

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**



На правах рукописи

УДК 622.8:621.313.223

ЧОРНОУС Евгений Витальевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ШАХТНОЙ
УЧАСТКОВОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ НА
ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ШУНТИРОВАНИЯ
ПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ**

Специальность 05.26.01 – Охрана труда (по отраслям) (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
Ковалев Александр Петрович,
доктор технических наук, профессор



Идентичность всех экземпляров
диссертации ПОДТВЕРЖДАЮ.
Ученый секретарь диссертационного
совета Д 01.008.01



Донецк – 2019

И.А. Бершадский

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Актуальность темы	5
Степень разработанности темы	6
Цель и задачи исследования.	6
Объект и предмет исследования.....	7
Научная новизна.....	8
Теоретическая и практическая значимость работы.....	8
Методология и методы исследования.....	10
Положения, выносимые на защиту	10
Степень достоверности и апробация результатов	11
РАЗДЕЛ 1. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ЧЕЛОВЕКА ОТ ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ	13
1.1 Обзор работ в области защиты человека от поражения электрическим током	13
1.2 Количественные показатели уровня опасности сети для человека .	19
1.3 Разработка математических моделей для сравнительного анализа двух вариантов защиты.....	24
1.4 Основные результаты сравнительного анализа.....	31
1.5 Выводы по разделу 1	37
РАЗДЕЛ 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УВФ И АНАЛИЗ ЕГО СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ	38
2.1 Математическая модель УВФ.....	38
2.2 Анализ устойчивости УВФ в установившемся режиме однофазной утечки	48
2.3 Анализ основных возмущающих факторов в установившемся режиме однофазной утечки.....	55
2.4 Выводы по разделу 2	68
РАЗДЕЛ 3. АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ УВФ.....	70
3.1 Постановка задачи	70

3.2 Работа УВФ при интенсивном переходном процессе в сети	72
3.3 Анализ работы УВФ при действии нескольких возмущающих факторов	76
3.4 Работа УВФ в условиях скачкообразного изменения сопротивления утечки	79
3.5 Выводы к разделу 3.....	82
РАЗДЕЛ 4. АНАЛИЗ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ УВФ.....	84
4.1 Уточнение технических требований к УВФ	84
4.2 Особенности реализации "плавающих" опорных интервалов	88
4.3 Принципы построения и функционирования схемы УВФ	94
4.4 Обеспечение быстродействия УВФ	97
4.5 Принятие решения о выборе фазы с утечкой.....	101
4.6 Выводы по разделу 4	104
РАЗДЕЛ 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ УВФ.	106
5.1 Условия и методика проведения экспериментов.....	106
5.2 Основные результаты экспериментальных исследований	110
5.4 Обобщение результатов экспериментальных исследований	125
5.5 Выводы по разделу 5	130
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ.....	132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Математические модели в режиме однофазной утечки	146
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Дополнительные материалы к разделу 2.....	151
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Результаты экспериментальных исследований УВФ в режиме низкоомной однофазной утечки.	159
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Результаты экспериментальных исследований с применением статистической обработки промежуточных результатов.	164
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Документы, подтверждающие применение результатов диссертационной работы.	176

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

ПН – потенциал нейтрали (относительно земли);

АПН – амплитуда потенциал нейтрали;

УВФ – устройство выбора (поврежденной) фазы;

ОФИ – опорные фазовые интервалы;

БПР – блок промежуточных результатов (составная часть УВФ);

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

ЭДС – электродвижущая сила;

ФНП – фильтр нулевой последовательности;

R, C – активное сопротивление и емкость “фаза – земля”;

U, U_A, U_B, U_C – комплексы ПН и фазных напряжений участковой сети;

u, u_A, u_B, u_C – мгновенные значения ПН и фазных напряжений;

u_y – установившаяся составляющая первой гармоники ПН;

$u_{св}$ – свободная составляющая ПН;

U_u – интегральное (среднее по модулю) значение ПН (используется для включения БПР, контроля наличия утечки, смещения ОФИ);

u_N^p – промежуточное расчетное значения амплитуды ПН (используется БПР для отбрасывания сторонних корней);

R_h – сопротивление утечки (сопротивление тела человека);

i_h – мгновенное значение тока утечки;

ψ – промежуточное значение аргумента ПН, определяемое БПР;

$\psi_{ср}$ – текущее среднее аргумента ПН;

$\psi_{рсч}$ – расчетное (теоретическое) значение аргумента первой гармоники ПН;

$\Delta\psi = \psi - \psi_{рсч}$ – абсолютная текущая погрешность работы БПР.

$\beta_{ср}$ – граничные значения ОФИ.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Современное демократическое общество провозглашает жизнь и здоровье человека наивысшей ценностью, тем самым беря на себя обязательства обеспечивать безопасные условия жизнедеятельности, а также определять пути развития и совершенствования мероприятий, средств и устройств защиты человека. В настоящее время в концепции обеспечения электробезопасности на производстве все большее значение приобретает разработка и внедрение устройств защитного шунтирования, важнейшим элементом которых являются органы выбора поврежденной фазы. Таким образом, быстрое (5...12 мс) и гарантированно надежное определение поврежденной фазы в сети с изолированной нейтралью является актуальной и важной научно-технической задачей обеспечения безопасности человека при использовании электроэнергии на предприятиях горной промышленности.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнена по одному из основных научных направлений ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» в рамках разработок по гостемам Г-4-01 (№ госрегистрации 0101U001194) «Развитие основ теории процесса поражения человека электрическим током при эксплуатации электрооборудования», Н 27/2000 «Повышение эффективности систем электроснабжения и электропотребления», (Н 30/05) «Повышение эффективности электропотребления, живучести систем электроснабжения промышленных предприятий и безопасности технологических объектов при их эксплуатации», Н-22-15 «Развитие методов оценки пожарной безопасности электрических сетей 0,4/0,22 кВ», Н-21-10 «Прогнозирование искробезопасных параметров электрических цепей взрывозащищенного электрооборудования, вероятности возникновения взрывов, пожаров в квартирах и разработка мероприятий по их предотвращению» (госрегистрация №0101U007239).

Степень разработанности темы

Анализ путей развития обеспечения электробезопасности в мировой практике позволяет сделать вывод о том, что защитное шунтирование может обеспечить электробезопасность подземных электрических сетей с изолированной нейтралью, с перспективой дальнейшего повышения производственных мощностей и классов напряжений. Применение устройств защитного шунтирования уже сейчас находит отражение в нормативных документах по обеспечению электробезопасности при разработке подземных и открытых месторождений полезных ископаемых ведущих стран мира (Россия, США, Канада, Австралия и Новая Зеландия, ЮАР, Чили и др.), хотя по-прежнему не является обязательным. В настоящее время ряд не решенных технических задач исключает возможность применения защитного шунтирования в качестве основного средства обеспечения электробезопасности низковольтных шахтных сетей. Одной из таких задач является надежное и, по возможности, быстрое определение поврежденной фазы для ее последующего замыкания (шунтирования) на землю.

Существенный вклад в развитие методов и средств обеспечения электробезопасности, в частности, защитного шунтирования, внесли советские и постсоветские ученые Вареник Е.А., Дзюбан В.С., Жидков В.О., Ильин Ю.Н., Колосюк В.П., Маренич К.Н., Савицкий В.Н. Шкрабец П.Ф., Щуцкий В.И., и др.

Цель и задачи исследования.

Цель исследования. Целью диссертационной работы является обеспечение безопасности человека от поражения электрическим током в сетях с изолированной нейтралью на основе разработки быстродействующего способа определения поврежденной фазы и научного обоснования его работоспособности и устойчивости к помехам и возмущениям со стороны силовой сети.

Задачи, поставленные для достижения цели

1. На основе интегральных показателей тяжести поражения человека электрическим током выполнить сравнительный анализ степени опасности сети с защитным отключением и с защитным шунтированием.
2. Разработать быстродействующий способ идентификации поврежденной фазы сети, функционирующий в условиях интенсивного динамического режима, наличия продольной или поперечной несимметрии сети, воздействия высших гармонических составляющих
3. Обосновать возможности повышения надежности функционирования нового способа обеспечения электробезопасности человека в условиях высокоомной утечки.
4. Разработать критерий, обеспечивающий повышение быстродействия и надежности функционирования нового способа путем определения объема выборки значений аргумента ПН необходимого и достаточного для принятия обоснованного решения.
5. Выполнить экспериментальную проверку работоспособности предложенного способа в сети с изолированной нейтралью.

Объект и предмет исследования

Объект исследования – процессы в силовой участковой сети с изолированной нейтралью в режиме однофазной утечки.

Предмет исследования – возмущения и помехи со стороны силовой сети, способные исказить работу устройства определения поврежденной фазы или алгоритма его функционирования.

Научная новизна

1. Впервые получена новая аналитическая зависимость аргумента потенциала нейтрали и его интегрального значения от сопротивления изоляции и емкости сети и сопротивления тела человека, случайно оказавшегося под напряжением, которая позволила обосновать теоретически и подтвердить экспериментально то, что помехоустойчивость способа и алгоритма можно обеспечить, применяя “плавающие” опорные фазовые интервалы, а также доказано, что смещение последних должно осуществляться в функции интегрального значения потенциала нейтрали.

2. Впервые доказано аналитически и подтверждено экспериментальными исследованиями, что применение критерия принятия решения, состоящего в определении необходимого и достаточного количества промежуточных результатов аргумента потенциала нейтрали из условия соответствия доверительного интервала их среднего значения опорным фазовым интервалам, обеспечивает устойчивость и быстроедействие предложенного способа определения поврежденной фазы сети, под напряжением которой оказался человек, в условиях высокого (более 10 кОм) значения сопротивления цепи утечки.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы:

- описаны математические основы нового быстродействующего способа определения поврежденной фазы, доказана возможность определения промежуточных значений серии аргумента потенциала нейтрали по двум мгновенным значениям;
- разработаны элементы теории применения “плавающих” опорных интервалов, аналитически обоснована целесообразность использования интегрального значения серии полученных результатов, применяемого для обеспе-

чения устойчивости работы способа при высоких (более 10 кОм) значениях сопротивления человека и управления смещением “плавающих” интервалов;

- разработан критерий принятия решения, состоящий в определении необходимого и достаточного количества промежуточных результатов аргумента потенциала нейтрали из условия соответствия доверительного интервала их среднего опорным фазовым интервалам, предложены алгоритмы его определения в зависимости от закона распределения серии.

Практическая значимость работы:

- установлено, что алгоритм устройства выбора фазы (УВФ), реализующий предложенный способ, устойчиво функционирует в условиях продольной несимметрии с разбросом параметров нагрузки по фазам до 70%; при наличии в составе потенциала нейтрали до 7 нечетных высших гармоник с амплитудами до 15% от основной, в условиях затянувшегося переходного процесса с постоянной времени до 40 мс, а также при неоднократном скачкообразном изменении сопротивления утечки в пределах от 15 кОм до 1 кОм; однако в условиях неблагоприятной поперечной несимметрии, когда "фон" потенциал нейтрали находится в противофазе к аварийному сигналу, чувствительность устройства выбора фазы по сопротивлению утечки может снизиться с 20 кОм до значения, находящегося в пределах от 14 кОм до 15 кОм;

- установлено, что длительность определения поврежденной фазы, под напряжением которой случайно оказался человек, при низкоомной утечке ($R_h \leq 5$ кОм, $C = 0.7$ мкФ) составляет от 2.5 мс до 4.0 мс, а при высокоомной ($R_h \geq 10$ кОм) от 5 мс до 12 мс;

- предложенный способ определения поврежденной фазы сети, реализующий его алгоритм и результаты исследований его работы используются научно-исследовательскими и технологическими предприятиями Донбасса при разработке систем защитного шунтирования и разработке требований для их производства и эксплуатации;

- ряд положений, содержащихся в работе (математические модели двигателя в режиме выбега, сети после аварийного отключения, определения

тока утечки в динамических режимах и др.) используются в учебном процессе подготовки инженеров-электриков.

Методология и методы исследования

Теоретические исследования базируются на теории электрических цепей. Динамические режимы сети исследовались с использованием современных методов математического моделирования, при разработке и исследовании алгоритма устройства выбора фазы использованы аналитические методы решения трансцендентных уравнений, включающих операции отделения и устранения побочных корней. Экспериментальная проверка результатов анализа выполнена с использованием современных цифровых средств измерения и апробированного математического аппарата обработки результатов наблюдений.

Положения, выносимые на защиту

1. Новый быстродействующий способ определения поврежденной фазы шахтной участковой сети, отличающийся тем, что с опорными фазовыми интервалами сопоставляется серия промежуточных значений аргумента потенциала нейтрали, определяемых по двум его мгновенным значениям, считываемых через равные промежутки времени.

2. Метод применения “плавающих” опорных фазовых интервалов, который позволяет обеспечить помехоустойчивость предложенного способа определения поврежденной фазы, под напряжением которой оказался человек, а также функциональная зависимость интегрального значения потенциала нейтрали от емкости сети и сопротивлений тела человека и изоляции, определяющая функцию смещения “плавающих” опорных фазовых интервалов.

3. Критерий принятия решения, который позволяет обеспечить устойчивость и быстродействие способа выбора поврежденной фазы при значениях со-

противления тела человека более 10 кОм и состоящий в определении необходимого и достаточного количества промежуточных результатов аргумента потенциала нейтрали из условия соответствия доверительного интервала, определяемого с учетом их среднего значения, опорным фазовым интервалам.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается корректностью поставленных задач, обоснованностью принятых допущений, использованием апробированных методов математического моделирования и современных методов статистической обработки результатов наблюдений, а также приемлемой сходимостью результатов анализа и эксперимента. Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительные отзывы на Международных научно-технических конференциях: “Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах” (Севастополь, 2007 г.), посвященной 100-летию со дня рождения проф. М.А. Киклевича (Донецк, 2007 г.), посвященной 90 – летию Донецкого национального технического университета (Донецк, 2011 г.), 1 Всеукраинской научно-технической конференции преподавателей, аспирантов и студентов (Донецк, 2012 г.), «Управление режимами работы объектов электрических и электромеханических систем 2013. КРЕС-2013» (Донецк, 2013 г.).

Личный вклад автора. Научные положения, содержащиеся в работе, получены соискателем самостоятельно. Ему принадлежит защищенная патентом идея быстродействующего способа идентификации поврежденной фазы и разработка алгоритма его реализации. Предложена и защищена патентом идея "плавающих" опорных фазовых интервалов и разработан вариант ее практического осуществления. Предложен критерий принятия решения и экспериментально доказана необходимость его использования в условиях интенсивных помех и искажений.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 15 печатных работах: 6 в специальных научных журналах и сборниках, 6 в докладах и тезисах конференций, 1 патент Украины на изобретение, 2 патента Украины на полезные модели.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из вступления, 5 разделов с выводами по каждому разделу, общих выводов, списка использованных источников и приложений. Она изложена на 178 страницах сквозной нумерации, в том числе включает 56 рисунков, 3 таблицы, список использованных источников из 93 наименований на 11 страницах и 5 приложений на 33 страницах.

РАЗДЕЛ 1. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ЧЕЛОВЕКА ОТ ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

1.1 Обзор работ в области защиты человека от поражения электрическим током

Современный электротехнический комплекс (ЭТК) шахтного технологического участка представляет собой сложную систему электротехнического оборудования (Рисунок 1.1), которое содержит трансформаторную подстанцию (ТП), один или больше распределительных пунктов (РП) с комплектом коммутационных аппаратов, объединенных, как правило, в станциях управления (СУ), магистральные кабели, которые соединяют РП с ТП, разветвленную систему гибких кабелей, которые соединяют РП с потребителями электроэнергии. Основные потребители, ЭТК (добывающий комбайн, отбойный и штрековый конвейеры) характеризуются мощностью от 160 кВт до 700 кВт. Гибкие кабели, которые соединяют их с ТП имеют длину до 300 м с площадью поперечного сечения до 120 мм². Вспомогательные технологические механизмы (маслостанции, оросительные механизмы, лебедки) также питаются гибкими силовыми кабелями значительной протяженности [35, 61].

Эксплуатация оборудования ЭТК характеризуется нестационарным характером работы с постоянным или периодическим перемещением, вибрационными и механическими нагрузками, влиянием агрессивной среды (кислотные или щелочные воды, высокая влажность), электрическими перегрузками при заклинивании рабочих механизмов. Нельзя исключить возможные обрушения породы или выбросы газа или угля. Кроме того, на функционирование всех звеньев ЭТК отрицательно влияет прерывистый режим работы большинства двигателей, снижающий качество напряжения, сложности с организацией ремонтных или профилактических работ и обслуживанием механизмов [82].

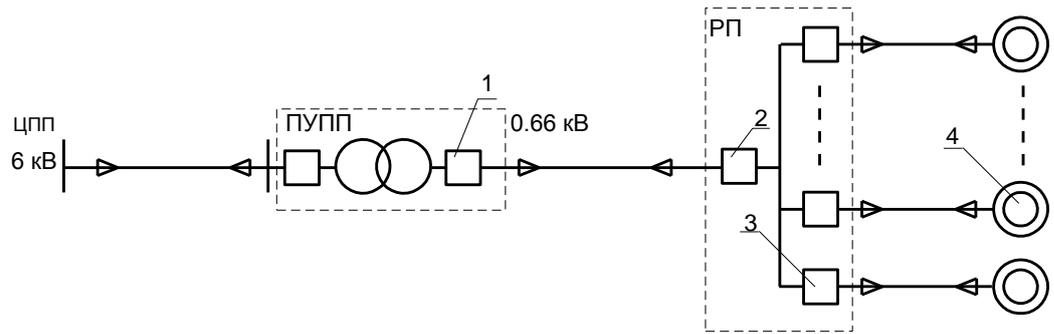


Рисунок 1.1. Принципиальная схема электроснабжения добычного участка угольной шахты:

- 1 – защитная коммутационная аппаратура (автоматический выключатель, реле утечки);
- 2 - вводный автоматический выключатель распределительного пункта;
- 3 – пускозащитная аппаратура (пускатель, контактор);
- 4 – силовая нагрузка участка (привод комбайна, конвейера, пр.)

Существующая тенденция к повышению мощности электроприводов горных машин [20, 34] требует роста мощности ТП, увеличения поперечного сечения кабелей и их емкости. Предполагается также переход на напряжение повышенного уровня. Указанные факторы приводят к высокой вероятности возникновения аварийных режимов [23], что, в свою очередь, ставит более высокие требования к охране труда.

Для защиты человека при прикосновении к элементам сети, нормально находящихся под напряжением, применяется защитное отключение всей электросети, которая подключена к участковой подстанции, причем, время отключения согласно требованиям [51] составляет 0.2 с для сетей 380 В и 660 В и 0.12 с для сети 1140 В.

Команда на защитное отключение подается аппаратом защиты, в качестве которого в последнее время применяются аппараты серии АЗУР [19, 56], причем, его настройка должна обеспечить продолжительный ток утечки не больше 0.025 А. Чтобы предотвратить включение ответвления с поврежденной изоляцией относительно земли, применяется реле блокирования утечки.

В состав аппаратов защиты входят устройства компенсации емкостной составляющей, которые должны ограничить ток утечки величиной 0.1 А, или ограничить заряд через сопротивление утечки значением 50 мА·с [9].

В реальных условиях работы ЭТК емкость сети может меняться в широких пределах и, что самое главное, после защитного отключения сеть питается от двигателей, которые, переходя в режим выбега, увеличивают время пребывания человека под действием тока. В этих условиях необходимо применение автоматической компенсации емкостной составляющей тока утечки [18].

Компенсирующий дроссель, который снижает значение тока через тело человека к току защитного отключения, подключается к сети через дополнительную нулевую точку, созданную емкостями или индуктивностями, соединенными звездой, что представляет фильтр нулевой последовательности (ФНП). Такое “скопление” разнородных накопителей энергии, по мнению некоторых ученых [59] содержит потенциальную угрозу резонансных явлений и связанных с ними перенапряжений. Кроме того, в ряде устройств защитного отключения (УАКИ, АЗАК, АЗУР и др.) для компенсации емкостной составляющей тока утечки используется нелинейный управляемый дроссель, динамическая индуктивность которого может меняться, “подстраиваясь” к изменению емкости силовой сети. Осуществляется это путем подмагничивания дросселя, управляющим постоянным током, величина которого связана с устройством измерения емкости сети по отношению к земле. Некоторые специалисты считают, что “...целесообразность применения нелинейной индуктивности для компенсации емкостной составляющей токов утечки в настоящее время аналитически не доказана...” [60]. Такая точка зрения обусловлена тем, что управляемая индуктивность, как любая нелинейная цепь, является источником высших гармоник, который может снизить ее компенсирующие свойства, а также тем, что теоретически не исключается последовательный резонанс и связанные с ним перенапряжения на основной или одной из высших гармоник. Нужно также заметить, что компенсирующие свойства дросселя снижаются в области пе-

реходных режимов, при наличии в сети высших гармоник и при изменении частоты при питании, например, от двигателей в режиме выбега [32].

Перспективным для промышленного внедрения является метод усовершенствованной автокомпенсации [45]. Его сущность заключается в том, что компенсируется обобщенная емкость (1мкФ/фазу), состоящая из емкости сети и регулируемой дополнительной емкости в составе аппарата защиты. Реализация метода требует быстродействующей коррекции дополнительной емкости и микропроцессорного способа измерения емкости сети, однако уменьшает генерирование высших гармоник.

Но все эти средства можно считать достаточными при напряжении сети не превышающем 660 В [8]. При переходе на более высокое напряжение (до 1140 В, например) и росте мощностей потребителей ЭТК указанных средств недостаточно и необходимо применение дополнительных защитных функций [11]. В данное время наиболее известны два направления их реализации.

Первое направление состоит в обособлении обратных ЭДС асинхронных двигателей (АД), то есть в исключении их действия на место нахождения сопротивления утечки [36]. Указанное обособление может осуществляться замыканием или размыканием статорных обмоток АД, причем, замыкание имеет ряд недостатков (его осуществление возможно лишь после защитного отключения), необходимость информационной связи между автоматическим выключателем участка и средствами коммутации АД, динамические перегрузки при коммутации обмоток АД, возможность ухудшения аварийной ситуации в случае ошибочного срабатывания средства замыкания. Размыкание обмоток статора АД указанных недостатков лишено, и может применяться одновременно с защитным отключением или даже с его опережением. Однако следует отметить, что при этом может возникнуть ситуация, когда человек не защищен от действия ЭДС двигателя в состоянии выбега. Кроме того, при отключении статора время выбега двигателя максимальное из-за отсутствия динамического торможения.

Второе направление состоит в защитном шунтировании фазы, в которой выявлена утечка тока на землю, и предусматривает ее автоматическое заземле-

ние с целью освобождения человека от действия тока, или максимального его уменьшения [83]. Существенно то, что защитное шунтирование в сравнении с обособлением обратных ЭДС двигателей является более быстродействующим и не требует значительных экономических затрат.

Наиболее ответственным звеном защитного шунтирования является устройство выбора поврежденной фазы (УВФ), технические требования к которому наиболее жесткие и состоят в следующем [22, 78, 79]:

- селективность (отношение селективных срабатываний к общему количеству) не меньше 0.99;
- зона чувствительности по сопротивлению утечки R_h : $0 < R_h < 3000$ Ом;
- быстродействие (время с момента возникновения утечки до подачи команды на шунтирование) для сетей до 1000 В, не более 100 мс.

Наиболее удобными величинами, на которые реагируют измерительные элементы УВФ, есть напряжения фаз (относительно земли) и напряжение нулевой последовательности (ННП). Согласно современной классификации величины, на которые реагируют измерительные органы УВФ, следующие:

- снижение напряжения поврежденной фазы;
- различие модулей фазных напряжений и ННП;
- угол сдвига между фазными напряжениями и ННП;
- различие модулей напряжений поврежденной и опережающей фазы;
- комбинация нескольких методов.

Устройства, которые реагируют на снижение напряжения поврежденной фазы путем сравнения напряжений [3] или токов [2] характеризуются достаточно высоким быстродействием, однако чувствительность их ограничена, а реакция на динамические или высокочастотные помехи не всегда предсказуема.

Устройства, которые реагируют на сумму или различие векторов фазных напряжений [1, 4], также имеют ограниченную чувствительность. Кроме того, они чувствительные к несимметрии в сети.

В устройстве [5] с помощью запоминающих конденсаторов осуществляются измерения амплитуд фазных напряжений, а исходный сигнал формируется на основе анализа их значений. В [44] с помощью вспомогательного источника осуществляется сравнение напряжений до и после возникновения утечки, причем, входной сигнал можно сформировать после окончания переходного режима.

Устройство [42] относится к УВФ комбинированного принципа действия. В нем на основе фазных напряжений и ННП формируются опорные импульсы, с помощью которых анализируются фазовые сдвиги между ННП и фазными напряжениями, причем, устройство позволяет за один период ННП получить два независимых промежуточных результата с относительным их сдвигом на 180° . Последнее позволяет увеличить устойчивость устройства против ошибок при определении поврежденной фазы.

Принцип действия большинства из рассмотренных УВФ заключается в том, что они прямо или косвенно базируются на фазных напряжениях источника питания. Однако, эти напряжения в момент возникновения утечки искажаются динамическими составляющими переходных процессов [58]. Кроме того, в составе фазных напряжений могут находиться высшие гармонические составляющие, причем, это касается не только комбинированных сетей. Предыдущий анализ показывает, что управляемый компенсирующий дроссель также является источником высших гармоник, которые могут исказить полезную информацию. На величины фазных напряжений (модули), кроме того, как показывает предыдущий анализ, влияет поперечная несимметрия сети. Особенно это проявляется в случае возникновения двух- или трехфазной (неаварийной) утечки, когда сопротивления изоляции одной или двух фаз снижены, но недостаточно для срабатывания защитного отключения [41]. Особого внимания заслуживает еще один фактор, связанный с тем, что когда утечка обусловлена попаданием человека под фазное напряжение, то его сопротивление может несколько раз измениться за короткий промежуток времени [40]. В этих условиях, когда новый переходной режим накладывается на предыдущий, еще не законченный;

работа УПФ может быть заблокирована, или обезображена настолько, что может привести к ошибочной идентификации поврежденной фазы. Последнее в шахтных условиях недопустимо [65].

Все указанные факторы вынуждают усложнять схемы УВФ, применять фильтрующие элементы, задерживать время срабатывания до окончания переходных режимов, что снижает быстродействие УВФ. Таким образом, вопрос надежности и быстродействия УВФ остается актуальным.

Актуальным является также вопрос сравнительного анализа уровня опасности сети для человека между защитным шунтированием и основным из современных средств защиты – защитным отключением, выполненным на основе интегральных показателей.

1.2 Количественные показатели уровня опасности сети для человека

В совокупности с тяжелыми условиями эксплуатации, человеческим и другими факторами, даже наиболее совершенная система защиты на практике не может обеспечить абсолютную электробезопасность. Ведь речь может идти о системе электроснабжения, наиболее рациональной по социальным и экономическим критериям. Больше того, отсутствует основоположный стандарт, который позволял бы обоснованно подходить к нормированию допустимых токов, которые протекают по телу человека, и напряжений касания. Последнее приводит к значительным расхождениям в точках зрения специалистов на оценку факторов, определяющих тяжесть поражения человека.

Подавляющее большинство специалистов [21, 26, 33, 48, 49, 62, 80] считают, что основными факторами, от которых зависит тяжесть поражения человека, являются сила тока и продолжительность его протекания. Однако существуют реальные ситуации, когда ток через тело человека за время его действия может существенно меняться не только по величине, но и по частоте.

Например, в шахтных низковольтных сетях можно выделить три этапа аварийной ситуации при случайном касании человека к токоведущим частям, которые находятся под напряжением [66]:

- **1-й этап** – с момента касания до срабатывания системы защитного отключения сети от участковой подстанции. Продолжительность этапа не превышает 0.2 с и характеризуется интенсивным переходным процессом, а после его окончания эффективной работой компенсирующего устройства, которое уменьшает ток утечки (ток через тело человека) в 4 – 6 раз [55].
- **2-й этап** характеризуется питанием сети от электродвигателей, которые продолжают вращаться, до момента отключения контакторов потребителей участка. Уменьшение частоты генерированной двигателями ЭДС приводит к ухудшению режима компенсации, которая, в свою очередь, приводит к росту тока утечки. Продолжительность этапа находится в пределах от 0.20 с до 0.45 с [37].
- **3-й этап** – продолжительностью от 0.45 с до 0.65 с начинается с момента отключения контактора потребителя. Присоединение подпитывается электродвигателем, который находится в режиме свободного выбега, длина кабелей (и их емкость) уменьшается в несколько раз, однако компенсация полностью отсутствует.

Кроме того, на границах этапов возникают динамические всплески тока, обусловленные реакцией накопителей энергии на работу коммутирующих аппаратов.

В этих условиях тяжело, а иногда невозможно применить положение ГОСТ 12.1.038-82 – основного национального нормативного документа, который определяет допустимые величины тока и напряжения касания и время их действия [81]. Очевидно, что для оценки тяжести поражения необходимы интегральные показатели, которые учитывали бы не только величину тока, но и закон его изменения во времени, включая динамические составляющие переходных процессов.

В литературных источниках рассматриваются три возможных показателя, которые позволяют дать интегральную оценку уровня опасности исследуемой аварийной ситуации:

1. Эквивалентное (среднеквадратичное за время действия t_δ) значение тока I_e , который протекает через тело человека:

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{t_\delta} \cdot \int_0^{t_\delta} i^2 dt} \quad (1.1)$$

2. Количество электромагнитной энергии Q , поглощенной телом человека за время действия тока (при условии, что его сопротивление $R_h = \text{const}$):

$$Q = R_h \cdot \int_0^{t_\delta} i^2 dt = I_e^2 \cdot R_h \cdot t_\delta \quad (1.2)$$

3. Количество электричества (заряд) q , которое взаимодействует с телом человека:

$$q = \int_0^{t_\delta} |i| dt = I_e \cdot t_\delta \quad (1.3)$$

Возникает вопрос: какое количество энергии, поглощенной человеком, (или какое количество заряда) можно считать допустимым и безопасным для его жизни и здоровья?

Согласно [53] значение удельной поглощенной энергии при действии тока частотой 50 Гц, что отвечает летальному исходу, составляет (0.9 – 1.4) Дж/кг. Для человека весом 75 кг это составляет от 70 Дж до 100 Дж. Очевидно, что эта величина, как предельное значение показателя, неприемлема.

Проф. Р.М. Лейбов, согласно условиям шахтной участковой сети с неавтоматической компенсацией при продолжительности действия тока $t_\delta = 1.15$ с (с учетом ЭДС двигателей, продолжающих вращение), приводит значение кратковременного допустимого эквивалентного тока, равного $I_\delta = 160$ мА, что соответствует $Q_\delta = 29.44$ Дж поглощенной энергии (при $R_h = 1000$ Ом), или 184 мА·с. При автоматической компенсации эти значения уменьшаются соответственно до 100 мА и 11.5 Дж или 115 мА·с.

Американский инженер-электрик С. Дальзиель [85] предложил коэффициент К, который равняется значению допустимого тока продолжительностью

1 с (коэффициент Дальзиеля). При другой продолжительности t допустимое значение тока I_{∂} определяется соотношением:

$$I_{\partial} = \frac{K}{\sqrt{t}} \quad (1.4)$$

Для соотношения (1.4) характерно то, что допустимое количество энергии Q_{∂} не зависит от продолжительности тока. Действительно:

$$Q_{\partial} = I_{\partial}^2 \cdot R \cdot t = K^2 \cdot R \quad (1.5)$$

Допустимое значение коэффициента Дальзиеля $K = 0.165$ соответствует значению $Q = 27.2$ Дж. Значения допустимых токов и связанных с ними значений поглощенной энергии, приведенные Дальзиэлем и Лейбовым, близки. Однако, по мнению отдельных авторов [28] они завышены.

В ГОСТ 12.1.038-82 приведены требования к установке норм на допустимые значения тока и напряжения касания в электроустановках. Выполнив согласно (1.2) и (1.3) расчеты допустимой энергии Q_{∂} и заряда q_{∂} , получаем (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Предельно допустимые значения поглощенной энергии и заряда в зависимости от значений эквивалентного переменного тока и времени его действия.

t , с	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
I , мА	400	190	160	140	125	105	90	75	65	50
Q_{∂} , Дж	16.00	7.22	7.68	7.84	7.81	6.62	5.67	4.50	3.80	2.50
q_{∂} , мА·с	40.0	38.0	48.0	56.0	62.5	63.0	63.0	60.0	58.5	50.0

Непосредственно из Таблица 1.1 вытекает, что допустимые значения первых двух интегральных показателей (эквивалентного тока и поглощенной энергии) существенно зависят от продолжительности тока. В меньшей мере это касается зарядового показателя, который, к тому же, мало зависит от сопротивле-

ния человека. Графические изображения интегральных показателей приведены на Рисунок 1.2.

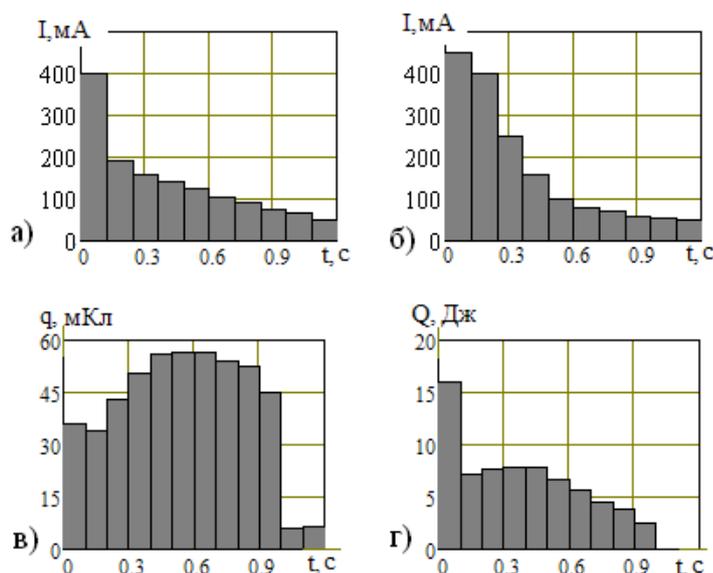


Рисунок 1.2. Интегральные критерии оценки в зависимости от продолжительности тока: а, б – эквивалентный ток; в – зарядный показатель; г – энергетический показатель

Представляет интерес сравнение требований действующего национального стандарта с требованиями Технического комитета МЭК [89, 91], и, в частности, с третьим изданием технического отчета 60479-1 “Действие тока на людей и домашних животных” [90]. Указанный отчет, хотя и не имеет статуса стандарта, все же относится к основным международным публикациям по безопасности. В нем приведены зоны действия на человека переменного тока частотой 50-60 Гц для интервала времени от 0 до 10 с (логарифмический масштаб). Наибольший интерес представляет зона АС-3, характерная тем, что в пределах до 1 с не вызывает каких-либо органических повреждений или необратимых явлений. Именно с этой точки зрения верхняя (по току) граница зоны АС-3 представляет интерес для сравнения, которое выполнено в виде двух временных диаграмм Рисунок 1.2 а, где приведена согласно МЭК зависимость предельно допустимого переменного тока частотой 50 Гц от времени его действия, и Рисунок 1.2 б, где для сравнения в том же масштабе приведена верхняя граница зоны АС-3, пересчитанная из логарифмического масштаба на обычный и

ограничена временем 1 с. Заметно, что граница зоны АС-3 допускает большие значения тока, чем национальный стандарт, особенно для области времени от 0.2 с до 0.4 с.

Подведем итоги. Гипотеза о постоянном значении допустимой поглощенной энергии (коэффициент Дальзиеля) не отвечает требованиям МЭК. Кроме того, энергетический показатель (количество поглощенной энергии) зависит от сопротивления человека, которое может меняться в широких пределах. С этой точки зрения показатель количества электричества (заряда), на величину которого в меньшей мере влияет сопротивление утечки (сопротивление человека), более чем энергетический, подходит для интегральной оценки того уровня опасности сети, который она представляет для человека.

Дальнейшая задача заключается в том, чтобы, применяя интегральные показатели тяжести поражения человека электрическим током, осуществить сравнительный анализ двух вариантов ее защиты. Для сравнительного анализа необходима разработка математических моделей, которые обеспечили бы получение мгновенных значений тока утечки и интегральных показателей с учетом всех этапов аварийной ситуации при разных вариантах схем компенсации.

1.3 Разработка математических моделей для сравнительного анализа двух вариантов защиты

Как уже отмечалось, в шахтных низковольтных сетях с компенсацией емкостной составляющей тока утечки можно выделить три этапа аварийной ситуации при случайном касании человека к оголенным токоведущим частям электрооборудования, находящегося под напряжением.

Этап 1 характеризуется упрощенными схемами замещения сети для двух типов присоединения компенсирующих устройств (Рисунок 1.3), где обозначено: фазы А, В, С источника питания; R , C – сопротивление изоляции и емкость фазы кабелей по отношению к “земле”; L_d , R_d – индуктивность и активное сопротивление компенсирующего дросселя; C_p – разделительная емкость; i_h , R_h – ток и сопротивление в месте повреждения [69]. Тот фактор, что в схемах Рису-

нок 1.3 не учитываются сопротивления потребителей, обусловлен тем, что токи утечки представляют собой нулевую последовательность, на которую изолированные от земли потребители не влияют.

При разработке математических моделей приняты такие допущения:

- источник питания и потребители участка симметричны и не влияют ни на ток утечки, ни на режим компенсации его емкостной составляющей;
- волновые процессы в кабелях игнорируются;
- фазы неповрежденных кабелей симметричны (их емкости и проводимости “фаза – земля” одинаковы).

Математические модели, которые позволяют исследовать в динамике первый этап однофазной утечки приведены в приложении А (системы А.1, А.12).

Этап 2 начинается с момента отключения сети от источника питания, а заканчивается отключением от сети присоединения, в котором возникла аварийная ситуация. Наиболее характерной особенностью этого этапа является то, что сеть питается от двигателей, которые перешли в режим свободного выбега, и поэтому без математической модели двигателя в этом режиме поставленные задачи не могут быть решенными [64].

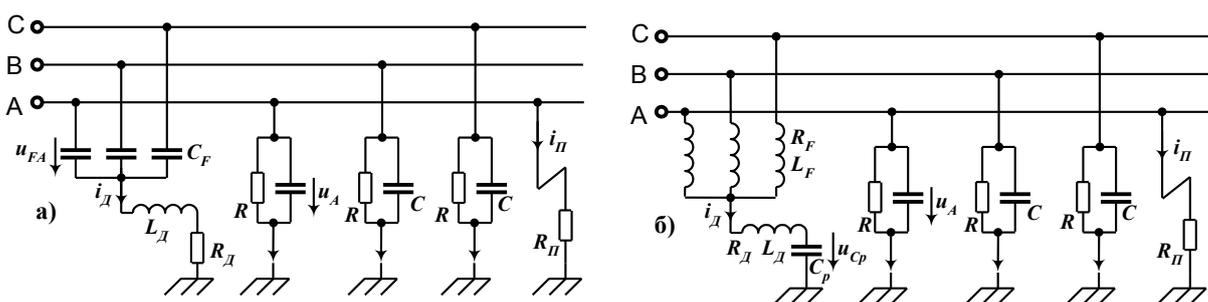


Рисунок 1.3. Схемы компенсации емкостной составляющей токов утечки с емкостным (а) и индуктивным (б) фильтрами нулевой последовательности

Амплитуда ЭДС двигателя после аварийного отключения сети пропорциональна мгновенному значению частоты его вращения и магнитного потока, который создается токами ротора. На закон изменения частоты вращения ротора влияет множество внешних факторов, большинство из которых трудно

учесть. В первом приближении этот закон можно считать линейным. Электрическую цепь ротора также можно считать линейным инерционным звеном первого порядка, ток которого (а, следовательно, и магнитный поток) затухают по экспоненциальному закону, который характеризуется постоянной времени T_E . При параллельной работе нескольких двигателей они представляются эквивалентным генератором. Причем, уравнительные токи приводят к более интенсивному затуханию ЭДС.

Наиболее неблагоприятной есть ситуация, когда вращается один или два двигателя соизмеримой мощности с примерно равными постоянными времени. Для двигателей мощностью от 150 кВт до 250 кВт электромагнитная постоянная времени $T_E \approx 1$ с, а механическая (время выбега) T_M находится в пределах от 1.5 до 2.0 с [17].

Анализ выполняется при следующих допущениях:

- ЭДС статора синусоидальна, а ее амплитуда пропорциональна магнитному потоку и частоте вращения ротора;
- электрическая цепь ротора эквивалентного генератора является инерционным звеном первого порядка, интенсивность затухания потока которого характеризуется постоянной времени T_E ;
- закон изменения частоты вращения ротора является линейным и определяется механической постоянной T_M , равной среднему времени выбега;

Исходя из последнего допущения, частота вращения ротора двигателя определяется выражением:

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s_n) \cdot \left(1 - \frac{t}{T_M}\right) \quad (1.6)$$

где ω , ω_0 – текущая и синхронная частоты вращения ротора;

s_n – начальное (номинальное) скольжение двигателя в момент отключения сети.

С учетом (1.4) амплитуда фазной ЭДС двигателя $E_{max}(t)$ принимает вид:

$$E_{max}(t) = k_e \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U \cdot (1 - s_n) \cdot \left(1 - \frac{t}{T_M}\right) \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_E}\right) \quad (1.7)$$

где $k_e = 0.9 - 0.95$ – коэффициент, который учитывает отношение начального значения ЭДС двигателя к напряжению сети U .

Поскольку закон изменения ЭДС синусоидальный, хотя и с переменными амплитудой и частотой, фаза ее колебаний, однозначно зависящая от угла поворота ротора $\varphi(t)$, определяется выражением:

$$\varphi(t) = \int_0^t \omega(t) dt = \omega_0 \cdot (1 - s_n) \cdot \left(t - \frac{t^2}{2 \cdot T_M}\right) \quad (1.8)$$

Окончательно с учетом (1.6), (1.7) и (1.8) выражение, которое моделирует мгновенное значение ЭДС двигателя в состоянии выбега, принимает вид:

$$e_A(t) = k_e \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U \cdot (1 - s_n) \cdot \left(1 - \frac{t}{T_M}\right) \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_E}\right) \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot (1 - s_n) \cdot \left(t - \frac{t^2}{2 \cdot T_M}\right)\right) \quad (1.9)$$

а его производная:

$$e'_A(t) = A(t) \cdot \left(T_M \cdot \left(1 - \frac{t}{T_M}\right)^2 \cdot (1 - s_n) \cdot \omega_0 \cdot \cos(\psi(t)) - \left(2 - \frac{t}{T_M}\right) \cdot \sin(\psi(t))\right) \quad (1.10)$$

$$\text{где: } A(t) = k_e \cdot \frac{\sqrt{6}}{3} \cdot \frac{U \cdot (1 - s_n)}{T_M} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_E}\right) \quad \psi(t) = \omega_0 \cdot (1 - s_n) \cdot \left(t - \frac{t^2}{2 \cdot T_M}\right).$$

Математические модели, которые описывают сеть, питающуюся от ЭДС двигателей в состоянии свободного выбега, и позволяют исследовать в динамике второй этап однофазной утечки, приведены в приложении А (системы (А.13), (А.14)).

Выполненные исследования позволяют сделать оценку продолжительности второго и третьего этапов, а также ее зависимости от постоянных времени T_E и T_M . На Рисунок 1.4 приведена расчетная осциллограмма, которая иллюстрирует закон изменения мгновенного значения ЭДС двигателя согласно (1.9).

Анализ показывает, что продолжительность второго этапа составляет около 0.3 секунды. И хотя за это время частота ЭДС уменьшается не более чем на 20%, такой фактор приводит к рассогласованию в работе компенсирующих устройств и, несмотря на снижение напряжения, увеличивает ток утечки.

Отдельного внимания заслуживает вопрос о продолжительности второго этапа в зависимости от интенсивности затухания частоты вращения двигателей и их мощности. Полученные соотношения позволяют решить эту задачу.

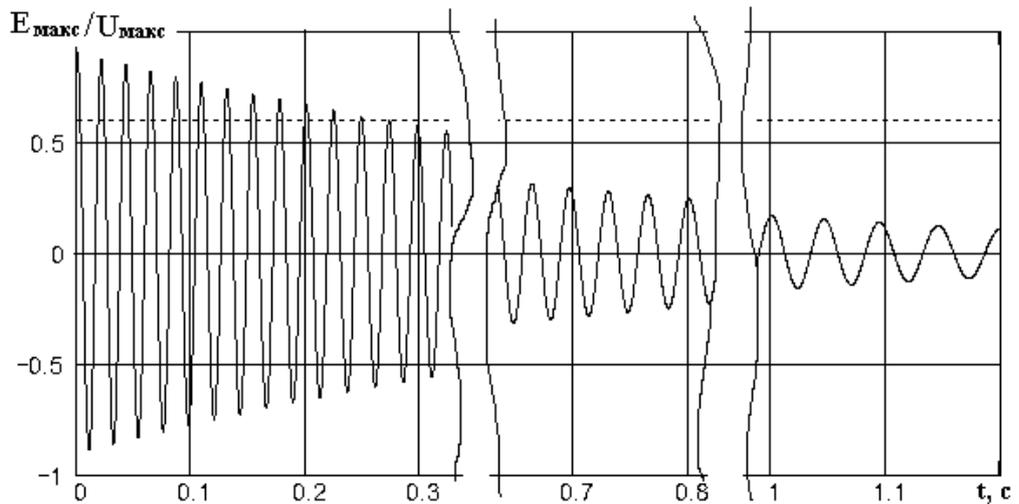


Рисунок 1.4. Зависимость ЭДС двигателя в состоянии свободного выбега от времени. $T_M = 2$ с, $T_E = 1$ с. Пунктир – линия отключения контакторов

На Рисунок 1.5 приведены зависимости напряжения двигателей (в относительных единицах) от времени для разных значений механической постоянной T_M при $T_E = 1$ с, полученные на основе (1.7). В зависимости от значения T_M продолжительность второго этапа составляет от 0.15 с до 0.35 с. Эти данные в целом совпадают с данными практики.

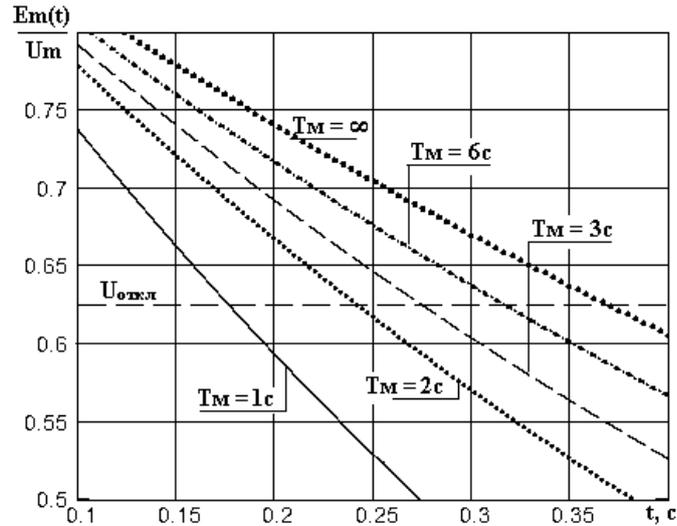


Рисунок 1.5. Зависимость амплитуды ЭДС двигателей от времени при $T_E = 1\text{с}$ различных значениях T_M : Горизонтальная штриховая линия – граница отключения контакторов

Однако, использование такой информации не всегда удобно. При этом не учитываются возможные изменения электромагнитной постоянной времени двигателей. Устранение этого недостатка, то есть более удобное и более надежное определение продолжительности второго этапа осуществляется через (1.7) и (1.9) для следующих условий:

- ЭДС двигателя взятая равной $E_{\text{макс}} = 0.625 \cdot U_{\text{макс}}$ (граница отключения контакторов);
- уравнение (1.5) решалось относительно t_2 (продолжительность второго этапа) в функции механической постоянной T_M ;

Результаты этого анализа приведены на Рисунок 1.6. Обращает на себя внимание то, что при $T_M > 2\text{с}$ на продолжительность второго этапа более существенно влияет электромагнитная постоянная времени в сравнении с механической.

Полученные зависимости позволяют разработать математические модели второго и третьего этапов утечки в динамике, а также определить продолжительность этих этапов, а информация, приведенная на Рисунок 1.4, Рисунок 1.5

и Рисунок 1.6 , дает наглядное представление о закономерностях изменения ЭДС двигателей в состоянии выбега.

Математические модели сети на втором этапе утечки, полученные с учетом соотношений (1.7) и (1.8), приведены в приложении А (системы (А.13), (А.14)).

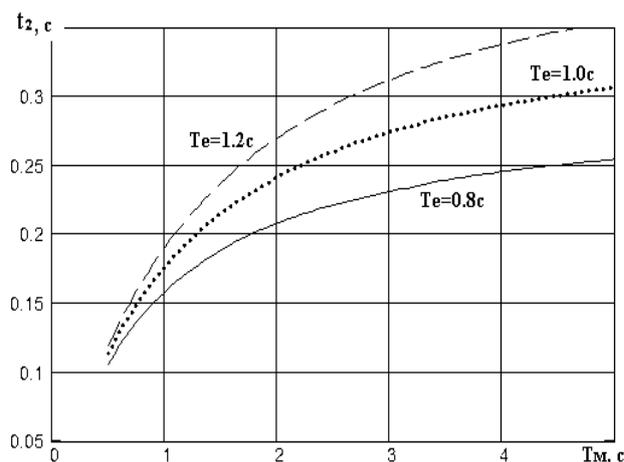


Рисунок 1.6. Продолжительность второго этапа в зависимости от механической T_M и электромагнитной T_E постоянных времени двигателей

Этап 3 начинается с момента отключения от сети присоединения с током утечки. При этом емкость “фаза-земля” уменьшается в несколько раз, однако компенсация емкостной составляющей отсутствует полностью. Математическая модель сети для третьего этапа, который длится от 0.45 с до 0.65 с, разработанная с учетом (1.9) и (1.10), приведена в приложении А (система (А.15)).

Таким образом, для исследования интегральных показателей уровня опасности сети для человека и проведения сравнительного анализа разработано пять различных математических моделей (систем уравнений), что охватывают три этапа аварийной ситуации, связанной с возникновением утечки, и учитывают два варианта схем присоединения компенсирующих устройств и уровня их настройки.

1.4 Основные результаты сравнительного анализа

На Рисунок 1.7 приведены расчетные осциллограммы мгновенного значения тока утечки (тока через тело человека) $i(t)$, а также текущих значений эквивалентного тока $I_e(t)$ и поглощенной энергии $Q(t)$ для исходных (базовых) значений параметров сети с индуктивным ФНП. В данном эксперименте полная компенсация емкостной составляющей тока утечки выполняется только на первом этапе, когда индуктивность компенсирующего дросселя L равняется резонансной $L/L_0 = 1$. На втором этапе ($0.20 \text{ с} < t < 0.45 \text{ с}$), где компенсация нарушена вследствие изменения частоты, наблюдается рост тока и поглощенной энергии, несмотря на уменьшение напряжения, а резкие подъемы кривой $Q(t)$, что наблюдаются при первой (возникновение утечки) и второй (защитное отключение) коммутациях, обусловлены переходными процессами.

Расчетные осциллограммы, приведенные на Рисунок 1.8, получены для тех же базовых значений параметров, но величину компенсирующей индуктивности уменьшено на 15 %. Следствием этого являются рост всех исследуемых величин, причем, значение поглощенной энергии увеличилось более чем в два раза, а эквивалентного тока более чем в полтора раза. Этот результат свидетельствует о том, что снижение индуктивности по отношению к ее резонансному значению является неблагоприятным фактором.

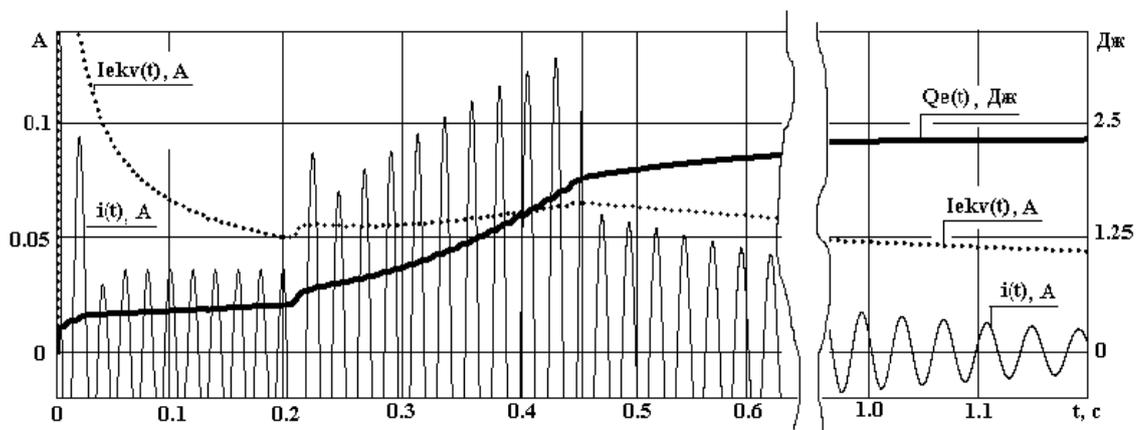


Рисунок 1.7. Расчетные осциллограммы $i(t)$, $Q_e(t)$, $I_e(t)$ для базовых значений параметров при неуправляемом дросселе $L/L_0 = 1$

Расчетные осциллограммы, которые приведены на Рисунок 1.9, получены для значения компенсирующей индуктивности увеличенной на 15 % при предыдущих значениях остальных параметров. Наблюдается заметное снижение исследуемых интегральных показателей. Значение поглощенной энергии снизилось в 1.35 раза, а эквивалентного тока в 1.2 раза. Необходимо отметить, что на всех рассмотренных осциллограммах рост эквивалентного тока и энергетического критерия в переходных режимах практически одинаков и не зависит от величины индуктивности.

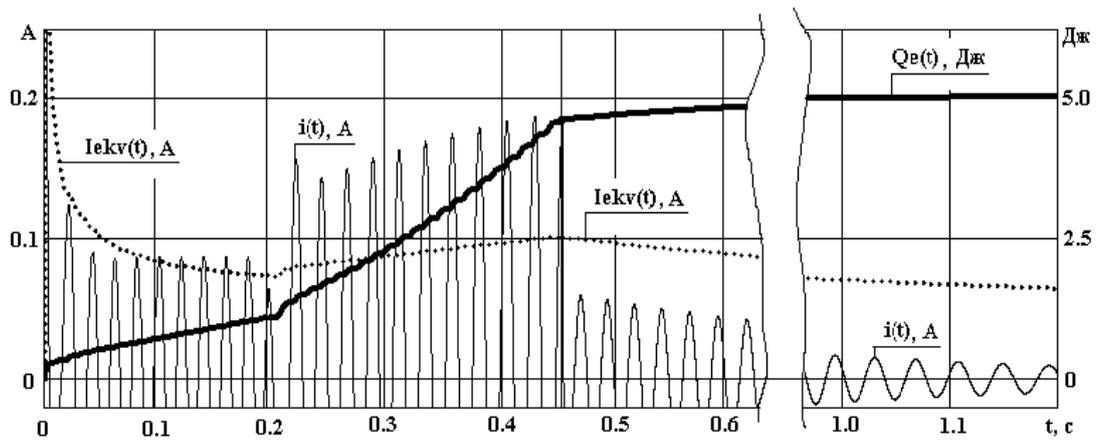


Рисунок 1.8. Расчетные осциллограммы $i(t)$, $Q_e(t)$, $I_e(t)$ для базовых значений параметров и неуправляемого дросселя $L/L_0 = 0.85$

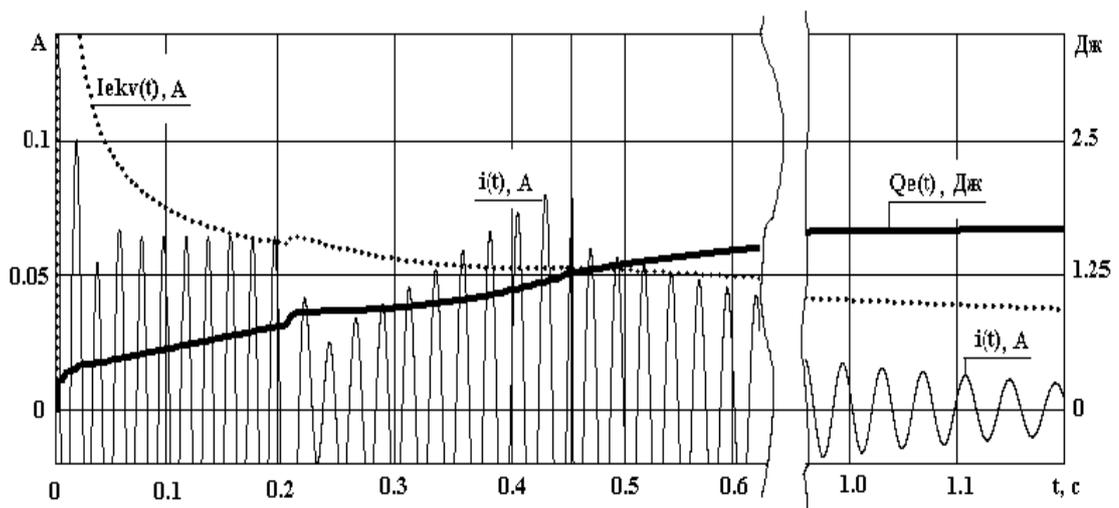


Рисунок 1.9. Осциллограммы $i(t)$, $Q_e(t)$, $I_e(t)$ для базовых значений параметров и неуправляемого дросселя $L/L_0 = 1.15$

Рассматривая полученные результаты, как предыдущие, можно утверждать, что повышение индуктивности сравнительно с резонансным значением с точки зрения обеих показателей является благоприятным фактором, а часть поглощенной энергии, которая обусловлена переходными процессами, практически не зависит от величины индуктивности.

Результаты более детальных исследований зависимости интегральных показателей от значения компенсирующей индуктивности приведены на Рисунок 1.10.

Для неуправляемой индуктивности исследования проводилось по той же методике, что и при получении рассмотренных осциллограмм, то есть индуктивность одинакова на первом и втором этапах. Опыты для управляемой индуктивности заключались в том, что на первом этапе индуктивность равняется резонансной (полная компенсация емкостной составляющей тока утечки), а на втором этапе индуктивность постоянна, больше резонансной и является аргументом исследования.

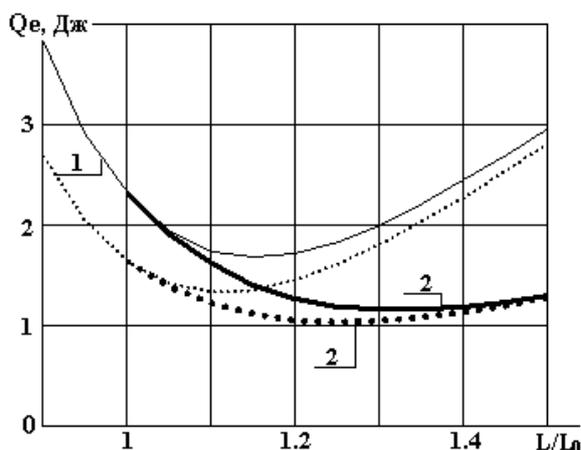


Рисунок 1.10. Зависимости поглощенной энергии от индуктивности дросселя:
 1 – дроссель неуправляемый;
 2 – дроссель управляемый; сплошные линии – индуктивный ФНП; пунктир – емкостный ФНП

Анализ результатов, приведенных на Рисунок 1.10 выявляет ряд характерных особенностей, в частности:

1. Для неуправляемого дросселя (индуктивность, как аргумент исследования, одинакова на первом и втором этапах) при прочих равных условиях устройство компенсации с емкостным ФНП по интегральным показателям более приемлемый в сравнении с индуктивным ФНП, а оптимальная по количеству поглощенной энергии индуктивность дросселя составляет 1.10 – 1.15 по отношению к резонансному значению для $f = 50$ Гц.
2. Управляемый дроссель (индуктивность на первом этапе равняется резонансной, а на втором этапе является аргументом исследования) в сравнении с неуправляемым позволяет в (1.4 – 1.6) раз уменьшить количество поглощенной энергии, а оптимальная по интегральным показателям его индуктивность на втором этапе составляет 1.25 – 1.35 по отношению к резонансному значению для $f = 50$ Гц.

Особенности полученных результатов обусловлены тем, что на втором этапе динамического режима из-за уменьшения частоты ЭДС двигателей уменьшается емкостная составляющая тока утечки, которая, в свою очередь, требует снижения тока компенсирующей индуктивности и, тем самым, увеличения отношения L/L_0 .

Таким образом, с точки зрения интегральных показателей вытекает, что для рационального режима неуправляемого компенсирующего дросселя необходимо завышение его индуктивности в (1.10 – 1.15) раз по сравнению с резонансным значением на первом этапе, а для управляемого, что обеспечивает резонансный режим на первом этапе, целесообразно повысить его индуктивность на втором этапе на (5 – 35) %. При этом необходимо отметить, что как по энергетическому, так и по зарядовому показателю, который находится в пределах от 30 мКл до 45 мКл, исследованная система не имеет резерва для повышения рабочего напряжения сети, а при некачественной компенсации эти показатели могут быть завышены.

Математические модели сети с защитным шунтированием не отличаются от моделей сетей с защитным отключением, которые используются на первом

этапе (приложение А, системы А.1, А.12). Это дает возможность определить энергетические показатели непосредственно по осциллограммам Рисунок 1.7, Рисунок 1.8 и Рисунок 1.9. Время пребывания человека под действием тока состоит из времени определения фазы с утечкой (от 10 мс до 30 мс) и времени срабатывания коммутирующего устройства (от 20 мс до 30 мс). Отметим, что бесконтактные коммутирующие устройства срабатывают за несколько десятков микросекунд, то есть почти мгновенно.

Таким образом, максимальная продолжительность действия тока может достичь 60 миллисекунд. Если ориентироваться на это время, взятое с запасом, то из тех же осциллограмм (см. Рисунок 1.7, Рисунок 1.8 и Рисунок 1.9) можно установить, что энергетический показатель при защитном шунтировании уменьшается в (4 – 8) раз в зависимости от режима компенсации.

Исследование не может быть полным, если не рассмотреть предельные режимы, когда компенсация или крайне расстроена, или полностью отсутствует. На Рисунок 1.11 приведены результаты этого исследования для напряжений 660 В и 1140 В, причем, в качестве показателей использованы эквивалентное значение тока I_e и показатель заряда q согласно (1.3). Для наиболее неблагоприятной ситуации ($U = 1140$ В, компенсация отсутствует) эквивалентное значение тока после окончания переходного процесса составляет около 420 мА, что согласно МЭК допустимо на протяжении 100 мс, а допустимое значение заряда для этого интервала времени, которое составляет около 40 мКл, достигается за время ≈ 110 мс.

При напряжении 660 В без применения компенсации эквивалентное значение тока составляет около 260 мА практически на всем этапе (начальный бросок тока достигает 0.55 А), а допустимое значение заряда (≈ 40 мКл) достигается за время ≈ 200 мс. Что касается расчетного времени (60мс), взятого с запасом, то за это время зарядовый показатель достигает ≈ 14 мКл.

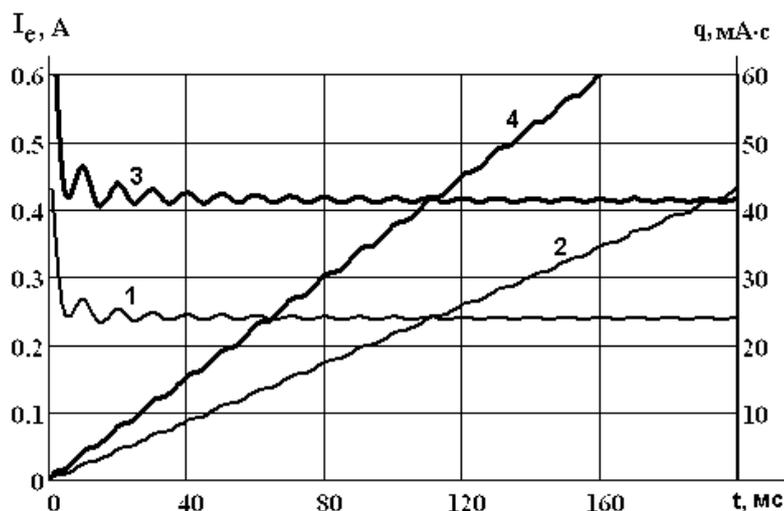


Рисунок 1.11. Интегральные показатели тяжести поражения человека:
 1, 2 – соответственно эквивалентный ток $I_e(t)$ и заряд $q(t)$ при $U = 660$ В;
 3, 4 – то же при $U = 1140$ В. Условия эксперимента: $C = 1$ мкФ; $R_h = 1000$ Ом

Таким образом, даже в наиболее неблагоприятной ситуации и повышенном напряжении, защитное шунтирование по интегральным показателям тяжести поражения человека электрическим током имеет значительный запас. Объясняется это не только меньшим временем пребывания человека под действием тока, но и тем, что он не подвергается действию двигателей в состоянии выбега.

В связи со всем изложенным можно сформулировать следующие задачи дальнейшего исследования.

Первая задача состоит в разработке способа идентификации (определения) поврежденной фазы и алгоритма, что этот способ реализуют, рациональных по быстрдействию и стойких к помехам и возмущениям со стороны силовой сети. Для обеспечения указанных требований способ должен базироваться не на фазных напряжениях, а на потенциале нейтрали (ПН) относительно земли, величина которого (модуль) есть вспомогательной информационной величиной, а за основной принимается его аргумент (начальная фаза) в заданной системе отсчета. Причем, основной отличительный признак способа заключается в том, что указанный аргумент определяется с частотой от 1 кГц до 2 кГц как серия промежуточных результатов, по которой после обработки и усреднения принимается конечное решение.

Вторая задача состоит в определении границ статической устойчивости способа, то есть уровня его работоспособности в условиях действия разных видов несимметрии сети и наличия высших гармонических составляющих.

Третья задача исследования состоит в определении границ динамической устойчивости способа, то есть его работоспособности в условиях действия динамических составляющих переходного режима, скачкообразного изменения сопротивления утечки, коммутационных возмущений, а также при одновременном действии нескольких возмущающих факторов.

1.5 Выводы по разделу 1

1. Из обзора работ в области защиты от поражения электрическим током в сетях с изолированной нейтралью показывает, что применение защитного шунтирования в дополнение к защитному отключению имеет серьезные преимущества, сокращая время пребывания человека под действием тока и исключая воздействие на него ЭДС двигателей.
2. В системе защитного шунтирования УВФ является наиболее важным звеном, определяющим ее надежность и быстродействие, а задача разработки и совершенствования способов идентификации поврежденной фазы является актуальной.
3. Усовершенствована математическая модель электродвигателя в состоянии свободного выбега, позволившая установить закон изменения амплитуды и частоты его ЭДС в функции механической и электромагнитной постоянных времени, определить продолжительность второго и третьего этапов динамического режима сети после ее защитного отключения и исследовать мгновенное значение тока утечки на этих этапах.
4. В результате сравнительного анализа установлено, что интегральные показатели тяжести поражения при защитном шунтировании по сравнению с защитным отключением уменьшаются в (4 – 8) раз, причем, защитное шунтирование мало чувствительно к точности настройки средств компенсации и имеет резервы для повышения напряжения.

РАЗДЕЛ 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УВФ И АНАЛИЗ ЕГО СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Задачи раздела заключаются в разработке математической модели УВФ, анализе предварительных требований к алгоритму его функционирования, количественной оценке показателей его статической устойчивости и исследовании влияния на его работу наиболее весомых возмущающих факторов: медленно затухающих экспоненциальных составляющих, продольной или поперечной несимметрии сети и высших гармонических составляющих.

2.1 Математическая модель УВФ

Сущность предлагаемого быстродействующего способа определения аварийной фазы заключается в расчете аргумента (начальной фазы) ψ ПН на основе двух его мгновенных значений, зафиксированных в смежные моменты времени ωt_1 и ωt_2 , разность между которыми $\Delta\omega t$ фиксирована и составляет от 10 до 20 градусов периода промышленной частоты [46, 70, 76]. Эти значения аргумента, являясь промежуточными результатами, следуют один за другим с частотой от 1 кГц до 2 кГц с последующей проверкой на принадлежность к одному из трех опорных фазовых интервалов (ОФИ). Конечное решение на срабатывание защиты принимается на основе серии от 5 до 20 таких результатов в зависимости от интенсивности помех и возмущений со стороны сети [47].

Алгоритм определения промежуточного значения аргумента ψ базируется на решении системы двух уравнений:

$$u(t_1) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t_1 + \psi) \quad (2.1)$$

$$u(t_2) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t_2 + \psi) \quad (2.2)$$

где $u(t)$, U_m , – соответственно, мгновенное и амплитудное значения ПН.

Исключив из системы (2.1), (2.2) амплитуду U_m , получаем функцию $y(\psi)$ и ее производную $y'(\psi)$:

$$y(\psi) = \frac{\sin(\omega \cdot t_1 + \psi)}{\sin(\omega \cdot t_1 + \Delta\omega t + \psi)} - \frac{u(t_1)}{u(t_2)} = \frac{\sin(\omega \cdot t_1 + \psi)}{\sin(\omega \cdot t_2 + \psi)} - \frac{u(t_1)}{u(t_2)} \quad (2.3)$$

$$y'(\psi) = \frac{\sin(\Delta\omega t)}{(\sin(\omega \cdot t_2 + \psi))^2} \quad (2.4)$$

Графики зависимостей (2.3) и (2.4) приведены на Рисунок 2.

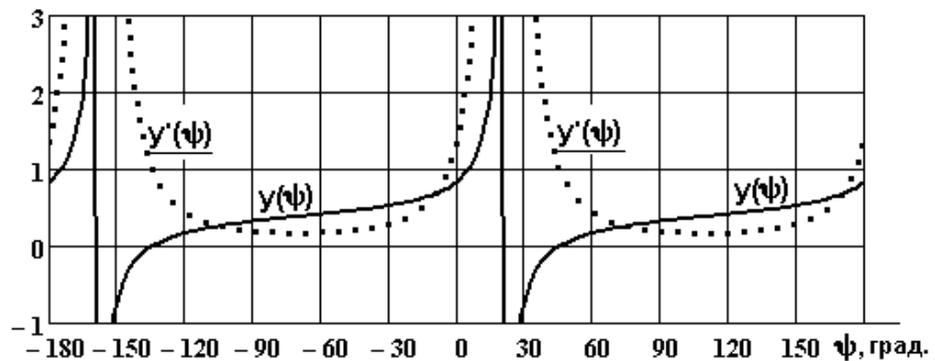


Рисунок 2.1. Графики функций $y(\psi)$ и ее производной $y'(\psi)$

Анализ основных свойств этих функций показывает:

- их период по аргументу ψ составляет π и на интервале $0 \dots 2\pi$ зависимость (2.3) имеет 2 корня, один из которых побочный;
- функция $y'(\psi)$ всегда положительна, из чего следует, что зависимость $y(\psi)$ монотонно возрастающая и в пределах своего периода ($0 \dots \pi$) имеет только один корень, что можно использовать для их отделения;
- функция (2.3) имеет разрывы второго рода при значениях аргумента ψ , отвечающих условию:

$$\omega \cdot t_2 + \psi = k\pi, \quad (2.5)$$

где $k = 0, 1, 2$.

Истинный корень функции (2.3) можно установить с помощью условия, вытекающего из (2.6):

$$U_m = \frac{u(t_1)}{\sin(\omega \cdot t_1 + \psi_1)} > 0 \quad (2.6)$$

Корень, который не отвечает условию (2.6), является сторонним и отбрасывается. Заметим, из выражения (2.6) используется только знак, тем не менее оно дает возможность вычислить (хотя и с погрешностями) амплитуду ПН.

Необходимо отметить, что изложенному способу была рассмотрена и проанализирована альтернатива [15, 67]. Сущность ее заключается в том, чтобы вместо решения системы (2.1), (2.2) решать систему из четырех уравнений вида

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi) - U_m \cdot \sin(\alpha + \psi) \cdot \exp\left(-\frac{\omega \cdot t - \alpha}{\omega \cdot \tau}\right) \quad (2.7)$$

где α – угол, отвечающий моменту коммутации; τ – постоянная времени наибольшей экспоненциальной составляющей.

С формальной точки зрения четыре неизвестных последнего выражения (ψ , τ , α , U_m) можно определить из системы четырех уравнений методом Ньютона при использовании матрицы Якоби [16]. Однако, метод Ньютона "работает" только в пространстве, где вектор корней уже выделен. Последняя задача не менее сложная, чем решение системы (2.7). По этой причине альтернативный вариант, хотя теоретически он более точный, был отклонен, а в основу реализации предложенного способа положена система (2.1) и (2.2), базирующаяся на предположении, что закон изменения ПН синусоидален.

Зависимость (2.3) является функцией двух переменных: аргумента потенциала нейтрали ψ , по которому выполняется поиск корня, и текущей переменной ωt , связанной с системой отсчета времени. По обоим переменным эта зависимость имеет разрывы второго рода, усложняющие поиск. В связи с этим рассмотрим объемный и контурный графики функции $y(\psi, \omega t)$, приведенные на Рисунок 2.. На графиках обозначено:

1 – основной "барьер" (прыжок функции в бесконечность) параллельный оси ψ ;

2, 3 – дополнительные "барьеры", отвечающие условию (2.5) и расположенные к оси ψ под углом 45^0 ;

4 – линия нулевого значения функции (2.3), т.е. годограф ее корней.

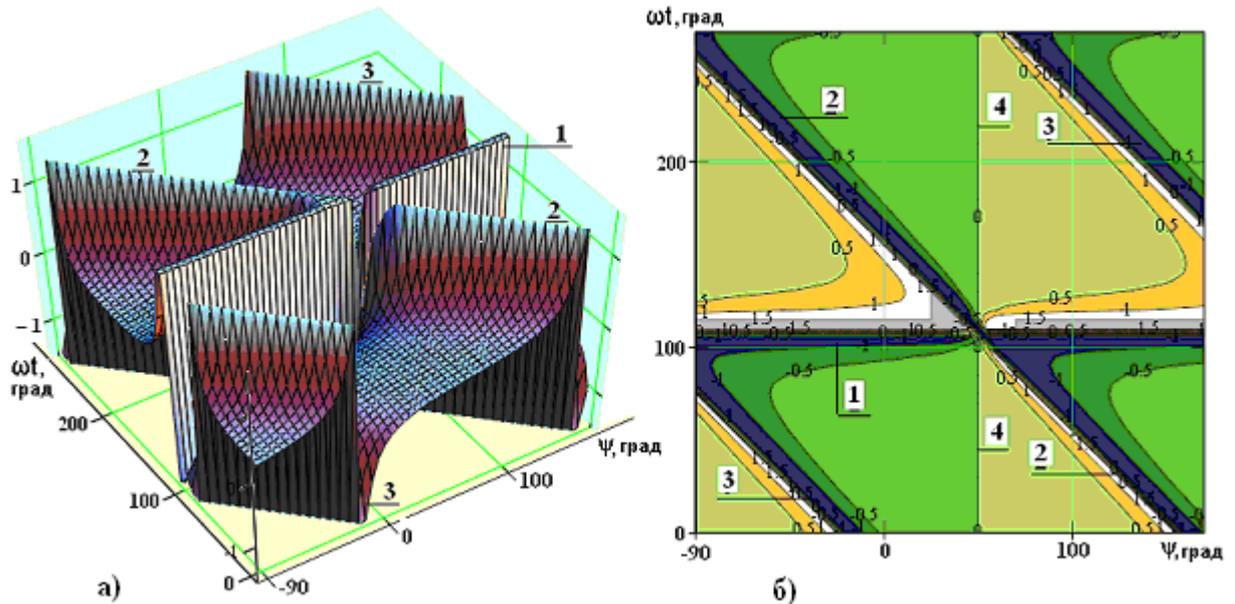


Рисунок 2.2. Объемный и контурный графики функции (2.3)

Анализ графиков показывает. Во-первых, разрывы функции по аргументу ψ ("барьеры" типа 2, 3 на Рисунок 2.2) зависят и от момента отсчета ωt , что особенно наглядно видно на контурном графике Рисунок 2.2, б. Во-вторых, "барьеры", пересекаясь, образуют общее "окно", через которое проходит нулевая линия, представляющая годограф корней функции (2.3), что говорит о ее непрерывности. Эти особенности также иллюстрируются на Рисунок 2.3, где приведены графики функции (2.3) для различных значений ωt и которые пересекают ось ψ в одной точке.

Таким образом, как вытекает из Рисунок 2.1 и Рисунок 2.2, поиск корней должен осуществляться в чрезвычайно "гористом" пространстве. Тем не менее, "барьеры" типа 2 и 3 сравнительно легко преодолевается. Для этого необходимо, чтобы в блоке алгоритма, осуществляющего поиск корней, блоке промежуточных результатов (БПР), была предусмотрена проверка условия:

$$0.1 < |u(t_1)/u(t_2)| < 10.0 \quad (2.8)$$

при невыполнении которого считанные данные $u(t_1)$ и $u(t_2)$ игнорируются и производится переход к следующей паре данных. Это позволяет не только перейти барьер без каких-либо последствий, но и избежать недопустимого роста погрешностей считанных данных в зоне перехода ПН через нуль.

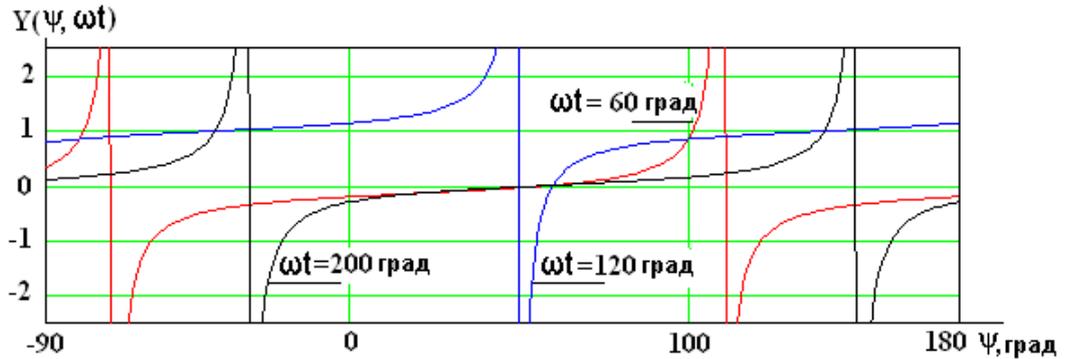


Рисунок 2.3. Кривые зависимости $y(\psi)$ при различных значениях ωt

Тем не менее, преодолеть основной барьер (1 на Рисунок 2.2 а) можно только дополнительными программными средствами. Например, для поиска корней применение метода Ньютона нежелательно [10]. Связано это с тем, что при наличии в составе ПН высокочастотных составляющих резко возрастают относительные погрешности при дифференцировании (2.3). Учитывая сравнительно невысокие требования к точности определения промежуточных результатов и наличия разрывов функции (2.3), целесообразно применение метода половинного деления.

Все графики на Рисунок 2.1, Рисунок 2.2 и Рисунок 2.3 построены при условии отсутствия в сети каких-либо возмущений или искажений. В действительности работа алгоритма УВФ, исходя из требований максимального быстродействия, протекает в условиях интенсивных помех и возмущений, обусловленных следующими факторами [75]:

- динамические составляющие переходного процесса, обусловленные возникновением утечки;
- поперечная или (и) продольная несимметрия сети;

- наличие высших гармонических составляющих в составе ПН;
- неточности считывания или обработки данных;
- скачкообразное изменение сопротивления утечки, которое приводит к наложению нового переходного режима на незакончившийся предыдущий;
- другие факторы, которые не всегда можно предусмотреть (возмущения в работе мощных приводов, коммутационные помехи в сети и т.п.).

Все эти факторы приводят к искажению кривой ПН и, как следствие, к погрешностям в определении его аргумента.

Из изложенного вытекают следующие предварительные требования к алгоритму УВФ:

1. Алгоритм на основе двух мгновенных значений функции, имеющей разрывы второго рода по обеим своим переменным, должен надежно отделить и определить ее корни, различив истинные и отбросив побочные из них.
2. Промежуточные результаты аргумента ψ должны следовать с частотой не меньше 1.0 кГц до получения серии, способной обеспечить принятие обоснованного конечного решения.
3. Алгоритм самостоятельно определяет необходимое и достаточное количество промежуточных результатов серии, осуществляет их обработку и принимает конечное решение.

Вычисление аргумента ПН реализуется в блоке определения промежуточных результатов (БПР), который является частью структурной схемы УВФ. В приложении Б, Рисунок Б.1 приведен фрагмент программы расчета промежуточных значений аргумента ПН методом половинного деления [27].

Для обеспечения устойчивого и надежного [39] функционирования алгоритма УВФ необходимо знание свойств ряда функциональных зависимостей, на которых базируется его работа. Кроме мгновенного значения ПН u , используемого для получения серии промежуточных результатов, это интегральное (среднее по модулю) U_u значение ПН, используемое алгоритмом для фиксации

возникновения утечки, последующего контроля ее наличия, а также для определения положения ОФИ и его управлением. Задача состоит в установлении функциональной связи между средним U_u , сопротивлением утечки R_h , емкостью C и сопротивлением изоляции R “фаза–земля”.

Упрощенная схема замещения участковой сети приведена в приложении Б, Рисунок Б.2. Там же приведена ее математическая модель для анализа установившегося режима однофазной утечки (система Б.1). Результаты ее исследования приводятся на Рисунок 2.4 в виде графиков зависимостей аргумента ПН и его интегрального значения в функции сопротивления утечки R_h и емкости цепи C , где R_h меняется непрерывно, а C ступенчато, а в приложении Б, Рисунок Б.3 приведены графики тех же зависимостей, но C меняется непрерывно, а R_h ступенчато.

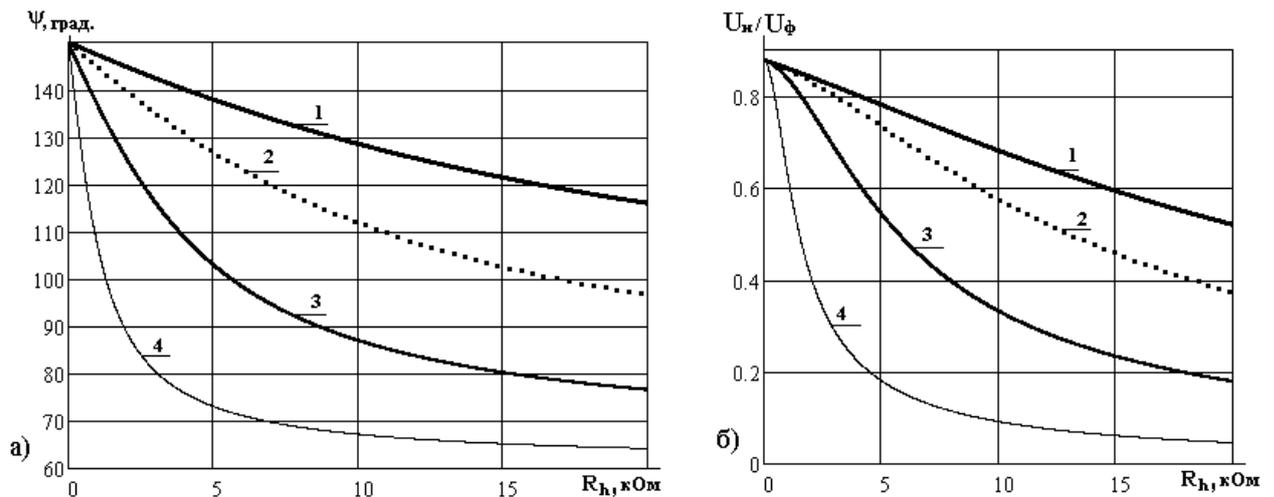


Рисунок 2.4. Графики зависимостей аргумента ПН (а) и интегрального значения ПН (б) в функции сопротивления утечки и емкости сети при $R = 300$ кОм. Значения емкостей (мкФ/фазу): 1 – 0.05; 2 – 0.1; 3 – 0.25; 4 – 1

Хотя полученные зависимости $\psi = f(R_h, C)$ и $U_u = f(R_h, C)$ дают наглядное представление об области значений ψ и U_u , они не позволяют определить, а тем более управлять положением ОФИ, так как это связано с влиянием двух параметров одновременно. Очевидно, что необходима обобщенная величина (или величины), учитывающие влияние параметров R_h и C одновременно. Обработка полученных функций (Рисунок 2.4 и Рисунок Б.2.2) позволила получить две

новых зависимости: аргумент ПН в функции его среднего значения при тех же значениях емкости $\psi=f(U_u, C)$, а также наибольшей постоянной времени системы $\tau = f(R_h, C)$, графики которых приведены на Рисунок 2.5. Эти функции в меньшей мере зависят от емкости сети и, следовательно, приемлемы для анализа и управления положением ОФИ. Правда, практическое значение имеет первая зависимость (Рисунок 2.5 а), в то время как постоянная времени в большей мере имеет теоретическое значение и может использоваться при анализе динамических режимов.

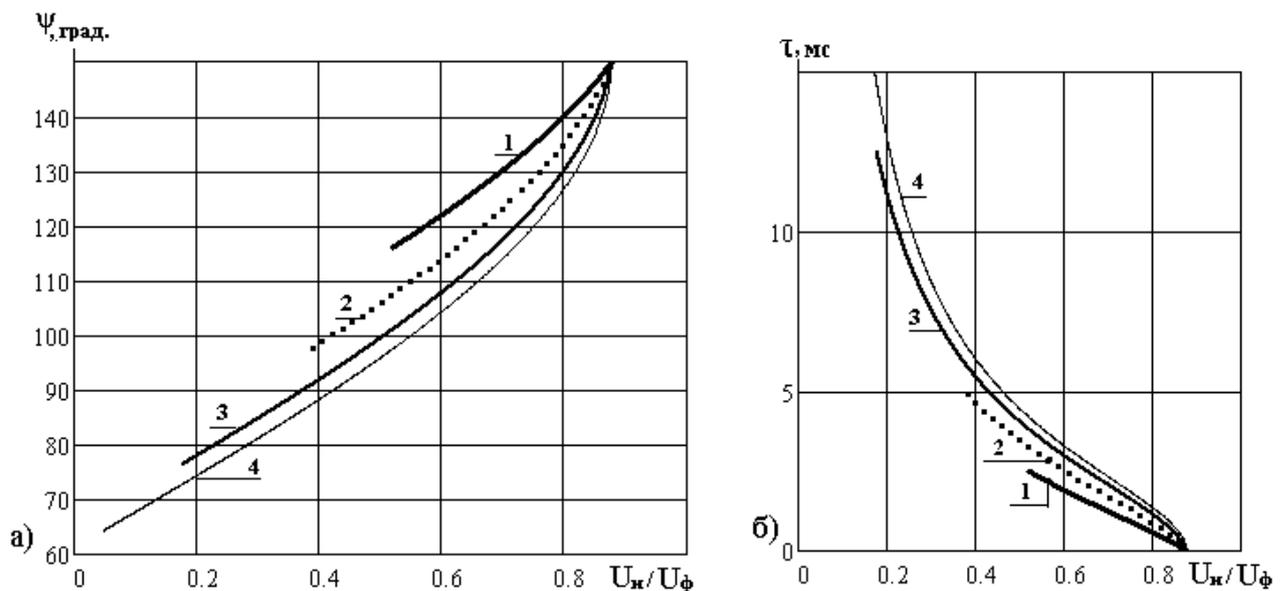


Рисунок 2.5. Графики зависимостей аргумента ПН (а) и постоянной времени цепи τ (б) в функции интегрального значения ПН при изменении сопротивления утечки. Условия опытов: $R = 300$ кОм; R_h изменяется от 0 кОм до 20 кОм; значения емкости (1...4) соответственно: 0.05; 0.1; 0.25; 1.0 (мкФ/фазу)

Теоретическое значение ОФИ для фазы А при условии, что начало отсчета соответствует моменту перехода через нуль напряжения U_{AB} при его возрастании, соответствует интервалу $60^{\circ} \dots 150^{\circ}$. При этом между ОФИ соседних фаз имеется “зазор” в 30° . Его можно использовать следующим образом. Верхняя граница ОФИ сдвигается на 50 в сторону опережающей фазы (для фазы А это 155°), а нижняя на 25° в сторону отстающей (т.е. до 35°). Такое положение границ ОФИ приемлемо для режима утечки, когда среднее значение ПН U_u по отношению к номинальному фазному напряжению составляет $U_u/U_{\phi} \approx 0.3$, что

соответствует $\tau \approx 7$ мс (Рисунок 2.5). За пределами указанных неравенств (т.е. $U_u/U_\phi < 0.3$, $\tau > 7$ мс) аргумент ПН ψ приближается к нижней границе ОФИ, причем, из-за снижения ПН u и его среднего U_u резко возрастает влияние помех и искажений. Вследствие этого искажается кривая ПН, а разброс промежуточных результатов ψ возрастает настолько, что часть их оказывается за пределами “своего” опорного интервала. Рационально при $U_u/U_\phi < 0.3$ ОФИ сместить в сторону отстающей фазы не менее чем на 30° .

Таким образом, границы ОФИ (для фазы А) составляют:

$$35^\circ \dots 155^\circ \quad \text{для } U_u/U_\phi > 0.3 \text{ или } \tau < 7\text{мс}; \quad (2.9)$$

$$5^\circ \dots 125^\circ \quad \text{для } U_u/U_\phi < 0.3 \text{ или } \tau > 7\text{мс}. \quad (2.10)$$

Отметим, что эти границы являются предварительными и по результатам экспериментальных исследований должны быть уточнены.

Отдельного анализа заслуживает вопрос о постоянной времени сети. Характеристическое уравнение динамической модели участковой сети (Рисунок Б.2.1) приведено на Рисунок Б.4.1 (приложение Б). Там же (Рисунок Б.4.2) приведены векторы корней этого уравнения для $C = 0.07$ мкФ и четырех значений сопротивления утечки. Особенность этих корней состоит в том, что наименьший из них, определяющий характер переходного процесса цепи утечки, имеет интервал постоянных значений, не зависящих от R_h .

Зависимость наибольшей из постоянных времени τ исследуемой системы в функции сопротивления утечки и емкости приведена на Рисунок 2.6, где постоянное значение, не зависящее от величины емкости, составляет $\tau \approx 2.5$ мс. Представляет интерес получение этих же результатов на упрощенной инженерной модели, образованной из модели Рисунок Б.2.1 отбрасыванием нагрузки и эквивалентного сопротивления источника. В этом случае порядок системы снижается до единицы (для симметричной системы), а постоянная времени определяется из выражения:

$$\tau = 3 \cdot C \cdot R \cdot R_h / (R + 3 \cdot R_h) \quad (2.11)$$

На Рисунок 2.6 пунктирные линии являются графиками зависимости (2.11). Характерно то, что в области $\tau > 2.5$ мс эти линии накладываются и практически сливаются с графиками, полученными в результате анализа системы четвертого порядка.

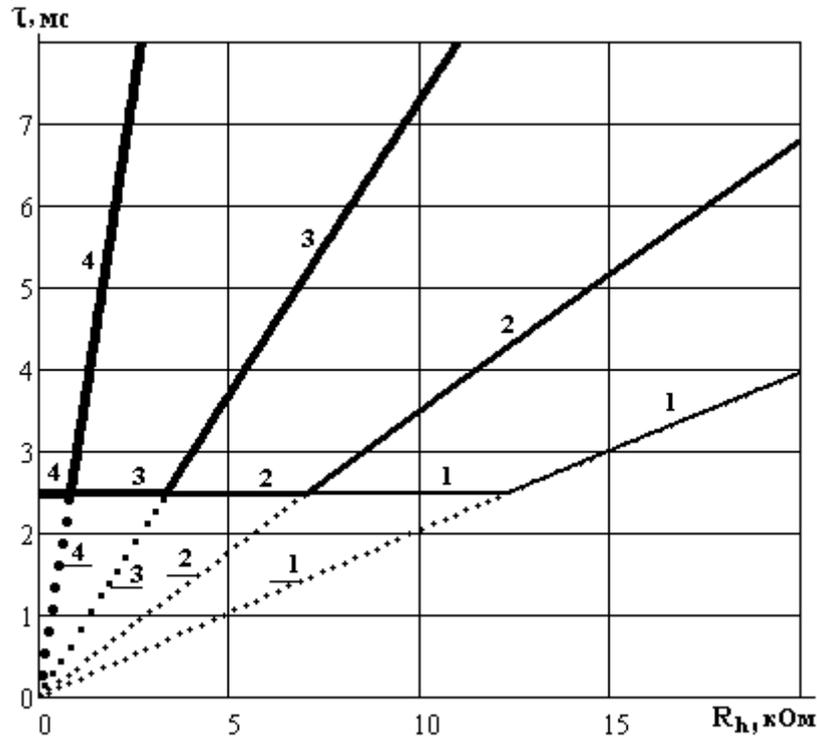


Рисунок 2.6. Зависимость наибольшей постоянной времени сети от сопротивления утечки при $R = 300$ кОм, $R_h = 0 \dots 20$ кОм, емкость C (1...4) соответственно: 0.07; 0.12; 0.25; 1.0 (мкФ/фазу). Сплошные линии – результат анализа модели 4-го порядка; пунктир – модели 1-го порядка

На основании изложенного можно считать доказанным, что постоянная времени и опорные фазовые интервалы могут определяться на основании упрощенной схемы сети, содержащей поперечные параметры (сопротивление изоляции R , емкость C) и сопротивление утечки R_h . Этот вывод подтверждается также и тем, что параметры эквивалентной нагрузки сети, а также параметры источника в десятки и сотни раз меньше “поперечных” параметров и не могут существенно влиять ни на характер переходного процесса, обусловленного воз-

никновением утечки, ни на свойства полученных зависимостей (Рисунок 2.4, Рисунок 2.5 и Рисунок 2.6).

2.2 Анализ устойчивости УВФ в установившемся режиме однофазной утечки

Под устойчивостью УВФ и реализующего его алгоритма, считается их способность безошибочно определять аварийную фазу сети, в которой возникает утечка тока на землю, несмотря на противодействие искажающих или возмущающих факторов.

Очевидно, что на работу УВФ могут влиять одновременно несколько из указанных факторов, однако для оценки весомости каждого из них необходимо обеспечить упрощенный режим математической модели сети при наличии именно указанного фактора.

Методика получения абсолютной погрешности $\Delta\psi$, которая, в свою очередь, зависит от абсолютной погрешности считанных мгновенных значений потенциала нейтрали Δu , заключается в решении системы уравнений (2.1) и (2.2) где угловая разность $\omega\Delta t$ фиксирована и находится в пределах от 10 до 20 градусов. Это означает, что текущие расчетные значения аргумента ψ поступают с частотой от 0.9 до 1.8 кГц.

Погрешности считывания в основном обусловлены квантованием измеряемой величины (потенциала нейтрали). Максимально возможный диапазон ПН ΔU_{max} определяется (при $R_h \rightarrow 0$) двойной амплитудой номинального фазного напряжения. Для $U = 660$ В это составляет:

$$\Delta U_{max} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U = 1078 \text{ , В} \quad (2.12)$$

При разрядности двоичного АЦП $N = 8$ ($2N = 256$) величина МЗР (младший значащий разряд) составляет $1\text{МЗР} \approx 0.4 \%$ [57], относительная погрешность считывания (половина МЗР):

$$\delta = 0.5 \cdot \text{МЗР} \approx 0.2 \%, \quad (2.13)$$

а максимальная абсолютная погрешность при $U = 660$ В:

$$\Delta U_{abc} = \delta \cdot \Delta U_{max} \approx 2.16 \text{ В} \quad (2.14)$$

Для интервала (2.8), либо скорректированного (2.9), где $U_w/U\phi > 0.4$, а $\tau < 0.7$ мс, полученные согласно (2.13) и (2.14) значения погрешностей незначительны и не заслуживают внимания. Однако с ростом R_h или C амплитуда ПН по отношению к (2.12) существенно уменьшается и соответственно возрастают относительные погрешности считывания мгновенных значений. Например, в области высокоомной утечки ($R_h \geq 15$ кОм) и $C = 1$ мкФ значение последних может находиться в пределах от 2% до 4%. Последнее значение возьмем за основу для анализа влияния погрешностей квантования на статическую устойчивость УВФ.

Первый опыт состоял в определении функциональной зависимости между абсолютными погрешностями промежуточных результатов аргумента ПН (в градусах) от погрешностей двух входных величин, обусловленных квантованием. Другими словами: исследуется реакция УВФ на относительные погрешности считывания одновременно двух входных величин. Методика исследования заключается в том, что кривая потенциала нейтрали в момент считывания принудительно искажается погрешностями, имитирующими более неблагоприятную ситуацию, когда две входные величины δu_1 и δu_2 максимальны по модулю и противоположны по знаку.

Результаты именно такой ситуации представлены контурным трехмерным графиком на Рисунок 2.7 Рисунок 2., где обозначено:

1 – основной, параллельный оси ψ "барьер" функции (2.3), демонстрирующий ее прыжок в бесконечность;

2, 3 - дополнительные "барьеры" той же функции, которые отвечают условию (2.5) и расположены под углом к оси ψ ;

4 - линия нулевого значения функции (2.3), т.е. годограф ее корней. Отметим, что именно эта линия резко отличается от прямой линии 4 на Рисунок 2.2 б, где отсутствуют любые искажающие факторы.

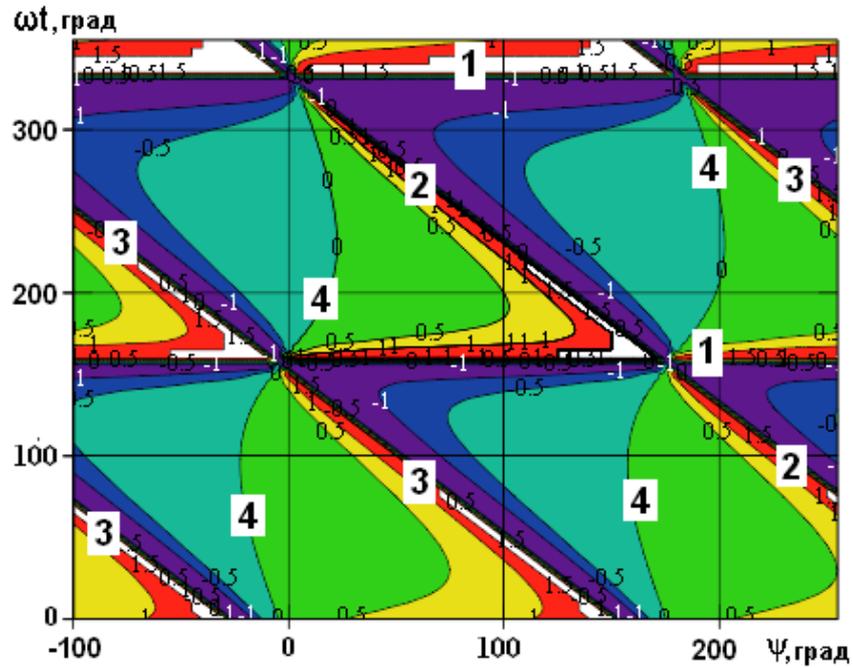


Рисунок 2.7. Контурный график функции (2.3) при условии максимальных погрешностей считывания

Несмотря на то, что в проведенном опыте игнорируется вероятностный характер погрешностей двух входных величин и его нельзя считать типичным, результаты опыта разрешают сделать важные выводы.

Во-первых, абсолютная погрешность промежуточных результатов носит периодический характер с законом изменения, близким к синусоидальному. Очевидно, что эти особенности обусловлены свойствами функций (2.3) и (2.4), которые используются при определении промежуточных значений аргумента ПН. Но это также означает, что среднее за период значение погрешности УВФ, обусловленной квантованием, стремится к нулю [29].

Во-вторых, можно предусмотреть, что по тем же причинам любое постоянное влияние на входе УВФ (постоянная составляющая или медленно затухающая экспонента) будут приводить к тем же результатам: периодичности и стремлению к нулю среднего за период значения.

Отдельно следует отметить, что на положение всех "барьеров" (Рисунок 2.7), на положение "окошка" их сечения, через которое проходит годограф 4 корней уравнения (2.3), искажающие факторы не влияют. Аналогичная ситуа-

ция представлена на Рисунок 2.8, где результаты работы УВФ поданы при максимальной погрешности каждой из входных величин, которые имеют противоположные знаки ($\Delta u_1 = 0.05$; $\Delta u_2 = -0.05$). Для обеспечения этого расчетного эксперимента считываемый сигнал (потенциал нейтрали) был искажен максимальной при данных условиях погрешностью, как это показано на Рисунок 2.8, б (кривые $u(t)$, $u(t+\Delta t)$ и их отношение $u(t) / u(t+\Delta t)$ для проверки условия (2.8). Именно этим решалась задача выявления влияния на работу УВФ максимальной погрешности АЦП в ее "чистом" виде. В опыте визуально наблюдается искажение обеих кривых потенциала нейтрали (Рисунок 2.8 б), по которым проводится считывание мгновенных значений. Отношение этих двух кривых имеет разрывы второго рода, по которым проверяется условие (2.8) и которым отвечают пропуски промежуточных результатов $\Delta\psi$ на Рисунок 2.8, а.

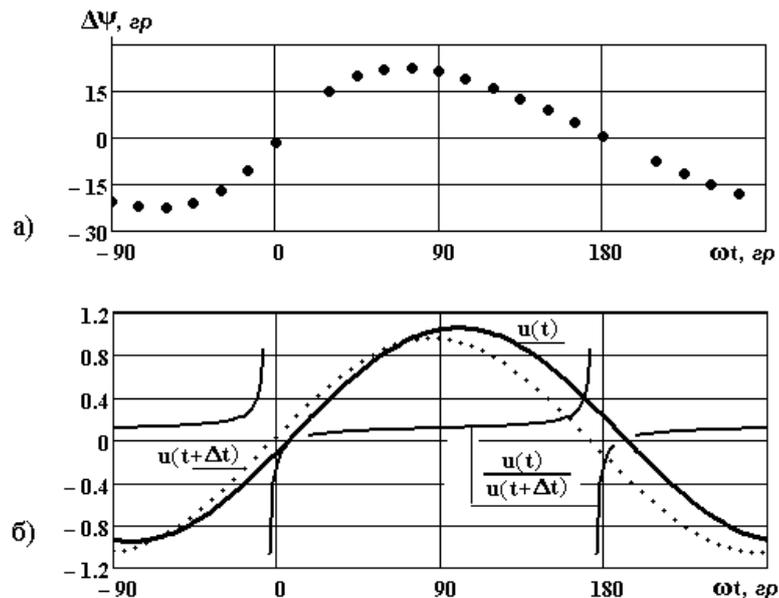


Рисунок 2.8. Результаты исследования работы УВФ при максимальной погрешности квантования:

а – абсолютная погрешность УВФ ($\Delta\psi$, градусы);

б – кривые ПН, искаженные максимальными погрешностями квантования

Кроме того, как показывает анализ, можно считать доказанным, что абсолютная погрешность УВФ, с достаточной для практического применения точностью можно представить следующей функцией двух случайных аргументов:

$$\Delta\psi = K(R_h) \cdot (\delta_{u1} - \delta_{u2}) \cdot \sin(\omega \cdot t + \gamma) \quad (2.15)$$

где γ - начальная фаза, которая зависит от выбора системы отсчета;

$K(R_h)$ - коэффициент, который зависит от величины сопротивления утечки (в данном опыте $K(R_h) \approx 240$; $\delta_{u1} - \delta_{u2} = 0.1$; $\Delta\psi_{max} \approx 24^0$).

Отдельного внимания заслуживает вопрос вероятности максимальной погрешности УВФ, обусловленной квантованием. Если принять, что максимальная погрешность считывания в области высокоомной утечки по модулю не превышает 4 %, то суммарная погрешность системы двух одинаковых случайных величин находится в симметричном интервале от -0.08 до 0.08 и носит вероятностный характер. Более того, обе величины в частности и их система в целом характеризуются равномерным распределением. Из этого вытекает, что математическое ожидание суммарной погрешности двух считываний $\delta = \delta_{u1} - \delta_{u2}$ равняется нулю и среднее значение абсолютной погрешности УВФ $\Delta\psi_{cp}$ согласно (2.9) и (2.8) стремится к нулю [13]. Это подтверждается результатами исследования, когда относительная погрешность каждого из измерений потенциала нейтрали определялась при помощи генератора случайных (псевдослучайных) чисел. Основной вывод этого опыта (Рисунок 2.9) подтверждает ранее полученные результаты: среднее значение абсолютной погрешности стремится к нулю уже спустя от 2 до 4 мс с начала работы БПР и не может существенным образом повлиять на статическую устойчивость УВФ.

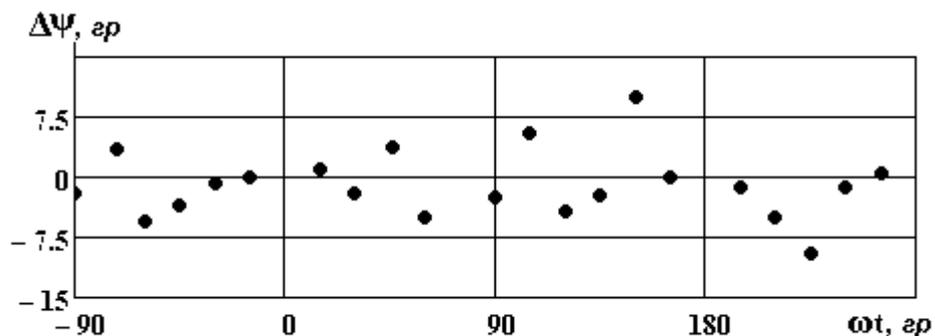


Рисунок 2.9. Абсолютная погрешность УВФ ($\Delta\psi$, градусы) при случайной погрешности считывания в пределах $-0.05 < \Delta u < 0.05$

Отметим, что в данном исследовании приняты наиболее неблагоприятные условия (сопротивление утечки стремится к 20 кОм, емкость к 1 мкФ, когда среднее значение ПН составляет $\approx 5\%$ номинального фазного напряжения).

Отметим так же, что увеличив разрядность АЦП, погрешности квантования можно уменьшить в несколько раз.

Погрешности медленно затухающей экспоненты связаны, как правило, с наиболее влиятельной динамической составляющей переходного процесса, обусловленной поперечными параметрами сети, и которая, к тому же, в наибольшей мере проявляет себя в области высокоомной утечки. На Рисунок 2.10 приведены результаты аналитического исследования утечки при условии, когда сопротивление утечки $R_h = 15$ кОм. При этом постоянная времени затухания наиболее влиятельной динамической составляющей переходного процесса достигает $\tau \approx 30$ мс, а ее максимальное значение в момент включения блока промежуточных результатов ($t = 0$ на Рисунок 2.10) достигает 0.75 амплитуды принужденной составляющей ПН.

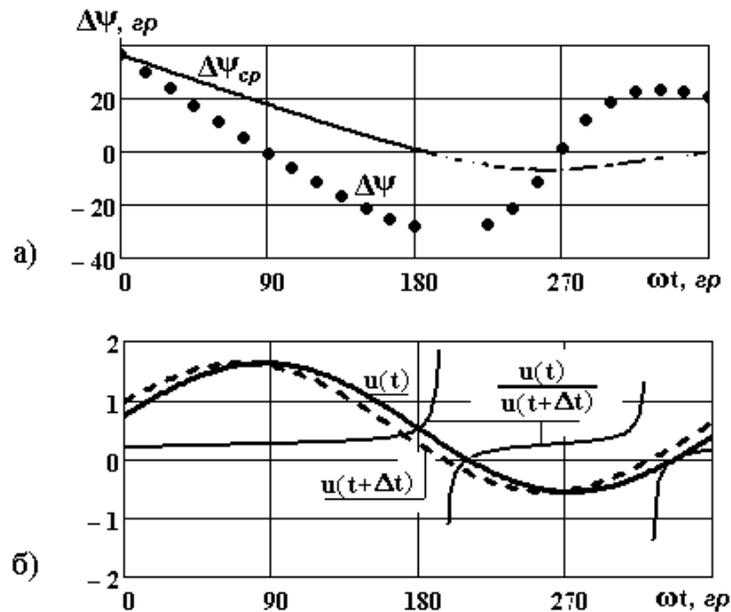


Рисунок 2.10. Влияние на работу УВФ экспоненты с медленным затуханием:

а) $\Delta\psi$ – абсолютные погрешности (градусы); $\Delta\psi_{cp}$ – среднее значение абсолютной погрешности (градусы);

б) $u(t)$, $u(t+\Delta t)$ – мгновенные значения ПН (по отношению к амплитуде); $u(t)/u(t+\Delta t)$ – отношение мгновенных значений ПН

Основные результаты опыта, представленного на Рисунок 2.10, заключаются в следующем. Максимальная абсолютная погрешность в определении аргумента ПН достигает почти 40° .

Сами по себе эти погрешности не угрожают надежности УВФ. Тем не менее, эта угроза может стать реальностью, если на указанные погрешности накладываются погрешности от действия других факторов (высших гармоник, например). Кроме того, при работе в области высокоомной утечки ($R_h > 10$ ком) часть промежуточных результатов ψ может быть "выплеснута" за нижнюю границу опорного интервала.

В значительной мере указанные недостатки компенсируются тем, что среднее значение абсолютных погрешностей ψ_{cp} уже за половину периода стремится к нулю. Тем не менее, для области высокоомной утечки характерно нежелательное приближение фактического значения аргумента потенциала нейтрали к нижней границе опорного фазового интервала, которое можно компенсировать только смещением последних.

С формальной точки зрения есть две возможности повышения статической устойчивости УВФ. Первая из них заключается в том, что решение на срабатывание защиты принимается не по серии однотипных промежуточных результатов, а по среднему значению этой серии ψ_{cp} :

$$\psi_{cp} = \frac{1}{n} \cdot \sum_1^n \psi_i \quad (2.16)$$

В этом случае возможный случайный "прыжок" одного или двух промежуточных результатов за границы "своего" опорного интервала не имеет решающего значения и не приводит к задержке процесса идентификации аварийной фазы из-за необходимости ожидания следующей стойкой однотипной серии.

Вторая возможность заключается в смещении границ опорных фазовых интервалов в функции сопротивления утечки R_h или, что то же самое, в функции амплитудного значения потенциала нейтрали (возможности практической реализации этого предложения исследованы в разделе 4). Действительно, фак-

тическое значение аргумента ПН ψ_{psc} с ростом сопротивления утечки смещается к нижней границе опорного интервала. Но в том же направлении смещаются все промежуточные значения ψ , которые переносят с собой все погрешности, как следствие возмущений и искажений сети. В идеальном случае ОФИ должны быть смещенные согласно условия:

$$\beta_{zp} = \psi_{psc} \pm 60^0 \quad (2.17)$$

Выполнить в точности условие (2.17) практически невозможно. Алгоритм УВФ не имеет для этого необходимой информации. Тем не менее, как это будет дальше показано, достичь определенного приближения к условию (2.17) можно. Поэтому с целью определения порога устойчивости алгоритма дальнейшее исследование выполняется с учетом обеих описанных возможностей:

- а) определение среднего значения серии промежуточных результатов согласно (2.16);
- б) смещение опорных фазовых интервалов согласно (2.17).

2.3 Анализ основных возмущающих факторов в установившемся режиме однофазной утечки

2.3.1 Продольная несимметрия сети.

Предыдущий анализ показал, что влияние почти всех возмущающих факторов в наибольшей мере проявляется при значительной величине сопротивления утечки ($R_h > 10$ кОм) [74]. Исследование выполнено по математической модели сети, приведенной в приложении Б, (Б.1), с применением метода узловых потенциалов [50]. Для количественной характеристики уровня продольной несимметрии удобно применить коэффициент несимметрии $k_{нс}$, что вводится в математическую модель в соответствии с выражениями:

$$Z_{nA} = Zn; \quad Z_{nB} = Zn \cdot k_{нс} \quad Z_{nC} = Zn/k_{нс} \quad (2.18)$$

где Zn – комплекс эквивалентного сопротивления нагрузки сети в симметричном режиме;

Z_n, Z_{nB}, Z_{nC} – комплексы эквивалентного сопротивления фаз сети при продольной несимметрии.

Основные результаты исследования влияния продольной несимметрии на работу УВФ отражены на Рисунок 2.11 и Рисунок Б.6. Исследования выполнены в области высокоомной утечки ($R_h = 10$ кОм) для трех разных значений коэффициента несимметрии:

$k_{нс} = 1$ (сеть симметричная, кривая 1);

$k_{нс} = 0.25$ (в четыре раза уменьшенное эквивалентное сопротивление отстающей фазы, и, соответственно, в четыре раза увеличенное эквивалентное сопротивление опережающей фазы, кривая 2);

$k_{нс} = 4$ (в четыре раза уменьшенное эквивалентное сопротивление опережающей фазы и, соответственно, в четыре раза увеличенное эквивалентное сопротивление отстающей фазы, кривая 3).

Несмотря на то, что исследуемый разброс параметров намного превышает все наиболее вероятные рабочие значения, абсолютная погрешность аргумента ПН, обусловленная именно продольной несимметрией, как это следует из Рисунок 2.11, не превышает одного градуса. При идентификации поврежденной фазы такая величина абсолютной погрешности не имеет существенного значения.

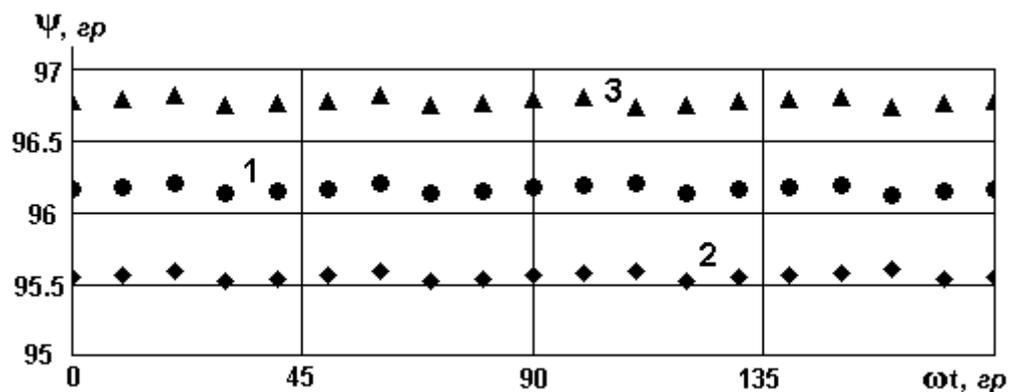


Рисунок 2.11. Работа УВФ при продольной несимметрии сети

Таким образом, продольная несимметрия, даже при 70%-ом разбросе параметров, практически не влияет ни на работоспособность исследуемого спосо-

ба определения поврежденной фазы, ни на устойчивость алгоритма, реализующего этот способ.

2.3.2 Поперечная несимметрия сети.

Более весомым фактором, который может повлиять на работоспособность и устойчивость алгоритма УВФ является поперечная несимметрия сети. Обусловлено это тем, что возникновение утечки само по себе приводит к возникновению поперечной несимметрии в сети. Это также означает, что наличие такой может быть без аварийной ситуации и заключается в разбросе сопротивлений "фаза-земля" (разброс емкостей "фаза-земля" подавляющее большинство авторов считает менее актуальным).

Для количественной характеристики уровня поперечной несимметрии напрасно применять коэффициент несимметрии, аналогичный предыдущему исследованию. Обусловлено это тем, что увеличение сопротивления изоляции R в математической модели сети, которая применяется для этого исследования (Б.1), не увеличивает поперечную несимметрию. Важно только его снижение для одной или двух фаз.

На Рисунок 2.12 приведены результаты одного из исследований для области низкоомной утечки ($R_h = 1$ кОм, $R = 500$ кОм).

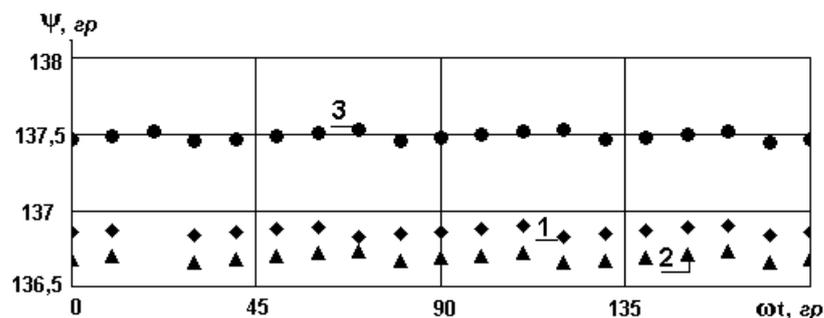


Рисунок 2.12. Работа УВФ при поперечной несимметрии в области низкоомной утечки ($R_h = 1$ кОм) при снижении сопротивления изоляции одной из фаз:

- 1 – совокупность значений ψ для симметричной сети;
- 2 – то же при пятикратном снижении сопротивления изоляции отстающей фазы;
- 3 – то же при пятикратном снижении сопротивления изоляции опережающей фазы

На первый взгляд может показаться, что абсолютная погрешность, обусловленная поперечной несимметрией, как и в предыдущем исследовании, не превышает 1° . Однако, это не так. Об этом можно судить по результатам исследования для области высокоомной утечки ($R_h = 15$ кОм, $R = 500$ кОм), что приведены на Рисунок 2.13. Расчетные значения ψ следуют один за другим с частотой 1.8 кГц (т.е. через каждые 10 градусов), тем не менее, каждая серия результатов (1, 2, 3 Рисунок 2.13) имеет один или два пропуска в области значений ωt в интервале от 80° до 140° . Объясняется это тем, что в этом интервале кривые мгновенных значений ПН переходят через нуль, что приводит к возникновению основного "барьера" функции (2.3). Именно в этой области, где не выполняется условие (2.8), алгоритм игнорирует входные данные, вследствие чего в серии промежуточных результатов создаются пропуски.

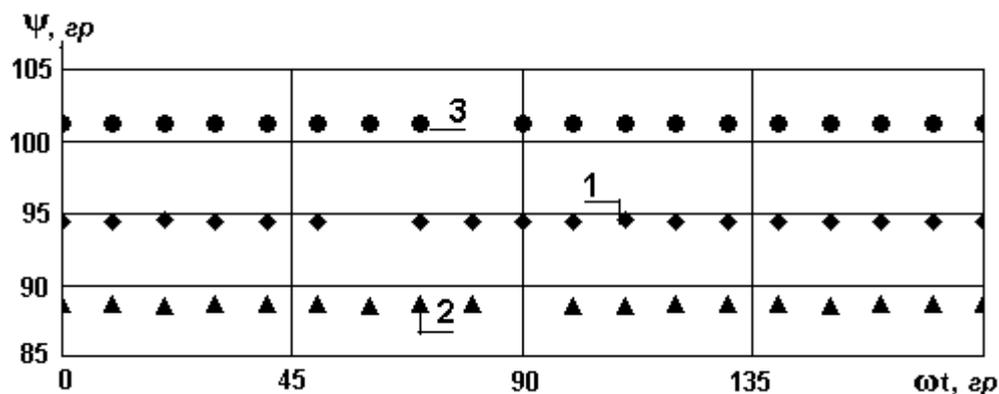


Рисунок 2.13. Работа УВФ при поперечной несимметрии в области высокоомной утечки ($R_h = 15$ кОм) при снижении сопротивления изоляции одной из фаз

Основной результат этого исследования заключается в том, что абсолютная погрешность аргумента потенциала нейтрали, которая обусловлена поперечной несимметрией, достигает $\pm 15^{\circ}$. Это значит, что алгоритм имеет значительный запас статической устойчивости по этому показателю. Тем не менее из-за значительного сопротивления утечки ($R_h > 10$ кОм) один из результатов (2 на Рисунок 2.13) находится вблизи нижней границы опорного интервала, причем, разность составляет всего 5° , что при наличии других возмущающих факторов может привести к существенному уменьшению быстродействия. Данный

опыт подтверждает необходимость коррекции опорных интервалов в области больших значений сопротивления утечки.

Двух- или трехфазная утечка представляет собой частный случай поперечной несимметрии. Ее предпосылкой являются снижение сопротивления изоляции одной или двух фаз сети к значениям, еще недостаточным для срабатывания защитного отключения, но которые могут оказаться достаточными для создания помех в работе УВФ. Обусловлено это появлением "фона" потенциала нейтрали, который, накладываясь на аварийный сигнал связанный с "основной" утечкой, может его исказить. Для количественной оценки этого явления были осуществлены исследования годографов ПН на комплексной плоскости в функции сопротивления утечки при разных вариантах поперечной несимметрии. Исследование выполнено с помощью математической модели (Б.1). Сопротивление изоляции отдельных фаз снижалось к минимальному, но недостаточному для срабатывания защитного отключения. Система отсчета привязана к напряжению u_{AB} .

Исследование, результаты которого приведены на Рисунок 2.14, выполнено при следующих условиях: сопротивление изоляции неповреждённых фаз $R = 500$ кОм, емкость "фаза-земля" одинакова для всех фаз и составляет $C = 0.75$ мкФ, напряжение сети $U = 660$ В, значение потенциала приведено в относительных единицах. Все годографы построены для утечки в фазе А при изменении сопротивления R_h в пределах от 5 до 20 кОм, причем, отдельно обозначена точка, определенная для условия $R_h \rightarrow \infty$, при которой определяется величина "фонового" потенциала.

На Рисунок 2.14, а) обозначено:

1 – годограф потенциала нейтрали для симметричной сети, а также точка, которая отвечает условию $R_h \rightarrow \infty$);

2 – такой же годограф, но при уменьшенном (до 50 кОм) сопротивлении изоляции фазы А, а также точка 2, что показывает "фон" ПН при отсутствии "основной" утечки (отметим, что кривая 2 практически наложена на кривую 1);

3 – годограф, пост-роенный при сниженном сопротивлении изоляции изоляции фазы В; 4 – то же при сниженном сопротивлении изоляции фазы С.

На Рисунок 2.14, б) обозначено:

- 1 – годограф потенциала нейтрали для неповрежденной сети (и, соответственно, точка, которая отвечает условию $R_h \rightarrow \infty$);
- 2 – то же при резком уменьшении сопротивлений изоляции фаз В и С (трехфазная утечка), а также точка 2, изображающая соответствующий "фон" ПН;
- 3 – годограф, построенный при сниженном сопротивлении изоляции фаз А и С;
- 4 – то же для фаз А и В.

На каждом из годографов обозначены 5 точек, которые соответствуют значениям сопротивления утечек 5к (5 кОм), 7.5к, 10к, 15к, 20к. Кроме того, точки 2, 3, 4 на каждом из рисунков обозначают "фоновое" значение ПН при отсутствии утечки.

Для облегчения анализа полученных результатов на Рисунок 2.14 проведены две дуги концентрических кругов, центр которых находится в точках нулевой координаты, а радиус отвечает точкам запуска в работу УВФ на "естественной" кривой (кривая 1) при $R_h = 20$ кОм (дуга 5) и $R_h = 15$ кОм (дуга 6).

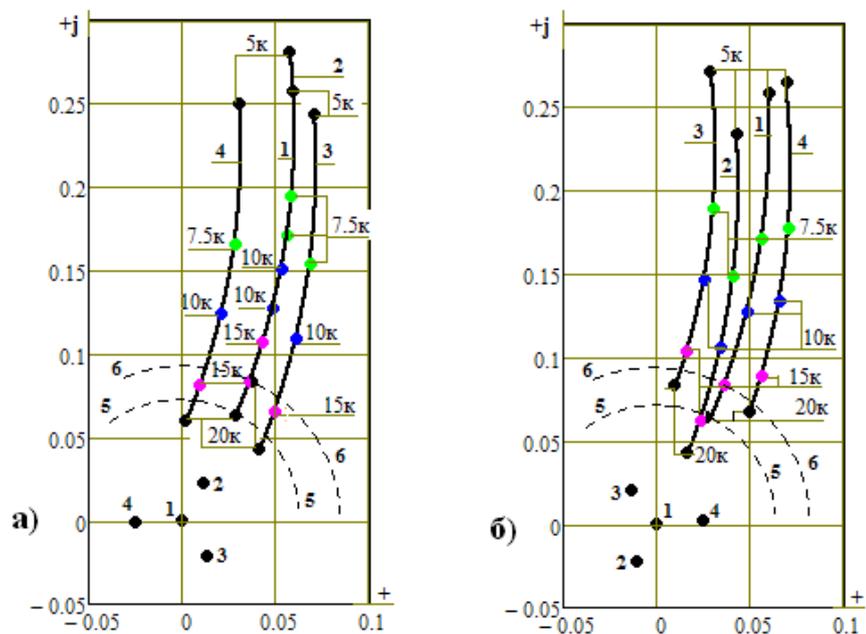


Рисунок 2.14. Фрагменты круговых диаграмм (годографов) потенциала нейтрали для режима двухфазной (а) и трехфазной (б) утечки

Первая особенность полученных результатов заключается в том, что "фоновые" значения ПН при резком снижении сопротивления изоляции (до 50 кОм) одной из фаз одинаковы по модулю, на комплексной плоскости расположены симметрично и составляют $\approx 2.5\%$ номинального фазного напряжения (точки 2, 3, 4 на Рисунок 2.14, а). В комплексном изображении они имеют вид:

$$\Psi_{0A} = 2.5 \cdot \exp(j \cdot 60^\circ) \quad (2.19)$$

$$\Psi_{0B} = 2.5 \cdot \exp(-j \cdot 60^\circ) \quad (2.20)$$

$$\Psi_{0C} = -2.5 \quad (2.21)$$

где Ψ_{0A} , Ψ_{0B} , Ψ_{0C} - комплексы "фоновых" ПН для фаз А, В, С соответственно.

На Рисунок 2.14 б "фоновые" потенциалы созданы одновременным снижением сопротивлений изоляции двух фаз. В частности для точки 2 (Рисунок 2.14, б), где снижены сопротивления изоляции фаз В и С, а также для точек 3 и 4 имеем:

$$\Psi_{0BC} = 2.5 \cdot \exp(-j \cdot 120^\circ) \quad (2.22)$$

$$\Psi_{0AC} = 2.5 \cdot \exp(j \cdot 120^\circ) \quad (2.23)$$

$$\Psi_{0AB} = 2.5 \quad (2.24)$$

где Ψ_{0BC} , Ψ_{0AC} , Ψ_{0AB} - комплексы "фоновых" ПН при одновременном снижении сопротивления изоляции фаз В и С, А и С, А и В соответственно.

Обратим внимание на то, что, например, $\Psi_{0BC} = \Psi_{0B} + \Psi_{0C}$, причем, эта особенность выполняется при других комбинациях соотношений (2.19) - (2.24). Из этого вытекает, что суммарный "фоновый" сигнал, обусловленный влиянием двух или трех фаз одновременно, равняется геометрической сумме "фоновых" сигналов от влияния каждой из фаз отдельно. Это означает, что "фоновые" сигналы, обусловленные любым видом поперечной несимметрии, подчиняются

принципу наложения. Больше того, анализ показывает, что смещение кривых 2, 3, 4 по отношению к кривой 1 осуществлено на величину соответствующего "фоновому" сигнала. Однако последнее утверждение более убедительно для области высокоомной утечки ($R_h \geq 10$ ком).

Вторая особенность полученных результатов по своей сути является следствием первой и заключается в искажении "основного" аварийного сигнала "фоновым". Например, аварийный сигнал ПН при утечке $R_h = 20$ кОм и отсутствии "фона" (точка 20к на пересечении кривых 1 и 5, Рисунок 2.14, а) составляет ≈ 6.5 % или в комплексной форме:

$$\Psi_{1-20к} \approx 6.4 \cdot \exp(j \cdot 68^\circ) \quad (2.25)$$

Такой же сигнал, но при сниженном сопротивлении фазы А (точка 20к на пересечении кривых 2 и 6 на Рисунок 2., а) составляет ≈ 8.8 % или в комплексной форме:

$$\Psi_{2-20к} \approx 8.8 \cdot \exp(j \cdot 70^\circ) \quad (2.26)$$

Последний сигнал можно рассматривать как геометрическую сумму аварийного сигнала (2.23) и "фоновому" (2.19), что снова так же подтверждает действительность принципа наложения:

$$\begin{aligned} \Psi_{2-20к} &= \Psi_{1-20к} + \Psi_{0А} = \\ &= 6.4 \cdot \exp(j \cdot 68^\circ) + 2.5 \cdot \exp(j \cdot 60^\circ) = 8.9 \cdot \exp(j \cdot 65^\circ) \end{aligned} \quad (2.27)$$

Но важнее другое: точке 20к на кривой 1 отвечает точка ≈ 24 кОм на кривой 2, т.е. при работе на кривой 2 УВФ становится более чувствительным и вместо 20 кОм сработает при 24 кОм. Это обусловлено тем, что "фоновый" сигнал прибавляется к аварийному.

Второй пример. Кривую 2 на Рисунок 2.14, б можно рассматривать как кривую 1, искаженную "фоновым" сигналом (2.20). Дуга концентрического круга 5 пересекает кривую 2 в точке, которая отвечает $R_h \approx 14$ кОм. Это означает, что когда УВФ работает на кривой 1, то его точка запуска $R_h \approx 20$ кОм, а при работе на кривой 2 точка запуска ≈ 14 кОм. Устройство определения фазы ста-

новится менее чувствительным, что обусловлено снижением аварийного сигнала "фоновым".

Два последних примера наиболее значащие. Для них характерны наибольшие искажения аварийного сигнала "фоновым". В данном исследовании разброс сопротивлений срабатывания УВФ представляет от 24 кОм (чувствительность УВФ повышена на $\approx 20\%$) до 14 кОм (чувствительность УВФ снижена \approx на 24%).

Таким образом, в области высокоомной утечки ($R_h > 15$ кОм) "фоновые" напряжения ПН, обусловленные различными видами поперечной несимметрии, способны исказить аварийный сигнал. По этой причине чувствительность УВФ может измениться в пределах от 24 кОм до 14 кОм.

При уменьшении сопротивления утечки (и, следовательно, возрастании аварийного сигнала) влияние поперечной несимметрии уменьшается, а в области низкоомной утечки ($R_h < 5$ кОм) "фоновые" сигналы можно не принимать во внимание.

Из всего изложенного вытекают три возможных варианта решения проблемы поперечной несимметрии применительно к данному способу.

Первый вариант. Полное игнорирование проблемы. Действительно, двух- или, тем более, трехфазная утечка при значительном "фоне" случается редко. Тем не менее, если это произойдет, то возникает естественный вопрос: как будет работать защита, когда сопротивление человека, попавшего под напряжение окажется больше, чем 20 кОм, что возможно, например, при хорошей изоляции его одежды или обуви? В этом случае включится в работу схема защитного отключения (время действия ≈ 200 мс). Далее возможны следующие две ситуации. Если человеку самому, благодаря значительному сопротивлению, не удалось освободиться от действия напряжения, наиболее вероятно то, что его сопротивление через 2 - 5 миллисекунд снизится из-за пробоя одежды (обуви) или кожи. В этом случае УВФ включится в работу и определит аварийную фазу за несколько миллисекунд (от 3 мс до 15 мс) в зависимости от нового значения R_h . При применении быстродействующих коммутационных устройств (тири-

сторных, например, время действия которых не превышает 10 мс) человек освобождается от напряжения уже через (30-60) миллисекунд. Но самое главное другое: человек освобождается от воздействия ЭДС двигателей, которые переходят в состояние свободного выбега после защитного отключения. Если же сопротивление человека не снизится (эта ситуация маловероятная, но ее нельзя игнорировать), то УВФ не включится в работу. Тогда суммарное время пребывания человека под напряжением может длиться от 0.2 секунды до 1.5 секунды в зависимости от количества и мощности двигателей, которые перейдут в режим свободного выбега после защитного отключения.

Второй вариант. Снижение уставки срабатывания УВФ до 10 кОм, разделив таким образом функции защиты, когда защитное шунтирование включается лишь для области $R_h < 10\text{кОм}$ (защита человека). Именно эта область наиболее вероятна для сопротивления человека, попавшего под напряжение, и, кроме того, в этой области меньше проявляется влияние поперечной несимметрии.

Третий вариант заключается в том, чтобы в установившемся безаварийном режиме периодически измерять и запоминать "фоновый" сигнал, который, в случае возникновения аварийной ситуации, геометрически вычитается от основного аварийного сигнала, компенсируя тем самым влияние поперечной несимметрии.

Таким образом, установлено, что предложенный способ определения поврежденной фазы с целью ее дальнейшего защитного шунтирования при наличии неблагоприятного варианта поперечной несимметрии ("фон" в противофазе к основному сигналу) не исключает, а дополняет существующую систему защитного отключения, которая, к сожалению, не защищает человека от действия ЭДС двигателей в состоянии выбега.

2.3.3 Влияние высших гармонических составляющих.

Высшие гармонические составляющие, входящие в состав ПН, в зависимости от частоты, амплитуды и количества могут существенно его исказить [72]. При исследовании их влияния на работу алгоритма УВФ, получаемого из

модели сети (Б.1) для установившегося режима однофазной утечки, накладывалось напряжение одной или нескольких гармонических составляющих. Полученный таким образом сигнал обрабатывался с помощью математической модели УВФ в соответствии с его алгоритмом. Исследование предполагалось вычисление абсолютной погрешности $\Delta\psi$ для каждого из промежуточных результатов, а также ее среднего значения.

Результаты первого из этих исследований, когда в составе потенциала нейтрали присутствует третья гармоника, приведены на Рисунок 2.15, а, где обозначено: u_N - результирующая кривая потенциала нейтрали; u_1 – первая (основная) гармоническая составляющая; u_3 - третья гармоническая составляющая, которая по отношению к первой составляет $\approx 10\%$. Значения погрешностей $\Delta\psi$ промежуточных результатов вследствие влияния третьей гармоники, следующих с частотой 1.8 кГц, приведены на графике Рисунок 2.15, б.

Анализ результатов опыта показывает, что искажение кривой ПН незначительное. Результирующая кривая u_N и первая гармоника u_1 почти сливаются. Тем не менее, абсолютная погрешность, вносимая третьей гармоникой, изменяется по закону, носящим периодический характер, и составляет $\approx 12^\circ$, что на работу УВФ никак не может повлиять.

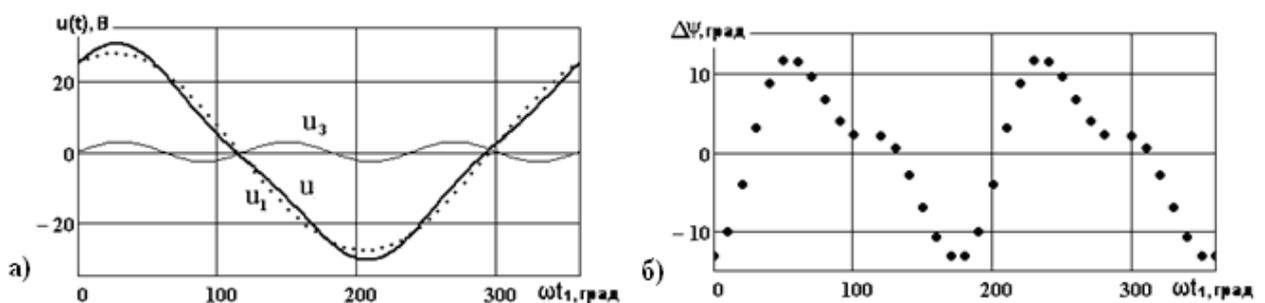


Рисунок 2.15. Исследование влияния третьей гармонической составляющей на погрешность определения аргумента:

- а) - графики гармонических составляющих потенциала нейтрали;
- б) - отклонение промежуточных значений аргумента, обусловленное искажением третьей гармоникой

Актуальность исследования влияния третьей гармоники может вызвать сомнение. Дело в том, что токи, ею обусловленные, не замыкаются в сети с изолированной нейтралью и, в сигнале, который подается на УВФ, составляющей третьей гармоники не может быть. Тем не менее, если в сети применяется компенсирующий дроссель, который при насыщении магнитной цепи генерирует третью гармонику, ток последней замыкается через сеть и дальше, разветвляясь на ее емкости и тело человека, попадет в состав сигнала, который подается на УВФ. При этом составляющая третьей гармоники по амплитуде может достигать 10% от основной [71]. С этой точки зрения выполненное исследование актуальное.

Результаты более неблагоприятной для УВФ ситуации, когда кривая потенциала нейтрали искажена одновременным действием четырех наиболее влиятельных гармоник: пятой, седьмой, одиннадцатой и тринадцатой, причем, каждая из них по амплитуде составляет 10 % от основной гармоники (Рисунок 2.16). Предложенный способ и алгоритм его реализации предназначены для сети с постоянной, стабильной частотой, поэтому сеть, которая питается от автономного преобразователя частоты, в данной работе не рассматривается. По отношению к реальной сети, в составе которой отсутствуют мощные нелинейные устройства, подобная ситуация кажется весьма завышенной. Тем не менее, необходимость такого исследования можно оправдать двумя факторами. Во-первых, нельзя полностью исключить влияние, например, мощных преобразователей частоты в соседней сети. Во-вторых, есть необходимость оценить запас статической устойчивости предложенного способа и алгоритма его реализации в условиях завышенного уровня высших гармонических составляющих.

На Рисунок 2.16, а обращает на себя внимание значительное искажение кривой потенциала нейтрали. В отдельных точках суммарные пики всех высших гармоник достигают 40% от амплитуды основной гармоники. Создается впечатление, что работать с этой кривой абсолютно невозможно.

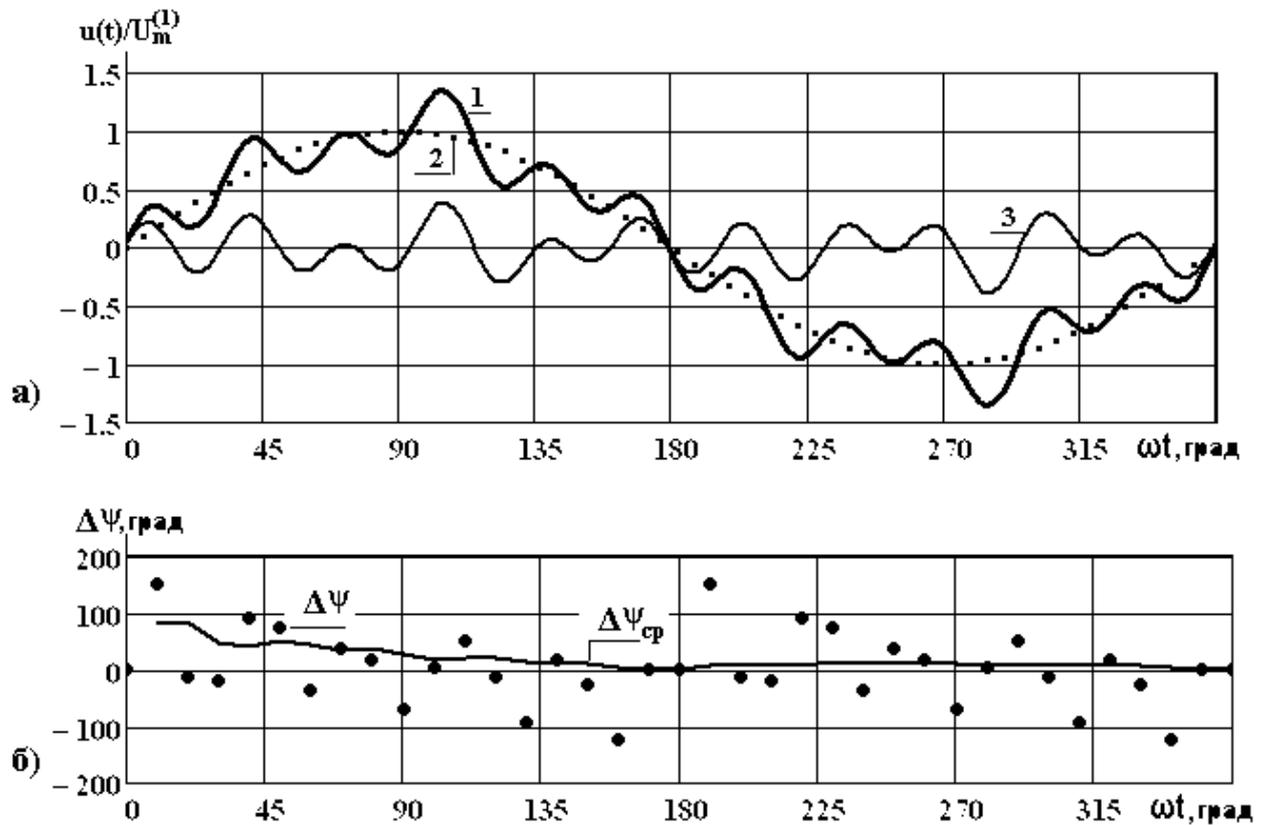


Рисунок 2.16. Исследование влияния высших гармоник на работу УВФ:

а) – графики мгновенных значений ПН: 1 – результирующая кривая; 2 – первая гармоника; 3 – сумма высших гармоник;

б) – погрешности расчетных значений аргумента ПН: $\Delta\psi_P$ - абсолютная погрешность промежуточных результатов; $\Delta\psi_{CP}$ - средняя погрешность серии результатов

На Рисунок 2.16, б приведены абсолютные (в градусах) погрешности в определении промежуточных результатов, которые определяются как разность между значениями аргумента, полученного алгоритмом УВФ, и аргументом первой гармонической составляющей, полученной из математической модели сети для установившегося режима.

Несмотря на значительные искажения кривой потенциала нейтрали (количество и величины высших гармоник по сравнению с "обычной" сетью завышены в несколько раз), алгоритм УВФ "добросовестно" отработал за период все 36 промежуточных результатов, которые следуют через каждые 10 градусов. Погрешности, которые вносятся высшими гармониками, превышают лю-

бые "разумные" границы. Некоторые из них достигают 160^0 . Тем не менее, среднее значение погрешности уже через (2 – 2.5) мс с момента включения в работу алгоритма снижается к "разумным" границам и имеет незначительные колебания относительно нуля (Рисунок 2.16, б).

В приложении Б приведены результаты аналогичного опыта (Рисунок Б.5.1), когда значение каждой из тех же высших гармоник (№№ 5, 7, 11, 13) увеличено в полтора раза и достигает 15% от основной. Кривая потенциала нейтралю настолько искажена, что применение к ней зависимости (2.3) кажется абсолютно неприемлемым. И все же алгоритм снова "добросовестно" отработал все 36 промежуточных результатов. Правда, их абсолютные погрешности возросли. Отдельные из них достигают 200^0 , что является недопустимым для идентификации фазы с утечкой. Тем не менее, обратим внимание на то, что среднее значение погрешности $\Delta\psi_{cp}$ уже через (4-5) миллисекунд пригодно для идентификации, а через 7 миллисекунд практически достигает нуля.

Главный вывод, который вытекает из последних двух исследований заключается в том, что по отношению к влиянию высших гармонических составных УВФ и алгоритм его функционирования имеют запас статической устойчивости, достаточный для того чтобы исследуемый способ рекомендовать для применения в комбинированных сетях, где, в частности, применяются преобразователи частоты [43, 54].

2.4 Выводы по разделу 2

1. Предложен быстродействующий способ определения фазы с утечкой, отличающийся тем, что с опорными фазовыми интервалами сопоставляется серия промежуточных значений аргумента ПН, определяемых из мгновенных значений последнего на основании гипотезы о его синусоидальном законе изменения.

2. Разработана математическая модель и алгоритм функционирования УВФ, реализующего предлагаемый способ путем многократного решения

трансцендентного уравнения, включающего отделение, проверку и устранение побочных корней.

3. Определены функциональные связи между сопротивлением утечки, ёмкостью сети, ее наибольшей постоянной времени и интегральным значением ПН, позволившие установить возможность и необходимость применения “плавающих” ОФИ, а также доказано, что смещение последних целесообразно осуществлять в функции интегрального значения ПН.

4. Доказано, что в области низкоомной утечки ($R_h < 5$ кОм, $C < 0.75$ мкФ) продольная несимметрия сети с разбросом параметров нагрузки до $\pm 70\%$, а также все виды поперечной несимметрии не снижают быстрдействие и статической устойчивости УВФ.

5. Установлено, что при снижении сопротивления изоляции двух фаз до границы срабатывания защитного отключения (предельный случай поперечной несимметрии), а "фоновый" сигнал ПН оказывается в противофазе к аварийному, чувствительность УВФ по сопротивлению утечки может снизиться до $R_h \approx 13$ кОм, а также доказано, что в области низкоомной утечки эта ситуация для алгоритма УВФ не критична.

6. Доказано, что в предельном случае воздействия высших гармонических составляющих (нечетные гармоники от 5-ой до 13-ой с амплитудами до 15% от основной) алгоритм УВФ имеет запас статической устойчивости, достаточный для использования исследуемого способа к в комбинированных сетях при условии постоянного уточнения частоты преобразователя, а при смене чередования фаз соответствующей перестановки ОФИ.

РАЗДЕЛ 3. АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЧИВОСТИ УВФ

3.1 Постановка задачи

Динамический режим сети, которым сопровождается возникновение утечки в одной из фаз, является наиболее весомым и наиболее разнообразным из всех возмущающих факторов. Разнообразие этого процесса обусловлено следующим:

- фаза коммутации (момент возникновения утечки), от которой зависит начальная величина динамической составляющей и, следовательно, интенсивность переходного режима, носит случайный характер и может иметь любое значение в пределах периода;
- сопротивление утечки и емкость сети также могут иметь широкий диапазон изменения своих значений, вследствие чего практическая длительность переходного режима может быть в пределах от нескольких миллисекунд до нескольких десятков миллисекунд.

Под динамической устойчивостью алгоритма УВФ считается его способность безошибочно и с достаточным быстродействием определять аварийную фазу сети при наиболее неблагоприятных условиях возникновения утечки. К последним, в частности, можно отнести динамический режим, обусловленный высокоомной утечкой при неблагоприятной фазе коммутации, тот же режим при одновременном действии нескольких высших гармоник, а также сложный динамический режим с резкими изменениями сопротивления утечки, когда на один, еще не законченный переходной процесс, накладывается следующий.

Математические модели, описывающие сеть в динамических режимах, связанных с возникновением утечки, приведены в приложении А (системы уравнений (А.1), (А.12), (А.13), (А.14), (А.15)).

Методика исследования заключается в следующем: пары мгновенных значений ПН $u(t_1)$ и $u(t_1+\Delta t)$, получаемые из математической модели в соответствии с принятой системой отсчета, проверяются по условию (2.7) и подаются

на математическую модель блока УВФ, где согласно его алгоритму определяются два корня функции (2.3). Одновременно из этой же пары данных согласно (2.6) определяется расчетное амплитудное значение ПН u_N^p , по которому проверяются полученные корни, отбрасывается “лишний”, а также определяется интегральное (среднее по модулю) значение амплитуды ПН U_N^{cp} (эта величина в дальнейшем используется как побочный источник информации о фактическом значении амплитуды ПН). После обработки всех данных выводятся промежуточные значения аргумента ψ , а также ему соответствующие (для данной пары данных) значения u_N^p и U_N^{cp} .

Дополнительно из математической модели динамического режима сети (А.1) или (А.12) определялись аргумент установившейся составляющей ПН $\psi_{рсч}$, а также предельные некорректированные значения границ ОФИ $\beta_{зр}$ и текущее среднее по модулю значение ПН.

Исследования выполнялись для разных значений сопротивления утечки в пределах от 1 кОм до 20 кОм, при разных моментах коммутации, при наличии поперечной несимметрии, а также при суммарном действии нескольких высших гармонических составляющих.

Мгновенные значения ПН и, следовательно, промежуточные значения ψ , а также границы ОФИ $\beta_{зр}$ через линейное напряжение u_{AB} связаны с общей системой отсчета. Интенсивность переходного режима достигается подбором момента коммутации, при котором свободная составляющая ПН имела бы экстремальное начальное значение, а его продолжительность соответствующим подбором параметров R , R_h и C .

Задачи раздела:

1. Исследовать работу алгоритма УВФ в условиях наиболее неблагоприятных переходных режимов сети.
2. Оценить показатели динамической устойчивости алгоритма в условиях действия нескольких возмущающих факторов одновременно.

3. Исследовать работу алгоритма УВФ в условиях неоднократного ступенчатого изменения сопротивления утечки.

3.2 Работа УВФ при интенсивном переходном процессе в сети

Результаты наиболее неблагоприятного переходного [68] режима приведены на Рисунок 3.1, а, где обозначено: u , u_y , $u_{св}$ – соответственно мгновенные значения ПН, его установившаяся и свободная составляющие; u_N^p - промежуточное значение амплитуды ПН, получаемое в БПР знак которой, согласно (2.6), используется алгоритмом УВФ для отбрасывания стороннего корня; U_N^{cp} – текущее интегральное (среднее по модулю) значение той же амплитуды.

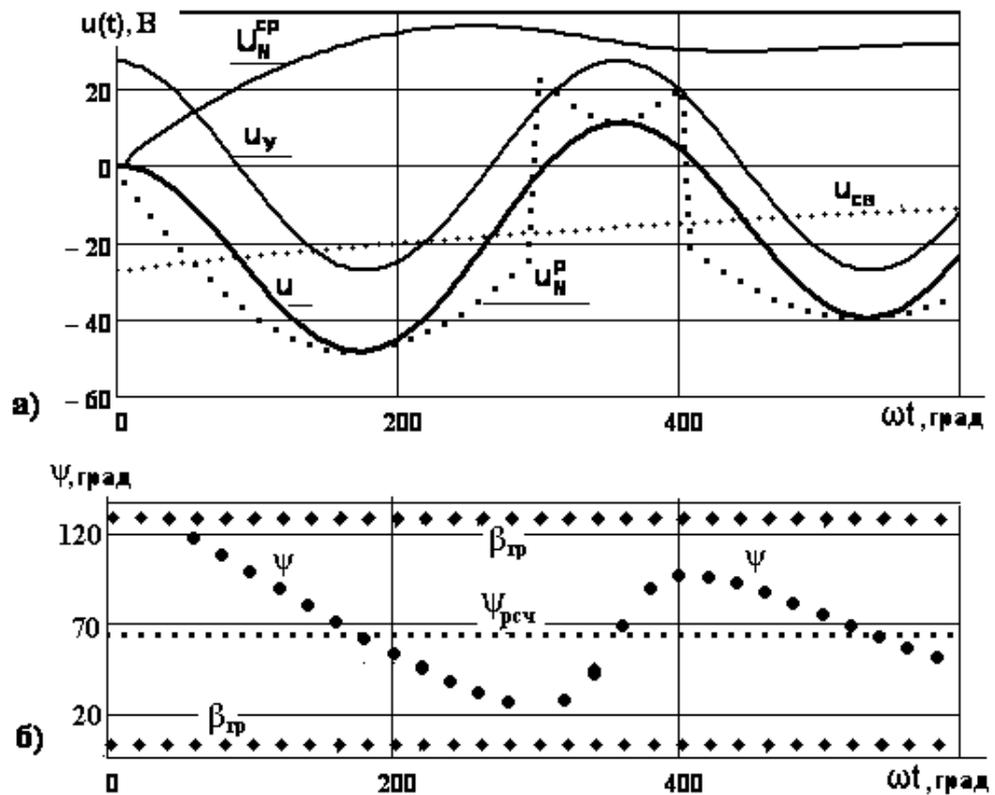


Рисунок 3.1. Работа УВФ в условиях неблагоприятного динамического режима после возникновения утечки:

- а) кривые составляющих переходного процесса;
 б) промежуточные и расчетные значения аргумента ПН

На Рисунок 3.1, б обозначено:

ψ – расчетное значение аргумента ПН по данным модели алгоритма УВФ;

$\psi_{рсч}$ – расчетное (теоретическое) значение аргумента установившейся составляющей ПН по данным математической модели сети;

$\beta_{зр}$ - некорректированные границы ОФИ.

Условия опыта: $U = 660$ В, $R_h = 20$ кОм, $C = 1$ мкФ, наибольшая постоянная времени $\tau_{max} = 0.038$ с (675 градусов).

В данном опыте практическая продолжительность переходного процесса составляет около пяти периодов (≈ 100 мс). Ожидать на его окончание для "спокойной" идентификации поврежденной фазы, означает подвергать человека под напряжением серьезной дополнительной опасности. С другой стороны, как видно из Рисунок 3.1, б часть результатов ψ , колеблющихся относительно расчетного значения $\psi_{рсч}$, в области ωt от 220^0 до 350^0 "выплескивается" за нижнюю границу опорного интервала. Тем не менее, это еще не означает возможности ошибки в определении поврежденной фазы. Алгоритмом предполагается подобная ситуация. Во-первых, конечное решение принимается по среднему значению серии $\psi_{ср}$ (2.16), которое не выходит за пределы опорного интервала. Во-вторых, есть возможность смещения (коррекции) опорных интервалов "вниз", поскольку значение аргумента ψ из-за высокоомной утечки находится рядом с нижней границей $\beta_{зр}$. В-третьих, алгоритмом предусмотрена дополнительная подстраховка. Она заключается в дополнительной проверке условия о том, что среднее значение серии промежуточных результатов $\psi_{ср}$ должно превышать нижнюю границу опорного интервала не менее чем на 10^0 .

Очевидно, что при выполнении всех этих условий надежная идентификация фазы с утечкой выполняется уже в первой половине периода (≈ 0.01 с), несмотря на то, что к окончанию переходного режима все еще остается не меньше четырех периодов.

На Рисунок 3.2, а приведены результаты аналогичного опыта, но с сопротивлением утечки, уменьшенным до $R_h = 5$ кОм. Это значение считается наиболее вероятным для человека. Поскольку все обозначения на Рисунок 3.1 и Ри-

сунок 3.2 идентичны, отличаясь только сопротивлением утечки, есть возможность взаимного сравнения результатов.

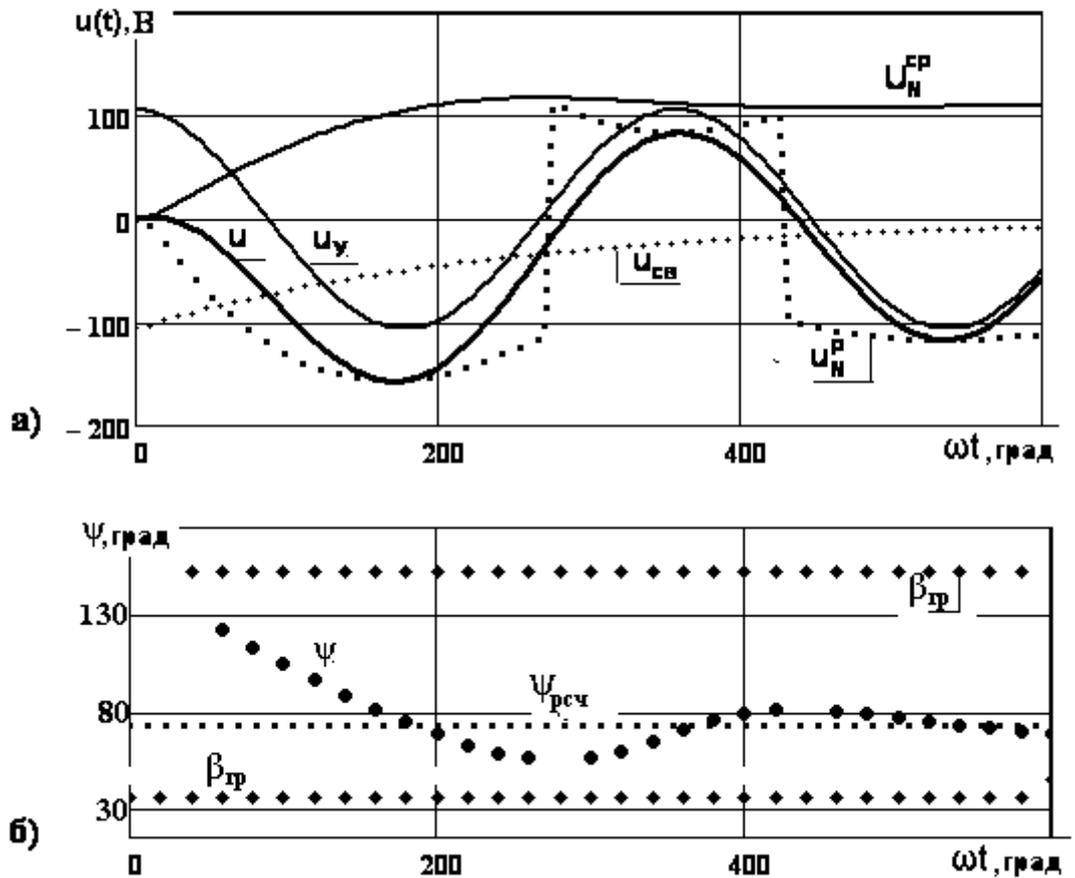


Рисунок 3.2. Работа УВФ в условиях динамического режима сети при сопротивлении утечки ($R_h = 5$ кОм):

а) – кривые мгновенных значений составляющих ПН;

б) – текущие значения аргумента ПН.

Условия опыта: $U = 660$ В, $R_h = 5$ кОм, $C = 1$ мкФ, наибольшая постоянная времени $\tau_{max} = 0.013$ с ($\approx 235^0$)

Основная особенность в сравнении этих двух опытов заключается в том, что во втором опыте наибольшая постоянная времени τ_{max} уменьшилась почти в четыре раза. Соответственно уменьшается практическая продолжительность переходного процесса и, что более важно, существенно уменьшены возмущения, которые вносятся динамическими составляющими. Вследствие этого все промежуточные результаты ψ находятся в пределах "своего" опорного интерва-

ла, а конечное решение может быть принято даже без применения тех трех условий, которые оказались необходимыми в первом опыте.

Обратим внимание на следующую особенность выполненных исследований. На Рисунок 3.1, а и Рисунок 3.2, а показаны графики двух величин: u_N^p - расчетное значение амплитуды ПН, знак которой, используется для отбрасывания сторонних корней уравнения (2.3), и интегрального значения этой величины U_N^{cp} , определяемой выражением:

$$U_{N_i}^{cp} = \frac{1}{m} \sum_i |u_{N_i}^p| \quad (3.1)$$

Первая из этих величин u_N^p , несет все бремя погрешностей и возмущений, что и промежуточные значения ψ , поскольку обе величины являются результатом решения той же системы уравнений (2.1) и (2.2). По этой причине ее практическое применение сомнительно (кроме соотношения (2.6), как уже отмечено). Тем не менее, вторая величина U_N^{cp} может быть использована как источник побочной информации о фактическом значении амплитуды ПН.

Действительно, обратим внимание на поведение кривой на Рисунок 3.2, а. Уже через половину периода эта величина достигает значения, равного амплитуде установившейся составляющей ПН. На Рисунок 3.1, а поведение этой функции аналогично. Она также за половину периода достигает своего фактического значения, относительно которого совершает незначительные колебания, обусловленные помехами продолжительного переходного процесса.

Результаты аналогичных исследований при сопротивлениях утечки 10 кОм и 1 кОм приведены в приложении В. Там же приведены результаты серии опытов для одного и того же сопротивления утечки ($R_h = 15$ кОм) при различных значениях фазы коммутации, т.е. для различной интенсивности переходного процесса.

3.3 Анализ работы УВФ при действии нескольких возмущающих факторов

Проанализируем результаты опыта, который считается наиболее неблагоприятным для работы алгоритма УВФ из всех ранее рассмотренных (Рисунок 3.3). Сопротивление утечки максимальное ($R_h = 20$ кОм), момент коммутации отвечает условию наибольшей динамической составляющей, практическая продолжительность переходного процесса превышает пять периодов и, кроме того, в составе потенциала нейтрали одновременно действуют пятая и седьмая гармонические составляющие, амплитуды которых составляют 10% от амплитуды установившейся составляющей основной гармоник.

На Рисунок 3.3, а обозначено:

u_y – установившаяся составляющая первой гармоник ПН; $u_{св}$ – свободная составляющая ПН;

u – мгновенное значение ПН; $u^{(5)} + u^{(7)}$ – суммарная кривая пятой и седьмой гармоник;

u_N^p , u_N^i – соответственно расчетное и интегральное значение амплитуды ПН по данным алгоритма УВФ.

На Рисунок 3.3, б приведены промежуточные ψ (по данным модели УВФ), расчетные $\psi_{рч}$ (по данным модели сети) значения аргумента ПН, среднее значение промежуточных результатов $\psi_{ср}$, а также некорректированные границы ОФИ $\beta_{ср}$.

На Рисунок 3.3, в приведены те же значения аргумента ПН, но для ситуации, когда границы ОФИ скорректированы согласно (2.17).

Из-за действия нескольких наиболее влиятельных возмущающих факторов наблюдается значительное искажение кривой u , вследствие чего "разброс" расчетных значений аргумента ψ превышает 100° (Рисунок 3.3, б). Более того, почти треть их оказывается за пределами опорного интервала. Тем не менее, среднее значение этой функции $\psi_{ср}$ полностью находится в пределах опорного интервала, постепенно приближаясь к своему расчетному значению $\psi_{рч}$. Тем не

менее, расчетное значение находится весьма близко к нижней границе опорного интервала, что снижает запас динамической устойчивости УВФ.

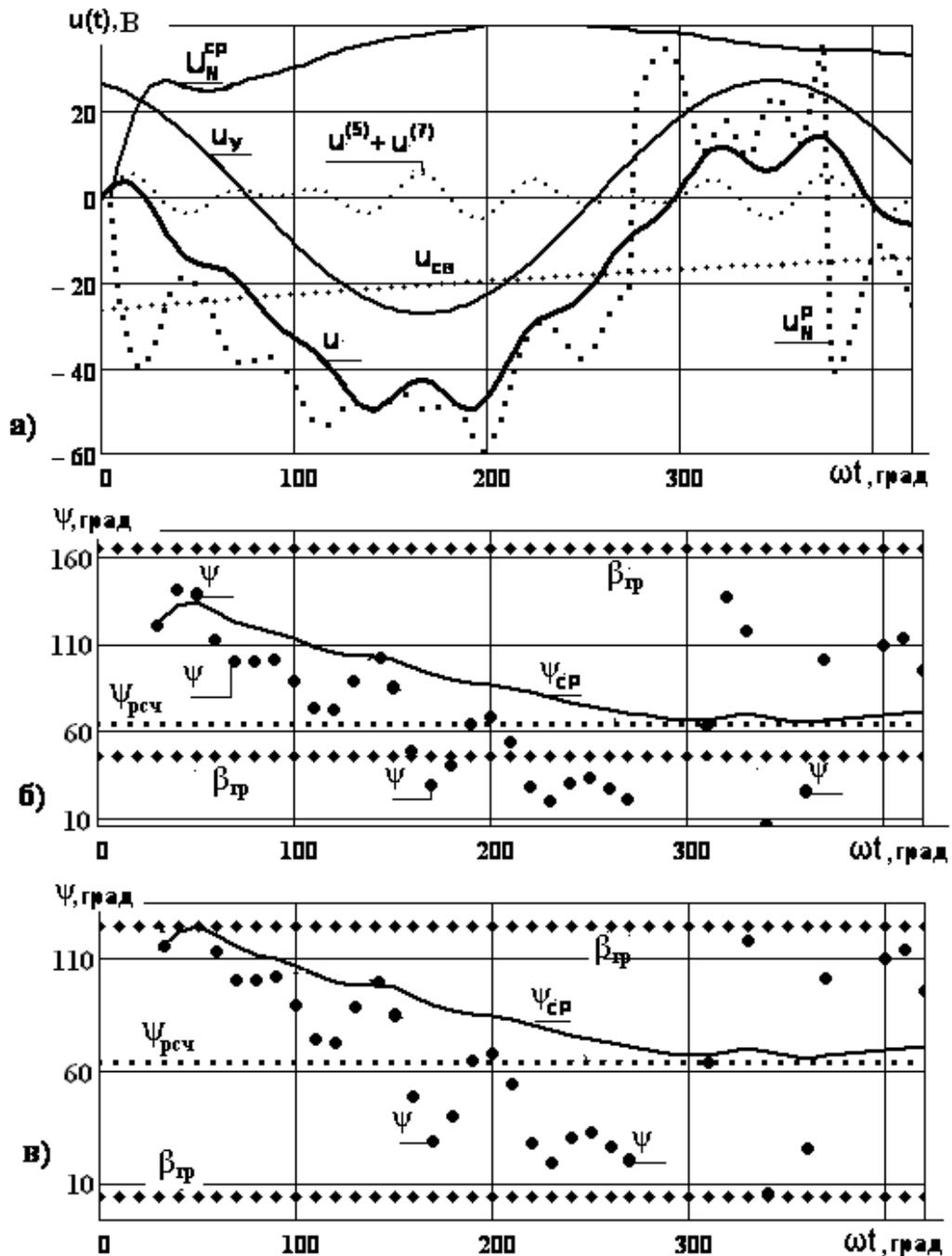


Рисунок 3.3. Работа УВФ при неблагоприятном динамическом режиме сети и действия двух высших гармонических составляющих:

- а) - кривые мгновенных значений составляющих ПН;
- б) - текущие значения аргумента ПН;
- в) - текущие значения аргумента ПН, но при скорректированных границах опорных интервалов

Однако, если скорректировать границы опорных интервалов согласно условию (2.17), то практически все промежуточные результаты ψ оказываются в пределах "своего", уже скорректированного интервала Рисунок 3.3, в. Если же конечное решение принимать по среднему значению ψ_{cp} , то алгоритм даже в данном неблагоприятном опыте приобретает определенный запас динамической устойчивости и можно быть уверенным, что кратковременные возмущения в сети (коммутации мощных выключателей, например), не приведут к принятию ошибочного конечного решения.

Но можно ли в алгоритме УВФ достичь выполнения условия (2.17)? Для применения "плавающих" опорных интервалов необходима информация или о сопротивлении утечки, или об амплитуде ПН, или о его среднем (по модулю) значению. Поскольку при работе алгоритма данная информация отсутствует, обратимся снова к двум кривым на Рисунок 3.3, а. Первая из них u_N^p , являясь результатом решения системы (2.1) и (2.2), ведет себя крайне "бурно" и непредсказуемо, вследствие чего ее практическое применение невозможно. В то же время, вторая зависимость U_N^{cp} достигает значения амплитуды первой гармоники установившейся составляющей менее чем за четверть периода, т.е. вдвое быстрее, чем в предыдущих опытах. Правда, интегральное значение амплитуды U_N^{cp} продолжает колебание относительно фактического значения амплитуды ПН, что безусловно вносит определенные погрешности. На Рисунок 3.3, а наибольшая погрешность вносится при $\omega t \approx 220^\circ$ и составляет около 50 %, что безусловно обозначится на точности смещения опорного интервала. Но имеет ли эта погрешность решающее значение? Среднее значение промежуточных результатов ψ_{cp} (Рисунок 3.3, б) уже через половину периода становится достаточно стабильным для принятия надежного однозначного решения и без смещения опорных интервалов. И все-таки, их смещение разрешает повысить запас динамической устойчивости алгоритма и является, кроме того, дополнительной подстраховкой на случай возможных непредвиденных факторов.

3.4 Работа УВФ в условиях скачкообразного изменения сопротивления утечки

Сопротивление человека R_h , попавшего под напряжение, зависит от многих факторов (характер прикосновения, одежда, обувь, физиологическое и психическое состояние и т.п.) и может меняться в широких границах. Кроме того, это сопротивление может за короткое время изменяться вследствие электрического пробоя одежды (обуви), кожи или других факторов, причем, закон его изменения предусмотреть практически невозможно. В этой ситуации динамический режим сети характеризуется несколькими этапами, которые сменяют друг друга в моменты изменения сопротивления утечки. При этом на переходной процесс одного этапа, который, как правило, не успевает закончиться, накладывается переходной процесс следующего.

Поскольку закон изменения сопротивления человека R_h неизвестен, анализируется вариант, при котором сопротивление утечки изменяется скачкообразно в сторону его уменьшения. Этот вариант считается наиболее неблагоприятным с точки зрения динамической устойчивости УВФ. Необходимость исследования работоспособности алгоритма в подобных условиях не вызывает сомнений.

Методика исследования, в основном, повторяет предыдущие опыты за исключением того, что в момент очередной коммутации в модели сети скачком менялось сопротивление утечки, а значения ее переменных состояния запомнились, образуя начальные условия для нового переходного процесса. Работа модели УВФ продолжалась в обычном режиме.

Результаты этого исследования приведены на Рисунок 3.4, где обозначено (Рисунок 3.4, а):

- 1 – момент первой коммутации ($\omega t = 25^0$, сопротивление утечки $R_h = 15$ кОм, наибольшая постоянная времени $\tau = 31$ мс);
- 2 – момент второй коммутации ($\omega t = 200^0$, $R_h = 5$ кОм, $\tau = 13$ мс);
- 3 – момент третьей коммутации ($\omega t = 320^0$, $R_h = 1$ кОм, $\tau = 2.9$ мс);
- i – мгновенное значение ПН.

На Рисунок 3.4, б обозначено: ψ , $\psi_{pсч}$ – соответственно промежуточные (следуют с частотой 900 Гц) и расчетные (теоретические) значения аргумента ПН; $\beta_{зр}$ – некорректированные границы опорного фазового интервала.

Кроме того, в математическую модель сети введена поперечная несимметрия: сопротивление изоляции в фазе В снижено на 70% и доведено до 50 кОм, а в фазе С повышено на 50%. (Следует отметить, что повышение сопротивления изоляции одной из фаз практически не влияет на динамику сети, в то время как снижение этого сопротивления влияет существенно и приближает сеть к режиму, который специалисты называют "двухфазной утечкой". Именно к этому режиму приближается данный эксперимент.

За время между первой и второй коммутациями ($25^0 < \omega t < 200^0$, что составляет ≈ 8 мс), когда сопротивление утечки максимальное ($R_h = 15$ кОм), а переходной процесс затянутый, вносятся наибольшие погрешности. Вследствие этого закон изменения промежуточных результатов ψ близок к тем, что приведены на Рисунок 3.1 и Рисунок 3.3. После второй коммутации ($200^0 < \omega t < 320^0$, что составляет ≈ 6.5 мс) переходной процесс менее затянут и промежуточные значения ψ быстрее и все более уверенно приближаются к своему расчетному значению.

Этот процесс более похож на переходной режим, что приведен на Рисунок 3.2, когда при $R_h = 5$ кОм алгоритм УВФ практически нечувствителен к поперечной несимметрии. Тем не менее, в точке $\approx 270^0$, где ПН переходит через нуль (Рисунок 3.4, б) наблюдается пропуск очередного значения ψ из-за выполнения алгоритмом условия (2.8). Подобные пропуски могут вызвать несущественные задержки алгоритма в принятии решения (до 1 мс).

После третьей коммутации сопротивление утечки наименьшее ($R_h = 1$ кОм). При этом значении R_h практическая длительность последнего переходного процесса снижается до 6 мс. В этих условиях промежуточные результаты ψ достигают своего расчетного значения ψ почти мгновенно (за 2 мс, как это вытекает из Рисунок 3.4, б). Этот факт можно считать наиболее характерным для данного опыта. Сущность его заключается в том, что при незначи-

тельном сопротивлении утечки даже при наличии дополнительных возмущающих факторов (поперечной несимметрии, например) УВФ надежно и с максимальным быстродействием обрабатывает свою функцию по определению фазы с утечкой. Можно принять это за кощунство, но, как видим, резкое ухудшение состояния человека под напряжением вследствие электрического пробоя его одежды или кожи, что приводит к снижению его сопротивления, резко повышает быстродействие и надежность УВФ, ускоряя процесс идентификации.

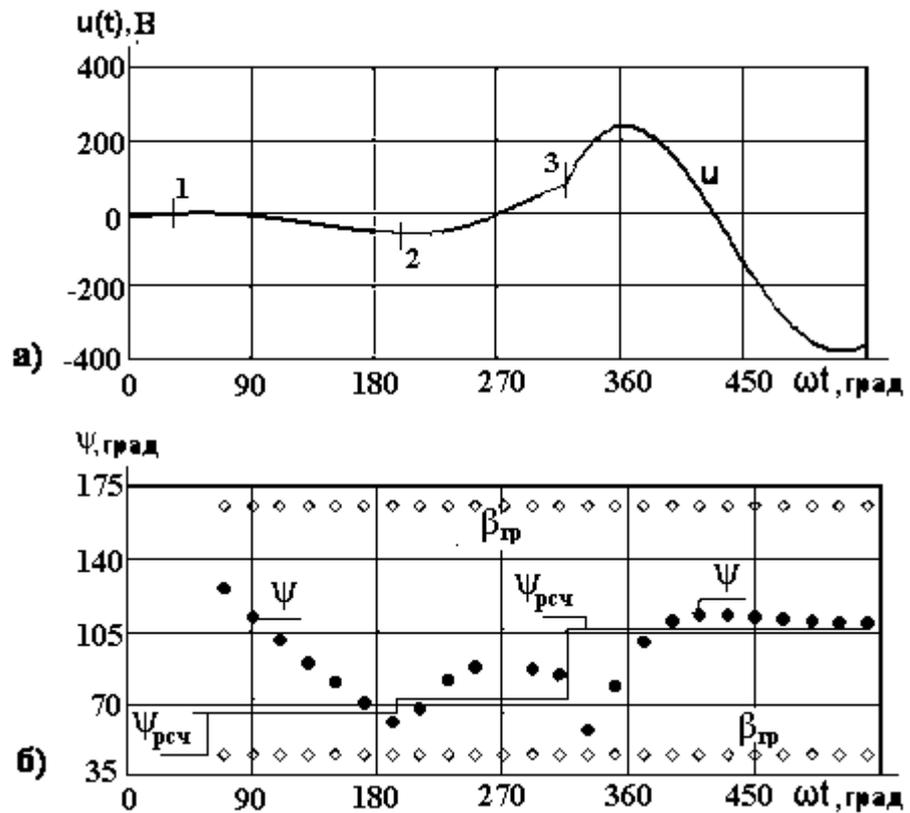


Рисунок 3.4. Работа УВФ в условиях двух скачкообразных изменений сопротивления утечки:

- а) - кривая мгновенного значения ПН;
- б) - текущие значения аргумента ПН.

3.5 Выводы к разделу 3

1. Установлено, что при неблагоприятных условиях переходного процесса ($R_h \approx 20$ кОм, $C = 1$ мкФ), когда его практическая длительность достигает почти пяти периодов (≈ 100 мс), блоки УВФ в достаточной мере выполняют свои функции, однако часть промежуточных результатов оказывается за нижней границей своего ОФИ, что приводит к задержке в принятии решения, для компенсации которой необходимо смещение ОФИ.
2. Доказано, что динамическую устойчивость способа и алгоритма в области высокоомной утечки, а также его быстродействие и надежность в принятии решения, можно повысить, придерживаясь следующих условий:
 - принятие решения выполняется на основе среднего значения серии промежуточных результатов ψ_{cp} ;
 - применение "плавающих" ОФИ, смещение которых осуществляется в функции среднего по модулю значения ПН;
 - перед принятием решения выполнять проверку запаса устойчивости, определяемой разностью между средним значением серии промежуточных результатов и нижней границей ОФИ.
3. Установлено, что в области низкоомной утечки ($R_h \leq 5$ кОм) даже при наибольшей емкости сети ($C = 1$ мкФ) и неблагоприятных условиях коммутации УВФ определяет все промежуточные результаты в пределах "своего" опорного интервала даже в том случае, когда не выполняются три условия повышения динамической устойчивости алгоритма.
4. Доказано, что при скачкообразном уменьшении сопротивления утечки, характерного для человека, оказавшегося под напряжением, динамические возмущения, обусловленные наложением нового переходного процесса на предыдущий, в значительной мере компенсируются

возрастанием ПН и, кроме того, снижается влияние помех, обусловленных поперечной несимметрией или высшими гармониками.

5. Установлено, что продолжительность времени с момента запуска БПР серии, достаточная для надежной идентификации поврежденной фазы, находится в пределах от 3 мс (низкоомная утечка $R_h < 5$ кОм, коммутация благоприятная) до 10 мс (высокоомная утечка $R_h > 10$ кОм, коммутация неблагоприятная).

РАЗДЕЛ 4. АНАЛИЗ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ УВФ

4.1 Уточнение технических требований к УВФ

В симметричном режиме при отсутствии помех или возмущений ПН равен (близок) к нулю. В статическом режиме однофазной утечки, когда сопротивление R_h изменяется в интервале от бесконечности к нулю, ПН изменяется соответственно от нуля до значения номинального фазного напряжения. При этом его аргумент (начальная фаза) возрастает от нижней границы на четверть периода.

В том случае, когда система отсчета "привязана" к линейному напряжению u_{AB} , опорные фазовые интервалы имеют следующие (теоретические) значения:

$$\begin{aligned}
 &\text{для фазы А от } 60^0 \text{ до } 150^0 ; \\
 &\text{для фазы С от } 180^0 \text{ до } 270^0 ; \\
 &\text{для фазы В от } 300^0 \text{ до } 390^0 \text{ (или от } -60^0 \text{ до } 30^0 \text{ градусов)}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Свободные промежутки между интервалами (4.1), составляющие 30^0 , используются для расширения теоретических интервалов ОФИ. Последние выполняются двухступенчатыми ("плавающими") и расширяются следующим образом (рис. 4.1):

$$\begin{aligned}
 &\text{от } 35^0 \text{ до } 155^0 && \text{для } U_w/U_\phi > 0.3 \text{ или } \tau < 7\text{мс} \text{ утечка в фазе А;} \\
 &\text{от } 5^0 \text{ до } 125^0 && \text{для } U_w/U_\phi < 0.3 \text{ или } \tau > 7\text{мс} \text{ утечка в фазе А;} \\
 &\text{от } -85^0 \text{ до } 35^0 && \text{для } U_w/U_\phi > 0.3 \text{ или } \tau < 7\text{мс} \text{ утечка в фазе В;} \\
 &\text{от } 245^0 \text{ до } 5^0 && \text{для } U_w/U_\phi < 0.3 \text{ или } \tau > 7\text{мс} \text{ утечка в фазе В;} \\
 &\text{от } 125^0 \text{ до } 245^0 && \text{для } U_w/U_\phi > 0.3 \text{ или } \tau < 7\text{мс} \text{ утечка в фазе С;} \\
 &\text{от } 155^0 \text{ до } 275^0 && \text{для } U_w/U_\phi < 0.3 \text{ или } \tau > 7\text{мс} \text{ утечка в фазе С;}
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Эти границы (4.2), определенные в разделе 2 как предварительные, и которые должны быть уточнены результатами экспериментальных исследований, выполненные теоретические исследования (разделы 2 и 3) в целом подтвердили их работоспособность.

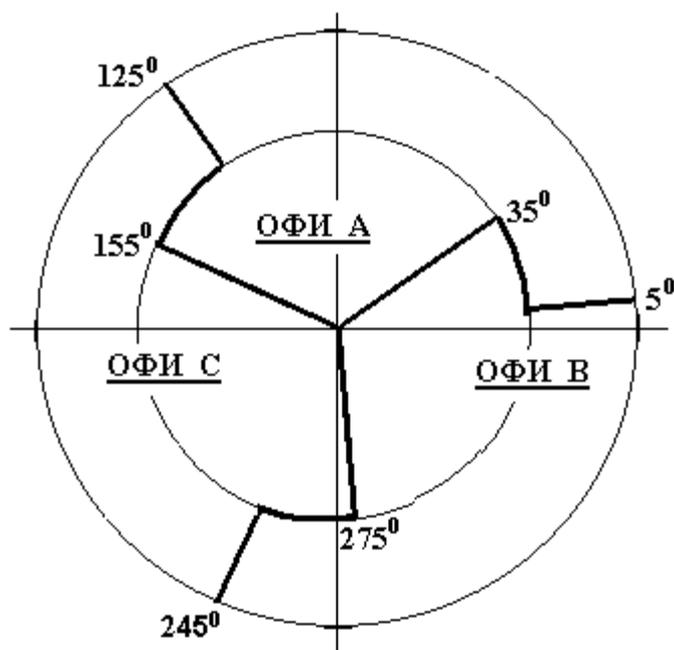


Рисунок 4.1. Границы опорных фазовых интервалов при двухступенчатой коррекции.

Для уточнения требований к УВФ проведем краткий анализ результатов выполненных исследований.

Во-первых, погрешности, которые в установившемся режиме сети вносятся в исходные данные (2.8), при их усреднении частично компенсируются, вследствие чего абсолютная погрешность среднего значения серии промежуточных результатов характеризуется четко выраженной тенденцией к уменьшению. Это подтверждается исследованиями не только коэффициента погрешности для установившегося режима (Рисунок 2.8), но и высших гармонических составляющих (Рисунок 2.11 и Рисунок 2.12). В частности, по отношению к высшим гармоникам помехоустойчивость УВФ возрастает в несколько раз, учитывая периодический характер вносимых при этом абсолютных погрешностей.

Во-вторых, поперечная несимметрия сети, как дополнительный источник погрешностей, проявляет себя только в области повышенных сопротивлений утечки, когда $R_h > 10$ кОм (Рисунок 2.14). Сущность этого фактора заключается в том, что все промежуточные результаты (вместе со своими погрешностями) могут сместиться почти к нижней границе "своего" ОФИ. Рациональным решением этой проблемы является применение "плавающих" интервалов с приближением их к условию (2.17).

В-третьих, при динамическом режиме сети, который является основным в работе УВФ, повышенное сопротивление утечки не только приводит к смещению всех промежуточных результатов (и всех привносимых погрешностей) к нижней границе ОФИ, но и к затягиванию переходного процесса (Рисунок 3.1, Рисунок 3.2 и Рисунок 3.3 и др.). Если в этом случае принятие решения по среднему значению есть желательным, то применение "плавающих" интервалов становится необходимостью. Нельзя также исключить действие нескольких факторов одновременно, включая и высшие гармонические составляющие.

Кроме того, в сети возможны кратковременные, иногда непредвиденные, динамические возмущения, обусловленные, например, коммутацией мощных потребителей, неодновременным замыканием (или размыканием) контактов коммутирующих устройств или скачкообразным изменением напряжения. В этих условиях нельзя исключить ошибочный запуск в работу блока определения промежуточных результатов УВФ. Очевидно, что при этом нельзя допустить ошибочное срабатывание защиты, если аварийный сигнал кратковременный, или не носит системного характера.

На основании всех выполненных исследований и анализа их результатов можно уточнить требования к УВФ и алгоритму его функционирования [63]:

1. Для исключения ошибочного срабатывания защиты вследствие, например, помех, обусловленных коммутацией мощных приводов или другими кратковременными динамическими возмущениями, алгоритмом УВФ должно осуществляться постоянное слежение за наличием утечки.

2. Блок промежуточных результатов должен не только надежно определять корни функции, имеющей разрывы второго рода ("прыжки" в бесконечность), но и безошибочно отбрасывать побочные из них, а также приводить промежуточные результаты к основному интервалу и осуществлять их усреднение.
3. Блок принятия решения, исходя из текущего интегрального значения амплитуды ПН или его среднего по модулю значения, осуществляет коррекцию (смещение) ОФИ, определяет ОФИ, к которому относится среднее значение аргумента ПН, и после дополнительной проверки запаса устойчивости УВФ принимает конечное решение.

Для выполнения первого пункта (постоянное слежение за наличием утечки) сигнал о ее наличии необходимо связать с какой-либо интегральной характеристикой, однозначно зависящей от поперечных параметров сети (сопротивления утечки R_h , емкости C и сопротивления изоляции R). Анализ показывает, что в наибольшей мере для этого подходит интегральное (среднее по модулю) значение потенциала нейтрали U_u .

$$U_u = \frac{1}{t} \int_0^t |u(t)| dt \quad (4.3)$$

Таким образом, величина (4.3), кроме своей основной функции: запуска в работу БПР, становится фактором контроля наличия утечки, благодаря чему исключается возможность ложного включения защитного шунтирования.

Интервал времени Δt_1 с момента возникновения утечки до момента достижения интегральным значением U_u порога запуска БПР зависит от характера переходного процесса, начальной фазы коммутации, величины сопротивления утечки и поперечной несимметрии сети. Это время носит случайный характер и имеет большой разброс значений, который можно считать недостатком функции (4.3). Тем не менее, применение интегрального значения ПН имеет ряд преимуществ:

1. Функция (4.3) непрерывна, всегда положительна, и, как следствие, удобна для запуска БПР и контроля наличия утечки.
2. При кратковременном ошибочном возникновении утечки и следующем ее исчезновении интегральное значение (4.3) плавно уменьшается, работа БПР прекращается, предотвращая ошибочное срабатывание защитного шунтирования.
3. Функция (4.3) имеет сглаживающие свойства, что особенно важно при резком изменении ПН (коммутационные возмущения, высшие гармоники или скачкообразное изменение сопротивления утечки).

4.2 Особенности реализации "плавающих" опорных интервалов

Целью применения "плавающих" опорных фазовых интервалов, как уже отмечалось (раздел 2), является повышение устойчивости предложенного способа к помехам и искажениям со стороны сети, не уменьшая при этом его быстродействия [31]. Достижение этой цели возможно при наличии интегральных характеристик, зависящих от сопротивления утечки, других поперечных параметров сети и, кроме того, учитывающих возможную поперечную несимметрию.

С формальной точки зрения для этой цели может подойти интегральное (среднее по модулю) значение амплитуды ПН U_N^{cp} . Для ее получения можно использовать расчетное значение амплитуды ПН (2.6), являющееся побочным продуктом БПР и используемое при решении системы (2.1) и (2.2), а также уравнения (2.3). Свойства зависимости $U_N^{cp}(\omega t)$ были исследованы в разделе 3 (Рисунок 3.1 и Рисунок 3.2).

Второй интегральной характеристикой является среднее по модулю значение ПН U_u , также используемое в УВФ для фиксации и контроля наличия утечки.

Из сопоставления этих двух величин следует, что вторая из них (среднее значение ПН) имеет несомненные преимущества, состоящие в следующем. Во-

первых, интегральное значение U_N^{cp} обретает свою весомость (и доверительность) спустя несколько миллисекунд после запуска БПР, в то время как величина U_u готова к работе немедленно. Во-вторых, величина U_u по сравнению с U_N^{cp} в меньшей мере подвержена погрешностям и искажениям.

Таким образом, среднее значение ПН становится основной характеристикой, необходимой для определения момента возникновения утечки, контроля ее наличия и управления смещением ОФИ. Что же касается текущих значений расчетных амплитуд ПН, то за ними сохраняется важнейшая функция по определению истинных и отбрасыванию сторонних корней при решении уравнения (2.3).

Дальнейшая задача заключается в определении функциональной зависимости среднего ПН от параметров сети, включая, крайние, наиболее неблагоприятные, случаи поперечной несимметрии, а также оценка возможностей использования этой зависимости для управления смещением ОФИ.

Методика исследования заключается в анализе математической модели сети в установившемся режиме однофазной утечки (приложение Б, система (Б.1), Рисунок Б.2.1), из которой определяются функциональная связь между аргументом ПН и средним значением U_u для интервала сопротивления утечки $1 \text{ кОм} < R_h < 20 \text{ кОм}$. Для оценки влияния поперечной несимметрии применялись ее крайние проявления, когда сопротивление изоляции одной из фаз (отстающей или опережающей) снижалось до критического значения, находящегося на уровне срабатывания защитного отключения.

На Рисунок 4.2 приведены зависимости $\psi(U_u)$ для симметричной сети и двух крайних случаев поперечной несимметрии для емкости сети $C = 1 \text{ мкФ/фазу}$. Особенность этих результатов в том, что поперечная несимметрия, даже в крайних проявлениях, на интервале $U_u/U_\phi > 0.3$ ($R_h < 5 \text{ кОм}$) практически не сказывается на исследуемой зависимости $\psi(U_u)$.

Тем не менее, в области высокоомной утечки вносимая абсолютная систематическая погрешность возрастает, и при $R_h \approx 20 \text{ кОм}$ достигает ± 220 , при-

чем, по мере возрастании сопротивления утечки вносимая погрешность имеет тенденцию к резкому возрастанию.

Следующая группа опытов (Рисунок 4.3) выполнена для тех же условий, но емкость сети уменьшена в пять раз ($C = 0.25$ мкФ/фазу). Основная особенность этих результатов состоит в том, что снижение сопротивления опережающей фазы проявляется более интенсивно по сравнению с влиянием отстающей.

Следует также отметить, что систематические погрешности, вносимые несимметрией опережающей фазы, являются положительными и, к тому же, проявляют себя при большем значении среднего ПН для тех же значений R_h .

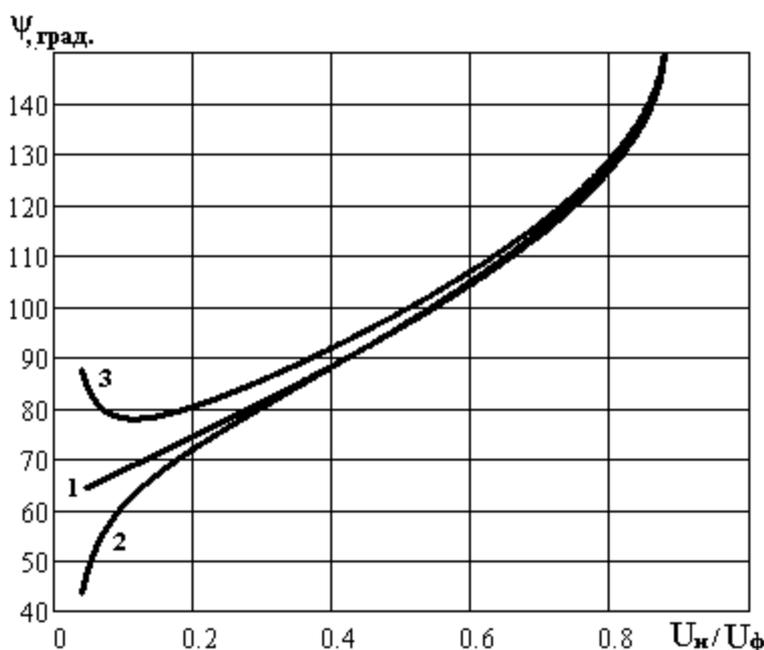


Рисунок 4.2. Зависимости $\psi(U_u)$ при изменении сопротивления утечки в интервале от 1 кОм до 20 кОм при максимальной емкости сети ($C = 1$ мкФ).

- 1 – сеть симметрична;
- 2 – снижение сопротивления в отстающей фазе;
- 3 – снижение сопротивления в опережающей фазе

Систематические погрешности, вносимые несимметрией отстающей фазы, носят менее выраженный характер. Они являются отрицательными и проявляются при большем сопротивлении утечки ($R_h > 10$ кОм). Более того, кривые $\psi(U_u)$ для симметричного режима и для несимметрии, вносимой отстающей фазой, переплетаются (кривые 1 и 2, рис.4.3), вследствие чего систематическая

погрешность меняет знак в области $U_u / U_\phi \approx 0.45$, что соответствует сопротивлению утечки для заданной емкости $R_h \approx 7$ кОм.

Абсолютная систематическая погрешность, вносимая отстающей фазой при поперечной несимметрии при $R_h = 20$ кОм составляет $\approx -18^\circ$, а опережающей фазой $\approx 26^\circ$.

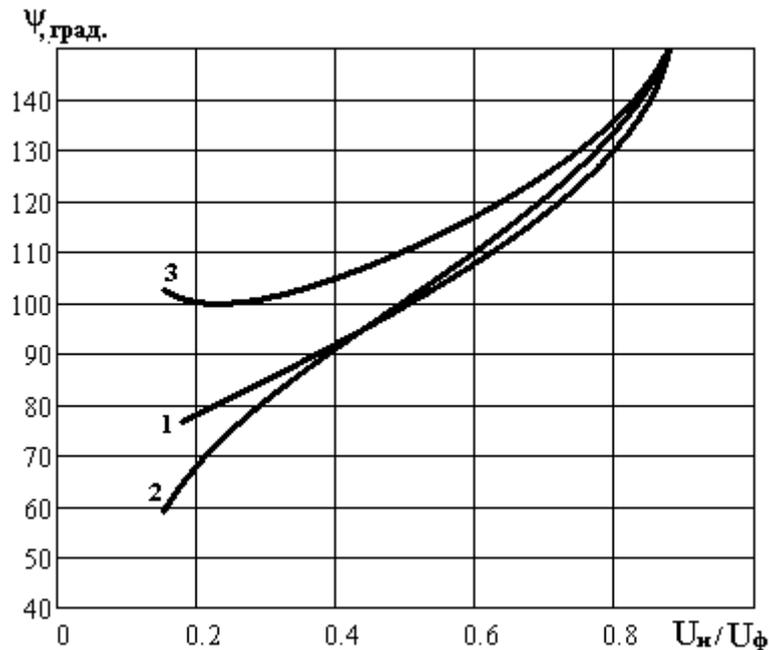


Рисунок 4.3. Зависимости $\psi(U_u)$ при изменении сопротивления утечки в интервале от 1 кОм до 20 кОм при емкости сети ($C = 0.25$ мкФ/фазу):

- 1 – сеть симметрична;
- 2 – снижение сопротивления в отстающей фазе;
- 3 – снижение сопротивления в опережающей фазе

Группа опытов (Рисунок 4.4), выполненная для условий, когда емкость сети уменьшена еще в пять раз ($C = 0.05$ мкФ/фазу). Наблюдается общая тенденция, обусловленная снижением емкости цепи. В частности, возросло влияние несимметрии, обусловленное уменьшением поперечного сопротивления (сопротивления изоляции) опережающей фазы. Например, абсолютная систематическая погрешность, обусловленная опережающей фазой при $R_h = 20$ кОм, составляет около $\approx 28^\circ$, причем, эта погрешность проявляется практически на всем интервале изменения сопротивления утечки.

Аналогичная погрешность, обусловленная отстающей фазой, на большей части интервала изменения сопротивления утечки является положительной, однако при $R^h \approx 10$ кОм меняет знак, и при $R_h = 20$ кОм достигает -16° .

Таким образом, поперечная несимметрия в ее крайних проявлениях вносит в значение аргумента ПН систематическую погрешность, возрастающую с ростом сопротивления утечки. В отдельных случаях абсолютное значение этой погрешности достигает 28° .

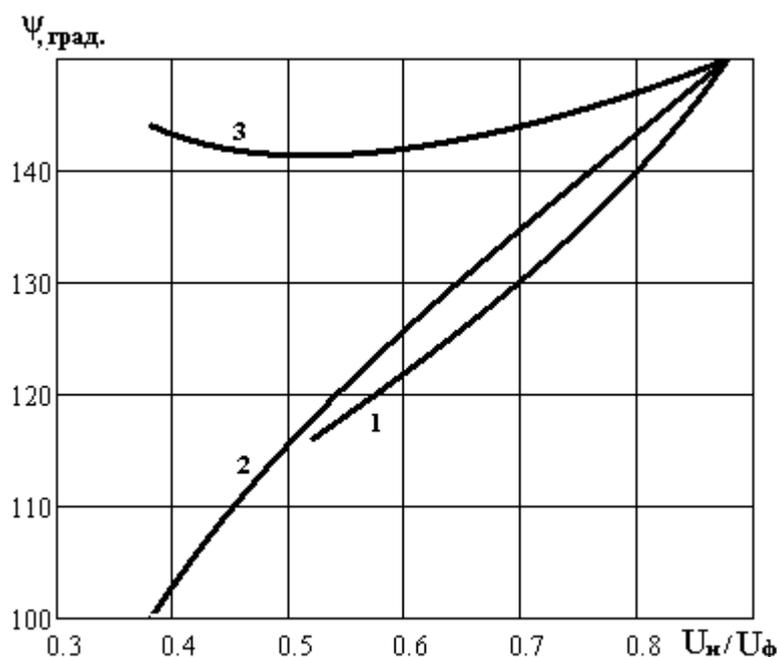


Рисунок 4.4. Зависимости $\psi(U_u)$ при изменении сопротивления утечки в интервале от 1 кОм до 20 кОм при емкости сети ($C = 0.05$ мкФ/фазу):

- 1 – сеть симметрична;
- 2 – снижение сопротивления в отстающей фазе;
- 3 – снижение сопротивления в опережающей фазе

Результаты проведенных исследований, вызывающие наибольшие систематические погрешности, приведены на Рисунок 4.5 (кривые 1 – 4). Они позволяют уточнить границы ОФИ и выявить рациональный закон их смещения с учетом, как сопротивления утечки, так и предельных случаев поперечной несимметрии.

Усреднив кривые 1 – 4, их совокупность можно аппроксимировать линейной функцией вида:

$$\psi = 100 \cdot (U_u / U_\phi) + 60^0 \quad (4.4)$$

Полученную зависимость (4.4) можно рассматривать как среднюю линию “плавающего” опорного фазового интервала (для фазы А). Если к этой функции применить идеализированное условие (2.17), получаем выражение, позволяющее определить границы ОФИ для этой же фазы:

$$\beta_{cp} = 100 \cdot (U_u / U_\phi) + 60^0 \pm 60^0 \quad (4.5)$$

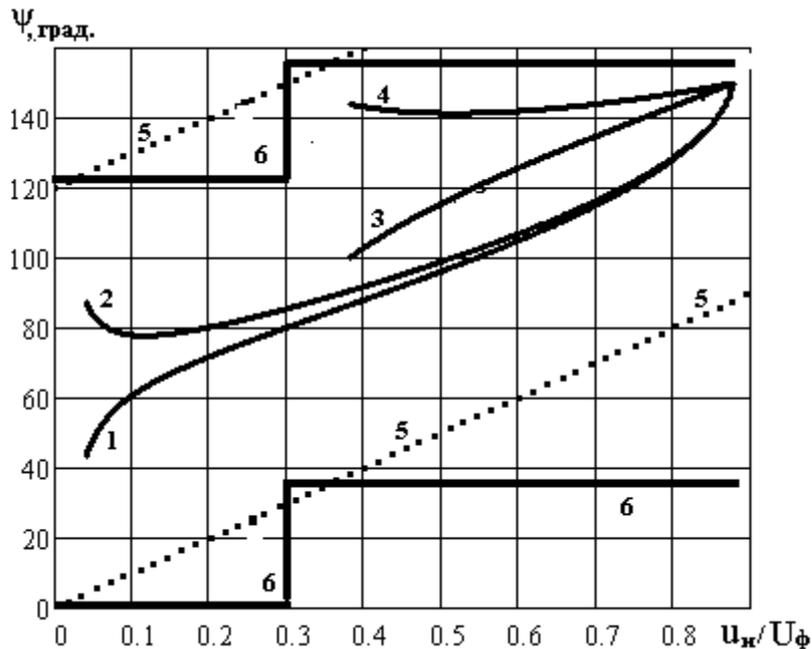


Рисунок 4.5. Два варианта реализации “плавающих” опорных интервалов (для фазы А):

- 1, 2 – границы вносимых поперечной несимметрией погрешностей при максимальной емкости сети;
- 3, 4 – то же при $C = 0.05$ мкФ/фазу;
- 5 – границы “плавающего” ОФИ при непрерывной коррекции;
- 6 – то же при двухступенчатой коррекции

Полученные согласно (4.5) границы “плавающего” ОФИ с непрерывной коррекцией в функции среднего ПН, приведены на Рисунок 4.5 (пунктирные прямые 5). Там же приведены границы “плавающего” ОФИ с двухступенчатой коррекцией (кривая 6, состоящая из кусочно-линейных участков). Они в достаточной мере перекрывают область значений аргумента ПН, включая систематические погрешности, вносимые максимальной поперечной несимметрией.

Анализ показывает, что оба из предложенных вариантов практической реализации "плавающих" опорных интервалов работоспособны. Однако следует отметить, что второй вариант более гибок в том смысле, что количество его ступеней можно изменить до трех или четырех в зависимости от конкретных рабочих условий. Кроме того, второй вариант более прост в наладке.

4.3 Принципы построения и функционирования схемы УВФ

Проведенный анализ технических требований к УВФ позволяет разработать основные звенья его структурной схемы.

Блок 1 (Рисунок 4.6) формирует систему отсчета УВФ. Он генерирует опорные импульсы частотой 18 кГц, синхронно с которыми осуществляется считывание текущего мгновенного значения линейного напряжения $u_{AB} = u_A - u_B$, а с каждым десятым импульсом (через каждые 100 промышленной частоты) формируются опорные сигналы (ОС), пополняющие содержимое счетчика ($k = k+1$) и синхронизирующие работу остальных блоков. Момент перехода линейного напряжения через нуль при положительной его производной фиксируется и при отсутствии сигнала "УТЕЧКА" обновляется отсчет времени. При этом обнуляется счетчик ($k = 0$) и среднее по модулю значение U_u в блоке 2 ($U_u = 0$).

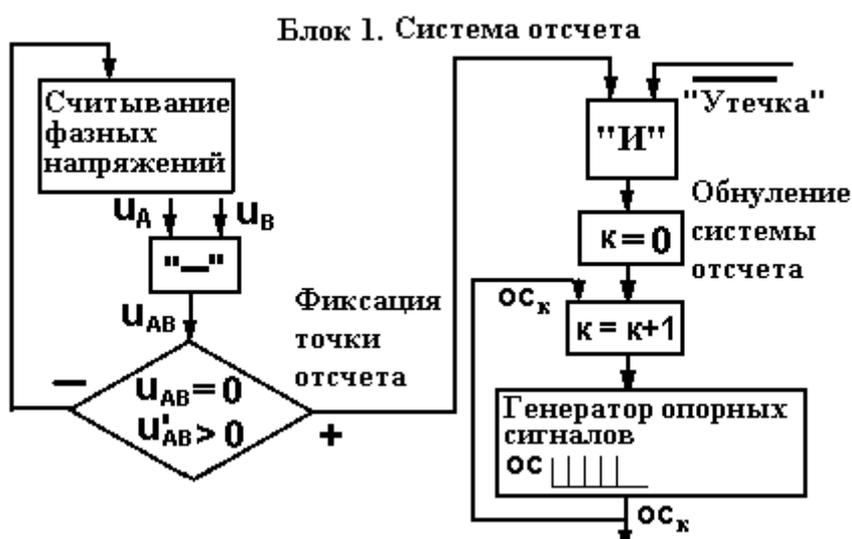


Рисунок 4.6. Формирование системы отсчета УВФ

Таким образом, блок 1 при нормальной (безаварийной) работе сети, когда сигнал "УТЕЧКА" отсутствует, обеспечивает возобновление системы отсчета времени через каждый период, а при возникновении сигнала "УТЕЧКА" продолжает работу в прежней системе отсчета, обеспечивая синхронную работу всех блоков УВФ в соответствии с текущим временем.

Блок 2 (Рисунок 4.7) фиксирует момент возникновения утечки. Обеспечивается это тем, что в момент изменения содержимого счетчика (в момент появления ОС) считывается очередное мгновенное значение ПН u_k и вычисляется его очередное k -тое среднее по модулю значение:

$$U_{u\ k} = (U_{u\ k-1} \cdot (k-1) + |u\ k|) / k \quad (4.6)$$

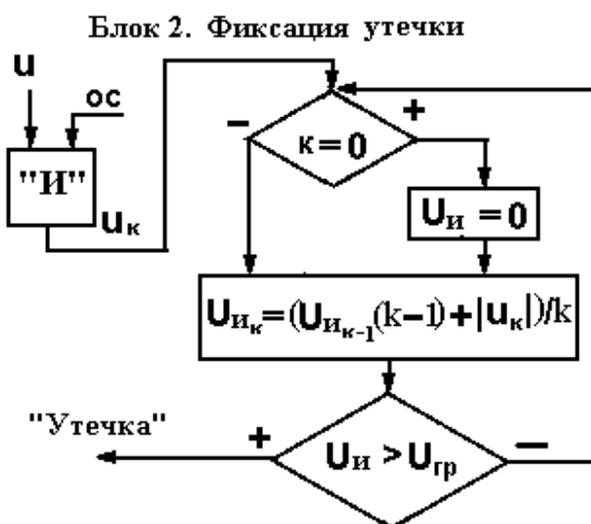


Рисунок 4.7. Блок фиксации утечки

Сигнал "УТЕЧКА" формируется в том случае, когда вычисленное среднее по модулю значение ПН превышает порог срабатывания $U_u > U_{гр}$. По этому сигналу блокируется обновление системы отсчета (блок 1) и включается в работу БПР (блок 3).

Кроме того, при помощи текущего среднего $U_{u\ k}$ осуществляется постоянное слежение за наличием утечки и в случае уменьшения U_u ниже пороговому уровню сигнал "УТЕЧКА" выключается. Этим предотвращается ошибочное срабатывание системы идентификации при случайных возмущениях в сети.

Основной задачей блока 3 (Рисунок 4.8) является вычисление серии промежуточных результатов аргумента ψ_i . Он запускается сигналом "УТЕЧКА" и работает только при его наличии. Вычисления выполняются после проверки условия $0.1 < |u_i / u_{i+1}| < 10$ для каждой пары сопредельных значений потенциала нейтрали u_i и u_{i+1} , которые считываются синхронно с опорными сигналами ОС [73]. Эта проверка позволяет избежать значительных погрешностей, когда одно из считанных значений близко к нулю. Одновременно определяется мгновенное расчетное значение амплитуды потенциала нейтрали u_N^p и проверяется условие $u_N^p > 0$, при невыполнении которого $\psi_i = \psi_i + \pi$.

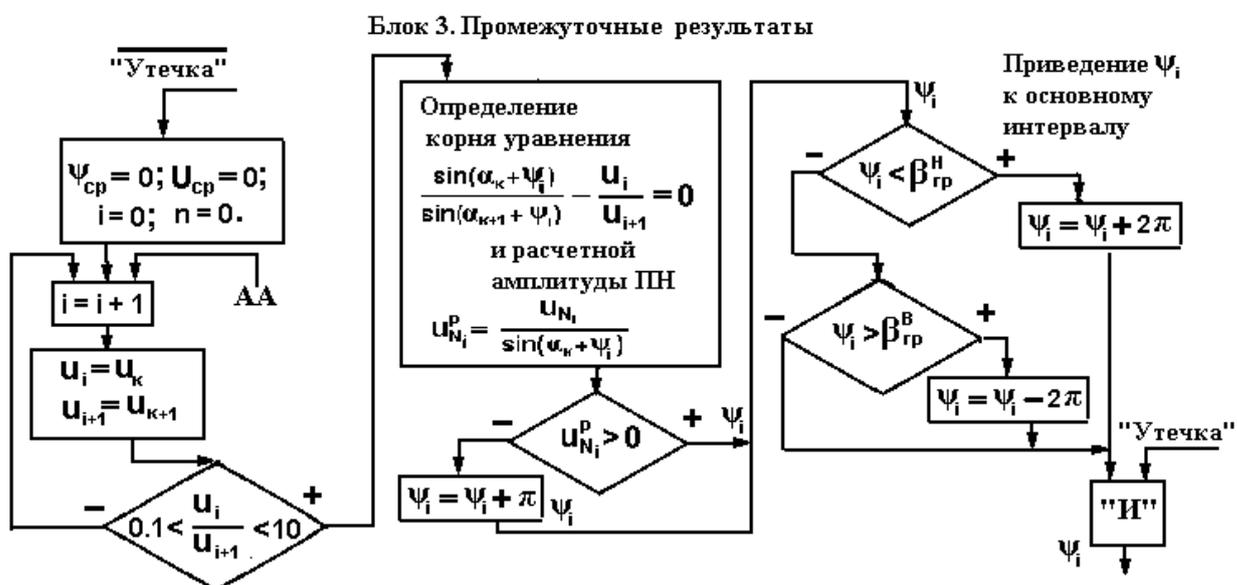


Рисунок 4.8. БПР. Блок промежуточных результатов

Полученное значение ψ_i приводится к основному интервалу, который для выбранной системы отсчета находится в пределах от $\beta_{cp}^B = -85^\circ$ до $\beta_{cp}^H = 275^\circ$. Элемент "И" на выходе БПР представляет добавочную подстраховку, благодаря которой исключается передача промежуточных значений ψ_i на следующий блок (блок 4) при исчезновении сигнала "Утечка".

Блок 4 (блок принятия решения, Рисунок 4.9) собирает информацию о серии промежуточных значений аргумента ПН и определяет ее текущее среднее значение ψ_{cp} , необходимое для принятия обоснованного решения.

В этом же блоке в функции текущего среднего U_{cpk} производится коррекция (смещение) ОФИ, а также определяется тот интервал, в границах которого находится полученное значение ψ_{cp} .

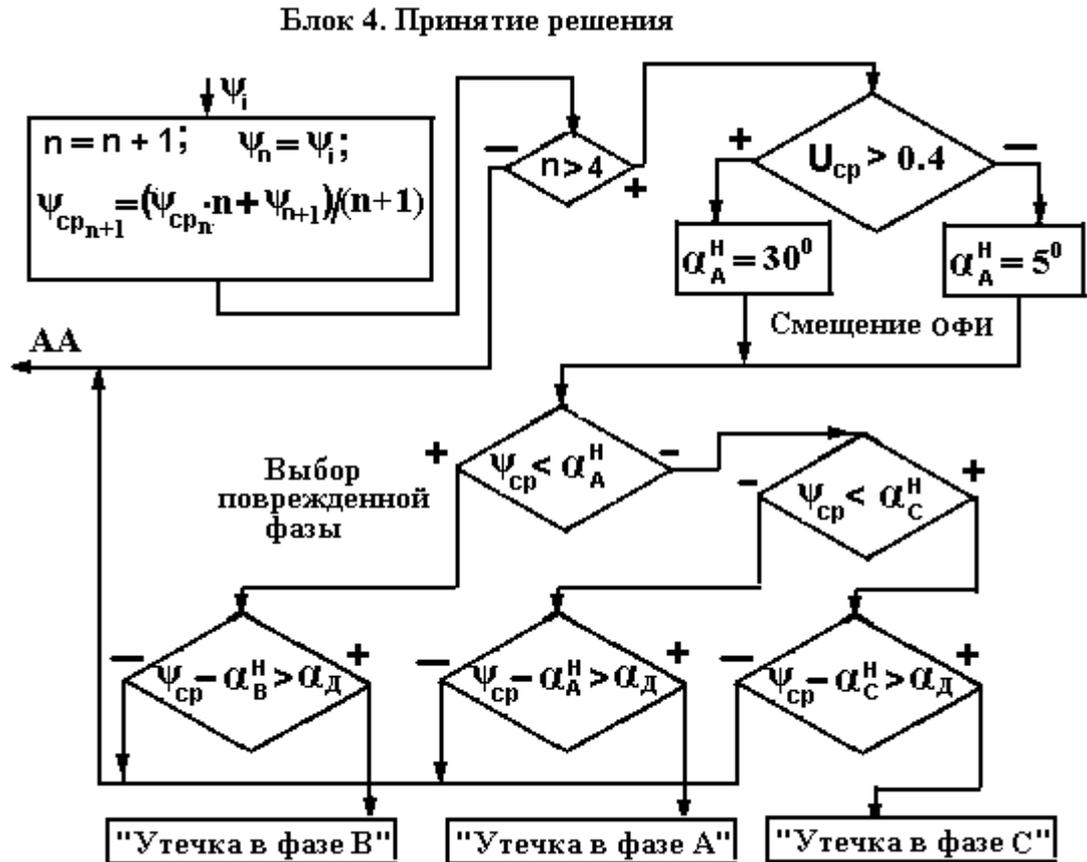


Рисунок 4.9. Блок принятия решения

Для повышения устойчивости УВФ в блоке 4 предусмотрена проверка условия достаточного (не ниже допустимого значения α_d) удаления аргумента ψ_{cp} от нижней границы "своего" опорного интервала. При выполнении этого условия формируется сигнал "Утечка в фазе...". В противном случае следует дальнейшее определение промежуточных результатов аргумента ψ .

4.4 Обеспечение быстродействия УВФ

Интегральное (среднее по модулю) значение ПН (4.3), что применяется для включения и отключения блока промежуточных результатов, может создать дополнительные факторы, которые снижают быстродействие УВФ. Ис-

следованием влияния указанной функции предусматривалось, во-первых, установление порога чувствительности УВФ по сопротивлению утечки. Во-вторых, установление факторов, которые влияют на продолжительность времени Δt_1 с момента возникновения утечки до включения в работу БПР.

Особенности методики исследования заключались в том, что рассматривались крайние случаи интенсивности переходного режима: "благоприятный" переходной процесс, когда в момент коммутации установившаяся составляющая ПН переходит через нуль; "неблагоприятный" переходной процесс – в момент коммутации установившаяся составляющая ПН переход через экстремум. Что касается поперечной несимметрии, то рассматривались также лишь крайние режимы: первый – симметрия, второй – наиболее неблагоприятная поперечная несимметрия, когда сопротивление изоляции почти на границе срабатывания защитного отключения, а "фоновый" сигнал ПН находится в противофазе к основному, аварийному сигналу. Интервал Δt_1 определялся моментом достижения функцией (4.3) порогового значения включения БПР. Для решения первой задачи (порог чувствительности) исследования выполнялись при $R_h = 20$ кОм при максимальной емкости.

Основные результаты исследований, приведены на Рисунок 4.10. Отметим, что кривые $U_{cp}(t)$ на этом рисунке являются не кривыми переходного процесса $u(t)$ в их "обычном" понимании, а результат их интегрирования по модулю. В этой связи под "благоприятным" переходным процессом будем понимать такой, при котором задержка во времени момента запуска в работу блока промежуточных результатов Δt_1 минимальна. Этому условию соответствует коммутация, происходящая в момент перехода через нуль установившейся составляющей ПН. Максимальная задержка включения в работу БПР соответствует моменту коммутации, когда установившаяся составляющая ПН проходит экстремум.

Последнее положение наиболее наглядно иллюстрируется сопоставлением кривых 1 и 2, отличающихся только фазой коммутации. Если первая кривая (переходной процесс благоприятный) достигает порога включения через $\approx 70^0$

($\Delta t_1 \approx 4$ мс), то задержка, обусловленная кривой 2 (неблагоприятная коммутация), достигает $\approx 140^\circ$ ($\Delta t_1 \approx 8$ мс). Та особенность, что кривые 1 и 2, будучи в одинаковых условиях (кроме фазы коммутации), спустя два периода после возникновения утечки все же отличаются друг от друга, объясняется не закончившимся переходным процессом, т.к. максимальная постоянная времени для этих условий достигает 50 мс.

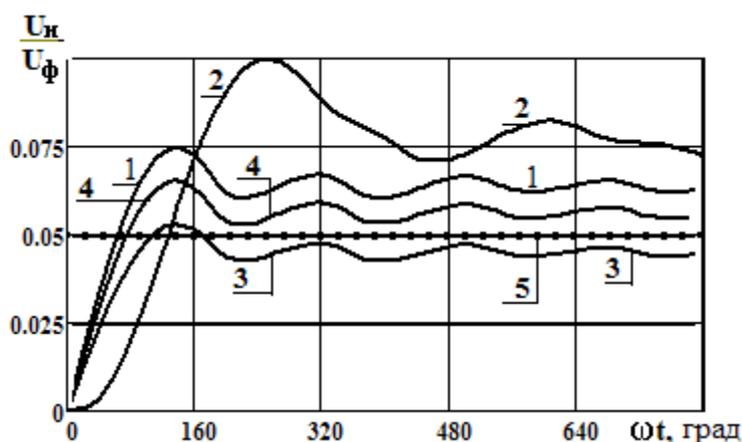


Рисунок 4.10. Кривые среднего значения ПН при различных условиях переходного процесса ($R_h = 20$ кОм, $C = 1$ мкФ):

- 1 – переходной процесс благоприятный, сеть симметрична;
- 2 – то же при процессе неблагоприятном;
- 3 – то же при наличии наиболее неблагоприятной поперечной несимметрии;
- 4 – то же при сниженном (до 17 кОм) сопротивлении утечки;
- 5 – порог запуска БПР

Для кривой 3, полученной при наиболее неблагоприятной поперечной несимметрии (сопротивление изоляции на грани срабатывания защитного отключения, "фоновый" и аварийный сигналы в противофазе) надежный запуск БПР не обеспечивается, а в случае запуска его работа неустойчива. Однако, если сопротивление утечки при тех же условиях уменьшить с 20 кОм до 17 кОм (кривая 4), запуск обеспечивается, хотя и с недостаточным запасом устойчивости.

Таким образом, наиболее неблагоприятная форма поперечной несимметрии может привести к необходимости снижения чувствительности предложенного способа.

Отметим, что результаты этого исследования не противоречат, а скорее соответствуют результатам, полученным в разделе 2 (Рисунок 2.14), где исследованы отрезки круговых диаграмм в установившемся режиме однофазной утечки при различных условиях поперечной несимметрии.

На Рисунок 4.11 приведены результаты исследования интервала Δt_1 в функции угла коммутации ψ_1 . В качестве последнего принята начальная фаза линейного напряжения u_{AB} , задающего систему отсчета. Исследование выполнено для фиксированных значений сопротивления утечки R_h (утечка в фазе А) при наиболее неблагоприятной поперечной несимметрии.

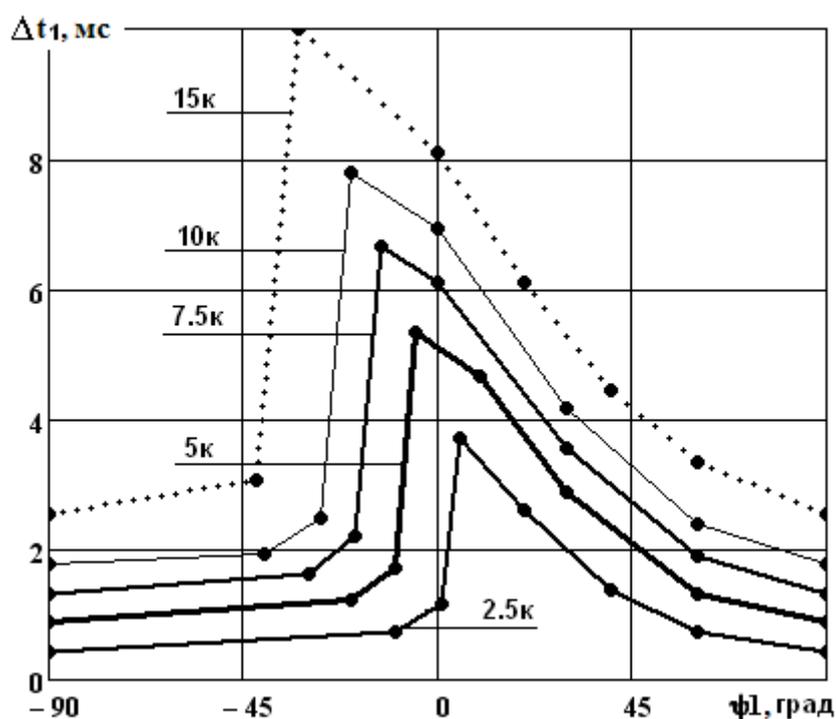


Рисунок 4.11. Задержка включения в работу блока промежуточных результатов (интервал Δt_1) в зависимости от фазы коммутации и сопротивления утечки. Условия эксперимента: емкость максимальна, поперечная несимметрия неблагоприятная

Результаты данного исследования в полной мере совпадают с ранее выполненными, в частности:

1. В области низкоомной утечки ($R_h < 5$ кОм,) задержка включения блока промежуточных результатов незначительна (от 1 мс до 4 мс) и даже при наиболее неблагоприятных условиях не превышает 6 мс. Это

означает, что определение фазы с утечкой обеспечивается уже через (10...12) мс с момента коммутации, а при применении быстродействующих коммутирующих устройств (тиристоров, например), человек может быть освобожден от действия тока за (25...35) мс, т.е. значительно раньше, чем сработает защитное отключение.

2. В области высокоомной утечки ($R_h > 17$ кОм, $C > 0.75$ мкФ) при наличии неблагоприятной поперечной несимметрии (при двухфазной утечке неаварийных фаз, например, когда их результирующее сопротивление еще недостаточное для срабатывания защитного отключения) существует вероятность, что работа БПР окажется неустойчивой и задержит процесс принятия решения.

Последний из изложенных результатов не следует считать препятствием к применению предложенного способа, поскольку исследуемая ситуация (совпадение высокоомной утечки аварийной фазы при неблагоприятной поперечной несимметрии неаварийных фаз) маловероятна. Но даже при ее возникновении возможны два варианта. Если под действием тока сопротивление человека уменьшится (как это показано на Рисунок 3.4, например), то блоки УВФ и система защитного шунтирования сработают в расчетном режиме. В противном случае (сопротивление утечки не уменьшается) работа БПР может оказаться неустойчивой, что из-за неопределенности промежуточных результатов и приведет к задержке в принятии решения. В этом случае через (150...200) мс сработает защитное отключение, однако человек при этом, к сожалению, не защищен от ЭДС двигателей в режиме выбега.

4.5 Принятие решения о выборе фазы с утечкой

Принятие решения на защитное шунтирование фазы, в которой выявлена утечка, является наиболее ответственным действием УВФ. С одной стороны, попадание человека под напряжение требует максимального быстродействия по освобождению его от действия тока. С другой стороны, ошибочное шунтирование невредимой, "здоровой", фазы при еще не отключенной сети недопустимо

по двум причинам. Во-первых, это значительно увеличило бы тяжесть поражения человека. Во-вторых, это может привести к двухфазному замыканию сети на заземляющий контур в двух разнесенных в пространстве точках [30, 65].

Таким образом, на первом месте при принятии решения стоит надежность в определении фазы с утечкой, и лишь на втором месте ее быстроедействие. Проведем анализ наиболее характерных динамических режимов с точки зрения этих двух требований по принятию решения.

На Рисунок 3.1 показано "чистый" (без дополнительных возмущающих факторов) переходный процесс, максимально неблагоприятный с точки зрения его продолжительности (3-4 периода), а экстремум свободной составляющей u_B равняется амплитуде установившейся составляющей u_U . С формальной точки зрения решение могло бы быть принятым уже в первой четверти периода. Действительно, все промежуточные результаты первой четверти периода ψ_p находятся в пределах опорного фазового интервала ψ_{cp} (в данном опыте промежуточные результаты поступают через 20^0 и, следовательно, есть запас по быстродействию).

Тем не менее, такое решение не отвечало бы первому требованию о надежности в определении фазы. Ведь информация о возможном параллельном действии других возмущающих факторов отсутствует, а это означает, что достоверность первой серии результатов можно подвергнуть сомнению. Напрашивается следующее решение. Во-первых, определяя среднее значение серии ψ_{cp} согласно (2.11), отметим, что эта величина достаточно быстро приближается к фактическому значению аргумента ψ_ϕ (через $3/4$ периода они почти сливаются). Во-вторых, смещение опорных интервалов можно применять уже в конце первой четверти периода (через 5 - 6 миллисекунд), когда интегральное значение амплитуды ПН U_N^{cp} достигает 20 В ($\approx 5\%$). В этих условиях, когда границы опорного интервала смещены, а среднее значения серии промежуточных результатов находится в достаточной удаленности от нижней границы, достовер-

ность суммарного результата сомнений не вызывает, и решение может быть принятым уже через половину периода (8 - 10) миллисекунд.

Аналогичные результаты, но при менее напряженном переходном режиме, приведены на Рисунок 3.2. В этом исследовании сопротивление утечки снижено до $R_h = 5$ кОм, что более вероятно для человека под напряжением. Из опыта вытекает, что даже без применения какой-либо коррекции опорных интервалов все промежуточные результаты находятся в пределах "своего" интервала и принятие решения не вызывает сомнения. Очевидно, что при уменьшении сопротивления утечки, когда $R_h < 5$ кОм, условия для принятия решения становятся еще более благоприятными.

На Рисунок 3.3 приведены результаты опыта, выполненного при наиболее неблагоприятных динамических условиях, когда на затяжной переходной процесс ($R_h = 20$ кОм) накладывается действие двух высших гармонических составляющих, амплитуды каждой из которых составляют 10% от амплитуды установившегося значения основной гармоники. Этот опыт характеризуется значительным разбросом значений промежуточных результатов, причем, часть последних выходит за пределы опорного интервала. Тем не менее, даже в этих условиях, если скорректировать опорные интервалы (Рисунок 3.3, в), надежное решение можно принять уже через половину периода (10 мс после включения блока промежуточных результатов). И все же необходимо отметить, что в том случае, когда в системе существует значительная поперечная несимметрия (например двухфазная утечка при сопротивлениях, еще недостаточных для срабатывания защитного отключения) существует вероятность того, что блок промежуточных результатов не включится в работу. В этом случае через ≈ 200 мс сработает защитное отключение. Однако, когда все же утечка обусловлена попаданием под напряжение человека, то, как это вытекает из Рисунок 3.4, его сопротивление уже через несколько миллисекунд станет меньше 5 кОм и система защитного шунтирования надежно сработает независимо от уровня несимметрии или других возмущающих факторов.

Таким образом, процесс идентификации фазы и принятие решения на ее аварийное шунтирование при попадании человека под фазное напряжение осуществляется надежно и с достаточным быстродействием (от 5 мс до 15 мс) независимо от уровня поперечной несимметрии, высших гармоник или других факторов.

4.6 Выводы по разделу 4

1. Уточнены технические требования к УВФ, на основании которых разработана структурная схема его алгоритма, состоящая из четырех блоков:

- блок системы отсчета, который при отсутствии сигнала "УТЕЧКА" обновляет систему отсчета в каждый момент перехода линейного напряжения u_{AB} через нуль при его возрастании;
- блок фиксации и контроля утечки, формирующий интегральное (среднее по модулю) значение ПН и обеспечивающий его непрерывное обновление, подачу сигнала "УТЕЧКА" при превышении им порогового значения и дальнейший контроль его уровня;
- блок промежуточных результатов (БПР), при сигнале "УТЕЧКА" через равные промежутки (≈ 100) считывает мгновенные значения ПН, для каждой их пары, решая трансцендентное уравнение, определяет его аргумент, отбрасывает сторонние и отбирает истинные корни, приводя последние к основному интервалу в заданной системе отсчета;
- блок принятия решения осуществляет усреднение полученных промежуточных значений аргумента ПН, обеспечивает коррекцию опорных фазовых интервалов, определяет фазу с утечкой и после дополнительной проверки запаса устойчивости, состоящего в разности промежуточных результатов и нижней (лимитирующей) границей опорного интервала, подает команду на шунтирование.

2. Доказано, что интегральное (среднее по модулю) значения ПН по сравнению с другими функциями, пригодными для управления "плавающими"

опорными фазовыми интервалами, имеет преимущества, состоящие в том, что эта функция в меньшей мере подвержена влиянию помех и искажений и, кроме того, готова к использованию немедленно после включения БПР.

3. Доказано, что смещение "плавающих" интервалов можно осуществлять как непрерывно, так и ступенчато, причем, оба варианта равноценны по работоспособности, однако второй вариант более гибкий для привязки к конкретным рабочим условиям и более прост в отладке.

4. Установлено, что при неблагоприятной поперечной несимметрии сети, когда сопротивление изоляции одной из фаз снижено до уровня, близкого к порогу срабатывания защитного отключения, а "фоновый" и аварийный сигналы находятся в противофазе, чувствительность УВФ по сопротивлению утечки при максимальной емкости снижается с 20 кОм до $\approx 12 \dots 14$ кОм.

5. Установлено, что в области низкоомной утечки ($R_h \leq 5$ кОм) время определения аварийной фазы находится в пределах от 5 мс до 10 мс вне зависимости от характера поперечной несимметрии, а в области высокоомной утечки ($R_h \geq 10$ кОм) в пределах от 10 мс до 15 мс, однако, при неблагоприятном варианте поперечной несимметрии это время может достигнуть 20 мс.

РАЗДЕЛ 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ УВФ.

Задачи экспериментальных исследований состояли в следующем:

1. Подтверждение работоспособности предложенного способа идентификации фазы, под напряжением которой случайно оказался человек.
2. Установление границ устойчивой работы УВФ, реализующего предложенный способ, и выявление основных факторов, определяющих границы его устойчивости.
3. Установление критерия, определяющего необходимый и достаточный объем выборки промежуточных результатов аргумента ПН, по которому принимается окончательное решение (критерий принятия решения).

5.1 Условия и методика проведения экспериментов

Экспериментальные исследования проводились на лабораторно-исследовательском стенде типа УИЛС, блок трехфазных напряжений которого содержит три однофазных трансформатора. Фазное напряжение последних регулируется в пределах от 0 В до 40 В с шагом 1 В (Рисунок 5.1).

Физическое подобие экспериментального стенда с реальной сетью обеспечивалось таким подбором параметров, при котором, согласно теории подобия [12], обеспечивалось равенство безразмерных параметров – критериев подобия. В качестве последних приняты аргументы линейных и фазных напряжений, а в качестве основного критерия подобия использован аргумент потенциала нейтрали ψ [6, 25]. В частности, для моделирования емкости и сопротивления “фаза-земля” было принято $C = 0.75$ мкФ и $R = 200$ кОм. Система отсчета обеспечивалась опорным напряжением U_{AB} , в наименьшей мере подверженному воздействию, как высших гармоник, так и динамических составляющих переходного процесса при возникновении утечки.

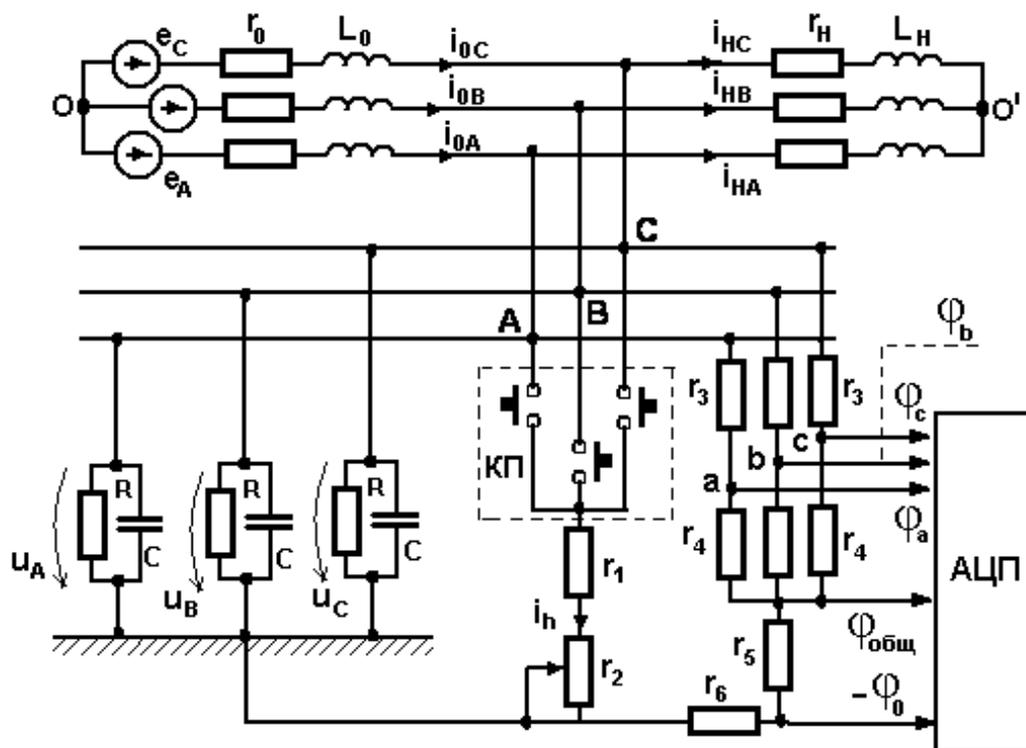


Рисунок 5.1. Схема исследовательского стенда

С использованием стенда описанной конструкции проведены эксперименты с исследованием переходных процессов в сети при наличии однофазной утечки тока на землю и различных значениях R_h .

Минимальный объем выборки при заданной точности $d = 0.26$ и заданной статистической надежности $\gamma = 0.95$, необходимый для оценки стандартного отклонения и среднего значения, составляет [24].

$$n = 1 + 0.5 \cdot \left(\frac{z_\alpha}{d} \right)^2 = 1 + 0.5 \cdot \left(\frac{1.96}{0.15} \right)^2 \approx 30 \quad (5.1)$$

z_α – нормированная нормально распределенная переменная, значение которой для $\alpha = 1 - \gamma = 0.05$ составляет 1.96.

В качестве основного регистрирующего прибора использован цифровой осциллограф типа “Рекон – 08МС”, обеспечивающий запись в текстовом файле мгновенных значений исследуемых величин с частотой 10 кГц.

При исследовании фиксировались мгновенные значения линейного напряжения u_{AB} (опорное напряжение), потенциал нейтрали u (основная исследуемая величина), фазное напряжение u_A (добавочный контроль результатов).

В соответствии с выражением (5.1) каждый эксперимент проводился 30 раз для получения характеристик параметров, которые измерялись. Каждая реализация отдельного эксперимента предусматривала выполнение следующей последовательности: за один пуск осциллографа при одном и том же сопротивлении R_h 30 раз имитируется возникновение утечки длительностью (0.1 – 0.2) с. При этом пауза между коммутациями выдерживается не менее (1 – 2) с, что необходимо для разряда накопленной емкостями экспоненциальной составляющей. Результаты, представляющие собой мгновенные значения напряжений, считанные через 0.1 мс (1.80 для частоты 50Гц), запоминаются в специальном текстовом файле. Эта процедура выполняется для различных значений сопротивления утечки.

Полученная таким образом информация обрабатывается на цифровой модели УВФ. Мгновенные значения потенциала нейтрали $u(\omega t)$ и $u(\omega t + 10^0)$, считанные попарно с постоянным интервалом в 10^0 , являются входными величинами для решения системы (2.1) и (2.2).

Результатом решения данной системы является очередное промежуточное значение аргумента ψ и амплитуды потенциала нейтрали U_{max} . Для каждой коммутации программой обработки результатов экспериментального исследования предусматривался расчет 31 промежуточного результата ψ , что составляет 1.5 периода сетевого напряжения, расчет текущего среднего значения ψ_{cp} всех предыдущих промежуточных результатов и их среднеквадратического отклонения для всего исследуемого интервала, а также погрешностей в определении промежуточных результатов [7, 14, 38]. Все эти результаты представляют исходную информацию для определения границ устойчивости предложенного способа и показателей работоспособности УВФ, реализующего этот способ.

Гармонический анализ потенциала нейтрали имел задачей оценку влияния высших гармонических составляющих на статическую устойчивость рабо-

ты УВФ и выполнялся для интервала времени, когда переходный процесс, обусловленный очередной коммутацией, практически закончен и физическая модель находится в установившемся режиме. Исходя из предположения, что спектральный состав высших гармоник мало зависит от сопротивления утечки, гармонический анализ выполнялся как для “фонового” значения потенциала нейтрали (т.е. при отсутствии утечки), так и для установившихся режимов однофазной утечки.

В данной работе результатом гармонического анализа приняты первые двадцать гармонических составляющих, включая четные гармоники, влияние которых на работу УВФ, пусть незначительное, исключить нельзя. Более того, выполнялся также расчет нулевой гармоники (постоянной составляющей), которую представляют медленно затухающие экспоненты. Последние в реальной системе могут возникать при кратковременном возникновении поперечной несимметрии (неодновременное замыкание контактов коммутирующих аппаратов, например). В данном же исследовании по величине нулевой гармоники можно судить о восстановлении физической модели после предыдущей коммутации.

Для характеристики результатов гармонического анализа приняты следующие количественные показатели:

- действующее значение потенциала нейтрали U ;
- относительное значение k -той гармонической составляющей по отношению к U_{max} , представленное в виде графика (амплитудный спектр) или таблицы;
- результирующее действующее значение всех высших гармоник (начиная со второй) U_{grm} , взятое по отношению к U .

Основным показателем работоспособности УВФ и способа, им реализуемого, является их устойчивость, т.е. способность выполнять свои функции по идентификации поврежденной фазы вне зависимости от помех и возмущений со стороны сети.

5.2 Основные результаты экспериментальных исследований

5.2.1 “Фон” потенциала нейтрали

“Фон” исследовался с целью определения его величины и гармонического состава. Один из результатов этого исследования отображен на Рисунок 5.2, где приведена осциллограмма потенциала нейтрали при отсутствии утечки (кривая 1) и кривая линейного напряжения u_{AB} в уменьшенном масштабе, задающая в данном исследовании систему отсчета. При этом действующее значение “фона” ПН по отношению к фазному напряжению физической модели не превышает 3 %, что нечувствительно в симметричном режиме сети, но может проявиться в режиме высокоомной утечки.

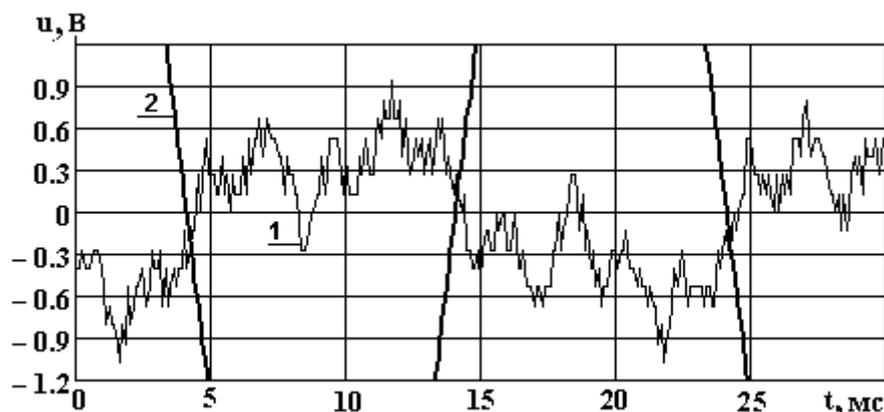


Рисунок 5.2. Осциллограмма “фона” потенциала нейтрали:

- 1 – мгновенное значение;
- 2 – опорное напряжение u_{AB} , (масштаб уменьшен)

В результате проведенного гармонического анализа получен амплитудный спектр “фонового” ПН (Рисунок 5.3) и процентное содержание всех его гармонических составляющих (Таблица 5.1).

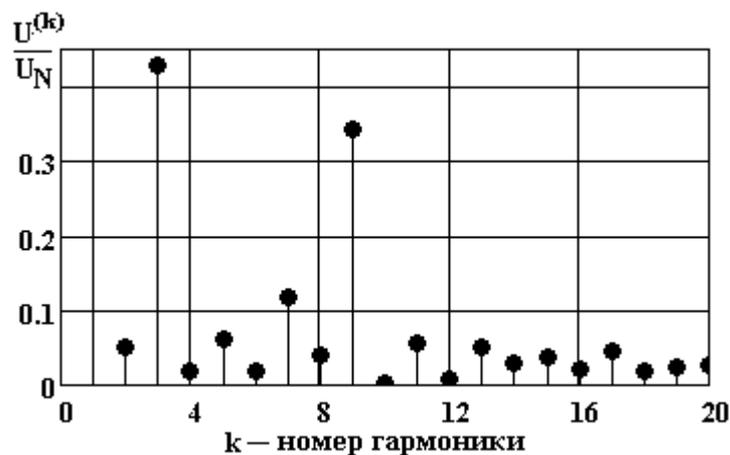


Рисунок 5.3. Спектральный состав “фонового” потенциала нейтрали

Анализ показал, что действующее значение всех высших гармонических составляющих в составе ПН достигает 62 % по отношению к его действующему значению, чем объясняется резкое искажение “фонового” напряжения. Характерно, что в полученном спектре преобладают гармоники, кратные трем (третья и девятая, прежде всего), а также нечетные (5, 7, 11, 13). Влияние последних на работу УВФ исследовано теоретически (раздел 2) и, следовательно, имеется возможность экспериментальной проверки результатов анализа.

Таблица 5.1.

Процентное содержание гармонических составляющих в составе “фонового” ПН.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-0.34	78.78	4.98	42.73	1.83	6.24	2	11.85	3.94	34.41	...
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.35	5.68	0.83	5.21	2.94	3.87	2.12	4.48	1.83	2.28	...

Если исходить из той посылки, что поперечная несимметрия сети, частным случаем которой является режим однофазной утечки, мало изменяет спектральный состав высших гармонических составляющих, выполненный гармонический анализ “фонового” напряжения является актуальным.

5.2.2 Низкоомная однофазная утечка

Этот вид утечки определяется величиной $R_h < 5$ кОм. Первое исследование из этой области выполнено для $R_h = 4$ кОм. На Рисунок 5.4, где результаты обработки экспериментальных исследований представлены наиболее наглядно, обозначено:

ψ – промежуточные значения аргумента ПН, полученные в результате работы цифровой модели УВФ;

ψ_{cp} – текущее среднее значение АПН;

$\psi_{pсч}$ – расчетное значение АПН, полученное в результате анализа физической модели для $R_h = 4$ кОм;

β_{cp} – скорректированные в соответствии с (2.9) значения нижней (35^0) и верхней (155^0) границ опорного фазового интервала фазы А, в которой имитируется данная утечка.

Характерная особенность результатов данной серии экспериментов состоит в том, что, во-первых, все полученные промежуточные результаты находятся в пределах “своего” опорного интервала и, во-вторых, их текущее среднее значение уже через 4 мс ($\approx 70^0$) после включения в работу блока промежуточных результатов практически сливается с расчетным значением аргумента ПН. Это значит, что решение на идентификацию фазы может быть принято уже через ≈ 4 мс после начала работы БПР. Учитывая задержку времени, необходимую для достижения средним значением ПН порога запуска УВФ, практическое время идентификации аварийной фазы при данном сопротивлении утечки можно оценить в пределах от 5 мс до 7 мс (в зависимости от емкости сети).

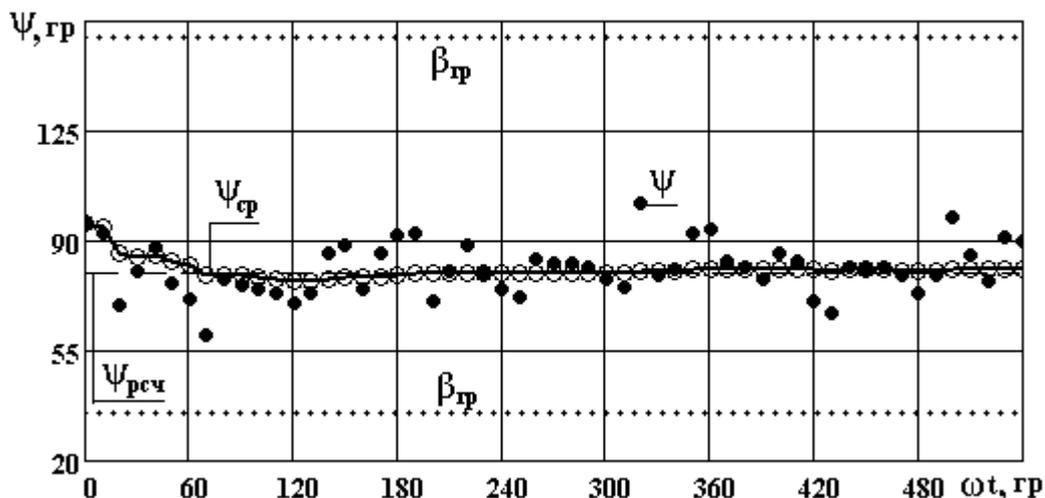


Рисунок 5.4. Результаты вычисления промежуточных значений АПН ψ и его текущего среднего значения $\psi_{ср}$ цифровой моделью УВФ при $R_h = 4$ кОм; $\beta_{гр}$ – границы опорного фазового интервала

Естественно ожидать, что при меньшем сопротивлении утечки результаты идентификации, по крайней мере, не ухудшаться. Обусловлено это тем, что с ростом потенциала нейтрали влияние его “фонового” значения уменьшается.

На Рисунок 5.5 приведен фрагмент осциллограммы потенциала нейтрали в пределах 1.5 периода с момента включения УВФ. Обращает на себя внимание то, что модель прибора работает, когда в сети продолжается переходный режим, обусловленный возникновением утечки (заметно влияние экспоненты, особенно в точках экстремумов: 0^0 , 180^0 , 360^0 , 540^0).

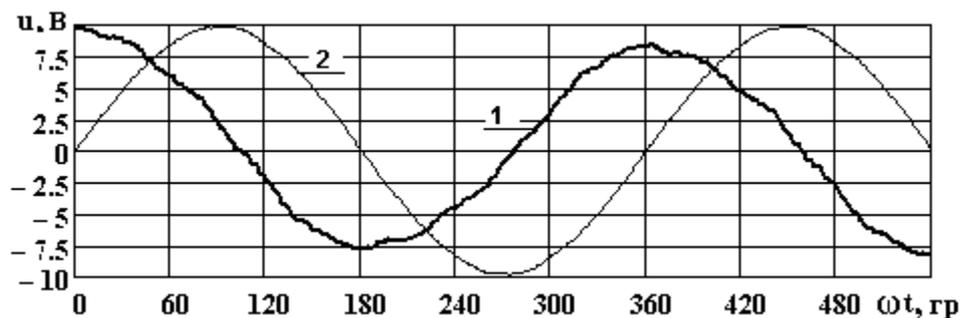


Рисунок 5.5. Осциллограмма потенциала нейтрали (1) и опорного напряжения u_{AB} (2) (масштаб уменьшен) при $R_h = 4$ кОм

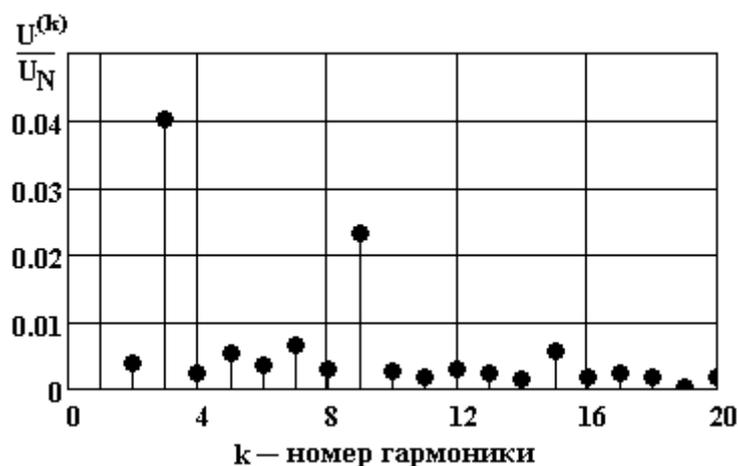
Рисунок 5.6. Спектральный состав ПН при $R_h = 4$ кОм

Таблица 5.2.

Процентное содержание гармонических составляющих в составе ПН $R_h = 4$ кОм.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1.31	99.86	0.38	4	0.23	0.53	0.37	0.66	0.3	2.32	...
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.27	0.18	0.28	0.24	0.15	0.57	0.18	0.23	0.18	0.02	...

Сопоставляя спектральные составы, полученные в двух экспериментах (Рисунок 5.3 и Рисунок 5.4), а также результаты гармонического анализа (Таблица 5.1 и Таблица 5.2), можно заметить определенные отличия, однако, влияние нечетных гармоник, кратных трем (третья и девятая), остается преобладающим. Сохраняется также влияние остальных нечетных гармоник (пятая, седьмая, пятнадцатая), хотя и наблюдается некоторое перераспределение их долевых значений.

В приложении В приведены более полные результаты исследований работы УВФ для $R_h = 4$ кОм; $R_h = 2$ кОм; $R_h = 8$ кОм. Обобщение первых двух серий экспериментов позволяет отметить:

1. Все промежуточные значения аргумента ПН исследуемой области находятся в пределах “своего” опорного фазового интервала.

2. Среднее значение аргумента ПН для всего полуторапериодного интервала практически совпадает с расчетным значением (расхождение в 2, 3 или даже в 5 градусов не имеет значения).
3. Среднеквадратичное отклонение аргумента ПН для всего интервала незначительно и составляет $S_0=7.4^0$ для $R_h=4$ кОм и $S_0 = 4.2^0$ для $R_h=2$ кОм, что объясняется сравнительно низким содержанием высших гармоник в составе ПН.
4. Запас устойчивости, определяемый удалением ψ_{cp} от границ опорного фазового интервала, достигает $\approx 40^0$, что позволяет принять решение на идентификацию уже через (3...5) мс после включения БПР.

Результаты аналогичных исследований, выполненные для сопротивления утечки $R_h = 8$ кОм, приведены на Рисунок 5.7 (основная их часть размещена в приложении В). Они существенно отличаются от предыдущих, что объясняется, очевидно, тем, что сопротивление $R_h = 8$ кОм находится уже за границей области “низкоомной” утечки. Резко возросло отклонение промежуточных результатов от их среднего значения. Наблюдаются отдельные случаи их “выплескивания” за нижнюю границу опорного интервала (Рисунок 5.7). Вторая особенность данной группы опытов состоит в приближении всех промежуточных результатов и их текущего среднего к нижней границе опорного фазового интервала. Именно по этой причине часть промежуточных значений ψ оказалась за нижней границей ОФИ, в то время как верхняя граница практически свободна. С этой точки зрения можно утверждать, что необходимость смещения опорных фазовых интервалов с изменением сопротивления утечки подтверждается экспериментально.

И все же в целом эти результаты подтверждают работоспособность предложенного способа и приемлемую сходимость с результатами теоретических расчетов. Тем не менее, обобщение результатов исследований для области сопротивлений утечки в диапазоне $2 \text{ кОм} < R_h < 8 \text{ кОм}$, которую условно можно считать “низкоомной”, вскрыло ряд вопросов и особенностей, которым ранее не было уделено должного внимания.

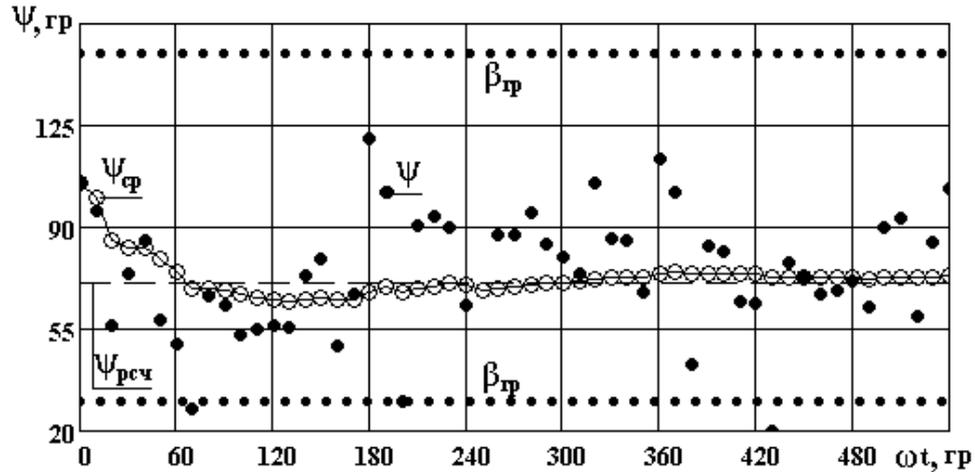


Рисунок 5.7. Результаты вычисления промежуточных значений ψ и его текущего среднего значения $\psi_{ср}$ цифровой моделью УВФ при $R_h = 8$ кОм

Во-первых, основным фактором, влияющим на работоспособность способа и на предел его устойчивости, являются не динамические составляющие переходного процесса, как это предполагалось ранее, а высшие гармонические составляющие, причем, доленое содержание последних в составе потенциала нейтрали и их искажающее воздействие на работу УВФ с ростом сопротивления утечки возрастают.

Во-вторых, содержание высших гармоник в составе ПН определяется не только его “фоном”, но также начальными фазами (аргументами) отдельных составляющих, рабочим режимом сети, насыщением магнитной цепи трансформаторов, а также наличием нелинейных источников высших гармоник (преобразователей частоты, например). В этой связи прогнозировать их влияние для конкретных условий работы УВФ не представляется возможным. Более того, попытка установить по результатам экспериментов какую-либо строгую функциональную связь между коэффициентом гармоник (основная характеристика степени “засоренности” ПН высшими гармониками) и среднеквадратическим значением рассеяния промежуточных результатов к положительному результату не привела. Эта связь носит статистический характер и с ростом сопротивления утечки проявляется в тенденции к росту рассеяния промежуточных резуль-

татов и приближению их среднего к нижней границе опорного фазового интервала.

Основной же вывод, вытекающий из изложенного, состоит в необходимости выработки количественного показателя, опираясь на который можно обеспечить объективное и достоверное принятие решения УВФ вне зависимости от интенсивности воздействия искажающих факторов. Причем, этот же показатель должен не только выполнять функции критерия принятия решения, но также служить объективным показателем работоспособности и границ применимости предложенного способа в области высокоомной утечки.

5.2.3 Критерий принятия решения

Критерий принятия решения, предлагаемый для решения поставленной задачи, состоит в том, что кроме определения серии промежуточных значений аргумента ПН и их среднего, дополнительно, для заданной доверительной вероятности (0.95 для большинства технических измерений) определяется доверительный интервал указанного среднего и запас устойчивости УВФ, оцениваемый по удалению (в градусах) среднего значения аргумента ПН ψ_{cp} (с учетом доверительного интервала) от границ ОФИ.

Таким образом, сущность критерия принятия решения состоит в текущей статистической обработке поступающих промежуточных результатов аргумента ПН, вычислении их текущего среднего, его доверительного интервала и сопоставлении последнего с опорными фазовыми интервалами.

Уже первая группа экспериментов показала, что в области низкоомной утечки ($R_h \leq 5$ кОм при $C = 0.7$ мкФ или в более общей форме $U_u/U_\phi > 0.3$) все текущие значения аргумента ψ (малая выборка) находятся в пределах “своего” ОФИ. В этих условиях принятие решения не представляет сложностей. Однако с ростом R_h , когда отношение U_u/U_ϕ уменьшается, а влияние искажающих и возмущающих факторов растет, увеличивается разброс промежуточных значений ψ , и принятие решения усложняется.

Поскольку статистическая обработка результатов наблюдений (малой выборки) предусматривает также и проверку основной гипотезы, проведем предварительный анализ факторов, ухудшающих работу УВФ в области высокоомной утечки.

Во-первых, как показывают эксперименты, наиболее значимым искажающим фактором оказались высшие гармонические составляющие. Причем, их состав, интенсивность и начальные фазы гармоник зависят от множества случайных факторов, определяемых, в основном, характером и количеством включенных потребителей и наличием устройств с нелинейными элементами.

Во-вторых, динамические составляющие переходного процесса, вносящие систематические погрешности и также имеющие случайный характер, обусловленный фазой коммутации, емкостью сети, сопротивлениями утечки и изоляции.

В-третьих, наличие в сети поперечной несимметрии, обусловленной разбросом сопротивления изоляции кабельных коммуникаций или отдельных потребителей, также носит случайный характер из-за меняющегося количества работающих потребителей.

Таким образом, три основных, наиболее влиятельных фактора, вносящих свою долю погрешностей при определении аргумента ПН, сами имеют случайный характер, а закон распределения погрешностей, вносимых отдельными факторами неизвестен. Тем более, невозможно аналитически оценить их совместное влияние.

В этих условиях для рассматриваемой серии аргументов ПН, как результатов наблюдений целесообразно применить центральную предельную теорему, позволяющую считать указанный результат соответствующий нормальному, или близкому к нему, распределению. Однако, учитывая, что УВФ оперирует малыми выборками (от 5 до 20 промежуточных результатов), возникает необходимость добавочной проверки основной гипотезы, используя критерии согласия – асимметрию и эксцесс, применимые при небольших объемах выборок.

Выборочные значения асимметрии A и эксцесса E определяются выражениями [52]:

$$A = \frac{1}{n \cdot s^3} \sum_1^n (\psi - \psi_{cp})^3 \quad (5.2)$$

$$E = \frac{1}{n \cdot s^4} \sum_1^n (\psi - \psi_{cp})^4 - 3 \quad (5.3)$$

где n – объем выборки; s – выборочный стандарт.

Наблюдаемое распределение ψ можно считать нормальным, если выборочные асимметрия и эксцесс отвечают неравенствам [52]:

$$|A| \leq 3\sqrt{D(A)} \quad (5.4)$$

$$|E| \leq 5\sqrt{D(E)} \quad (5.5)$$

где

$$D(A) = \frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)} ; D(E) = \frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)} - \text{дисперсии асимметрии и эксцесса.}$$

Для практического использования выражения (5.4) и (5.5) удобно привести к виду:

$$Ass = 3\sqrt{D(A)} - |A| \geq 0 \quad (5.6)$$

$$Eks \geq 5\sqrt{D(E)} - |E| \quad (5.7)$$

где Ass и Eks количественные показатели выборочных значений соответственно асимметрии и эксцесса.

Фрагмент структурной схемы алгоритма, обеспечивающего принятие решения в соответствии с предложенным критерием, приведен на Рисунок 5.8.

Алгоритм содержит следующие функциональные узлы:

Узел 1 обеспечивает исходную серию значений ψ , содержащую от 4 до 7 промежуточных результатов в зависимости от величины сопротивления утечки. Их роль состоит в накоплении предварительной информации, используемой в последующем анализе.

Узел 2 определяет каждое последующее i -тое значение аргумента ПН, после которого производится анализ результатов в соответствии с предложенным критерием.

Узел 3 после получения очередного i -того значения осуществляет следующие операции:

- определяется текущее среднее серии промежуточных результатов

$$\psi_{cpi} = \frac{1}{i} \cdot \sum_{k=1}^i \psi_k ;$$

- определяется текущее среднее квадратичное отклонение среднего

$$\text{серии промежуточных результатов } s_{0i} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^i (\psi_k - \psi_{cpi})^2}{i \cdot (i-1)}} ;$$

- на основании заданной доверительной вероятности ($p_c = 0.95$) и известного числа промежуточных результатов i определяется текущее значение коэффициента Стьюдента t_c (для удобства использования программой УВФ функция $t_c = f(p_c, i)$, которая обычно задается таблицей, аппроксимируется аналитическим выражением);

- определяется доверительный интервал среднего текущей серии промежуточных результатов $E = \Delta \psi_{cpi} = s_{0i} \cdot t_{ci}$;

- определяется текущее значение запаса устойчивости УВФ $\Delta \psi_{zani}$, состоящее в удалении среднего серии, включая доверительный интервал, от нижней границы опорного фазового интервала

$$\Delta \psi_{zani} = \psi_{cpi} - \Delta \psi_{cpi} - \beta_{ep} .$$

Узел 4 в зависимости от имеющегося запаса устойчивости на i -том шаге принимает решение об окончании идентификации, или ее дальнейшем продолжении.

Важная особенность разработанного алгоритма в том, что, в соответствии с предложенным критерием он обеспечивает программе УВФ принятие решения, самостоятельно выбирая количество необходимых промежуточных результатов в зависимости от интенсивности возмущающих факторов.



Рисунок 5.8. Фрагмент алгоритма работы УВФ. Принятие решения

Приведем примеры применения разработанного критерия для низкоомных утечек. Работа БПР для сопротивлений утечки 2 кОм и 4 кОм приведены на рис. 5.9.

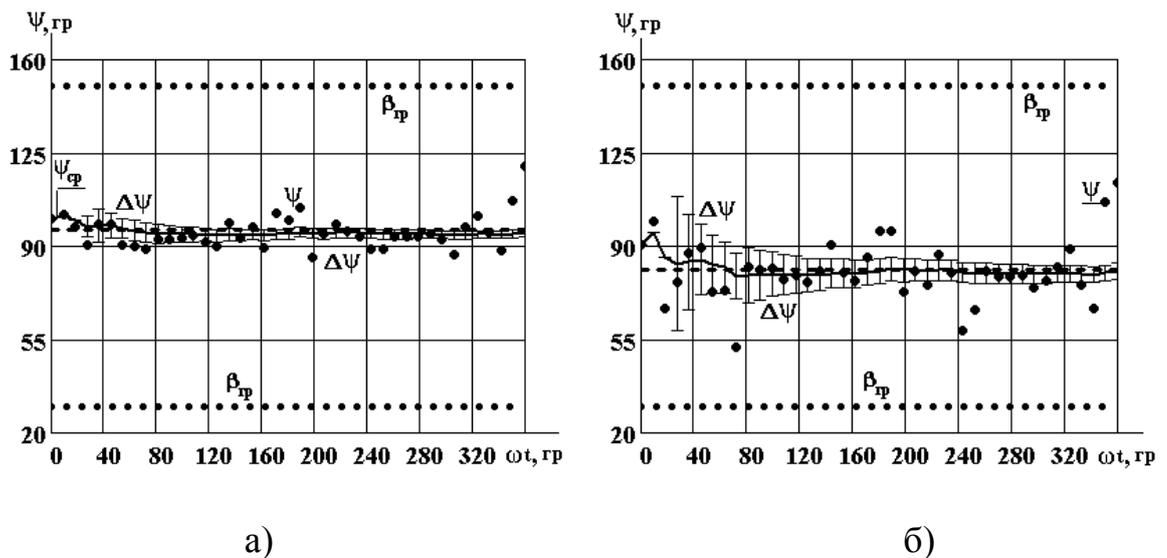


Рисунок 5.9. Результаты вычисления промежуточных значений ψ , его текущего среднего значения $\psi_{ср}$ и границ доверительного интервала $\Delta\psi$ цифровой моделью УВФ: а) - при $R_h = 2$ кОм; б) - $R_h = 4$ кОм

График на Рисунок 5.10 представляет собой осциллограмму Рисунок 5.7 ($R_h = 8$ кОм) дополненную доверительными интервалами, наличие которых и дает информацию о вероятности принятия решения о том, какая фаза сети повреждена.

Еще одна особенность алгоритма состоит в том, что его можно использовать для более полной количественной оценки результатов экспериментальных исследований. Это позволяет не только оценить работоспособность УВФ по целому ряду показателей, но также запас его устойчивости, а при известных параметрах возмущающих факторов (спектральный состав, коэффициент гармоник и др.) предел его применимости в конкретных рабочих условиях. Эта особенность используется далее для анализа экспериментальных исследований в области высокоомной утечки.

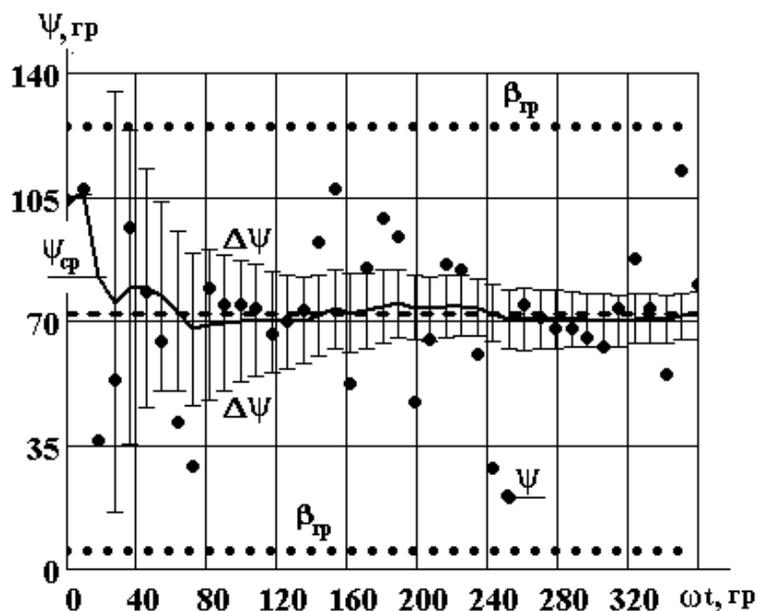


Рисунок 5.10. Результаты вычисления промежуточных значений ψ и его текущего среднего значения $\psi_{ср}$ цифровой моделью УВФ при $R_h = 8$ кОм; $\pm\beta_{гр}$ – границы опорного фазового интервала

Тем не менее, нельзя исключить тот факт, что основная гипотеза или не подтверждается, или вызывает сомнение. На этот случай при анализе работоспособности УВФ и, в частности, при определении доверительных интервалов

для малых выборок ($n \leq 20$) рекомендуется применять неравенство Чебышева, которое применительно к данной задаче имеет вид:

$$\psi_{cp} - \frac{s}{\sqrt{n \cdot p}} \leq \psi \leq \psi_{cp} + \frac{s}{\sqrt{n \cdot p}} \quad (5.8)$$

где ψ_{cp} , s – соответственно выборочные среднее и стандарт;

n – объем выборки;

p – значимость.

Учитывая, что одной из основных задач экспериментальных исследований является экспериментальное подтверждение работоспособности предлагаемого способа и УВФ, указанные исследования по проверке основной гипотезы и определению доверительных интервалов выполнялись для наиболее неблагоприятных условий. К последним следует отнести высокоомную утечку и связанное с ней искажение кривой ПН высшими гармониками при наличии наиболее интенсивного переходного режима.

Еще одна особенность алгоритма состоит в том, что его можно использовать для более полной количественной оценки результатов экспериментальных исследований. Это позволяет не только оценить работоспособность УВФ по целому ряду показателей, но также запас его устойчивости, а при известных параметрах возмущающих факторов (спектральный состав, коэффициент гармоник и др.) предел его применимости в конкретных рабочих условиях. Эта особенность используется далее для анализа экспериментальных исследований в области высокоомной утечки.

5.2.4 Высокоомная однофазная утечка

Высокоомная однофазная утечка определяется условно величиной $R_h > 5$ кОм, причем, положение ОФИ в соответствии с (2.9) для фазы А составляет от 5° до 125° (для фаз В и С соответствующий сдвиг на треть периода). Сводка основных результатов экспериментального исследования нескольких серий опытов для сопротивлений утечки $R_h = 2, 4, 8, 14, 16$ кОм приведена в Таблица Д.1 приложения Д. Все эксперименты выполнялись для выборок объемом $n = 5, 10$,

15, 20 промежуточных значений аргумента потенциала нейтрали. Для каждой выборки определялись значения выборочного среднего ψ_{cp} аргумента ПН (в градусах), выборочного стандарта σ (в градусах), числовые значения критериев согласия: асимметрии Ass и эксцесса Eks в соответствии с (5.2) и (5.3). Кроме того, для каждой выборки определялось отклонение от среднего границы доверительного интервала $\Delta\psi$ (в градусах), выполненные для двух условий: а) для нормального распределения промежуточных значений ψ ; б) для произвольного их распределения в соответствии с неравенством Чебышева (5.8).

Заключительные столбцы Таблица Д.1 содержат информацию о времени (длительности) работы блока промежуточных значений (БПР) необходимом и достаточном для принятия обоснованного решения, когда границы доверительного интервала находятся в пределах опорного фазового интервала (определялось по осциллограммам приложения Д), а также максимальное время идентификации с момента коммутации (возникновения утечки) до момента принятия решения.

В приложении Д также приведены осциллограммы работы цифровой модели УВФ для сопротивлений утечки 2 кОм, 4 кОм, 8 кОм (четыре серии опытов), 14 кОм (пять серий), 16 кОм (две серии).

Каждая из серий опытов содержит три рисунка с индексами а, б, в, содержащими соответственно:

а) осциллограмму потенциала нейтрали, позволяющая оценить степень его искажения или произвести гармонический анализ, осциллограмму опорного напряжения (линейное напряжение u_{AB} в данных экспериментах, масштаб уменьшен), обеспечивающего систему отсчета при вычислении промежуточных результатов;

б) осциллограммы результатов работы БПР, содержащие промежуточные значения ψ , их текущее среднее ψ_{cp} , расчетное (теоретическое) значение $\psi_{рсч}$, границы опорного фазового интервала β_{cp} и текущие границы доверительного интервала $\Delta\psi$, рассчитанные из условия нормального распределения;

в) то же, но текущие границы доверительного интервала $\Delta\psi$ рассчитаны на основании неравенства Чебышева (5.8), т.е. для произвольного закона распределения промежуточных результатов.

5.4 Обобщение результатов экспериментальных исследований

Статистическая обработка промежуточных результатов, положенная в основу критерия принятия решения, нашла экспериментальное подтверждение в полной мере. Используя критерий, алгоритм УВФ способен самостоятельно выбрать необходимый объем выборки, обеспечивающий принятие обоснованного решения по идентификации фазы, в которой возникла утечка. Рассмотрим некоторые особенности работы БПР (блока, в котором выполняются расчеты промежуточных результатов).

На рис. 5.11 приведены полученные на основании обобщения результатов экспериментов данные для минимальной выборки $n = 5$.

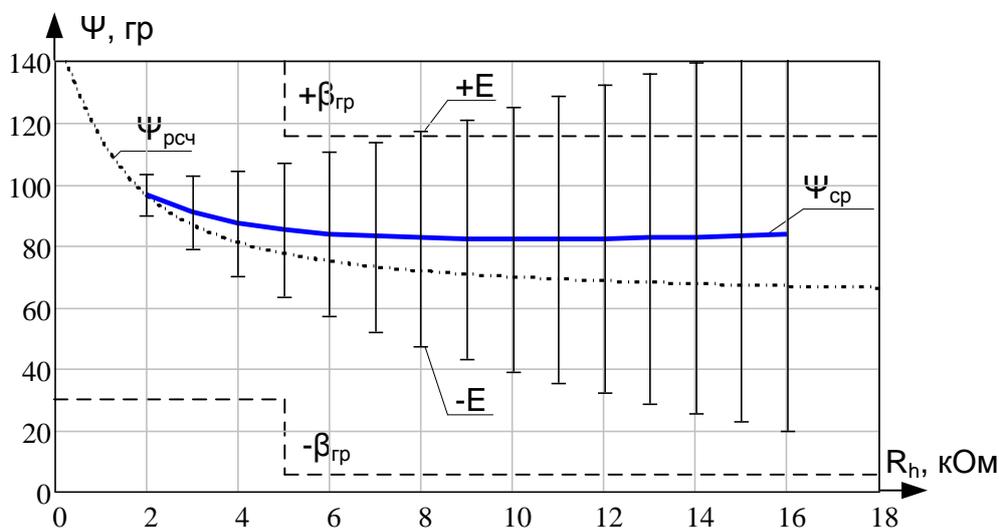


Рисунок 5.11. Результаты работы БПР в функции сопротивления утечки R_h при объеме выборки $n = 5$; $\psi_{ср}$, $\psi_{рсч}$ — соответственно, текущее среднее и расчетное (теоретическое) значения аргумента ПН; $\pm E$, — границы доверительного интервала среднего; $\beta_{гр}$ — границы ОФИ

Характерная особенность данного обобщения состоит в том, что начиная с сопротивления утечки $R_h = 8$ кОм доверительный интервал среднего аргумен-

та ПН выходит за пределы ОФИ. Интерпретировать этот результат можно, очевидно, только тем, что объема выборки $n = 5$ при $R_h > 7$ кОм недостаточно для принятия обоснованного решения и УВФ должен продолжать работу.

Более благоприятными являются данные обобщения, приведенные на Рисунок 5.12 для объема выборки $n = 10$. Доверительный интервал среднего по сравнению с предыдущим обобщением (рис. 5.11) на всем диапазоне изменения сопротивления утечки уменьшается более чем в 2 раза и находится в пределах ОФИ, причем, минимальный запас устойчивости (при $R_h = 15$ кОм) составляет $\approx 15^\circ$.

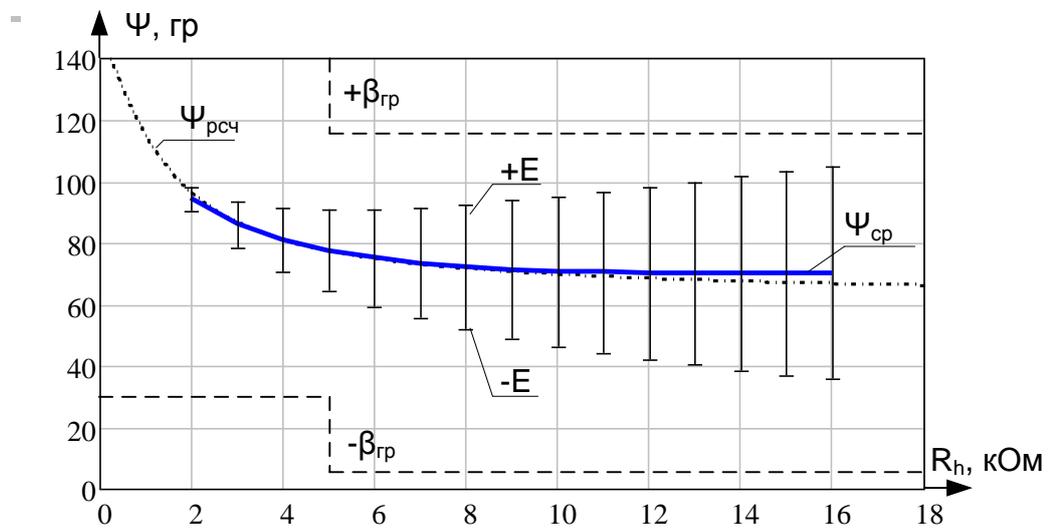


Рисунок 5.12. Результаты работы БПР в функции сопротивления утечки R_h при объеме выборки $n = 10$. Время работы БПР ≈ 5 мс; $\Psi_{ср}$, $\Psi_{рсч}$ — соответственно, текущее среднее и расчетное значения аргумента ПН; $\pm E$ — границы доверительного интервала; $\beta_{гр}$ — границы опорного интервала

На Рисунок 5.13 приведены данные, аналогичные данным Рисунок 5.12, но для объема выборки $n = 20$. Для этого обобщения также характерно заметное уменьшение доверительного интервала. Это значит, что рост интенсивности помех и искажающих факторов не может сорвать работу программы УВФ или привести к ее неустойчивости, но может привести к замедлению процесса идентификации.

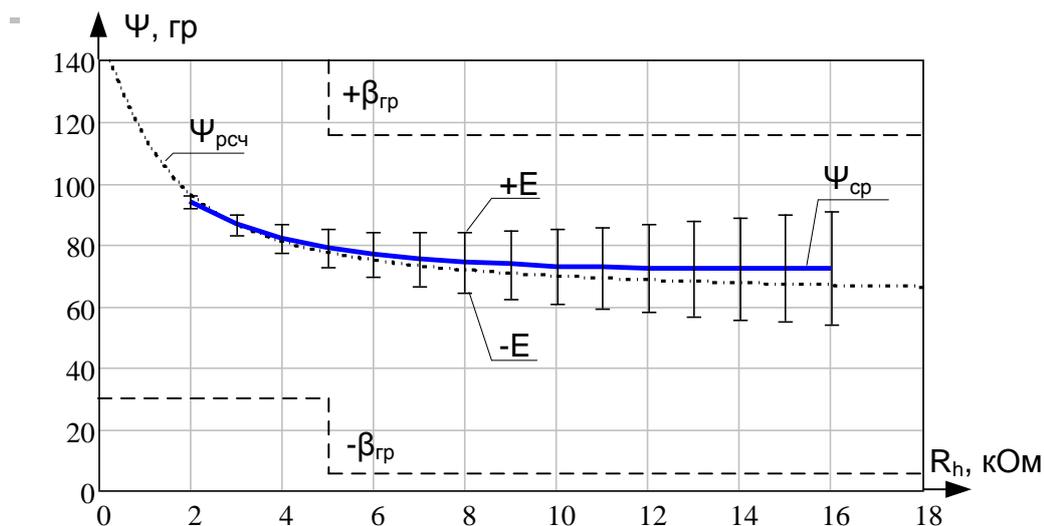


Рисунок 5.13. Результаты работы БПР в функции сопротивления утечки R_h при объеме выборки $n = 20$. Время работы БПР ≈ 5 мс; $\psi_{ср}$, $\psi_{рсч}$ — соответственно, текущее среднее и расчетное значения аргумента ПН; $\pm E$ — границы доверительного интервала; $\beta_{гр}$ — границы опорного интервала

Тем не менее, в области высокоомной утечки ($R_h > 15$ кОм, $C > 0.7$ мкФ) могут возникнуть неблагоприятные условия, когда запаса устойчивости УВФ окажется недостаточно. Такие условия могут возникнуть, например, при неблагоприятной поперечной несимметрии, когда ее “фоновая” составляющая оказывается в противофазе с основным сигналом, на который, к тому же, наложен длительный переходный процесс. В этих условиях среднее по модулю значение ПН находится вблизи точки включения БПР, и интенсивное совместное воздействие динамических и высших гармонических составляющих может привести к перемежающейся работе УВФ. Для сопротивления тела человека, оказавшегося под напряжением, характерно снижение сопротивления из-за пробоя одежды (обуви) или кожи. Если это произойдет, УВФ работает в своем “штатном” режиме. В противном случае (если R_h не снижается), процесс идентификации может затянуться до срабатывания защитного отключения (≈ 200 мс), которое, к сожалению, еще не освобождает человека от воздействия тока из-за продолжающихся вращение электродвигателей.

Обработка и обобщение результатов экспериментальных исследований в полной мере подтверждают работоспособность, как предложенного способа, так и алгоритма, его реализующего.

Экспериментальное подтверждение нашла идея применения “плавающих” опорных фазовых интервалов, позволяющая расширить возможности способа.

Экспериментально подтверждено, что использование предложенного критерия принятия решения, состоящего в статистической обработке наблюдений (промежуточных значений аргумента ПН), и сопоставлении доверительного интервала их среднего с опорными фазовыми интервалами, позволяет алгоритму, реализующему способ, определять количество наблюдений (промежуточных результатов) необходимое и достаточное для принятия решения.

Более того, экспериментально установлено, что совместное применение критерия принятия решения и “плавающих” ОФИ позволяет алгоритму быть более гибким и легче приспосабливаться к меняющимся условиям в области помех и искажений, что, в свою очередь, подтверждает возможность применения способа в комбинированных сетях.

Вместе с тем эксперименты показали, что основным фактором, ограничивающим применение способа в области высокоомной утечки ($R_h > 16$ кОм при $C > 0.75$ мкФ или более строго при $U_u/U_\phi < 0.08$) являются не динамические составляющие переходного процесса, как это предполагалось ранее, а высшие гармонические в составе ПН, влияние которых возрастает с ростом сопротивления утечки и емкости сети. Очевидно, что для расширения области применения способа необходимо найти такое решение подавления высших гармоник, которое не внесет в основной сигнал ни амплитудных, ни, в особенности, фазовых искажений. Если эту задачу решить, то возможности предложенного способа расширяются не только в области защиты человека, но и в области диагностики поперечной несимметрии сети, что крайне важно для ее безопасной эксплуатации.

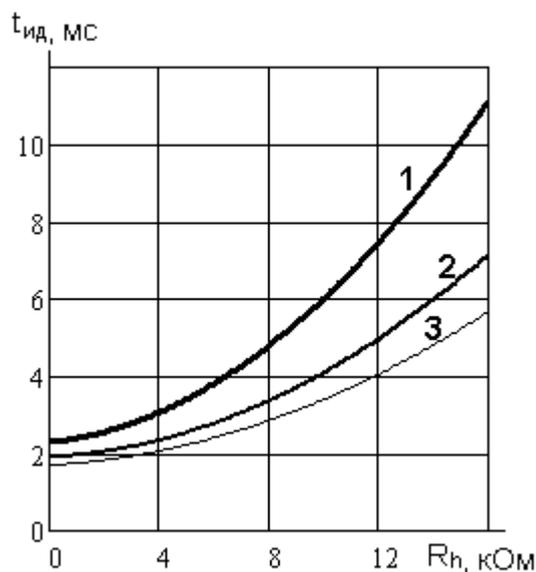


Рисунок 5.14. Время идентификации в зависимости от сопротивления утечки: 1 – максимальное; 2 – среднее; 3 – время работы БПР.

Обобщение результатов экспериментальных исследований позволяет оценить время идентификации $t_{ид}$, т.е. время с момента возникновения утечки до момента принятия решения и подачи команды на шунтирование. В Таблица Д.1 определено время работы БПР (с момента его запуска до принятия решения). Однако время с момента коммутации (возникновения утечки) до включения БПР Δt_1 определяется временем, за которое среднее по модулю значение ПН достигнет порога включения БПР и зависит не только от особенностей переходного режима (постоянной времени, фазы коммутации), но также от “фона” ПН и может меняться в широких пределах.

Время идентификации в зависимости от сопротивления утечки (при $C = 0.75$ мкФ) приведено на Рисунок 5.14. При этом максимальное время (кривая 1) определялось из условия, что составляющая “фона” ПН обусловлена наиболее неблагоприятной поперечной несимметрией. Эксперименты подтвердили, что максимальное время определения фазы, под напряжением которой оказался человек, в зависимости от его сопротивления (от 4 кОм до 14 кОм при $C = 0.75$ мкФ) находится в пределах от 3 мс до 11 мс.

5.5 Выводы по разделу 5

1. Экспериментально доказана работоспособность предложенного способа идентификации фазы, под напряжением которой оказался человек, и алгоритма, реализующего этот способ в области как низкоомной, так и высокоомной утечки. Запас устойчивости, обеспеченный в большинстве экспериментов, составляет до 20^0 , а расхождение между расчетными и полученными экспериментально средними аргументов ПН находятся в пределах от 2 до 10 градусов, что составляет от 2 до 8% объема ОФИ.

2. Установлено, что основным фактором, ограничивающим порог устойчивости УВФ пределом $U_u \approx 0.07U_\phi$ ($R_h \approx 15\text{кОм}$ при $C = 0.75\text{мкФ}$) являются высшие гармоники в составе ПН и поперечная несимметрия сети, в то время как экспоненциальные составляющие переходного процесса, способные затянуть время идентификации (на 1...3) мс, являются менее значимым фактором.

3. Доказано, что в области “низкоомной” утечки (среднее значение ПН $U_u > 0.3 U_\phi$, что соответствует $R_h < 5 \text{ кОм}$ при $C = 0.75\text{мкФ}$) никакие искажающие факторы не могут повлиять на работу УВФ или понизить его устойчивость.

4. Экспериментально доказана необходимость применения количественного показателя (критерия принятия решения), состоящего в том, что с опорными фазовыми интервалами сопоставляется доверительный интервал текущего среднего промежуточных результатов, что позволяет программе УВФ определить количество последних, необходимое и достаточное для принятия обоснованного решения вне зависимости от интенсивности искажающих факторов.

5. Получила экспериментальное подтверждение идея “плавающих” опорных фазовых интервалов, в частности доказано, что в области высокоомной утечки ($U_u < 0.3U_\phi$) смещение последних на 25 – 30 градусов в сторону отстающей фазы повышает избирательность и запас устойчивости УВФ, а реализация указанного смещения в функции среднего значения ПН упрощает алгоритм УВФ и его программное обеспечение.

6. Экспериментально установлено, что совместное применение критерия принятия решения и “плавающих” ОФИ позволяет алгоритму УФФ быть более гибким и легче приспосабливаться к меняющимся условиям помех и искажений, что, в свою очередь, подтверждает возможность применения способа в комбинированных сетях с меняющейся частотой и амплитудой напряжения источника питания.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, в которой дано теоретическое обоснование и практическое решение актуальной научно-технической задачи по обеспечению электробезопасности человека, эксплуатирующего шахтное электрооборудование напряжением до 1000 В, что позволило создать быстродействующий способ определения поврежденной фазы сети с изолированной нейтралью, в которой возникает утечка тока на землю, и научно обосновать, что предложенный алгоритм идентификации поврежденной фазы устойчиво функционирует, как в условиях длительного переходного процесса, так и при неоднократном скачкообразном изменении сопротивления утечки в пределах от 15 до 1 кОм, а также при одновременном воздействии нескольких возмущающих факторов.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Усовершенствована математическая модель электродвигателя в режиме свободного выбега, позволившая уточнить закон изменения частоты и амплитуды его ЭДС в функции механической и электромагнитной постоянных времени, исследовать два этапа динамического режима сети после ее защитного отключения и определить закон изменения тока утечки на этих этапах.

2. Установлено, что интегральные показатели тяжести поражения при защитном шунтировании по сравнению с защитным отключением снижаются в 1.5 – 2 раза вследствие того, что человек не подвергается воздействию ЭДС двигателей в режиме свободного выбега и уменьшается время его пребывания под напряжением.

3. Предложен новый быстродействующий способ определения фазы с утечкой, отличающийся от известных тем, что с опорными фазовыми интервалами сопоставляется серия промежуточных значений аргумента ПН, определяемых из мгновенных значений последнего и считываемых через равные интер-

валы времени; а также разработаны математическая модель и алгоритм функционирования УВФ, реализующего предлагаемый способ.

4. Впервые установлено, что в области низкоомной утечки ($R_h < 5$ кОм) УВФ функционирует устойчиво как при наличии продольной или поперечной несимметрии, так и при воздействии высших гармоник и динамических составляющих переходного процесса, а также при скачкообразном изменении сопротивления утечки, когда новый переходный процесс, накладывается на неоконченный предыдущий.

5. В области высокоомной утечки ($R_h > 10$ кОм) динамические и высшие гармонические составляющие ПН приводят к более широкому разбросу промежуточных значений его аргумента, а наличие “фона” потенциала нейтрали, обусловленного поперечной несимметрией кабельной сети, может создать абсолютную систематическую погрешность промежуточных результатов, достигающую 15^0 .

6. Впервые установлено, что наиболее неблагоприятным для УВФ вариантом поперечной несимметрии следует считать снижение сопротивления двух неаварийных фаз (двухфазная утечка) до уровня, еще недостаточного для срабатывания защитного отключения, когда “фон” ПН находится в противофазе к аварийному сигналу, что может снизить чувствительность УВФ по сопротивлению утечки на $\approx 20\%$.

7. Впервые доказано, что устойчивость УВФ можно повысить, применив “плавающие” опорные интервалы, смещение которых осуществляется в функции интегрального значения ПН, а также доказано, что для решения задачи достаточно двух состояний ОФИ, граница между которыми по сопротивлению утечки находится в пределах от 4 кОм до 6 кОм.

8. Предложен критерий принятия решения, позволяющий УВФ определять количество промежуточных результатов, достаточное для принятия обоснованного решения, состоящий в том, что для заданной доверительной вероятности определяется доверительный интервал среднего промежуточных результатов, который сопоставляется с положением ОФИ.

9. Впервые доказано, что предложенный способ и алгоритм его реализации применимы в комбинированной сети, если частота преобразователя уточняется в каждый момент перехода линейных напряжений через нуль; а при изменении порядка чередования фаз с прямого на обратный, ОФИ смещаются на шестую часть периода в сторону опережения, а два из них меняются местами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.С. 335763 (СССР) Устройство для выбора поврежденной фазы сети. / Н.В. Шишкин, В.И. Микрюков, В.В. Шкабер и др. Оpubл. в Б.И., 1972. №13.
2. А.С. 531228 (СССР) Устройство для защиты от поражения электрическим током. / А.И. Быков, В.П. Колосюк, В.С. Дзюбан и др. Оpubл. в Б.И., 1976. №37.
3. А.С. 636736 (СССР) Устройство для выбора поврежденной фазы. / В.В. Назаров. Оpubл. в Б.И., 1976. №45.
4. А.С. 744819 (СССР) Устройство для выбора поврежденной фазы в трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью / В.О. Жидков. Оpubл. в Б.И., 1980. №24.
5. А.С. 838866 (СССР) Устройство для выбора поврежденной фазы в трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью / В.О. Жидков, Ю.Н. Ильин, Н.А. Щур и др. Оpubл. в Б.И., 1981. №22.
6. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – Изд. 2, перераб. и доп. – М.: Наука, 1976. –279 с.
7. Айвазян, С.А. Статистическое исследование зависимостей / С.А. Айвазян – М.: Металлургия, 1968. – 227 с.
8. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях / В.П. Шкрабец, Н.А. Шидловская, В.С. Дзюбан, К.А. Вареник. – Днепропетровск: Нац. Горный ун–т, 2006.151 с.
9. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия: ГОСТ 22929-78. С изменениями согласно ИУС 11-80, 7-81, 11-83. Соответствует СТ СЭВ 2309-80. – [Вступил в силу 01.01.1979]. – М.: Изд-во стандартов, 1987. 13с. – (Межгосударственный стандарт).

10. Бахвалов, Н.С. Численные методы (анализ, алгебра, обыкновенные дифференциальные уравнения) / Н.С. Бахвалов. – М.: Недра, 1975. – 631 с.»
11. Белошистов, А.И. Проблемы защиты от утечек тока на землю распределительных сетей угольных шахт, содержащих силовые полупроводниковые элементы / А.И. Белошистов, В.Н. Савицкий // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго – Восток, ЛТД», 2004. – . 78 –83.
12. Веников, В.А. Теория подобия и моделирование (применительно к задачам электроэнергетики). / В.А. Веников. - М., «Высшая школа», 1976. - 479 с.
13. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей. / Е.С. Вентцель. М.: изд –во «Академия», 2003, –576 с.
14. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения (ГОСТ 8.207 – 76. С изменениями ИУС №7 1978 г.) ДСТУ ГОСТ 8.207:2008 [Введен в действие с 2008-10-01]. - К.: - Госпотребстандарт Украины, 2008. – 10 с. – (Национальный стандарт Украины).
15. Готин, Б.О. Сравнение двух путей численного определения поврежденной фазы в сети с изолированной нейтралью. / Б.О. Готин, Е.В. Черноус // Электротехнические и электромеханические системы. 17-я Всеукраинская конференция. Сб. науч. трудов. - Севастополь, СевНТУ, 2012. – С.10-11.
16. Демидович, Б.П. Основы вычислительной математики. / Б.П. Демидович, И.А. Марон. – М.: Наука, 1970. – 664 с.
17. Дзюбан, В. С. Об электромагнитной постоянной времени затухания обратной э.д.с. шахтных электродвигателей / В.С. Дзюбан, Я.С. Риман. В кн. Взрывобезопасное электрооборудование. Вып. 9. М.:Энергия, 1969.
18. Дзюбан, В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / В.С. Дзюбан. – М.: Недра. 1982. – 152 с.
19. Дзюбан, В.С. Взрывозащищенные аппараты низкого напряжения / В.С. Дзюбан. – М.: Недра, 1993. – 151 с.

20. Дзюбан, В.С. Требования к взрывозащищенному электрооборудованию и системам электроснабжения горных машин на напряжение 3 (3,3) кВ / В.С. Дзюбан, Н.М. Басов // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. Трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2009. С 209 –213.
21. Долин, П.А. Основы техники безопасности в электроустановках [учебн. пособие для вузов]. / П.А. Долин– [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.
22. Жидков, В.О. Комбинированная система защиты от замыканий на землю и поражения электротоком в сетях 6 кВ угольных разрезов / В.О. Жидков, Г.И. Макаров // Тр. ВостНИИ, т. 25 Предупреждение травматизма и аварий в угольных шахтах. – Кемерово, 1976. С. – 101 – 109.
23. Забезпечення безпеки та ефективності шахтних електроустановок / Вареник Є.О., Випанасенко С.І., Дзюбан В.С. та ін.; за ред. Г.Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Нац. гірничий ун – т, 2004. – 334 с.
24. Закс, Л.С.; Статистическое оценивание / Л.С. Закс пер. с нем. В.Н. Варыгина под ред. Ю.А. Адлера, В.Г. Горского. – М.: Статистика, 1976. – 598 с.
25. Ивоботенко, Б.А. Планирование эксперимента в электротехнике / Б.А. Ивоботенко. – М.: – Энергия, 1975. – 84 с.
26. Кизимов, Н.А. Зависимость величины безопасного электрического тока от времени его действия на организм. / Н.А. Кизимов, О.В. Обоницкая // Труды МакНИИ, т. 16 – Недра, 1962.
27. Кирьянов, Д.В. Mathcad 14. / Д.В. Кирьянов. – СПб.:БХВ – Петербург, 2007. – 704 с.: ил.
28. Киселев, Н.Л. О критериях электробезопасности / Н.Л. Киселев, С.П. Власов // Промышленная энергетика. – 1971. – №4 – С. 37 –39.
29. Ковалев, А.П. Динамическая погрешность аргумента потенциала нейтрали. / А.П. Ковалев, Е.В. Черноус // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО “АИР”, 2012. С. 143-147.
30. Ковалев, А.П. Моделирование шахтной участковой сети при двухфазном замыкании на землю / А.П. Ковалев, В.П. Черноус, Е.В. Черноус // Нау-

- кові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Вип. 41, серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: ДонНТУ, 2002. – Вип. 41. - С. 234-238.
31. Ковальов, О.П. Про «плаваючі» опорні інтервали при визначенні фази з витоком. / О.П. Ковальов, Є.В. Черноус // IV міжнародна науково – техн. конф. «Керування режимами роботи об'єктів електричних та електромеханічних систем 2013. КРЕС – 2013» Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Вип. 2 (15), серія «Електротехніка та енергетика». – Донецьк: ДонНТУ, 2013. – Вип. 2 (15). С.133–136.
32. Колосюк, В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок / В.П. Колосюк . – М.: Недра, 1980. 334 с.
33. Колосюк, В.П. Связь первичных критериев электробезопасности с параметрами защитного отключения. Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. / В.П. Колосюк, Ю.В. Товстик // Сб. тр. МакНИИ. – Макеевка – Донецк. – 2004. –С. 255 – 263.
34. Ландкоф, Л.Б. Совершенствование двигателей угольных комбайнов и электроснабжение очистных забоев / Л.Б. Ландкоф, И.Я. Чернов // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. Трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2007. С. 242-249.
35. Лейбов, Р.М. Электрификация подземных горных работ / Р.М. Лейбов, Озерной М.И. – М.: Недра, 1972. – 464 с.
36. Маренич, К.М. Зворотні енергетичні потоки асинхронних двигунів як фактор небезпеки в електромережі шахти: монографія / К.М. Маренич, С.В. Василюк – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ»2012. – 206 с.
37. Маренич, К.Н. К анализу проблематики электробезопасности участковой электросети, обусловленной действием ЭДС вращения электродвигателя. Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах /К.Н. Маренич, Ю.В. Товстик // Сб. тр. МакНИИ. – Макеевка – Донецк. – 2005. –С. 233 – 238.

38. МИ 2083 – 90. ГСОЕИ. Рекомендация. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. М.: - Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. – 19 с.
39. Надежность систем энергетики. Терминология. Сборник рекомендуемых терминов. – М.: Наука, 1980. Вып. 95. – 44 с.
40. Научные основы (теория) электробезопасности / [Малиновский А.А., Никонца Л.А., Голубов С.В. и др.]; под ред. Никонца Л.А.– Львов: НВФ «Украинские технологии», 2008. – 224 с.
41. Озерной, М.И. Электрооборудование и электроснабжение подземных разработок угольных шахт / М.И. Озерной – [5-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Недра, 1975. – 448 с.
42. Пат. Российская Федерация, 2150167 МПК7 H02H 3/16, G01R 31/08. Способ определения поврежденной фазы на землю в трехфазной сети с изолированной нейтралью / Е.В. Сергин, В.П. Кононенко – 99112719/09. Заявл. 10.06.1999. Опубл. 27.05.2000. – 9 с.: ил.
43. Патент на винахід №104695, МПК H02H 3/16, G01R 31/08. Спосіб визначення пошкодженої фази в комбінованих електричних мережах з ізольованою нейтраллю. / Є.В. Черноус, О.П. Ковальов, В.П. Черноус, Б.О. Готін. а 201303104. Заявл. 14.03.2013. Опубл.25.02.2014. Бюл. № 4,- 6 с.: іл.
44. Патент на корисну модель 10320 (UA), МПК (2006) G01R 31/08 Способ определения поврежденной фазы на землю в трехфазной сети с изолированной нейтралью / Е.С. Шурин, Л.А. Муфель – u200503429. Заявл. 12.04.2005. Опубл. 15.11.2005, Бюл. №11 – 2 с.
45. Патент на корисну модель 46748 (UA), МПК (2009) H02H 3/00 Спосіб автоматичної компенсації ємнісних струмів витоку в трифазних електричних мережах з ізольованою нейтраллю. / В.М. Савицький , О.І. Белошистов, О.В. Савицький – u2009 04385. Заявл. 05.05.2009. Опубл. 11.01.2010. Бюл. №1.
46. Патент на корисну модель 51307 (UA), МПК (2009) H02H 3/16 G01R 31/08 Спосіб визначення пошкодженої фази з витоком на землю в елек-

- тричній мережі з ізольованою нейтраллю / Є.В. Черноус. u 2010 00703. Заявл.25.01.2010, Опубл.12.07.2010. Бюл. № 13, - 6 с.: іл.
47. Патент на корисну модель № 63716 (UA), МПК H02H 3/16 G01R 31/08 Спосіб визначення пошкодженої фази з витоком на землю в електричній мережі з ізольованою нейтраллю / Є.В. Черноус. u 2010 13824. Заявл.22.11.2010, Опубл.25.10.2011. Бюл. № 20, - 4 с.: іл.
48. Пахомов, А.Ф. К вопросу о критериях опасности и допустимости токов. / А.Ф. Пахомов, Г.С. Солодовников // Промышленная энергетика. – 1971. – №4 – С. 37 –39
49. Первичные критерии электробезопасности при кратковременных воздействиях токов промышленной частоты / М.С. Богушевич, С.П. Власов, Н.Л. Гурвич // Электричество. – 1975. - №5. – С. 43-46.
50. Перхач, В.С. Теоретична електротехніка. / В.С. Перхач. К.: «Вища школа», 1992. – 439 с
51. Правила безпеки у вугільних шахтах [Електронний ресурс]: затверджено наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду 22.03.2010 N 62. – К., 2010. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0398-10>.
52. Пустыльник, Е.И. Статистические методы обработки наблюдений. – М. «Наука». 1968. – 288 с.
53. Савин, В.Ф. Существует ли общая энергетическая мера различных аварийных поражающих воздействий на человека? / В.Ф. Савин // Безопасность труда в промышленности. – 1999. – № 6.
54. Савицкий, В.Н. Защита от токов утечки в комбинированных распределительных сетях угольных шахт [Электронный ресурс] / В.Н. Савицкий, Н.И. Стадник. – Режим доступа: <http://ukrniivecom.ua/ru/article/>
55. Справочник энергетика угольной шахты: в 2-х т. / [В.С. Дзюбан, И.Г. Ширнин, Б.Н. Ванеев, В.М. Гостищев]; под редакцией Б.Н. Ванеева. – [5-е изд., перераб. и доп.]. – Донецк: ООО «Юго=Восток, Лтд», 2001.– Т.1: (Гл. 1 – 21). – 447 с.; Т.2.: (Гл. 22 – 44). – 440 с.

56. Устройства защитного отключения. Классификация, Общие технические требования. ГОСТ 12.4.155 –85. [Введен в действие с 1986 – 01 –01]. – М.: изд-во стандартов, 1985. – 9 с.
57. Херовиц, П. Искусство схемотехники в 3 –х т., т.2 / П. Херовиц, У. Хилл; пер. с англ. – [4-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Мир, 1993. – 371 с.
58. Цапенко, Е.Ф. Горная электротехника: [учебн. для техникумов] / [Е.Ф. Цапенко, М.И. Мирский, О.К. Сухарев]; под ред. Е.Ф. Цапенко.–М.: Недра, 1986. – 437 с.
59. Цапенко, Е.Ф. О компенсации токов утечки на землю в шахтных сетях при применении рудничных аппаратов типии УАКИ, АЗАК, АЗШ, АЗУР / Е.Ф Цапенко // Промышленная энергетика, – 1999. – №4 – С. 35 – 36.
60. Цапенко, Е.Ф. Резонансные перенапряжения в шахтных сетях при компенсации токов утечки на землю. // Е.Ф. Цапенко // Промышленная энергетика. – 1998.– №10. – С. 32-33.
61. Цапенко, Е.Ф. Шахтные кабели и электробезопасность сетей / Е.Ф. Цапенко, Л.И., Сычев, П.Н. Кулешов; [3–е изд., перераб. и доп.] – М.: Недра, 1998. – 213 с.
62. Цапенко, Е.Ф. Электробезопасность на горных предприятиях: учеб. пособие / Е.Ф. Цапенко, С.З. Шкудин. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2001. – 103 с.
63. Черноус, Е.В. Быстродействующий способ определения поврежденной фазы шахтной участковой сети. / Е.В. Черноус, Д.А. Богданов // Автоматизация технологичних об'єктів та процесів. Пошук молодих: X науково-технічна конференція аспірантів та студентів, 18-20 травня 2010 р.: - зб. наук. праць. - Донецьк: ДонНТУ, 2010. – С.216-218.
64. Черноус, Е.В. Математическая модель асинхронного двигателя как составная часть модели шахтной участковой сети после аварийного отключения. / Е.В. Черноус, И.И. Белинская // Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах: Материалы международной научно-технической конференции,

- 24-28 сентября 2007 г.: сб. науч. трудов. – Севастополь: СевНТУ, 2007. – С. 64–68.
65. Черноус, Е.В. Моделирование режима заземляющего контура при двухфазном замыкании шахтной участковой сети в разнесенных точках / Е.В. Черноус // Донбас-2020: наука і техніка – виробництву: II науково-практична конференція, 03-04 лютого 2004 року.: зб. наук. праць. - Донецьк: ДонНТУ, 2004. С. 353-357.
66. Черноус, Е.В. Об оценке электробезопасности сети с изолированной нейтралью. / Е.В. Черноус, А.П. Ковалев, В.П. Черноус // Электричество. – 2006 – № 5 – С. 59 – 61.
67. Черноус, Е.В. О быстродействии в определении фазы с утечкой в сети с изолированной нейтралью. / Е.В. Черноус, Б.А. Готин // Сучасні проблеми електропостачання промислових та побутових об'єктів. Збірник наукових праць I Всеукраїнської науково-технічної конференції викладачів, аспірантів і студентів: 18-19 жовтня 2012 р., зб. наук. праць. - м. Донецьк: ДонНТУ, 2012. С.145–146.
68. Черноус, Е.В. О динамических свойствах быстродействующего алгоритма выбора поврежденной фазы сети с изолированной нейтралью / Е.В. Черноус // Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Вип. 10 (180), серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: ДонНТУ, 2011.– С.208–210.
69. Черноус, Е.В. О моделировании процессов в шахтных сетях 660 В с изолированной нейтралью при комплексации токов утечки на землю / Е.В. Черноус, А.А. Чурсинова // Матеріали міжнародної науково технічної конференції “Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації”. Наукові праці Кременчуцького державного політехнічного університету: 19.05.2004 р., м. Кременчуг, 2004. – С. 156-158
70. Черноус, Е.В. Об альтернативном варианте защиты шахтной сети от тока утечки / Е.В. Черноус // Электричество № 8, август 2009. – Москва 2009. - С. 33-36.

71. Черноус, Е.В. Об оценке третьей гармоники в составе утечки шахтной участковой сети / Е.В. Черноус, И.И. Белинская, М.В. Апухтин // Міжнародна науково-технічна конференція присвячена 100-річчю з дня народження проф. М.А. Кіклевича. Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Вип. 7 (128), серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: ДонНТУ, 2007.–Вип. 7 (128).–С.208–209.
72. Черноус, Е.В. Определение поврежденной фазы в сети с изолированной нейтралью при наличии высших гармоник в составе потенциала нейтрали. / Черноус Е.В. // Міжнародна науково-технічна конференція присвячена 90-річчю Донецького Національного Технічного Університету. Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Вип. 11 (186), серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: ДонНТУ, 2011 – вип. 11 (186). - С.422–424.
73. Черноус, Е.В. Погрешность потенциала искусственной нейтрали. / Е.В. Черноус, В.Х. Антамонов, С.В. Солёный // Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів. Матеріали I Всеукраїнської науково-технічної конференції викладачів, аспірантів і студентів, 18-19 жовтня 2012 р., зб. наук. праць. – м. Донецьк: ДонНТУ, 2012. С. 47-49.
74. Черноус, Е.В. Учет несимметрии в алгоритме поиска поврежденной фазы сети с изолированной нейтралью. / Е.В. Черноус // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО “АИР”, 2010. С.116–121.
75. Черноус, Є.В. Математична основа та межі статичної стійкості швидкодіючого способу визначення пошкодженої фази. / Є.В. Черноус // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО “АИР”, 2011. С.212-217.
76. Шнеерсон, Э.М. Цифровая релейная защита. М.: Энергоатомиздат, 2007. — 549 с.: ил. — ISBN 978-5-283-03256-6.

77. Щуцкий, В.И. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок / В.И. Щуцкий, В.О. Жидков, Ю.Н. Ильин – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.:ил.
78. Щуцкий, В.И. Электрификация подземных горных работ: [учебн. для вузов] / Щуцкий В.И., Волощенко Н.И., Плащанский Л.А.– М.: Недра, 1986. – 364 с.
79. Электрификация горных работ: учебн. для вузов/[М.М. Белый, В.Т. Заика, Г.Г. Пивняк и др.]; под ред. Г.Г. Пивняка.– М.: Недра, 1992.–383 с.
80. Электробезопасность в горнодобывающей промышленности / [Л.В. Гладилин, В.И. Щуцкий, Ю.Г. Бацежев, Н.И. Чеботаев] – М.: Недра, 1986. – 364 с.
81. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (ГОСТ 12.1.038 – 82 с изменениями ИУС № 4 1988 г.) ДСТУ ГОСТ 12.1.038:2008 [Введен в действие с 2008 – 10 – 01]. – К.: Госпотребстандарт Украины, 2008 – 6 с. – (Национальный стандарт Украины).
82. Электроснабжение угольных шахт / [С.А. Волотковский, Ю.Т. Разумный, Г.Г. Пивняк и др.]. – М.: Недра, 1984. – 376 с.
83. Ягудаев, Б.М. Защита от электропоражения в горной промышленности / Б.М. Ягудаев, Н.Ф. Шишкин, В.В. Назаров. – М.: Недра, 1982. – 152с.
84. AS/NZS 2081.3:2002 Electrical equipment for coal and shale mines. Electrical protection devices – Part 3: Earth-leakage protection systems for use on earth-fault current limited systems (IT systems). - Jointly published by Standards Australia International Ltd, GPO Box 5420, Sydney, NSW 2001 and standards New Zealand, Private Bag 2439, Wellington 6020. – ISBN 0 7337 4749 3.
85. Dalziel, C.F., Lee, W.R. Lethal Electric Currents / C.F. Dalziel, W.R. Lee – IEEE Spectrum, 1968. №2.
86. Electrical Safety in Grounded, Resistance Grounded and Ungrounded Systems. A Detailed Guideline for Installers, System Designers and Technical Person-

- nel. Bender Inc. 700 Fox Chase. Coatesville, PA 19320.
www.benderrelay.com.
87. Electrical Safety in mines. Ground Fault Protection Equipment for the mining industry. - Bender Inc. 700 Fox Chase. Coatesville, PA 19320.
www.benderrelay.com.
88. Health and Safety Executive (Управление по охране труда в Великобритании). <http://www.hse.gov.uk>.
89. IEC Guide 104: 1997, Guide to the drafting of safety standards and the role of committees with safety pilot functions and safety group functions.
90. International Electrotechnical Commission. IEC Report Publication 60479-1. Third edition. Effect of current on human beings and livestock. Part 1. General aspects. 1994-09.
91. ISO/IEC Guide 51: 1990, Guideline for the inclusion of safety aspects I standards.
92. Mine Safety and Health Administration 201 12th Street South, Suite 401 Arlington, VA 22202-5450. www.msha.gov.
93. Protection against earth faults with Residual Current Devices. Technical guide 2013. - ABB SACE A division of ABB S.p.A. Line Protection Devices. Viale dell'Industria, 18 20010 Vittuone (MI) – Italy. www.abb.com.

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Математические модели в режиме однофазной утечки

Так как внутренние сопротивления источника питания и эквивалентной нагрузки в десятки раз меньше поперечных сопротивлений кабельных коммуникаций и не влияют существенно на ток утечки, ими можно пренебречь, что позволяет снизить порядок динамических систем без снижения их достоверности. Упрощенные схемы замещения сети для двух типов присоединения компенсирующих устройств приведены на Рисунок 1.3. Ситуацию с момента возникновения утечки к моменту защитного отключения (≈ 200 мс) моделируют схемы первого этапа.

Динамическая модель цепи с емкостным фильтром характерна тем, что напряжения двух групп емкостей C и C_F взаимосвязаны, а также учитывая симметрию сети, содержит только три независимых накопителя энергии. В качестве последних наиболее целесообразно принять ток дросселя, напряжение на эквивалентной емкости кабеля фазы А и напряжение u_{FA} на емкости фазы А фильтра нулевой последовательности (Рисунок 1.3 а). В результате система полностью определяется тремя переменными состояниями и состоит из трех уравнений :

$$\begin{aligned}
 3 \cdot C_F \cdot \frac{du_{FA}}{dt} - i_D &= 3 \cdot C_F \cdot \frac{de_A}{dt} \\
 i_D + 3 \cdot C \cdot \frac{du_A}{dt} + u_A \cdot \left(\frac{1}{R_{II}} + \frac{3}{R} \right) &= 3 \cdot C \cdot \frac{de_A}{dt} + \frac{3 \cdot e_A}{R} \\
 L_D \cdot \frac{di_D}{dt} + R_D \cdot i_D - u_A + u_{FA} &= 0
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

где u_D , u_A , u_{FA} – соответственно: мгновенные значения переменных состояний: ток дросселя, фазное напряжение фазы А, напряжение на емкости фазы А фильтра нулевой последовательности;

$e_A = E_m \cdot \sin(\omega t + \psi)$ – мгновенное значение ЭДС фазы А источника питания;

ψ – начальная фаза, определяющая момент коммутации.

Что касается схемы Рисунок 1.3 а, то из ее конфигурации нет ясности о том, какие величины целесообразно взять в качестве переменных состояния. Поэтому опишем схему системой уравнений для мгновенных значений и проведем ряд преобразований.

Система уравнений цепи рис. 1.3 б, составленная для двух узлов и трех контуров, имеет вид.

$$i_{FA} + i_{FB} + i_{FC} - i_D = 0 \quad (\text{A.2})$$

$$i_D + C \cdot \frac{d}{dt}(u_A + u_B + u_C) + \frac{u_A + u_B + u_C}{R} + \frac{u_A}{R_{II}} = 0 \quad (\text{A.3})$$

$$\frac{u_{cp}}{dt} = i_D / C_p \quad (\text{A.4})$$

$$L_F \cdot \frac{d i_{FA}}{dt} + R_F \cdot i_{FA} + L_D \cdot \frac{d i_D}{dt} + R_D \cdot i_D + u_{cp} - u_A = 0 \quad (\text{A.5})$$

$$L_F \cdot \frac{d}{dt}(i_{FA} - i_{FB}) + R_F \cdot (i_{FA} - i_{FB}) = u_{AB} \quad (\text{A.6})$$

$$L_F \cdot \frac{d}{dt}(i_{FA} - i_{FC}) + R_F \cdot (i_{FA} - i_{FC}) = u_{AC} \quad (\text{A.7})$$

где: $i_{FA}, i_{FB}, i_{FC}, i_D$, – мгновенные значения токов фильтра и дросселя;

u_A, u_B, u_C, u_{Cp} - мгновенные значения фазных напряжений кабеля и разделительной емкости.

Последовательность преобразований следующая:

Суммируя известные соотношения $u_A - u_B = e_A - e_B$ и $u_A - u_C = e_A - e_C$, получаем выражение: $u_B + u_C = -3 \cdot e_A + 2 \cdot u_A$, применив которое к уравнению (A.3) получаем:

$$i_D + 3 \cdot C \cdot \frac{d}{dt}(u_A - e_A) + 3 \cdot \frac{(u_A - e_A)}{R} + \frac{u_A}{R_{II}} = 0 \quad (\text{A.8})$$

решаемое относительно $\frac{d u_A}{dt}$.

Суммируя уравнение (А.5) и (А.6), получаем:

$$L_F \cdot \frac{d}{dt}(2 \cdot i_{FA} - i_{FB} - i_{FC}) + R_F \cdot (2 \cdot i_{FA} - i_{FB} - i_{FC}) = 2 \cdot e_A - e_B - e_C = 3 \cdot e_A \quad (\text{А.9})$$

Из (А.2), учитывая $i_{FB} + i_{FC} = i_D - i_{FA}$, выражение (А.9) приводится к виду:

$$L_F \cdot \frac{d}{dt}(3 \cdot i_{FA} - i_D) + R_F \cdot (3 \cdot i_{FA} - i_D) = 3 \cdot e_A \quad (\text{А.10})$$

Решая совместно (А.5) и (А.10), получаем:

$$(3 \cdot L_D + L_F) \cdot \frac{d i_D}{dt} + (3 \cdot R_D + R_F) \cdot i_D - 3 \cdot u_A + 3 \cdot u_{CP} = -3 \cdot e_A \quad (\text{А.11})$$

также решаемое относительно $\frac{d i_D}{dt}$.

В результате полученные соотношения (А.8) и (А.9) совместно с (А.4) создают математическую модель цепи рис. 1.3 б, выраженную в форме Коши:

$$\begin{aligned} \frac{d i_D}{dt} &= - \frac{3 \cdot e_A - (3 \cdot R_D + R_F) \cdot i_D + 3 \cdot u_A - 3 \cdot u_{CP}}{3 \cdot L_D + L_F} \\ \frac{d u_A}{dt} &= \frac{d e_A}{dt} + \frac{e_A}{R \cdot C} - \frac{i_D}{3 \cdot C} - \frac{u_A}{3 \cdot C} \cdot \left(\frac{3}{R} + \frac{1}{R_{II}} \right) \\ \frac{d u_{CP}}{dt} &= \frac{i_D}{C_p} \end{aligned} \quad (\text{А.12})$$

Модели второго этапа функционируют с момента защитного отключения источника питания к моменту отключения контакторов потребителей вследствие снижения напряжения в сети. Переменные состояния динамических моделей второго этапа те же, что и у моделей первого этапа. Тем не менее, в отличие от последних, частота и амплитуда напряжения источника питания (двигателей, которые находятся в состоянии свободного выбега) переменные. Последнее приводит к нелинейности моделей второго этапа, который исключает "простое" аналитическое решение уравнений. Система уравнений второго этапа однофазной утечки, составленная с учетом ЭДС двигателей в состоянии выбега (А.7), (А.8), соответственно схеме рис. 1.3 а следующая:

$$\begin{aligned}
e_A(t) &= k_e \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U \cdot (1-s_n) \cdot \left(1 - \frac{t}{T_M}\right) \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_E}\right) \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot (1-s_n) \cdot \left(t - \frac{t^2}{2 \cdot T_M}\right)\right) \\
e'_A(t) &= A(t) \cdot \left(T_M \cdot \left(1 - \frac{t}{T_M}\right)^2 \cdot (1-s_n) \cdot \omega_0 \cdot \cos(\psi(t)) - \left(2 - \frac{t}{T_M}\right) \cdot \sin(\psi(t))\right) \\
A(t) &= k_e \cdot \frac{\sqrt{6}}{3} \cdot \frac{U \cdot (1-s_n)}{T_M} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_E}\right) \\
\psi(t) &= \omega_0 \cdot (1-s_n) \cdot \left(t - \frac{t^2}{2 \cdot T_M}\right) \\
3 \cdot C_F \cdot \frac{du_{FA}}{dt} - i_{\Delta} &= 3 \cdot C_F \cdot \frac{de_A}{dt} \\
i_{\Delta} + 3 \cdot C \cdot \frac{du_A}{dt} + u_A \cdot \left(\frac{1}{R_{II}} + \frac{3}{R}\right) &= 3 \cdot C \cdot \frac{de_A}{dt} + \frac{3 \cdot e_A}{R} \\
L_{\Delta} \cdot \frac{di_{\Delta}}{dt} + R_{\Delta} \cdot i_{\Delta} - u_A + u_{FA} &= 0
\end{aligned} \tag{A.13}$$

Система уравнений второго этапа для схемы рис. 1.3, б отличается только последними тремя уравнениями.

$$\begin{aligned}
e_A(t) &= k_e \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U \cdot (1-s_n) \cdot \left(1 - \frac{t}{T_M}\right) \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_E}\right) \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot (1-s_n) \cdot \left(t - \frac{t^2}{2 \cdot T_M}\right)\right) \\
e'_A(t) &= A(t) \cdot \left(T_M \cdot \left(1 - \frac{t}{T_M}\right)^2 \cdot (1-s_n) \cdot \omega_0 \cdot \cos(\psi(t)) - \left(2 - \frac{t}{T_M}\right) \cdot \sin(\psi(t))\right) \\
A(t) &= k_e \cdot \frac{\sqrt{6}}{3} \cdot \frac{U \cdot (1-s_n)}{T_M} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_E}\right) \\
\psi(t) &= \omega_0 \cdot (1-s_n) \cdot \left(t - \frac{t^2}{2 \cdot T_M}\right) \\
\frac{di_{\Delta}}{dt} &= \frac{-3 \cdot e_A - (3 \cdot R_{\Delta} + R_F) \cdot i_{\Delta} + 3 \cdot u_A - 3 \cdot u_{cp}}{3 \cdot L_{\Delta} + L_F} \\
\frac{du_A}{dt} &= \frac{3 \cdot C \frac{de_A}{dt} + \frac{3 \cdot e_A}{R} - i_{\Delta} - u_A \cdot \left(\frac{3}{R} + \frac{1}{R_h}\right)}{3 \cdot C} \\
\frac{du_{cp}}{dt} &= \frac{i_{\Delta}}{C_p}
\end{aligned} \tag{A.14}$$

Модель третьего этапа определена с момента отключения аварийного участка от сети до снижения напряжения к безопасному уровню. Она характеризуется только одной переменной состояния и независимо от схемы фильтра нулевой последовательности имеет вид:

$$\begin{aligned}
 e_A(t) &= k_e \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U \cdot (1-s_n) \cdot \left(1 - \frac{t}{T_M}\right) \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_E}\right) \cdot \sin\left(\omega_0 \cdot (1-s_n) \cdot \left(t - \frac{t^2}{2 \cdot T_M}\right)\right) \\
 e'_A(t) &= A(t) \cdot \left(T_M \cdot \left(1 - \frac{t}{T_M}\right)^2 \cdot (1-s_n) \cdot \omega_0 \cdot \cos(\psi(t)) - \left(2 - \frac{t}{T_M}\right) \cdot \sin(\psi(t))\right) \\
 A(t) &= k_e \cdot \frac{\sqrt{6}}{3} \cdot \frac{U \cdot (1-s_n)}{T_M} \cdot \exp(-t/T_E) \\
 \psi(t) &= \omega_0 \cdot (1-s_n) \cdot \left(t - \frac{t^2}{2 \cdot T_M}\right) \\
 \frac{du_A}{dt} &= \frac{3 \cdot C \frac{de_A}{dt} + \frac{3 \cdot e_A}{R} - u_A \cdot \left(\frac{3}{R} + \frac{1}{R_h}\right)}{3 \cdot C}
 \end{aligned} \tag{A.15}$$

где T_M , T_E – механическая и электромагнитная постоянные времени двигателя в режиме выбега.

Таким образом, исследование трех этапов аварийной ситуации, связанной с возникновением утечки, выполняется с помощью пяти разных математических моделей. Для удобства пользования номера моделей сведены в таблицу А.1.

Таблица А.1.

Математические модели для сравнительного анализа

Схема присоединения компенсирующего дросселя	
емкостной ФНП	индуктивный ФНП
(А.1)	(А.12)
(А.13)	(А.14)
(А.15)	(А.15)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Дополнительные материалы к разделу 2

Б.1 Пример реализации алгоритма расчета уравнений (2.2) и (2.3)

$$f(\psi_a, t_1) := \frac{\sin(\omega \cdot t_1 + \psi_a)}{\sin[\omega \cdot (t_1 + \Delta t) + \psi_a]} - \frac{u_N(t_1)}{u_N(t_1 + \Delta t)}$$

```

αa(t1) := | i ← 0
              | A ← A1(t1)
              | B ← A2(t1)
              | while |A - B| > AB
              |   | i ← i + 1
              |   | break if i > 50
              |   | C ← (A + B)·0.5
              |   | A ← C if f(A, t1)·f(C, t1) > 0
              |   | B ← C otherwise
              | C

```

Рисунок Б.15. Фрагмент программы вычисления i -того промежуточного значения аргумента ПН методом половинного деления

Список идентификаторов:

t_1 – текущая точка времени отсчета i -того значения ПН;

Δt – интервал времени между двумя смежными отсчетами;

$f(\psi_a, t_1)$ – функция пользователя, аналог функции (2.3);

$u_N(t_1), u_N(t_1 + \Delta t)$ – текущие мгновенные значения ПН;

$\alpha(t_1)$ – текущий результат работы программного модуля;

A, B, C – промежуточные переменные программного модуля;

AB – константа, задающая точность расчета.

Б.2 Математические модели для исследования установившегося режима однофазной утечки

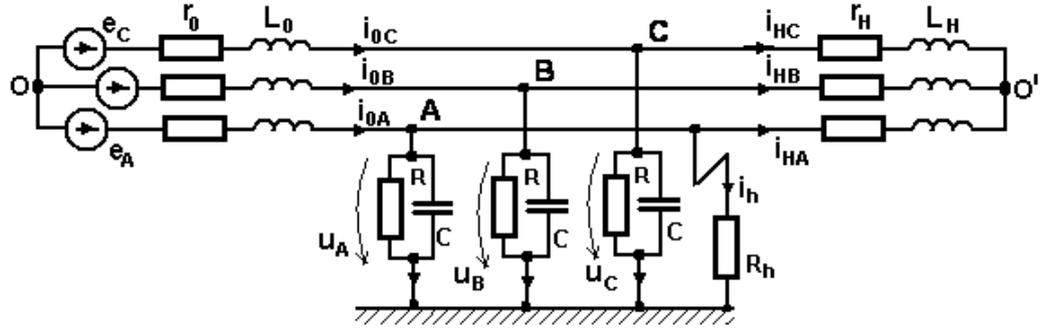


Рисунок Б.2.17. Упрощенная схема замещения сети

Модель сети для исследования установившегося режима однофазной утечки с учетом продольной или поперечной несимметрии (схема рис. Б.2.1):

$$\begin{aligned}
 \Psi_0 \cdot \left(\frac{3}{Z_0} \right) - \Psi_A \cdot \left(\frac{1}{Z_0} \right) - \Psi_B \cdot \left(\frac{1}{Z_0} \right) - \Psi_C \cdot \left(\frac{1}{Z_0} \right) &= 0 \\
 \Psi_1 \cdot \left(\frac{1}{Z_{nA}} + \frac{1}{Z_{nB}} + \frac{1}{Z_{nC}} \right) - \Psi_A \cdot \left(\frac{1}{Z_{nA}} \right) - \Psi_B \cdot \left(\frac{1}{Z_{nB}} \right) - \Psi_C \cdot \left(\frac{1}{Z_{nC}} \right) &= 0 \\
 \Psi_A \cdot Y_A - \Psi_0 \cdot \frac{1}{Z_0} - \Psi_1 \cdot \frac{1}{Z_{nA}} &= \frac{E_A}{Z_0} \\
 \Psi_B \cdot Y_B - \Psi_0 \cdot \frac{1}{Z_0} - \Psi_1 \cdot \frac{1}{Z_{nB}} &= \frac{E_B}{Z_0} \\
 \Psi_C \cdot Y_C - \Psi_0 \cdot \frac{1}{Z_0} - \Psi_1 \cdot \frac{1}{Z_{nC}} &= \frac{E_C}{Z_0} \\
 Y_A &= \frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_{nA}} + \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_h} + j\omega C \\
 Y_B &= \frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_{nB}} + \frac{1}{R_B} + j\omega C \\
 Y_C &= \frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_{nC}} + \frac{1}{R_C} + j\omega C
 \end{aligned}
 \tag{Б.1}$$

где: Ψ_0, Ψ_1 – потенциалы нейтралей источника питания и эквивалентного потребителя соответственно;

Ψ_A, Ψ_B, Ψ_C – потенциалы фаз магистрального кабеля;

$Z_{nA} = Z_n = r_n + j \cdot \omega \cdot L_n$, $Z_{nB} = Z_n \cdot k'_{nc}$, $Z_{nC} = Z_n / k'_{nc}$ – комплексы эквивалентных сопротивлений нагрузки (имитация продольной несимметрии); k'_{nc} – коэффициент продольной несимметрии;

$Y_A = 1/R + j \cdot \omega \cdot C$, $Y_B = k''_{nc}/R + j \cdot \omega \cdot C$, $Y_C = 1/k''_{nc} \cdot R + j \cdot \omega \cdot C$ – комплексы поперечных проводимостей (имитация поперечной несимметрии);

k''_{nc} – коэффициент поперечной несимметрии;

E_A, E_B, E_C – комплексы эквивалентных фазных ЭДС;

$Z_0 = r_0 + j \cdot \omega \cdot L_0$ – комплекс внутренних сопротивлений источника питания.

Математическая модель (Б.1), описывающая сеть в режиме однофазной утечки, позволяет получить зависимости $\psi(R_h, C)$ и $U_u / U_\phi = f(R_h, C)$, один из вариантов графиков которых приведен на рис. Б.2.2.

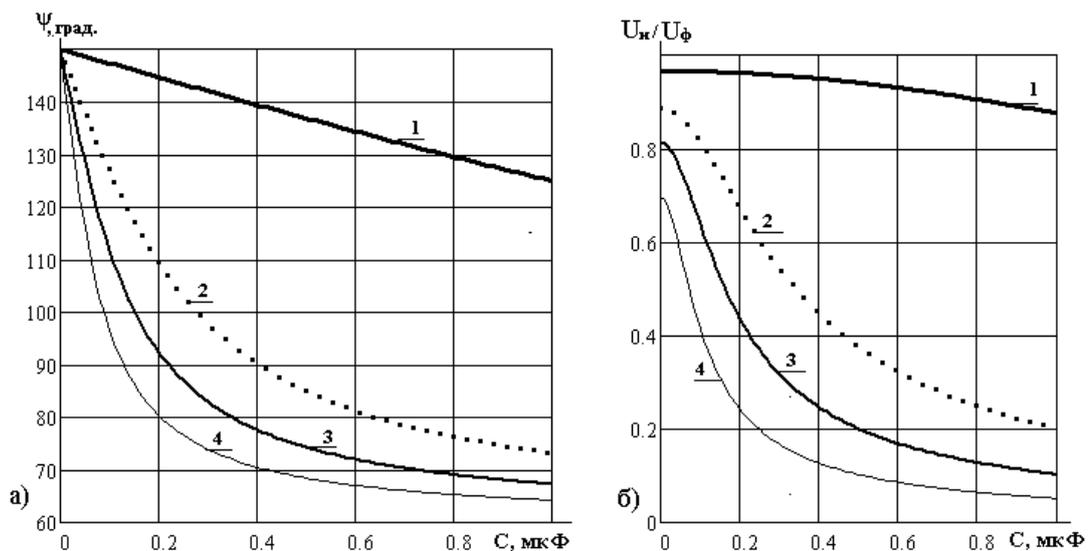


Рисунок Б.2.1. Графики зависимостей аргумента ПН (а) и интегрального значения ПН (б) в функции сопротивления утечки и емкости сети при $R = 300$ кОм.. Значения сопротивления утечки (кОм): 1 – 0.5; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 20

Полученные зависимости не позволяют осуществлять управление смещением опорных фазовых интервалов непосредственно из-за влияния двух параметров одновременно, однако они позволяют перейти к функции $\psi(U_u)$, являющейся основным инструментом управления ОФИ. Графики зависимости $\psi(U_u)$ приведены на рис. 2.5.

Б.3 Графики функции (2.3)

Данный опыт повторяет исследование, представленное Рисунок 2.4, с новым коэффициентом погрешности $kn = 0.75$. Это означает, что отношение входных данных $u_N(t_1)/u_N(t_1+\Delta t)$ изменено на 25% в сторону уменьшения этого отношения.

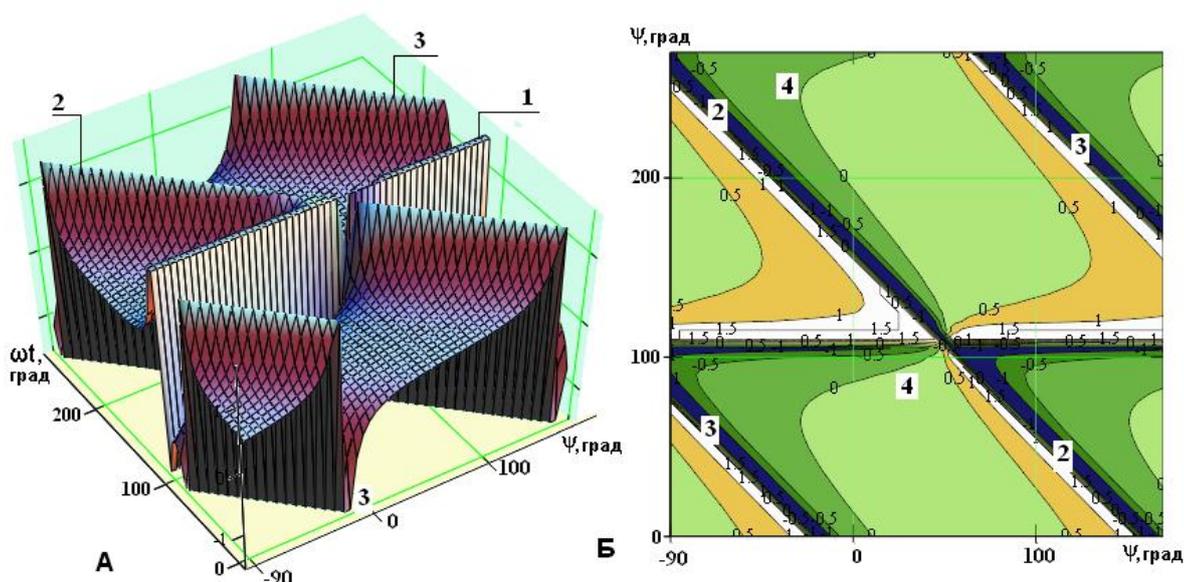


Рисунок Б.3.1. Объемный (а) и контурный (б) графики функции (2.3) при коэффициенте погрешности $kn = 0.75$:

- 1 - основной "барьер" (разрыв функции по переменной ωt);
- 2, 3 - разрывы функции по переменной ψ ;
- 4 - линия нулевого значения функции (годограф корней).

Как и в предыдущем опыте (Рисунок 2.4) положение "барьеров" функции $y(\psi, \omega t)$ остается неизменным, тем не менее, положение линии одинакового уровня изменилось на противоположное. В частности, нулевая линия (годограф корней функции) сместилась влево, т.е. в сторону уменьшения значения корней, причем, значение абсолютной погрешности, как и в предыдущем случае, находится в пределах от 0 до 70 градусов. Эти результаты хорошо иллюстрируются также кривыми, которые приведены на Рисунок Б.2.2, б, что представляют собой поперечные сечения объемного графика Рисунок Б.2.2, а.

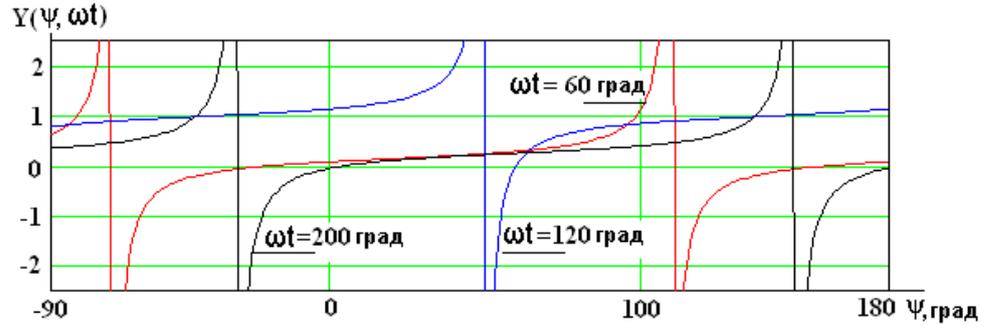


Рисунок Б.3.2. Зависимости $y(\psi)$ при фиксированных значениях ωt и $k_{п} = 0.75$

Минимальное значение погрешности имеет кривая, которая отвечает моменту отсчета $\omega t = 120^{\circ}$, что совпадает с результатами предыдущего опыта, а максимальная – моменту отсчета $\omega t = 60^{\circ}$.

Таким образом, погрешность исходных данных, представленная коэффициентом $k_{п}$, приводит к погрешности в определении промежуточных значений аргумента ψ , которая носит периодический характер в функции координаты ωt точки отсчета.

Б.4 Динамические параметры сети в режиме однофазной утечки.

Что касается функции $\tau(U_u)$, позволяющей оценить динамические свойства системы (Б.1), то для ее получения система уравнений (Б.1) была преобразована в дифференциальную форму, из которой было получено характеристическое уравнение (Рисунок Б.4). Последнее позволяет определить его корни при любом соотношении параметров.

$$\begin{pmatrix} \frac{3}{r_0 + p \cdot L_0} & 0 & \frac{-1}{r_0 + p \cdot L_0} & \frac{-1}{r_0 + p \cdot L_0} & \frac{-1}{r_0 + p \cdot L_0} \\ 0 & \frac{3}{r_n + p \cdot L_n} & \frac{-1}{r_n + p \cdot L_n} & \frac{-1}{r_n + p \cdot L_n} & \frac{-1}{r_n + p \cdot L_n} \\ \frac{-1}{r_0 + p \cdot L_0} & \frac{-1}{r_n + p \cdot L_n} & \frac{1}{r_0 + p \cdot L_0} + \frac{1}{r_n + p \cdot L_n} + Y + \frac{1}{R_h} & 0 & 0 \\ \frac{-1}{r_0 + p \cdot L_0} & \frac{-1}{r_n + p \cdot L_n} & 0 & \frac{1}{r_0 + p \cdot L_0} + \frac{1}{r_n + p \cdot L_n} + Y & 0 \\ \frac{-1}{r_0 + p \cdot L_0} & \frac{-1}{r_n + p \cdot L_n} & 0 & 0 & \frac{1}{r_0 + p \cdot L_0} + \frac{1}{r_n + p \cdot L_n} + Y \end{pmatrix} = 0$$

Рисунок Б.4.1. Характеристическое уравнение динамической системы рис. Б.2

На Рисунок Б.4.2 приведены векторы корней характеристического уравнения. Наибольшей постоянной времени отвечает четвертый (наименьший по модулю) корень уравнения.

Именно этот корень определяет характер переходного процесса в поперечной части цепи (емкость и сопротивление изоляции “фаза-земля”). Можно заметить, что существует область значений R_h , в которой максимальная постоянная времени не зависит от сопротивления утечки.

$$\begin{aligned}
 p(5000, C_0) &= \begin{pmatrix} -1.058 \times 10^3 - 3.333i \times 10^5 \\ -1.058 \times 10^3 + 3.333i \times 10^5 \\ -966.679 \\ -401.095 \end{pmatrix} & p(10000, C_0) &= \begin{pmatrix} -581.927 - 3.333i \times 10^5 \\ -581.927 + 3.333i \times 10^5 \\ -490.477 \\ -401.095 \end{pmatrix} \\
 p(15000, C_0) &= \begin{pmatrix} -423.197 - 3.333i \times 10^5 \\ -423.197 + 3.333i \times 10^5 \\ -401.095 \\ -331.746 \end{pmatrix} & p(20000, C_0) &= \begin{pmatrix} -401.095 \\ -343.832 - 3.333i \times 10^5 \\ -343.832 + 3.333i \times 10^5 \\ -252.381 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Рисунок Б.4.2. Векторы корней характеристического уравнения схемы замещения участковой сети при $R = 300$ кОм; $R_h = 5, 10, 15, 20$ кОм; $C = 0.07$ мкФ

Б.5 Результаты исследования работы УВФ при наличии в составе ПН высших гармонических составляющих

На Рисунок Б.5.1 приведены результаты опыта, когда значение каждой из высших гармоник (5, 7, 11, 13) достигает 15 % от основной. По сути, этот опыт является проверкой УВФ на работоспособность в отношении высших гармоник. Действительно, наличие и интенсивность высших гармоник превышает все пределы, как для обычной сети, так и на выходе преобразователя частоты.

На Рисунок Б.5.1 обозначено:

- а) графики мгновенных значений ПН:
 - 1 – результирующая кривая;
 - 2 – первая гармоника;

3 – сумма высших гармоник;

б) погрешности расчетных значений аргумента ПН;

$\Delta\psi_P$ – абсолютная погрешность очередного результата;

$\Delta\psi_{CP}$ – текущая средняя погрешность серии результатов.

Кривая потенциала нейтрали настолько искажена, что применение к ней зависимости (2.3) представляется невозможным. И все же УВФ отработало все промежуточные результаты. Отдельные абсолютные погрешности возросли до 200° , что является недопустимым для идентификации фазы с утечкой. Тем не менее, обратим внимание на то, что среднее значение погрешности $\Delta\psi_{CP}$ уже через 4 мс после начала работы БПР пригодно для идентификации, а через 7 мс практически достигает нуля.

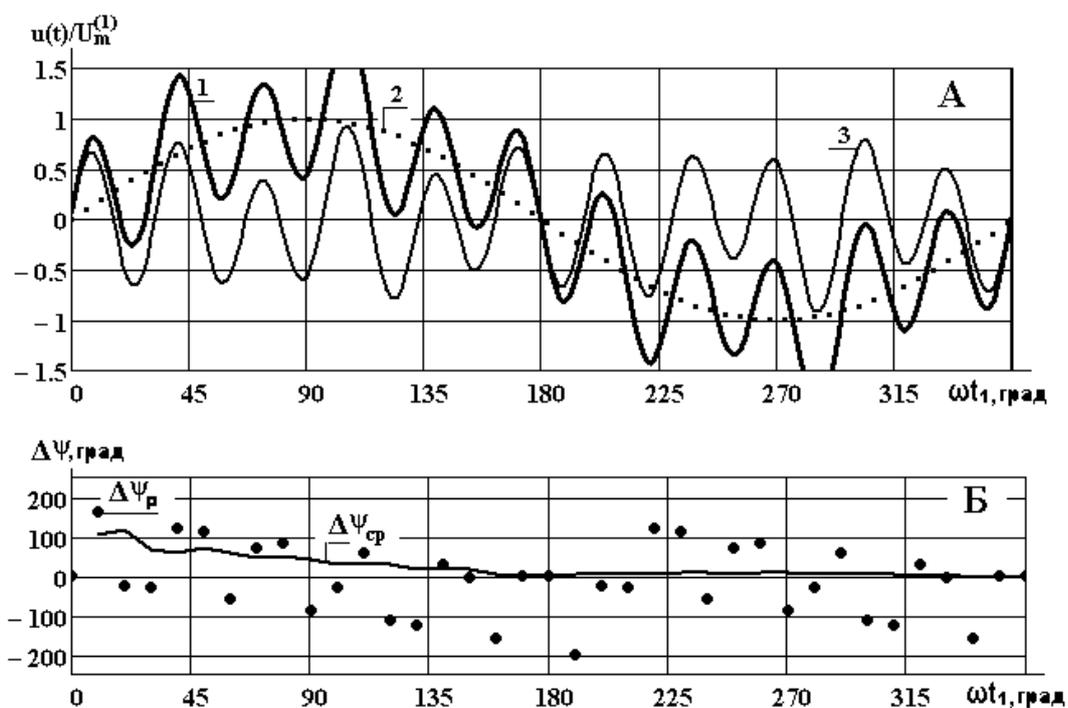


Рисунок Б.5.1. Исследование абсолютной $\Delta\psi$ и средней $\Delta\psi_{CP}$ погрешностей определения аргумента потенциала нейтрали, которые вносятся при одновременном действии пятой, седьмой, одиннадцатой и тринадцатой гармонических составляющих, каждая из которых по амплитуде составляет 15 % от основной.

а) - графики мгновенных значений ПН: 1 - результирующая кривая; 2 - первая гармоника; 3 - сумма высших гармоник;

б) - погрешности расчетных значений аргумента ПН; $\Delta\psi_P$ - абсолютная погрешность одного результата; $\Delta\psi_{CP}$ - средняя погрешность серии результатов от начала отсчета к текущему моменту времени

Б.6 Результаты исследований работы УВФ при продольной несимметрии и несимметрии источника питания

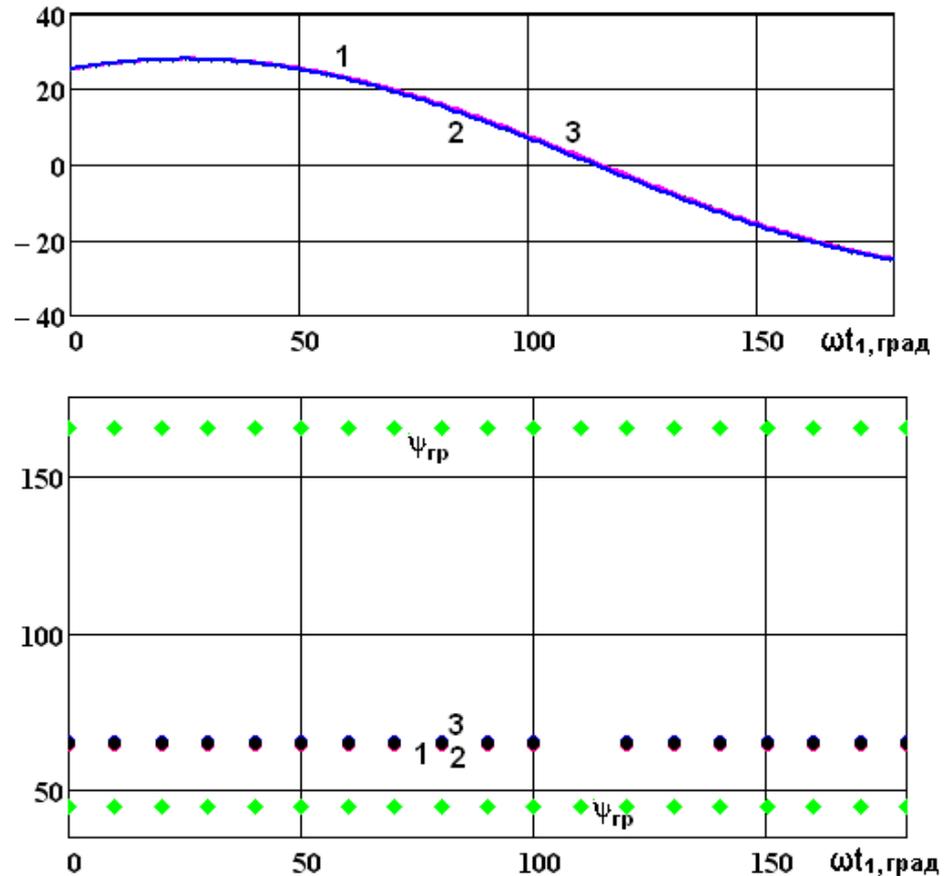


Рисунок. Б.6 Работа УВФ при продольной асимметрии сети и условиях: $R_h = R_A = 20$ кОм; $R_B = R_C = 200$ кОм. Предельные (некорректированные) границы опорного интервала $45^\circ < \psi_{gp} < 165^\circ$. На верхнем рисунке мгновенные значения ПН, на нижнем - расчетные промежуточные значения аргумента ПН при двух показателях продольной несимметрии:

1 - система симметричная ($k_{нс} = 1.0$, $Z_A = Z_B = Z_C = 1$ Ом, $\psi = 64.8^\circ$).

2 - система несимметричная
($k_{нс} = 1.7$, $Z_A = 1$ Ом, $Z_B = 1.7$ Ом, $Z_C = 4$ Ом, $\psi = 64.20$).

3 - система несимметричная
($k_{нс} = 0.3$, $Z_A = 1$ Ом, $Z_B = 4$ Ом, $Z_C = 0.57$ Ом, $\psi = 65.5^\circ$)

На Рисунок В.1 приведена сводка части результатов обработки экспериментальных исследований, содержащая:

- $U_{N\Sigma}/U_{\Phi}$ – отношение действующих значений ПН и фазного напряжения источника питания;
- k_{Γ} – коэффициент гармоник (отношение действующего значения массива двадцати высших гармонических составляющих, начиная со второй, к действующему значению ПН);
- Ψ_{sr} – массив средних значений аргумента ПН (в градусах) для: 0 – весь интервал исследования (54 точки через 100, полтора периода); 1, 2, 3 – три полупериода по 18 точек;
- S – массив среднеквадратических отклонений АПН (в градусах) для: 0 – весь интервал исследования (54 точки, полтора периода); 1, 2, 3 – три полупериода по 18 точек.

$$\frac{U_{N\Sigma}}{U_{\Phi}} = 0.29, \quad k_{\Gamma} = 0.05, \quad \psi_{sr} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 0 \\ \hline 0 & 81 \\ \hline 1 & 78.5 \\ \hline 2 & 83 \\ \hline 3 & 81.6 \\ \hline \end{array}, \quad S = \begin{array}{|c|c|} \hline & 0 \\ \hline 0 & 7.4 \\ \hline 1 & 9.2 \\ \hline 2 & 9.4 \\ \hline 3 & 7.4 \\ \hline \end{array}$$

Рисунок В.1. Сводка результатов обработки экспериментальных исследований однофазной утечки для $R_h = 4$ кОм

2. Результаты экспериментальных исследований УВФ для $R_h = 2$ кОм.

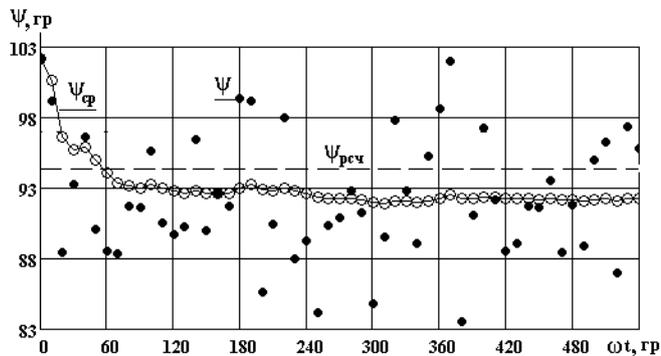


Рисунок В.2. Результаты вычисления промежуточных значений аргумента ПН ψ и его текущего среднего значения ψ_{sr} цифровой моделью УВФ при $R_h = 2$ кОм

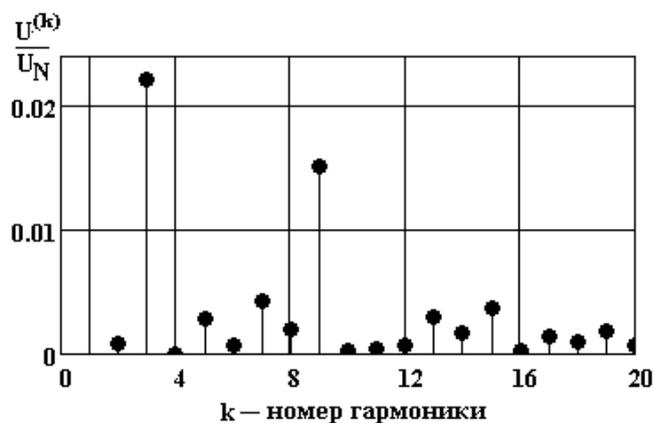


Рисунок В.3. Спектральный состав потенциала нейтрали при $R_h = 2$ кОм

Таблица В.2

Процентное содержание гармонических составляющих потенциала нейтрали

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-1.44	99.87	0.09	2.21	0.01	0.29	0.07	0.42	0.21	1.52	...
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.03	0.04	0.07	0.31	0.17	0.38	0.02	0.14	0.1	0.18	...

$$\frac{U_{N\Sigma}}{U_{\Phi}} = 0.503 \quad k_{\Gamma} = 0.046 \quad \psi_{\text{sr}} = \begin{pmatrix} 92.1 \\ 92.5 \\ 91.6 \\ 92.3 \end{pmatrix} \quad S = \begin{pmatrix} 4.2 \\ 3.5 \\ 4.7 \\ 4.5 \end{pmatrix}$$

Рисунок В.4. Сводка результатов обработки экспериментальных исследований однофазной утечки для $R_h = 2$ кОм

3. Результаты экспериментальных исследований УВФ для $R_h = 8$ кОм

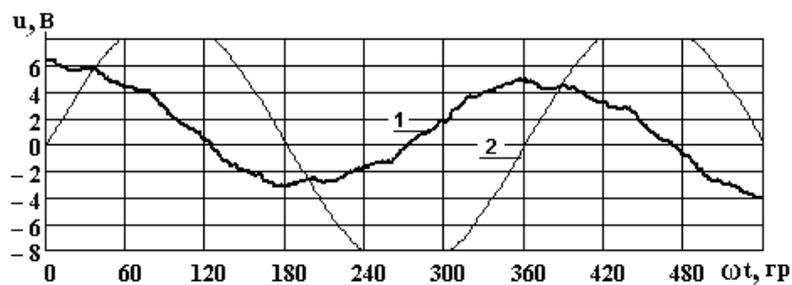


Рисунок В.5. Осциллограмма ПН (1) и напряжения u_{AB} (2) в начальной стадии однофазной утечки при $R_h = 8$ кОм

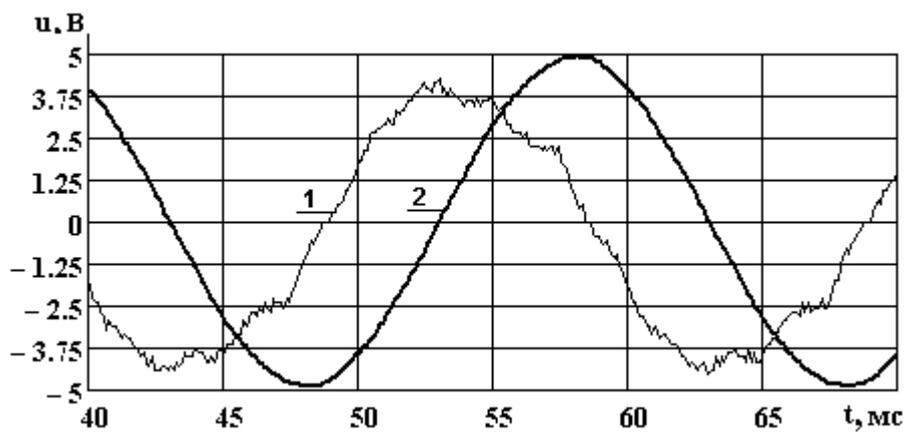


Рисунок В.6. Осциллограмма ПН (1) и опорного напряжения u_{AB} (2) в установившемся режиме однофазной утечки. $R_h = 8$ кОм

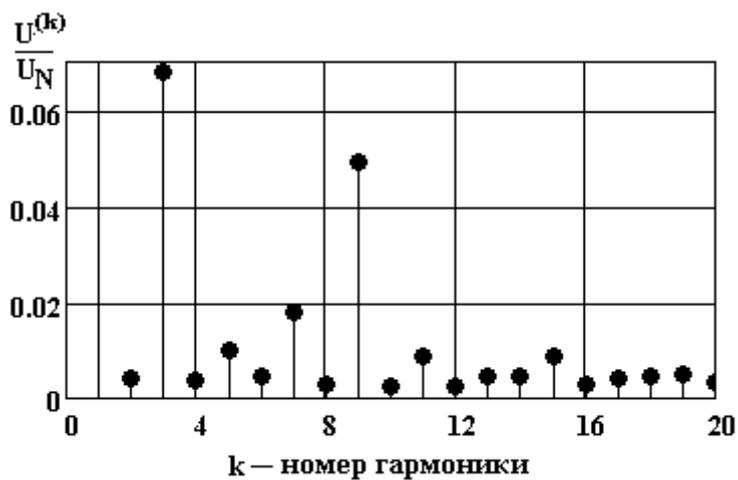


Рисунок В.7. Спектральный состав ПН при $R_h = 8$ кОм

Таблица В.3

Процентное содержание гармонических составляющих потенциала нейтрали

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-3.1	99.5	0.4	6.8	0.4	1	0.4	1.8	0.3	4.9	...
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.3	0.9	0.3	0.4	0.4	0.9	0.3	0.4	0.5	0.5	...

$$\frac{U_{N\Sigma}}{U_{\Phi}} = 0.148 \quad \frac{U_{N_{\text{grm}}}}{U_{N\Sigma}} = 0.091 \quad \psi_{\text{srI}} = \begin{pmatrix} 73 \\ 65.9 \\ 80.4 \\ 72.8 \end{pmatrix} \quad S = \begin{pmatrix} 22.6 \\ 20.6 \\ 25.3 \\ 20.3 \end{pmatrix}$$

Рисунок В.8. Сводка результатов обработки экспериментальных исследований однофазной утечки для $R_h = 8$ кОм

Таблица В.4

Результаты работы УВФ при $R_h = 8$ кОм

№ ωt t, ms ψ $\psi_{\text{ср}}$ $\Delta\psi_{\text{ср}}$ $\Delta\psi_{\text{гр}}$ $\Delta\psi$

№	ωt	t, ms	ψ	$\psi_{\text{ср}}$	$\Delta\psi_{\text{ср}}$	$\Delta\psi_{\text{гр}}$	$\Delta\psi$
0	0	0	105	105	0	75	34
1	10	0.6	95.7	100.3	-4.6	70.3	29.3
2	20	1.1	56.1	85.6	-29.5	55.6	14.6
3	30	1.7	74.3	82.8	-8.5	52.8	11.8
4	40	2.2	85.4	83.3	2.1	53.3	12.3
5	50	2.8	58.5	79.1	-20.7	49.1	8.1
6	60	3.3	49.9	75	-25.1	45	4
7	70	3.9	27.9	69.1	-41.2	39.1	-1.9
8	80	4.4	66.4	68.8	-2.3	38.8	-2.2
9	90	5	63.5	68.3	-4.8	38.3	-2.7
10	100	5.6	52.8	66.9	-14.1	36.9	-4.1
11	110	6.1	54.7	65.8	-11.1	35.8	-5.2
12	120	6.7	56	65.1	-9.1	35.1	-5.9
13	130	7.2	55.8	64.4	-8.6	34.4	-6.6
14	140	7.8	73.2	65	8.2	35	-6
15	150	8.3	79.4	65.9	13.5	35.9	-5.1
16	160	8.9	49	64.9	-15.9	34.9	-6.1
17	170	9.4	67.1	65	2.1	35	-6
18	180	10	120.4	68	52.5	38	...

№ ωt t, ms ψ $\psi_{\text{ср}}$ $\Delta\psi_{\text{ср}}$ $\Delta\psi_{\text{гр}}$ $\Delta\psi$

№	ωt	t, ms	ψ	$\psi_{\text{ср}}$	$\Delta\psi_{\text{ср}}$	$\Delta\psi_{\text{гр}}$	$\Delta\psi$
19	190	10.6	102	69.7	32.3	39.7	-1.3
20	200	11.1	30.1	67.8	-37.7	37.8	-3.2
21	210	11.7	90.4	68.8	21.6	38.8	-2.2
22	220	12.2	93.8	69.9	23.9	39.9	-1.1
23	230	12.8	90.1	70.7	19.4	40.7	-0.3
24	240	13.3	63.2	70.4	-7.2	40.4	-0.6
25	250	13.9	10.4	68.1	-57.8	38.1	-2.9
26	260	14.4	87.5	68.8	18.7	38.8	-2.2
27	270	15	87.4	69.5	17.9	39.5	-1.5
28	280	15.6	95	70.4	24.6	40.4	-0.6
29	290	16.1	84.3	70.8	13.4	40.8	-0.2
30	300	16.7	79.9	71.1	8.7	41.1	0.1
31	310	17.2	74.1	71.2	2.9	41.2	0.2
32	320	17.8	105.6	72.3	33.3	42.3	1.3
33	330	18.3	86.4	72.7	13.8	42.7	1.7
34	340	18.9	85.6	73.1	12.5	43.1	2.1
35	350	19.4	67.9	72.9	-5.1	42.9	1.9
36	360	20	113.4	74	39.4	44	3
37	370	20.6	102	74.7	27.3	44.7	...

№ ωt t, ms ψ $\psi_{\text{ср}}$ $\Delta\psi_{\text{ср}}$ $\Delta\psi_{\text{гр}}$ $\Delta\psi$

№	ωt	t, ms	ψ	$\psi_{\text{ср}}$	$\Delta\psi_{\text{ср}}$	$\Delta\psi_{\text{гр}}$	$\Delta\psi$
36	360	20	113.4	74	39.4	44	3
37	370	20.6	102	74.7	27.3	44.7	3.7
38	380	21.1	42.8	73.9	-31.1	43.9	2.9
39	390	21.7	83.4	74.2	9.2	44.2	3.2
40	400	22.2	81.8	74.3	7.5	44.3	3.3
41	410	22.8	64.8	74.1	-9.3	44.1	3.1
42	420	23.3	63.9	73.9	-9.9	43.9	2.9
43	430	23.9	20.2	72.7	-52.5	42.7	1.7
44	440	24.4	77.7	72.8	4.9	42.8	1.8
45	450	25	72.6	72.8	-0.2	42.8	1.8
46	460	25.6	66.8	72.6	-5.8	42.6	1.6
47	470	26.1	68.1	72.5	-4.5	42.5	1.5
48	480	26.7	71.4	72.5	-1.1	42.5	1.5
49	490	27.2	62.9	72.3	-9.5	42.3	1.3
50	500	27.8	90.1	72.7	17.4	42.7	1.7
51	510	28.3	93.5	73.1	20.4	43.1	2.1
52	520	28.9	59.6	72.8	-13.3	42.8	1.8
53	530	29.4	84.7	73	11.7	43	2
54	540	30	103.6	73.6	30	43.6	...

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Результаты экспериментальных исследований с применением статистической обработки промежуточных результатов.

В приложении Д приводятся осциллограммы работы цифровой модели УВФ для сопротивлений утечки 2 кОм, 4 кОм, 8 кОм (четыре серии опытов), 14 кОм (три серии), 16 кОм (две серии).

Каждая из серий содержит три рисунка с индексами а, б, в. Рисунки с индексом “а” содержат осциллограмму потенциала нейтрали 1, которая позволяет оценить степень его искажения или произвести гармонический анализ, и осциллограмму опорного напряжения 2 (линейное напряжение u_{AB} , на осциллограмме масштаб уменьшен), задающего систему отсчета при вычислении промежуточных результатов.

Рисунки с индексом “б” содержат осциллограммы результатов работы блока промежуточных результатов (БПР) ψ , их текущее среднее $\psi_{ср}$, расчетное (теоретическое) значение $\psi_{рсч}$, границы опорного фазового интервала $\beta_{зр}$ и текущие границы доверительного интервала $\Delta\psi$, рассчитанные из условия нормального распределения промежуточных значений аргумента ПН.

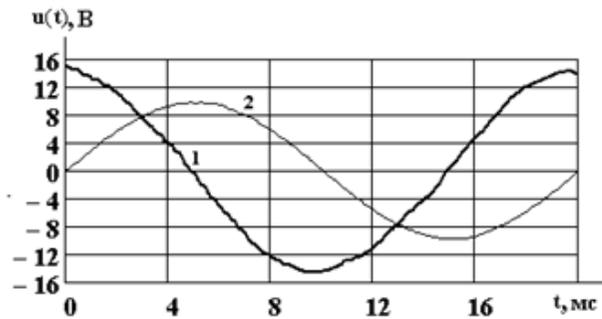
Рисунки с индексом “в” содержат те же осциллограммы, но текущие границы доверительного интервала $\Delta\psi$ рассчитаны на основании неравенства Чебышева (5.2), т.е. для произвольного закона распределения промежуточных результатов. Задача этой части опытов состояла в проверке применимости способа в случае, если распределение промежуточных значений ψ не будет отвечать нормальному.

Исходные данные. Линейное напряжение: – 35 В; фазное – 20.4 В; емкость и сопротивление “фаза - земля” – $C = 0.75$ мкФ, $R = 300$ кОм.

Таблица Д.1. Сводка результатов экспериментальных исследований.

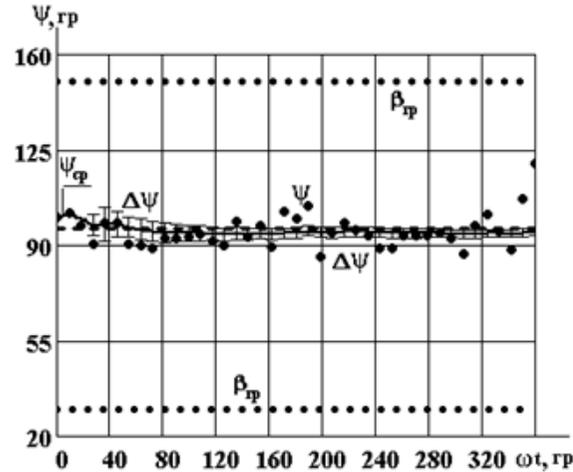
№ п/п	Сопр. утечки, R_h , кОм	Объем выборки, n	Выборочн. среднее ψ_{cp} , град.	Выборочн. стандарт σ , град.	Критерии согласия		Доверительные границы		Максимальн. время идентификац., мс		Примечание	
					Асимметрия	Эксцесс	Номальн. распред.	Н-во Чебышева	Работа БПР	Принят. решения		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	2	5	97.6	4.4	1.5	1.1	6.2	12.5	2.0	2.4	31066 Рис. Д.1	Осц.
		10	94.8	4.8	1.7	1.9	3.6	8.4				
		15	94.0	4.1	0.99	2.8	2.3	5.5				
		20	94.5	4.3	1.0	2.5	1.9	4.6				
2	4	5	84.1	12.7	2.0	0.7	18.0	36.4	2.0	2.6	32644 Рис. Д.2	Осц.
		10	79.1	13.7	1.4	2.9	10.4	24.2				
		15	79.1	11.1	1.1	3.5	6.3	15.3				
		20	80.0	10.0	0.9	2.3	4.7	11.6				
3	8	5	73.4	33.6	1.56	0.94	47.2	95.2	2.7	7.5...8.0	27178, Экспон. отриц.	
		10	71.7	28.3	1.65	3.02	21.1	49.2				
		15	76.4	25.7	1.52	3.61	14.7	35.6				
		20	78.9	23.5	1.32	3.78	11.3	27.7				
4	8	5	79.7	32.4	1.79	0.4	44.3	89.4	2.5	7.5...8.0	42828 Рис. Д.3	Осц.
		10	69	28.6	1.84	2.07	21.5	50.1				
		15	69.9	23.0	1.50	2.96	13.2	31.9				
		20	72.9	22.5	1.32	3.03	10.7	26.4				
5	8	5	91.5	22.5	1.28	0.41	13.04	26.3	2.9	7.5...8.0	44281	
		10	76.5	14.5	1.15	2.0	7.78	18.14				
		15	72.6	11.5	1.37	2.49	5.15	12.45				
		20	73.2	11.0	1.17	2.39	4.2	10.32				
6	8	5	91.6	37.4	1.1	0.97	33.3	67.2	2.6	7.5...8.0	42828	
		10	73.2	29.5	1.2	2.21	18.01	41.8				
		15	71.6	23.5	0.96	3.1	11.2	27.1				
		20	74.7	23.0	0.77	3.0	9.5	23.3				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
8	14	5	79.9	33.7	2.1	0.44	48.1	97.1	4.9	9...10	29521, эксп +, резкая, рис.		
		10	64.1	34.7	1.82	2.54	26.3	61.4					
		15	60.7	28.4	1.27	3.64	16.2	39.2					
		20	63.2	25	-0.13	-0.94	11.8	28.9					
9	14	5	82.4	70.5	1.88	0.31	97.1	195.9	4.5		9...10	58606, эксп -, резкая	
		10	63.5	67	1.59	2.28	50.3	117.3					
		15	74.1	56.5	0.89	3.31	32.1	77.7					
		20	77.9	49.7	0.46	3.5	23.7	58.1					
11	14	5	88.3	31.4	1.91	0.29	36.7	74.1	5.4			9...10	23503 Эксп выраж., полож.
		10	70.7	34.3	1.74	1.98	23.4	54.5					
		15	64.4	30.1	1.16	2.74	15.6	37.8					
		20	68.8	29.	1.14	2.63	12.0	29.4					
12	14	5	85.1	69.1	1.95	0.29	80.5	162.4	5.3	9...10			121593 Эксп. отриц.
		10	86.2	53.2	1.4	2.19	34.7	80.8					
		15	89.9	43.8	0.92	3.2	21.8	52.6					
		20	93.8	40.3	0.55	3.6	16.74	41.8					
13	14	5	81.2	18.3	1.8	0.68	19.7	39.8	5.5		9...10		133028 Эксп. полож., резко выраж
		10	61.1	33.2	1.31	2.49	23.1	53.9					
		15	56.6	27.8	1.5	3.6	14.7	35.5					
		20	59.2	27.5	0.79	2.76	12.8	30.1					
14	16	5	94.0	51.5	1.38	1.94	72.0	145.4	7.5			10...12	44701 Эксп. отр., резко выраж
		10	110.6	51.6	1.11	3.51	38.4	89.5					
		15	96.3	48.2	1.51	3.2	27.4	66.3					
		20	87.0	45.5	1.19	3.2	21.4	52.5					
15	16	5	63.7	58.2	1.12	1.52	81.5	164.5	8	10...12			49314
		10	83.7	58.7	1.72	3.25	44.0	102.7					
		15	78.6	49.8	1.52	2.32	28.4	68.6					
		20	76.4	46.5	1.45	1.93	22.3	54.7					



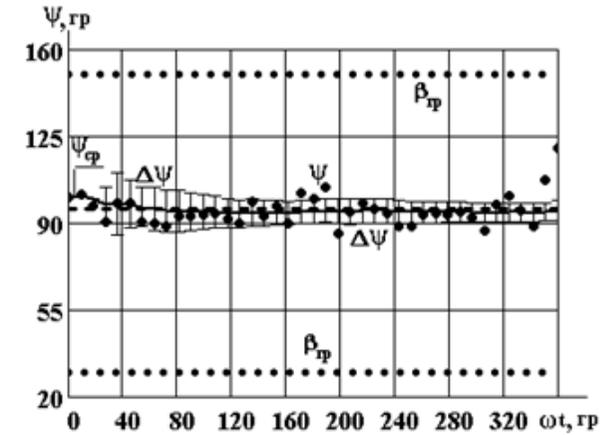
а)

Волновые диаграммы ПН нейтрали (1) и опорного напряжения (2) (масштаб уменьшен). $U_u/U_\phi = 0.54$.



б)

Промежуточные результаты и доверительные интервалы для нормального распределения.

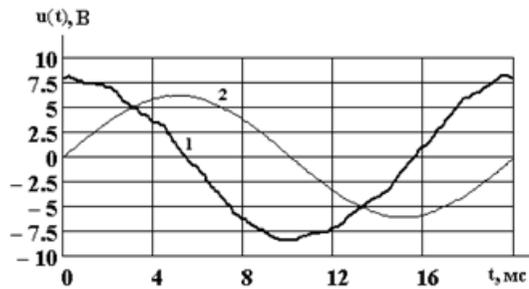


в)

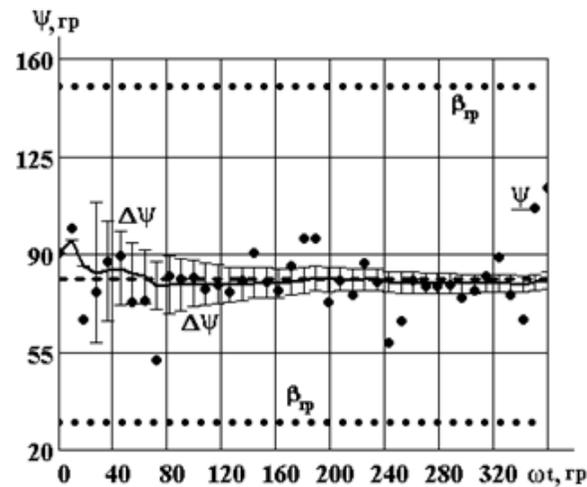
Промежуточные результаты и доверительные интервалы при использовании неравенства Чебышева.

Рисунок Д.1. Результаты экспериментальных исследований и их статистической обработки при $R_h = 2$ кОм.

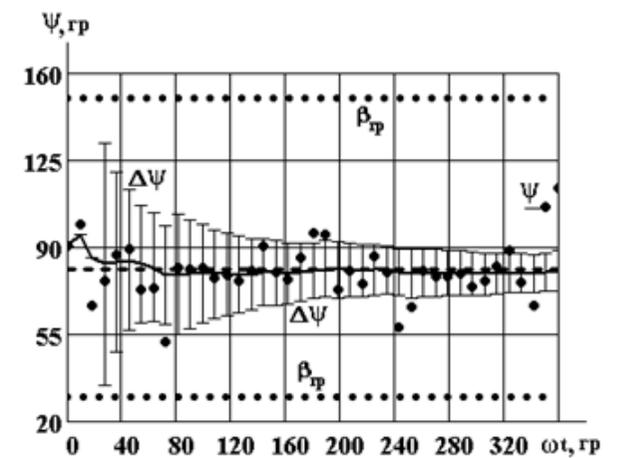
В данной серии опытов искажение кривой потенциала нейтрали практически отсутствует (Рисунок Д.1.а). Распределение промежуточных результатов нормальное. Нет необходимости в применении неравенства Чебышева (рис Д.1.в).



а)



б)



в)

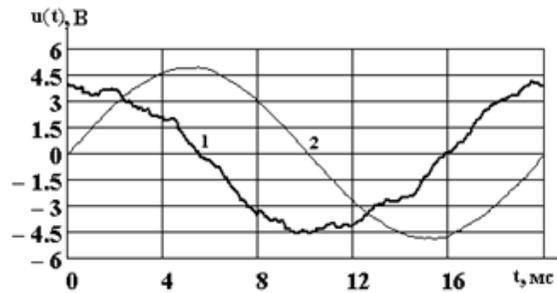
Волновые диаграммы ПН нейтрали (1) и опорного напряжения (2) (масштаб уменьшен). $U_u/U_\phi = 0.29$.

Промежуточные результаты и доверительные интервалы для нормального распределения.

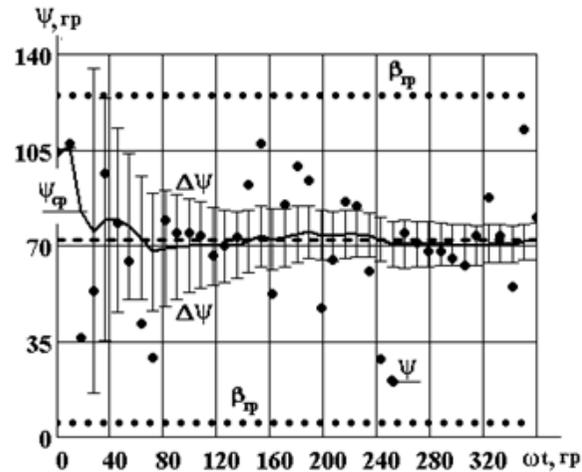
Промежуточные результаты и доверительные интервалы при использовании неравенства Чебышева.

Рисунок Д.2. Результаты экспериментальных исследований и их статистической обработки при $R_h = 4$ кОм

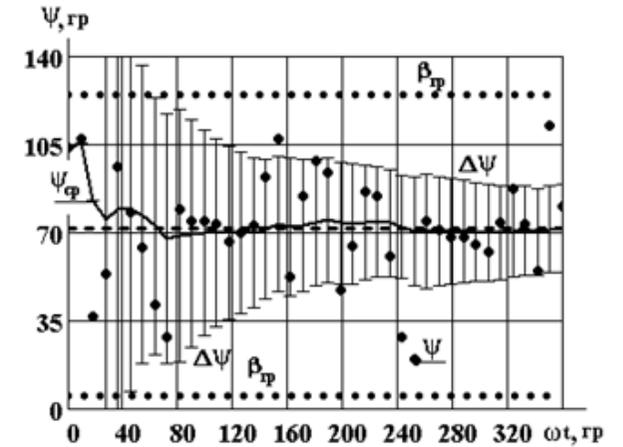
Хотя разброс промежуточных значений по сравнению с предыдущей серией возрос, конечные результаты данного опыта практически соответствуют предыдущему (включая время идентификации, составляющее от 4 до 5 мс независимо от способа расчета доверительных интервалов).



а)



б)



в)

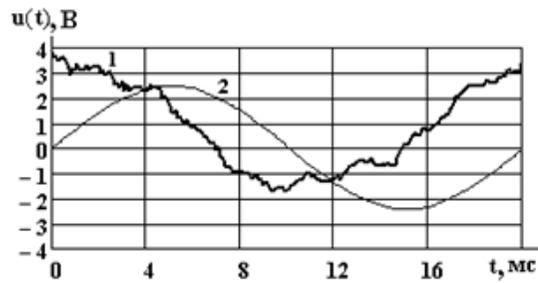
Волновые диаграммы ПН нейтрали (1) и опорного напряжения (2) (масштаб уменьшен). $U_u/U_\phi = 0.16$.

Промежуточные результаты и доверительные интервалы для нормального распределения.

Промежуточные результаты и доверительные интервалы при использовании неравенства Чебышева.

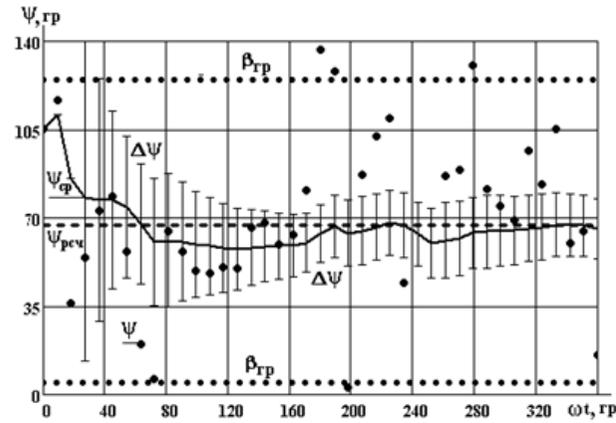
Рисунок Д.3. Результаты экспериментальных исследований и их статистической обработки при $R_h = 8$ кОм

Хотя разброс промежуточных значений по сравнению с предыдущей серией заметно возрос, время работы БПР до принятия решения не превышает 2.5 мс (для произвольного распределения ≈ 4 мс), что соответствует времени идентификации от 5 до 7 мс (для произвольного распределения от 7 до 4 мс).



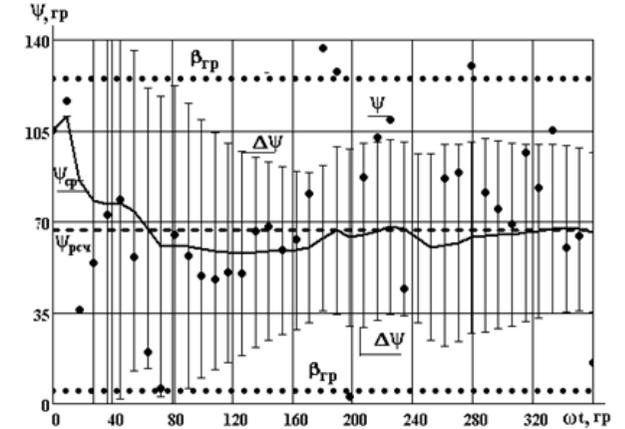
а)

Волновые диаграммы ПН нейтрали (1) и опорного напряжения (2) (масштаб уменьшен). $U_u/U_\phi = 0.085$.



б)

Промежуточные результаты и доверительные интервалы для нормального распределения.

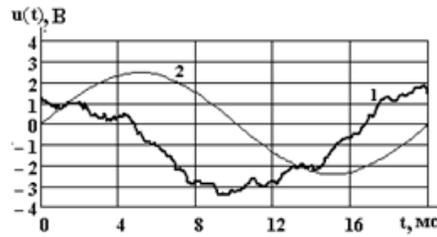


в)

Промежуточные результаты и доверительные интервалы при использовании неравенства Чебышева.

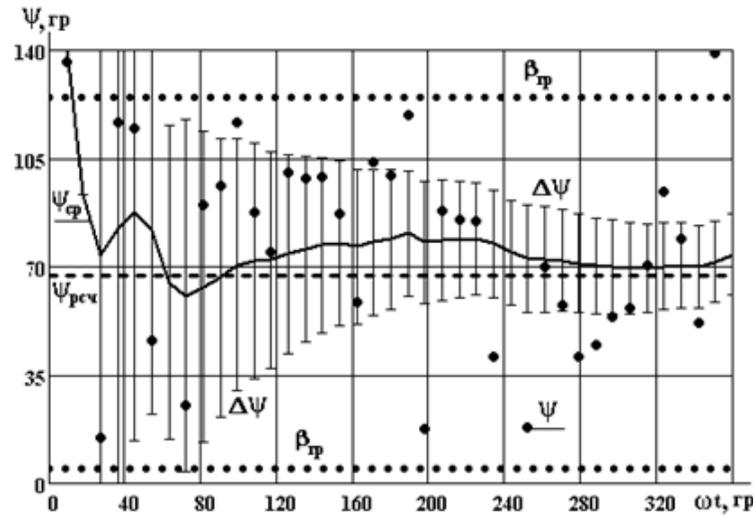
Рисунок Д.4. Результаты экспериментальных исследований и их статистической обработки при $R_h = 14$ кОм

Результаты данной серии в сравнении с предыдущей отличаются условиями переходного процесса и небольшим (от 0.5 до 1 мс) возрастанием длительности идентификации.



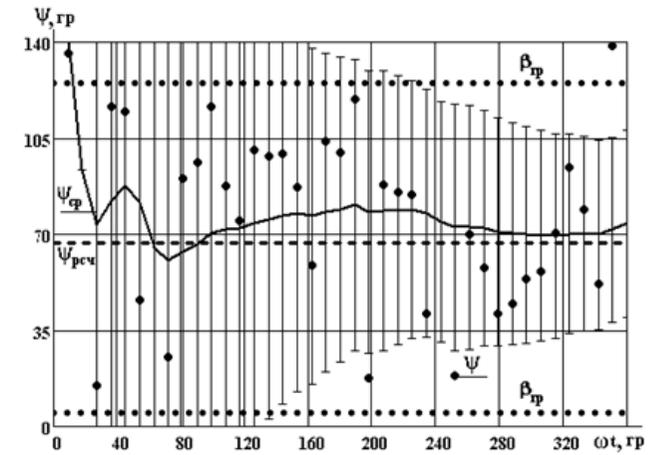
а)

Волновые диаграммы ПН нейтралей (1) и опорного напряжения (2) (масштаб уменьшен). $U_u/U_\phi = 0.09$.



б)

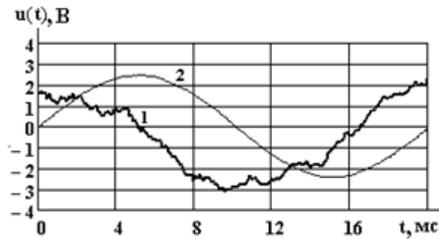
Промежуточные результаты и доверительные интервалы для нормального распределения.



в)

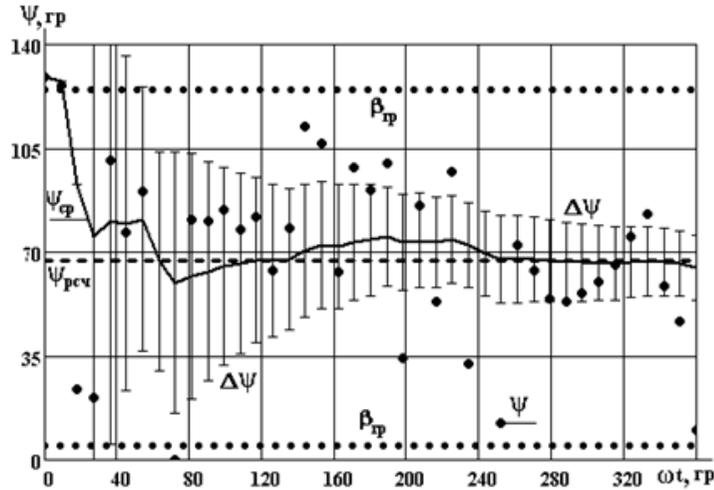
Промежуточные результаты и доверительные интервалы при использовании неравенства Чебышева.

Рисунок Д.5. Результаты экспериментальных исследований и их статистической обработки при $R_h = 14$ кОм



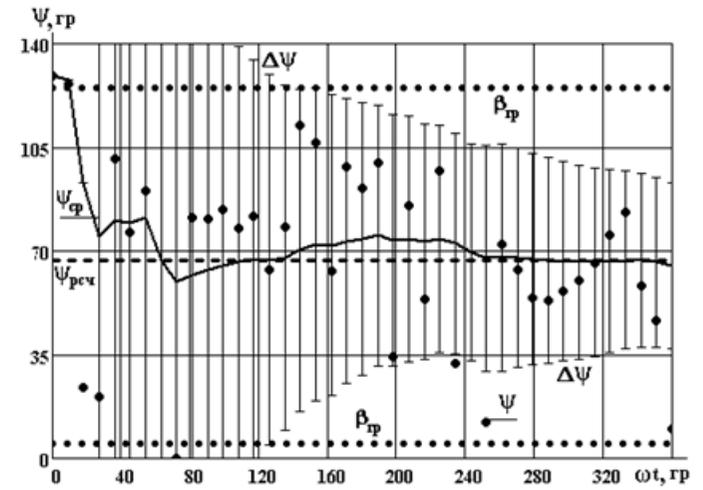
а)

Волновые диаграммы ПН нейтралей (1) и опорного напряжения (2) (масштаб уменьшен). $U_u/U_\phi = 0.091$



б)

Промежуточные результаты и доверительные интервалы для нормального распределения

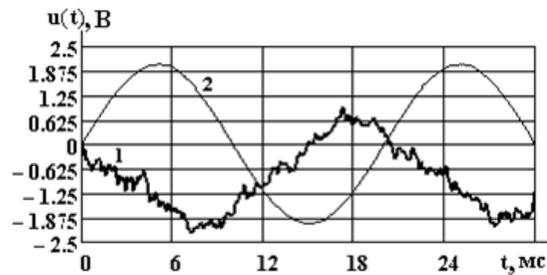


в)

Промежуточные результаты и доверительные интервалы при использовании неравенства Чебышева

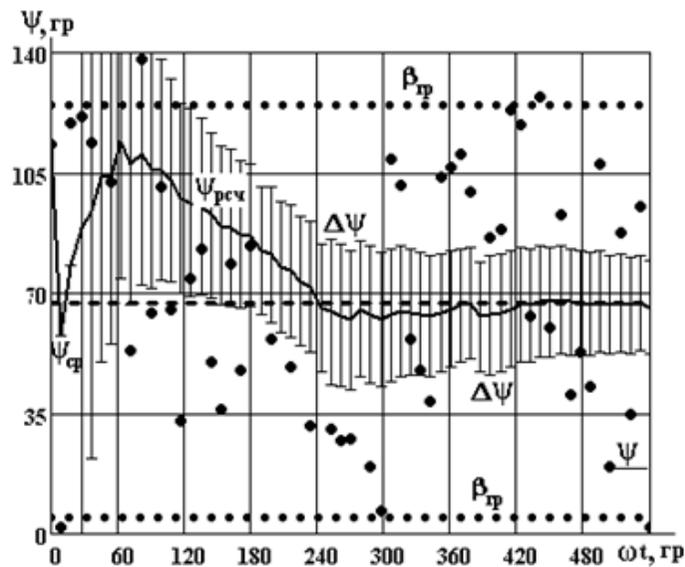
Рисунок Д.6. Результаты экспериментальных исследований и их статистической обработки при $R_h = 14$ кОм

В данных сериях опытов ($R_h = 14$ кОм) искажение кривой ПН резко возросло, вследствие чего время идентификации увеличивается в 1.5 – 2 раза (для расчетов при нормальном распределении). Использование неравенства Чебышева приводит к возрастанию времени идентификации еще в 1.5 – 2 раза



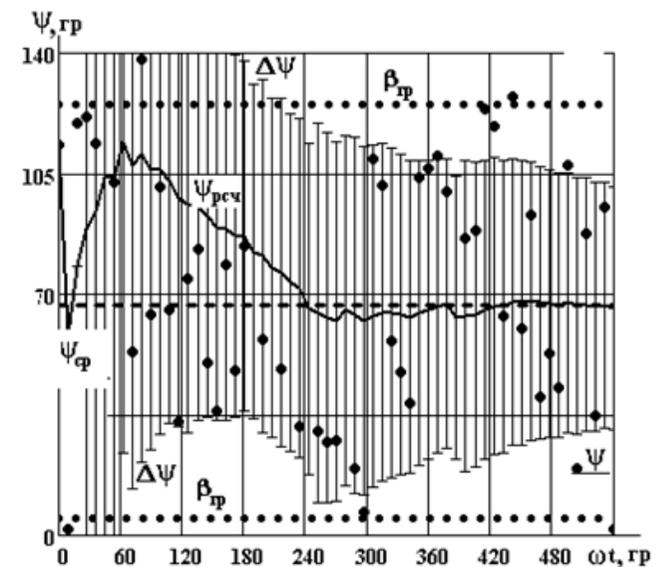
а)

Волновые диаграммы ПН нейтральной (1) и опорного напряжения (2) (масштаб уменьшен). $U_u/U_\phi = 0.069$.



б)

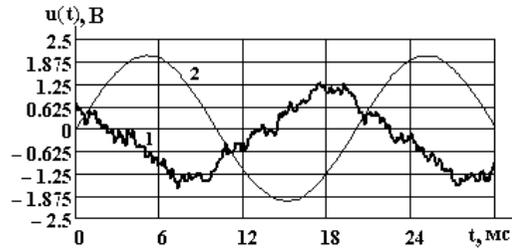
Промежуточные результаты и доверительные интервалы для нормального распределения.



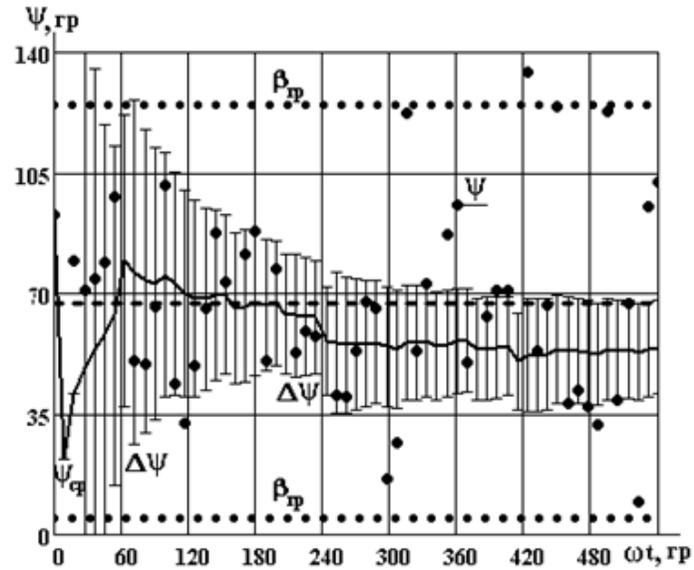
в)

Промежуточные результаты и доверительные интервалы при использовании неравенства Чебышева.

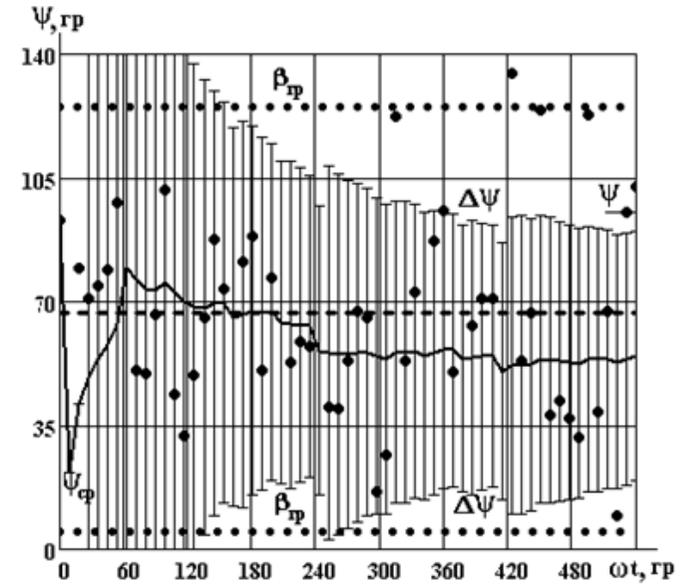
Рисунок Д.7. Результаты экспериментальных исследований и их статистической обработки при $R_h = 16$ кОм



а)



б)



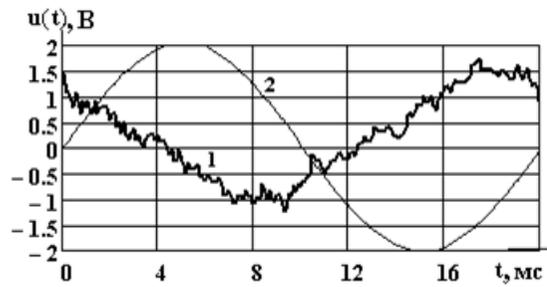
в)

Волновые диаграммы ПН нейтралей (1) и опорного напряжения (2) (масштаб уменьшен). $U_u/U_\phi = 0.072$.

Промежуточные результаты и доверительные интервалы для нормального распределения.

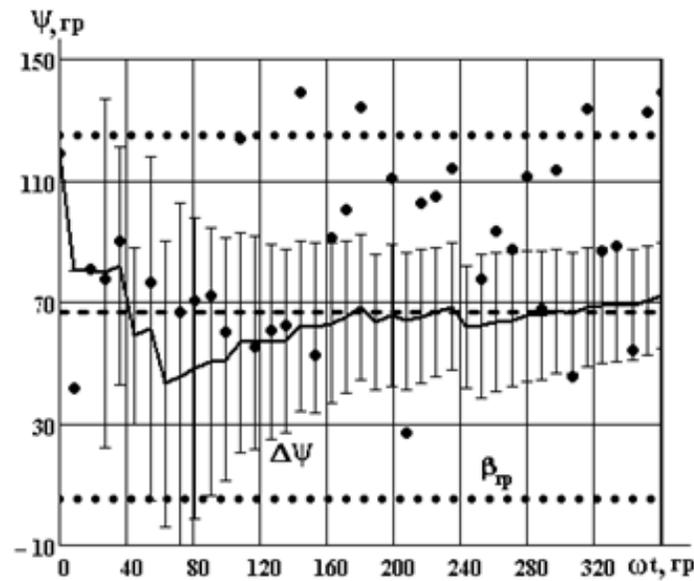
Промежуточные результаты и доверительные интервалы при использовании неравенства Чебышева.

Рисунок Д.8. Результаты экспериментальных исследований и их статистической обработки при $R_h = 16$ кОм



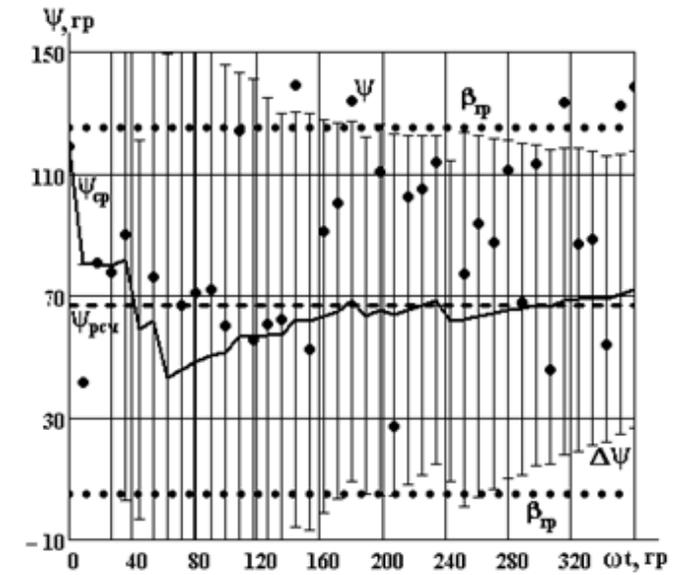
а)

$$U_u/U_\phi = 0.07.$$



б)

Нормальное распределение.



в)

Доверительные интервалы при использовании неравенства Чебышева.

Рисунок Д.9. Результаты экспериментальных исследований и их статистической обработки при $R_h = 16$ кОм.

Основной вывод, вытекающий из данных серий опытов, состоит в том, что при $R_h > 15$ кОм ($C = 0,75$ мкФ) возрастает число промежуточных результатов, “вылетающих” за пределы ОФИ, что ограничивает дальнейшее повышение чувствительности УВФ. Очевидно, что для решения этой задачи необходимо найти пути компенсации влияния высших гармоник на функционирование блока промежуточных результатов УВФ.



“УТВЕРЖДАЮ”

Проректор по научной работе
ДОИНТУ, д.т.н., проф.
Ю.Ф. Булгаков
” _____ 2018 р.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертации Черноуса Евгения Витальевича “Обеспечение безопасности эксплуатации шахтной участковой электросети повышенной мощности на основе совершенствования систем шунтирования поврежденной фазы”.

Настоящим подтверждается, что на основании результатов диссертационной работы соискателя кафедры “Электромеханика и теоретические основы электротехники” Черноуса Е.В. разработан и внедрен в учебный процесс **Учебно – исследовательский тренажер (УИТ):** Однофазное замыкание на землю сети с изолированной нейтралью.

Зав. кафедрой электроснабжения
промышленных предприятий и городов
к.т.н., доцент

 А.В. Левшов

Зав. кафедрой электропривода и
автоматизации промышленных установок
к.т.н., доцент

 П.И. Розкаряка

Зав. кафедрой
электрических систем
к.т.н., доцент

 Д.В. Полковниченко

Зав. кафедрой
электрических станций
к.т.н., доцент

 С.Н. Ткаченко



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

№ _____
На № _____

Диссертационный совет Д 01.008.01 при
ГОУ ВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Черноуса Евгения Витальевича на тему «Обеспечение безопасности эксплуатации шахтной участковой электросети повышенной мощности на основе совершенствования систем шунтирования поврежденной фазы», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.26.01 – «Охрана труда» (по отраслям) (технические науки) в научно-исследовательскую работу кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий и городов» ГОУ ВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Результаты диссертационного исследования были использованы при разработке следующих научно-исследовательских работ Г-4-01 (госрегистрация № 0101U001194) «Развитие основ теории процесса поражения человека электрическим током при эксплуатации электрооборудования», Н 27/2000 «Повышение эффективности систем электроснабжения и электропотребления», (Н 30/05) «Повышение эффективности электропотребления, живучести систем электроснабжения промышленных предприятий и безопасности технологических объектов при их эксплуатации», Н-22-15 «Развитие методов оценки пожарной безопасности электрических сетей 0,4/0,22 кВ», Н-21-10 «Прогнозирование искробезопасных параметров электрических цепей взрывозащищенного электрооборудования, вероятности возникновения взрывов, пожаров в квартирах и разработка мероприятий по их предотвращению» (госрегистрация № 0101U007239), в выполнении которых Черноус Евгений Витальевич принимал участие в качестве исполнителя.

Проректор по научной работе
д-р техн. наук, профессор



Ю.Ф. Булгаков



ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«МАКЕЕВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПО БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»
МакНИИ

ул. Лихачева, 60, Горняцкий район, г. Макеевка, 86132
телефоны: (062) 300-11-32, (0623) 22-22-18, факс (0623)22-19-00
e-mail: maknii2014@inbox.ru, <http://maknii.jimdo.com>

СПРАВКА

Выдана соискателю ГОУ ВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Черноусу Е. В. в том, что результаты его диссертационного исследования на тему: «Обеспечение безопасности эксплуатации шахтной участковой электросети повышенной мощности на основе совершенствования систем шунтирования поврежденной фазы» используются ГУ «МАКЕЕВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ПО БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ» при разработке требований для производства и эксплуатации систем защитного шунтирования подземных электрических сетей.

*Зам. директора
по научной работе, к.т.н.*



 О.А. Демченко