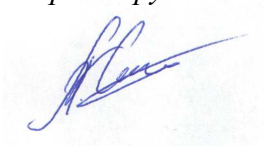
Открытое акционерное общество
«Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского»

На правах рукописи



Смирнов Александр Николаевич

ВОЛНОВОЙ МЕТОД ДВУХСТОРОННИХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ 110 – 220 КВ

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
Панфилов Дмитрий Иванович

Москва 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 5

Глава 1 Состояние вопроса исследования. Анализ современных методов и устройств ОМП 10

1.1 Анализ современных методов ОМП 10

1.2 Обоснование исследования волнового метода двухсторонних измерений 17

1.3 Анализ факторов, влияющих на погрешность волнового метода двухсторонних измерений 22

1.4 Анализ современных устройств дистанционного ОМП 24

1.5 Выводы 29

Глава 2 Разработка и исследование способа выделения волнового переходного процесса из совокупности электромагнитных процессов в ВЛ 110 – 220 кВ 31

2.1 Методы исследования волновых переходных процессов в ВЛ 31

2.1.1 Аналитический расчет волновых переходных процессов в ВЛ 110 – 220 кВ 31

2.1.2 Имитационное моделирование волновых переходных процессов в ВЛ 110 – 220 кВ 38

2.1.3 Параметры ВЛ для исследования волновых переходных процессов 39

2.2 Исследование способа выделения волнового переходного процесса в ВЛ 110 – 220 кВ из фазных напряжений и токов 43

2.2.1 Способ выделения волнового переходного процесса с помощью метода волновых каналов 43

2.2.2 Сравнение способов выделения волнового переходного процесса 64

2.2.3 Подавление стационарных сигналов 76

2.3 Влияние мест нарушения однородности ВЛ 110 –- 220 кВ на распространение электромагнитных волн в ней 76

2.4 Выводы 81

Глава 3 Разработка и исследование способа определения времени достижения фронтом электромагнитной волны точки контроля 83

3.1 Методы анализа сигналов для определения времени достижения фронтом электромагнитной волны точки контроля 86

3.1.1 Методы анализа сигналов в частотной области 86

3.1.2 Методы анализа сигналов в частотно-временной области 87

3.1.3 Методы анализа сигналов во временной области 91

3.2 Имитационное моделирование ОМП волновым методом двухсторонних измерений с применением предложенных способов повышения эффективности 96
3.2.1 Оценка погрешности способа ОМП при различных видах КЗ 105
3.2.2 Оценка погрешности способа ОМП при различных значениях переходного сопротивления в месте КЗ 108
3.2.3 Оценка погрешности способа ОМП при различных мгновенных значениях напряжения при возникновении повреждения 109
3.2.4 Оценка влияния транспозиции на погрешность способа ОМП 109
3.2.5 Исследование способа ОМП на двухцепной линии 110
3.2.6 Исследование влияния частотных характеристик измерительных трансформаторов на точность способа ОМП 113
3.2.7 Исследование влияния различных отношений сигнал/помеха на точность способа ОМП 118
3.2.8 Оценка способа ОМП и характеристик ТН и ТТ по осциллограммам процессов в ВЛ 110 кВ Пугачи – Акбулак, ВЛ 220 кВ Тамбовская-500 – Давыдовская-1, ВЛ 220 кВ Парская – Сасово 119
3.3 Выводы 126
Глава 4 Разработка аппаратно-программного обеспечения устройства ОМП волновым методом двухсторонних измерений 127
4.1 Многофункциональные устройства для сетей 110 кВ и выше 127
4.2 Цель разработки устройства и основные функции 132
4.3 Общие технические требования и структура МФУ 134
4.4 Разработка аппаратного обеспечения основных модулей 137
4.4.1 Модуль аналого-цифрового преобразования 137
4.4.2 Модуль цифровой обработки сигналов 141
4.4.3 Модуль синхронизации 143
4.5 Разработка алгоритмов и программного обеспечения МФУ 144
4.5.1 Определение времени появления фронта волны, обмен метками времени и расчет расстояния до места повреждения 146
4.5.2 Регистрация аварийных процессов 151
4.5.3 Расчет и усреднение ПКЭ трехфазной сети 151
4.5.4 Расчет и усреднение синхронизированных векторов трехфазной сети 157
4.5.5 Программное обеспечение интерфейсного преобразователя 160
4.6 Основные структурные и функциональные схемы МФУ 162
4.7 Программа и методика лабораторных испытаний МФУ. Испытания МФУ 175

4.8 Опытно-промышленная эксплуатация МФУ на объекте ЕНЭС 179
4.9 Внедрение МФУ в серийное производство 181
4.10 Выводы 183
Заключение 184
Список сокращений и условных обозначений 185
Список литературы 187
Приложение 1 Акт о внедрении результатов диссертационной работы 196
Приложение 2 Программа расчета T_u, $\gamma_м$, $Z_{в,м}$ на языке Matlab 197
Приложение 3 Программа расчета частотной характеристики волновых каналов ВЛ $H(\omega,l)$ на языке Matlab 200
Приложение 4 Погрешности испытаний устройства на СИ ПКЭ 204
Приложение 5 Погрешности испытаний устройства на СВИ 207
Приложение 6 Погрешности испытаний устройства на ОМП 208

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Воздушные линии (ВЛ) электропередачи 110 – 220 кВ подвержены коротким замыканиям (КЗ) и обрывам проводов. Эти повреждения приводят к перерывам электроснабжения и ухудшению его качества, увеличению потерь электроэнергии, а также – к нарушениям устойчивости работы энергосистемы. Причины возникновения повреждений различны – ухудшение состояния изоляции, воздействие внешних объектов, метеорологические условия.

Важным фактором для быстрого устранения последствий повреждений является точное дистанционное определение места повреждения (ОМП), позволяющее уменьшить зону обхода ВЛ оперативно-ремонтным персоналом электрических сетей. Точность ОМП особенно важна, если на элементах ВЛ отсутствуют видимые следы пробоя, не позволяющие достоверно определить место повреждения при осмотре ВЛ, а также – при успешных автоматических повторных включениях ВЛ, поскольку после устранения повреждения возможно ослабление уровня изоляции ВЛ, ведущее к повторным КЗ.

Наибольшее распространение в России и мире получила группа методов и устройств, осуществляющая измерение параметров аварийного режима на промышленной частоте. Однако погрешность данных методов и устройств составляет не менее 1 – 2 % от длины ВЛ. Поэтому повышение точности ОМП на ВЛ является актуальной проблемой, решение которой позволяет сократить время обнаружения места повреждения.

Степень разработанности темы исследования. Весомый вклад в разработку и исследование методов ОМП внесли Г. М. Шалыт, А. С. Малый, А. И. Айзенфельд, А. П. Кузнецов, Е. А. Аржанников, А.-С. С. Саухатас, Я. Л. Арцишевский, А. Л. Куликов, Д. Р. Любарский, Р. Г. Минуллин, Ю. А. Лямец, L. V. Bewley, T. Takagy, M. M. Saha и многие другие. В представленной работе уделено большое внимание исследованию способов повышения эффективности волнового метода двухсторонних измерений для ОМП. Новый этап в развитии волнового метода двухсторонних измерений, связанный с распространением спутниковых радионавигационных систем и систем цифровой обработки сигналов, начинается в конце XX века. В работах таких ученых как D. Fernandes Jr., W. L. A. Neves, A. M. Elhaffar, M. da Silva, M. Oleskovicz исследуются проблемы распознавания фронтов волн из всей совокупности электромагнитных процессов, имеющих место в линии электропередачи (ЛЭП).

На всех этапах работы автор пользовался консультациями к.т.н., с.н.с., заведующего лабораторией «Информационно-измерительных и управляющих систем в электроэнергетике» ОАО «ЭНИН» В.Ф. Лачугина, внесшего большой вклад в исследования волновых переходных процессов в ВЛ 6 – 1150 кВ.

Объектом исследования в работе являются ВЛ 110 – 220 кВ, **предметом** – волновой метод двухсторонних измерений для ОМП ВЛ 110 – 220 кВ.

Цель работы: Повышение эффективности волнового метода двухсторонних измерений для ОМП ВЛ 110 – 220 кВ.

Для достижения указанной цели в работе решены следующие **задачи**:

1. Анализ современных методов и устройств ОМП.
2. Разработка и исследование способа выделения волнового переходного процесса из совокупности электромагнитных переходных процессов в ВЛ 110 – 220 кВ.
3. Разработка и исследование способа определения времени достижения точки контроля фронтом электромагнитной волны, возникшей в месте повреждения.
4. Разработка аппаратно-программного обеспечения устройства волнового ОМП.

Научная новизна работы:

1. Предложен способ выделения волнового переходного процесса для повышения эффективности волнового ОМП, отличающийся использованием преобразования фазных токов и напряжений в междуфазные составляющие с учетом геометрии расположения проводов, их удаленности от поверхности земли при вариации значений удельного сопротивления земли, с последующим вычислением аварийных составляющих напряжения падающей волны, что позволяет снизить влияние степени искажения формы электромагнитной волны, распространяющейся от места повреждения.
2. Для повышения точности волнового ОМП предложен способ определения времени достижения фронтом электромагнитной волны точки контроля, отличающийся применением статистических методов для анализа сигналов и помех предшествующего режима во временной области.
3. Разработана имитационная модель расчета переходных электромагнитных процессов в электрических сетях 110 – 220 кВ для предложенных способов повышения эффективности волнового метода двухсторонних измерений для ОМП ВЛ 110 – 220 кВ.
4. Разработаны алгоритмы ОМП волновым методом двухсторонних измерений с применением предложенных способов повышения его эффективности.

Практическая значимость работы:

1. Разработанные для проверки достоверности предложенных способов повышения эффективности волнового ОМП методы имитационного моделирования электромагнитных переходных процессов в электрической сети 110 – 220 кВ могут быть использованы при исследовании задач быстродействующей релейной защиты и устройств автоматики.
2. Результаты разработки и испытаний устройства волнового ОМП, использующего предложенные способы повышения эффективности волнового ОМП рекомендованы для организации производства опытно-промышленных устройств ОМП ВЛ 110 – 220 кВ.
3. Разработанное аппаратно-программное обеспечение устройства волнового ОМП является основой для выполнения многофункционального измерительного устройства с функциями контроля качества электроэнергии и синхронизированных векторных измерений в электрической сети 110 – 220 кВ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты разработки и исследования способа выделения волнового переходного процесса из совокупности электромагнитных процессов в ВЛ 110 – 220 кВ, основанного на расчете напряжения падающей волны из междуфазных составляющих с последующим вычислением аварийных составляющих.
2. Результаты разработки и исследования способа определения времени достижения фронтом электромагнитной волны точки контроля, основанного на применении статистических методов для анализа сигналов и помех предшествующего режима во временной области.
3. Результаты имитационного моделирования переходных электромагнитных процессов в электрических сетях 110 – 220 кВ и предложенных способов повышения эффективности волнового метода двухсторонних измерений для ОМП ВЛ 110 – 220 кВ.
4. Результаты разработки алгоритма ОМП волновым методом двухсторонних измерений с применением предложенных способов повышения его эффективности.

Методы исследования базируются на фундаментальных положениях теоретических основ электротехники, преобразования и передачи электрической энергии в электрических сетях, теории вероятностей, обработки сигналов, имитационного моделирования.

Степень достоверности диссертационной работы обеспечивается совпадением результатов расчетов, полученных при использовании разработанной имитационной модели,

реализованной в программном комплексе ATP/EMTP с результатами, опубликованными в научных изданиях и обусловлена использованием положений теоретических основ электротехники, преобразования и передачи электрической энергии в электрических сетях, методов теории вероятностей, методов обработки сигналов и обоснованностью принятых допущений.

Апробация полученных результатов. Основные научные и практические результаты работы докладывались и обсуждались на XIV Международной научно-технической конференции «Интеллектуальная электроэнергетика, автоматика и высоковольтное коммутационное оборудование» («ТРАВЭК»), Москва, 2012 г.; на XIX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, 2013 г. и на Конкурсе молодых специалистов ОАО «ЭНИН», Москва, 2013 г.

Внедрение результатов работы. Результаты работы использовались при подготовке отчетов по договору с ОАО «ФСК ЕЭС» по программе инновационного развития ОАО «ФСК ЕЭС» до 2016 г. с перспективой до 2020 г.

Результаты диссертационной работы защищены патентами на изобретение [52, 53], патентами на полезную модель [54, 102], свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ [103, 104], а также внедрены в виде усовершенствованных алгоритмов для ОМП в составе многофункционального устройства, что подтверждено актом внедрения ООО «ИРЗ ТЭК».

Личный вклад соискателя. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит:

- В публикациях [51], [107], [52], [49] – результаты разработки и исследования способа выделения волнового переходного процесса из совокупности электромагнитных процессов в ВЛ 110 – 220 кВ, основанного на расчете напряжения падающей волны из междуфазных составляющих с последующим вычислением аварийных составляющих.
- В публикациях [51], [50], [107], [48], [53], [54], [49] – результаты разработки и исследования способа определения времени достижения фронтом электромагнитной волны точки контроля, основанного на применении статистических методов для анализа сигналов и помех предшествующего режима во временной области.

- В публикациях [51], [107] – результаты имитационного моделирования переходных электромагнитных процессов в электрических сетях 110 – 220 кВ и предложенных способов повышения эффективности волнового метода двухсторонних измерений для ОМП ВЛ 110 – 220 кВ.
- В публикациях [51], [107], [102], [103], [104] – результаты разработки алгоритма ОМП волновым методом двухсторонних измерений с применением предложенных способов повышения его эффективности.

Публикации. Результаты диссертации опубликованы в 11 работах (5 статей, 2 патента на изобретение, 2 патента на полезную модель, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ), из них 10 в изданиях, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий».

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 209 страницах, имеет 120 иллюстраций, включает титульный лист, оглавление, введение, 4 главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы (113 позиций) и 6 приложений на 14 страницах.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ОМП

1.1 Анализ современных методов ОМП

Разработано большое количество различных методов ОМП на ЛЭП. Схема классификации методов ОМП [1] (Рисунок 1.1) содержит наиболее используемые методы для ВЛ.

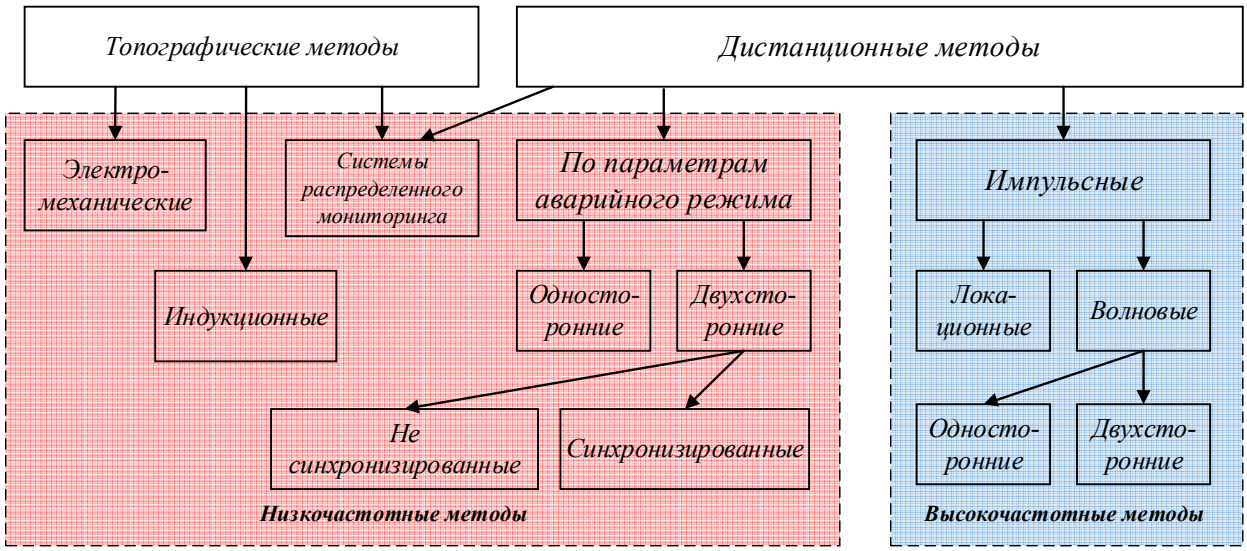


Рисунок 1.1 Схема классификации методов ОМП на ВЛ

Методы ОМП делятся на дистанционные и топографические. В дистанционных методах используются устройства, устанавливаемые в доступных персоналу пунктах сети, как правило, в общеподстанционных пунктах управления (ОПУ), и указывающих расстояние от места установки устройства до места повреждения. Топографические методы подразумевают определение места повреждения при движении по трассе с помощью переносных устройств, либо с помощью стационарных устройств, установленных вдоль ВЛ.

Методы подразделяются также на высокочастотные и низкочастотные. Низкочастотные методы используют контроль частот от нуля до нескольких килогерц, высокочастотные методы – десятки килогерц и более [1].

К устройствам, применяющим топографические методы, относятся различные индикаторы повреждений, устанавливаемые на проводах или на опорах ВЛ. При протекании тока КЗ устройство срабатывает и линейная бригада определяет место повреждения путем осмотра состояния индикаторов на трассе. Простейшим видом топографического метода является электромеханический метод, в основе которого лежит фиксация механических усилий, создаваемых за счет протекания тока КЗ. Электромеханический метод используется совместно

с дистанционными методами, определяющими зону осмотра. В последнее время стали появляться электронные приборы, выполняющие аналогичные функции, но имеющие возможность передавать факт срабатывания по беспроводным информационным сетям (системы распределенного мониторинга), что позволяет дистанционно определять место повреждения. Точность таких топографических методов зависит от шага установки устройств на ВЛ и эффективности применяемых алгоритмов.

Индукционный метод основан на том, что вдоль трассы линии улавливают характер изменения магнитного поля, создаваемого протекающим по линии током. Оператор с переносным приемным устройством перемещается вдоль трассы линии, определяя по различным признакам находится он до или после места повреждения [1].

Практика применения методов (устройств) ОМП на ВЛ 110 – 220 кВ показывает, что наиболее целесообразно увеличивать точность дистанционных методов (устройств), тем самым уменьшая зону обхода, при этом отказаться от применения топографических методов (устройств) и ограничится визуальным осмотром зоны повреждения.

Наибольшее распространение в России и в мире получила группа методов и устройств, осуществляющая измерение параметров аварийного режима (ПАР) на промышленной частоте, их запоминание и последующую обработку с целью расчета расстояния до места КЗ. Широкое распространение методов этой группы объясняется их простотой и использованием алгоритмов, применяющихся в РЗ [2].

Методы ОМП по ПАР с учетом различных признаков делятся на две основные группы: методы с двухсторонним измерением и методы с односторонним измерением. На ВЛ с промежуточными (ответвительными) ПС возможны дополнительные измерения.

Принцип работы ОМП по ПАР с двухсторонним измерением предполагает наличие устройств, установленных по концам ВЛ. Например, в некоторой точке ВЛ, соединяющей ПС 1 и 2 (Рисунок 1.2), происходит повреждение – однофазное КЗ на землю. Параметры аварийного режима связаны следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} U_1 + I_1 \times z_x &= U_x, \\ U_2 + I_2 \times (z - z_x) &= U_x, \end{aligned} \tag{1.1}$$

где U_1 ,U_2 и U_x – напряжения по концам линии и в месте повреждения; I_1, I_2 – токи по концам линии; z, z_x – сопротивления линии и участка до места повреждения.

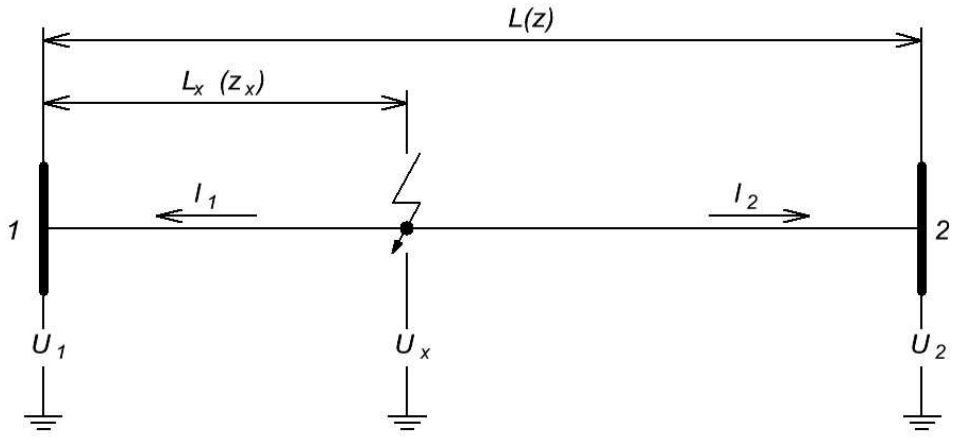


Рисунок 1.2 Напряжения и токи в линии в момент повреждения

Из (1.1) следует, что

$$z_x = \frac{I_2 \times z + U_2 - U_1}{I_1 + I_2}. \quad (1.2)$$

Поделив правую и левую части выражения (1.2) на удельное сопротивление проводов линии z_0, получим искомое расстояние до места повреждения:

$$L_x = \frac{I_2 \times z + U_2 - U_1}{z_0 \times (I_1 + I_2)}. \quad (1.3)$$

Параметры линии z и z_0 вводятся персоналом при установке устройства, реализующего данный метод. Величина L_x является выходной информацией устройства. Возможность исключения из расчетных выражений напряжения U_x показывает независимость результата ОМП от величины переходного сопротивления в месте повреждения.

Основными факторами, влияющими на погрешность двустороннего ОМП по ПАР, являются:

- неточность задания параметров ВЛ (сопротивления прямой последовательности и длины L);
- влияние насыщения измерительного трансформатора тока при КЗ;
- влияние мгновенного значения напряжения в месте КЗ (угол возникновения КЗ).

На погрешность одностороннего ОМП по ПАР, также влияют:

- неточность задания параметров ВЛ (сопротивления нулевой последовательности), обусловленная влиянием изменения природных условий (время года, температура

окружающей среды, переходы через транспортные и природные преграды, вид грунта);

- влияние изменения режимов нагрузки ВЛ;
- наличие взаимоиндукции с другими ВЛ;
- неопределенность и неустойчивость величины переходного сопротивления в месте КЗ;
- наличие ответвлений;
- отсутствие транспозиции или неполный цикл транспозиции.

В наибольшей степени эти факторы проявляются при однофазных КЗ на землю и в меньшей — при междуфазных КЗ.

Таким образом, широко применяемые в настоящее время дистанционные устройства ОМП по ПАР обладают существенным недостатком – необходимостью отслеживания изменений параметров режимов, как правило, колеблющихся в значительных пределах. Для обеспечения погрешности ОМП по ПАР не более 5 % от длины линии необходимо проводить регулярную работу по уточнению значений параметров ВЛ.

Уменьшить влияние некоторых указанных выше недостатков ОМП по ПАР позволяет уточнение параметров ВЛ [7], например, с помощью вычисления синхронизированных векторов токов и напряжений непосредственно до возникновения аварийного режима на обоих концах ВЛ [4], [5].

Импульсные методы подразделяются на локационные (активные) и волновые методы (пассивные) (Таблица 1.1) [1]. Первые основаны на генерации импульсов, вторые – на контроле импульсов (электромагнитных волн), возникающих непосредственно в месте повреждения.

Таблица 1.1 Классификация импульсных методов

<table>
<tr><td colspan="4">Классификация методов, принятая в России</td><td>Классификация методов, принятая в США и Японии</td></tr>
<tr><td>Активные методы</td><td colspan="3">Локационные методы</td><td>C</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Пассивные методы</td><td rowspan="3">Волновые методы</td><td colspan="2">Односторонние измерения</td><td>A, E</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Двухсторонние измерения</td><td>С предварительной посылкой хронирующего сигнала</td><td>D</td></tr>
<tr><td>С последующей посылкой хронирующего сигнала</td><td>B</td></tr>
</table>

Набольшее распространение получили локационные методы (тип C), односторонние волновые методы (тип A и E) и двухсторонние волновые методы с предварительной посылкой хронирующего сигнала (тип D) [1].

Локационный метод (тип C) основан на измерении времени между моментами посылки в линию зондирующего электрического импульса и прихода к началу линии импульса, отраженного от места повреждения (Рисунок 1.3) [1].

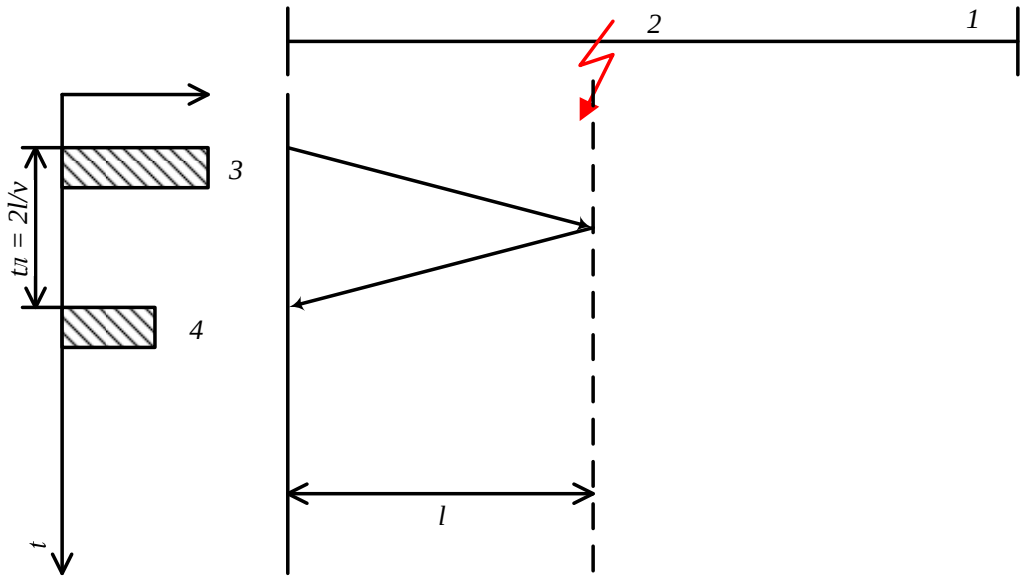


Рисунок 1.3 Пространственно-временная диаграмма импульсов при локационном методе ОМП: 1 –ВЛ; 2 – место повреждения; 3 – зондирующий импульс, 4 –отраженный импульс.

При этом, измеряется время двойного пробега этого импульса до места повреждения $t_л$ [25]. Расстояние до места повреждения определяют по следующей формуле:

$$l = \frac{t_л}{2} \times v, \tag{1.4}$$

где v – скорость распространения импульса в линии, м/с.

Волновые методы основаны на измерении времени между моментами достижения концов ЛЭП фронтами электромагнитных волн, возникающих в месте повреждения. Рассмотрим один провод ВЛ (Рисунок 1.4а) длиной L, который в момент повреждения заряжен до напряжения U, например положительной полярности. При возникновении повреждения (Рисунок 1.4б), например КЗ фазы на землю, напряжение в точке пробоя, удаленной от конца линии на расстояние l, становится равным нулю. Вследствие этого в месте повреждения возникают распространяющиеся в обе стороны электромагнитные волны напряжением $-U$, стремящиеся со скоростью v распространить нулевой потенциал по всей ВЛ (Рисунок 1.4в) [1].

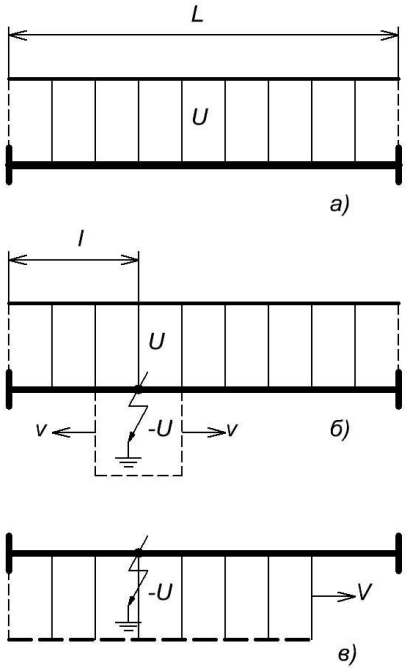


Рисунок 1.4 Диаграмма распространения волн: а – напряжение на линии перед повреждением; б – распространение волн непосредственно после повреждения; в – расположение фронтов волн в момент достижения одним из них конца линии.

По истечении времени $t_1 = t_0 + l/v$ фронт одной из волн достигает одного конца линии (Рисунок 1.5), в момент времени $t_2 = t_0 + (L — l)/v$ фронт второй волны достигает второго конца, а в момент времени $t_3 = t_0 + 3l/v$ фронт первой волны отразится от места повреждения и вновь достигнет первого конца линии.

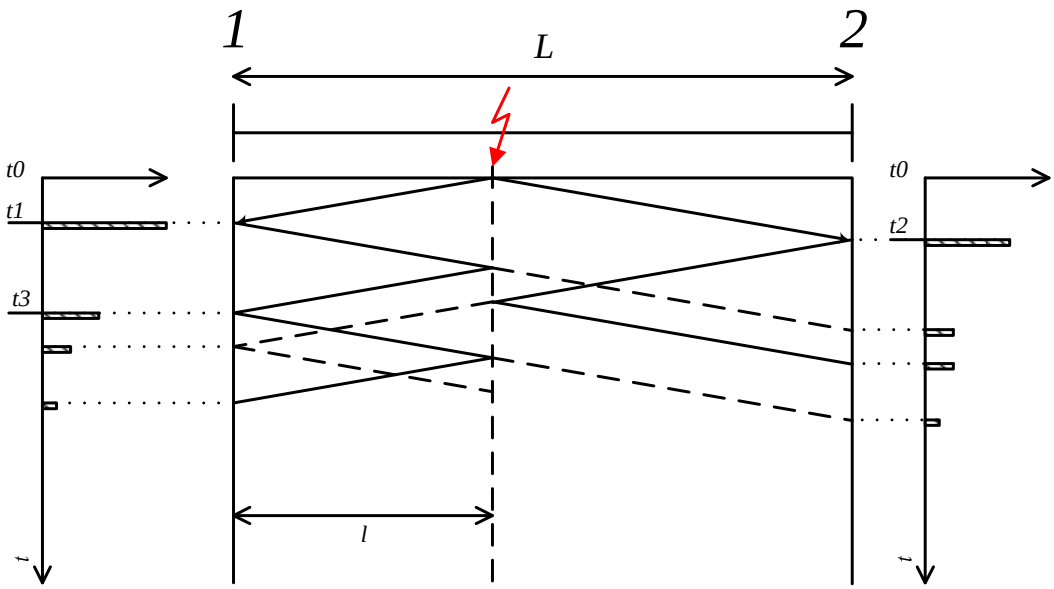


Рисунок 1.5 Пространственно-временная диаграмма распространения волн

Волновой метод односторонних измерений (тип A) основан на определении времени между моментом прихода волны возникшей в месте повреждения (t_1) и моментом повторного прихода фронта волны после отражений от начала линии и места повреждения (t_3). Расстояние до места повреждения вычисляется по соотношению:

$$l = \frac{t_3 - t_1}{2} \cdot v. \tag{1.5}$$

Волновой метод двухсторонних измерений (тип D) с предварительной посылкой хронирующего сигнала основан на фиксации времени между моментом прихода фронта волны на один конец (t_1) и на другой (t_2). На обоих концах линии непрерывно ведут счет времени одинаковые счетчики, которые периодически синхронизируются либо ведущим концом, либо общим источником. В моменты достижения фронтами волн концов ВЛ соответствующие счетчики останавливаются. Временной интервал рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{L - l}{v} - \frac{l}{v}. \tag{1.6}$$

Если повреждение произошло в середине линии ($l = L/2$), то фронты волн достигают обоих концов одновременно: $t_1 = t_2$ и $\Delta t = 0$. При $l > L/2$ моменты приход фронтов на ведущем конце $t_1 > t_2$ и разница времен $\Delta t < 0$. При $l < L/2$ моменты приход фронтов $t_1 < t_2$, разница

времен $\Delta t > 0$. При известной длине ВЛ L, можно из уравнения (1.6) определить расстояние до места повреждения:

$$l = \frac{L}{2} - \frac{\Delta t}{2} \times v . \qquad (1.7)$$

Тип E является односторонним методом, использующий переходные процессы, создаваемые при включении ВЛ высоковольтным выключателем, в том числе при автоматическом повторном включении (АПВ) [3]. Тип E используется для определения места устойчивых повреждений, включая обрывы проводов фаз, а также может использоваться для измерения длины исправной ВЛ при ее включении.

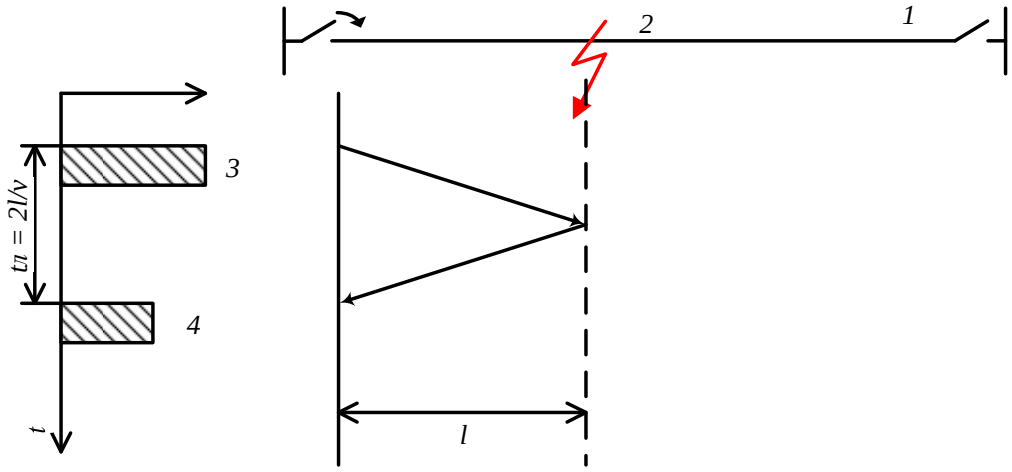


Рисунок 1.6 Пространственно-временная диаграмма импульсов при локационном методе ОМП: 1 – ВЛ; 2 – место повреждения; 3 – импульс, сформированный выключателем, 4 –отраженный импульс.

1.2 Обоснование исследования волнового метода двухсторонних измерений

Наибольшей точностью среди дистанционных методов ОМП обладает группа импульсных методов [1]. Предельная погрешность импульсных методов в основном определяется частотными характеристиками (АЧХ и ФЧХ) измерительного канала и частотой дискретизации. Минимальный шаг определения расстояния до места повреждения определяется отношением $h = v/(2 \cdot dt)$, где v - скорость распространения волны (приблизительно равна скорости света), а dt - период дискретизации устройства. В свою очередь предельная погрешность методов по ПАР в основном определяется погрешностью измерения токов (напряжений) для определения амплитуды и угла тока (напряжения) промышленной сети и погрешностью задания параметров линии (при отсутствии уточнения параметров по предаварийному режиму).

Высокая точность импульсных методов является следствием слабой зависимости методов от параметров ВЛ. Из преимуществ импульсных методов по отношению к синхронизированному двухстороннему методу по ПАР (наиболее совершенному методу по ПАР) стоит отметить, то что точность импульсных методов не зависит от вероятного насыщения ТТ и угла возникновения КЗ. Полный перечень факторов, влияющих на погрешности методов по ПАР и импульсных методов, а также требования к методам представлены в Таблица 1.2.

Таблица 1.2 Факторы, влияющие на погрешность дистанционных методов и требования к методам

Факторы, требования	Методы по параметрам аварийного режима			Импульсные методы		
	Односторонний	Двухсторонний несинхронизированный	Двухсторонний синхронизированный	Локационный	Волновой односторонний	Волновой двухсторонний
Полоса пропускания ТН и ТТ	**нет**	**нет**	**нет**	**нет**	**да**	**да**
Нелинейность характеристик ТН и ТТ (насыщение ТТ)	**да**	**да**	**да**	**нет**	**нет**	**нет**
Схема соединения ТН и ТТ (ТН соединенный в треугольник)	**да (для $K^{(1)}$)**	**да (для $K^{(1)}$)**	**да (для $K^{(1)}$)**	**нет**	**нет**	**нет**
Величина нагрузки линии	**да**	**нет**	**нет**	**нет**	**нет**	**нет**
Неоднородность параметров линии	**да**	**нет**	**нет**	**нет**	**нет**	**нет**
Параллельные линии (взаимоиндукция линий)	**да**	**нет**	**нет**	**нет**	**нет**	**нет**
Величина переходного сопротивления	**да**	**нет**	**нет**	**нет**	**нет**	**нет**
Угол возникновения повреждения	**да**	**да**	**да**	**нет**	**нет**	**нет**
Величина сопротивление грунта	**да**	**нет**	**нет**	**нет**	**нет**	**нет**
Линия без транспозиции	**да**	**да**	**да**	**нет**	**нет**	**нет**
Тупиковые линии	**да**	**да**	**да**	**да/нет**	**да**	**да/нет**
Линии с отпайками	**да**	**да**	**да**	**да**	**да**	**да**
Вид повреждения	**да**	**нет**	**нет**	**нет**	**нет**	**нет**
Погрешность аварийных измерений (местных)	**да**	**да**	**да**	**да**	**да**	**да**
Погрешность аварийных измерений (удаленных)	**нет**	**да**	**да**	**нет**	**нет**	**да**
Погрешность предаварийных измерений (местных)	**нет**	**да/нет**	**да/нет**	**нет**	**нет**	**нет**
Погрешность	**нет**	**да/нет**	**да/нет**	**нет**	**нет**	**нет**

предаварийных измерений (удаленных)						
Наличие генерирующей аппаратуры	**нет**	**нет**	**нет**	**да**	**нет**	**нет**
Наличие и погрешность синхронизации	**нет**	**нет**	**да**	**нет**	**нет**	**да**
Наличие связи между удаленными устройствами	**нет**	**да**	**да**	**нет**	**нет**	**да**
Погрешность задания длины линии	**да**	**да**	**да**	**нет**	**да**	**да**
Погрешность задания величины сопротивления прямой последовательности	**да**	**да/нет**	**да/нет**	**нет**	**нет**	**нет**
Погрешность задания величины сопротивления обратной последовательности	**да**	**нет**	**нет**	**нет**	**нет**	**нет**
Погрешность задания скорости распространения волны	**нет**	**нет**	**нет**	**да**	**да**	**да**
Наличие устройства продольной компенсации	**да**	**да**	**да**	**нет**	**нет**	**нет**
Наличие устройства поперечной компенсации	**да**	**да**	**да**	**нет**	**нет**	**нет**

Устройства, реализующие локационный метод, могут эффективно применятся для диагностики и мониторинга состояния ВЛ [18], в том числе для определения расстояния до обрыва. Локатор использует генератор и приемник зондирующих сигналов, которые подключаются к ВЛ через фильтр присоединения и конденсатор связи. Основным преимуществом волновых методов перед локационным является отсутствие необходимости в установке дополнительного высоковольтного оборудования. В свою очередь волновые методы используют сигналы от измерительных ТН и ТТ, находящихся в эксплуатации.

Волновой метод двухсторонних измерений, в отличие от метода односторонних измерений, основан на фиксации волн возникших в месте повреждения до их отражения и преломления от различных неоднородностей. Такие волны обладают наименьшим искажением формы волны после пробега по ВЛ, что является преимуществом двустороннего метода перед односторонним. При реализации одностороннего волнового метода появляются сложности при распознавании повторно отраженных волн, в особенности при близких КЗ и при наличии множества неоднородностей в ВЛ.

Одной из основных проблем волнового метода двухсторонних измерений была техническая сложность организации синхронизации измерений по концам линии. Однако развитие спутниковых радионавигационных систем (СРНС), таких как GPS и ГЛОНАСС, позволило осуществлять синхронизацию измерений в устройствах со шкалой всемирного координированного времени (UTC) круглосуточно на всей поверхности Земли.

Недостатками волнового метода двухсторонних измерений являются необходимость установки устройств на всех концах ВЛ, зависимость от наличия канала связи между устройствами и сигнала синхронизации от СРНС. Однако не зависимо от средств волнового ОМП активно развиваются информационные сети между подстанциями с целью повышения управляемости электрической сети и внедряются резервные источники синхронизации, например, для нужд телемеханики и синхронизированных векторных измерений.

Исходя из вышесказанного, волновой метод двухсторонних измерений целесообразно исследовать для повышения его точности и эффективности. Однако несмотря на все преимущества волновых методов, тот факт, что методы по ПАР и импульсные методы имеют различные источники погрешностей они могут дополнять друг друга. Устройство ОМП должно применять не один метод, а должно представлять собой комплекс (систему) ОМП, в котором сочетаются и взаимно резервируют друг друга методы ОМП, работающие на различных принципах.

1.3 Анализ факторов, влияющих на погрешность волнового метода двухсторонних измерений

Из выражения (1.7) следует, что погрешность измерения расстояния до места повреждения при использовании волнового метода двухсторонних измерений зависит от погрешности определения:

- длины ВЛ;
- скорости распространения электромагнитной волны в ВЛ;
- времени достижения волной точки контроля.

Длина ВЛ зависит от природно-климатических факторов, нагрузки по линии, марки проводов, расстояния между опорами в пролете ВЛ [1]. Для волнового ОМП следует задавать длину линии не как сумму расстояний между опорами, а как длину фазного провода ВЛ. Это связано с тем, что в волновых методах в основном оценивается пробег волн, которые распространяются в каналах «фаза-фаза».

Например, для ВЛ 220 кВ с шагом опор 400 м и проводом АС 240/32 при температуре 20℃ стрела провеса составляет 11,3 м. В первом приближение, аппроксимировав форму провода равнобедренным треугольником с высотой равной стреле провеса, увеличение длины линии на участке между опорами равно

$$\Delta L = 400 - 2 \cdot \sqrt{200^2 + 11{,}3^2} = 0{,}72 м . \quad (1.8)$$

При длине ВЛ по опорам равной 100 км увеличение длины линии за счет провеса провода составит

$$\Delta L = 0{,}72 м \cdot \frac{100 км}{400 м} = 180 м . \quad (1.9)$$

Неточность задания длины ВЛ присуща всем дистанционным методам ОМП, но устройства использующие импульсные методы, как правило, способны уточнять длину ВЛ. Например, после включения или отключения ВЛ с помощью выключателя образуется волна, которая отразится от противоположного конца (тип Е). По времени двойного пробега этой волны по ВЛ можно определить текущую длину.

Как показано в [1] и далее в тексте диссертации (Глава 2) скорость распространения волны в канале «фаза-фаза» составляет 0,98 – 0,99 от скорости света в вакууме. Поэтому скорость распространения волны в ВЛ для волновых методов часто принимается равной

скорости света в вакууме ($c \approx 299793\frac{км}{с}$) [3][5]. При этом максимальная ошибка определения расстояния при длине линии 100 км составляет

$$\Delta l = \frac{L}{2} \cdot (\frac{c}{v} - 1) = \frac{100км}{2} \cdot (\frac{c}{0{,}98 \cdot c} - 1) = 1020м \,. \quad (1.10)$$

Поэтому перед расчетом следует проводить оценку скорости распространения волны, например, аналитическим способом. И все же, приближенный выбор значения скорости распространения волны и оценка длины ВЛ оказывают меньшее влияние на точность ОМП, чем погрешность метода фиксации фронта волны.

Погрешность определения времени достижения волной точки контроля зависит от:

- погрешности источника синхронизации;
- точности измерения формы волны по концам ВЛ;
- погрешности метода определения времени достижения фронтом волны конца ВЛ.

Погрешность синхронизации в точках контроля, как правило, не хуже, чем $\Delta t_{синхр}$ = 1 мкс (максимальное отклонение импульса синхронизации) [3] [5]. При данной погрешности синхронизации минимальная погрешность ОМП составляет

$$\Delta l = \frac{\Delta t}{2} \cdot \mathrm{c} = \frac{1мкс}{2} \cdot 299793\frac{км}{с} = 149{,}8м \approx 150м \,. \quad (1.11)$$

Серийно выпускаемые источники синхронизации, например [19] [20], обладают меньшей погрешностью (до 100 нс). Точность синхронизации по СРНС зависит от характеристик приемника СРНС, а также характера распространения сигналов СРНС (многолучевость, тропосферная задержка, ионосферная задержка) [21].

Волны, распространяющиеся от места повреждения, претерпевают искажения, в основном проявляющиеся в уменьшении крутизны фронта. Причинами искажений являются наличие активного сопротивления в линии (сопротивления проводов), поверхностный эффект, коронный разряд, а также различные неоднородности (транспозиция, переходы через водные преграды, изменение тапа опор, переходы с бестросового участка на участок, защищенный тросом, переход от двухцепного участка линии к одноцепному, устройства компенсации). Кроме того, возможна фиксация случайных блуждающих волн, не связанных с повреждением. Поэтому необходимо использовать методы, которые повысят точность измерения (достоверность распознавания) волн из совокупности процессов в ВЛ.

Другим фактором определяющим погрешность является непосредственное определение времени фронта волны. Изменение скорости нарастания фронта в зависимости от пробега и наличие помех влияет на точность определения времени.

Итак, для волнового метода двухсторонних измерений поставлена задача повышения его эффективности за счет

- повышения точности измерения (достоверности распознавания) волны;
- повышения точности определения времени появления фронта волны в точке контроля.

1.4 Анализ современных устройств дистанционного ОМП

Дистанционные способы ОМП могут быть реализованы как дополнительные функции в терминалах РЗ и регистраторах аварийных событий (РАС) и как программные средства, которые работают с осциллограммами аварийных процессов, записанным РЗ и РАС (Рисунок 1.7). Также возможен расчет при помощи формул и таблиц по осциллограммам аварийных процессов. Однако, наиболее распространенными средствами ОМП в сетях 110 кВ и выше являются терминалы ОМП.

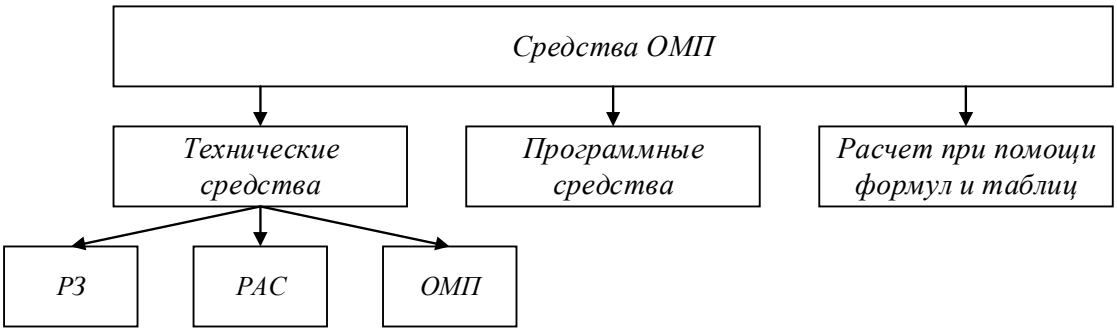


Рисунок 1.7 Схема классификации средств дистанционного ОМП

Средства ОМП подразделяются на средства, работающие в темпе процесса, и средства, использующие осциллограммы аварийных процессов. Как правило, к ОМП не предъявляются высокие требования по быстродействию (достаточно расчета за несколько секунд или минут), что позволяет использовать сложные алгоритмы по сохраненным осциллограммам.

Перечень современных средств ОМП (Таблица 1.3) включает устройства, использующие волновой метод [8], [9], [10], [11], [12], [13], [15] и устройства и программы, использующие методы по ПАР [13], [14], [15], [16], [17]. В перечень не включены средства ОМП в составе терминалов РЗ и РАС.

Таблица 1.3 Перечень современных средств ОМП

№	Наименования	Вид	Входы	Разрядность АЦП	Частота дискретизации	Синхронизация	Способ ОМП	Заявленная погрешность ОМП	Пуск ОМП	Интерфейсы	Протоколы
1	Qualitrol IDM+ 9 (IDM+18, IDM+36) (США)	Техническое средство	9 (18, 36) аналоговых и 32 (64, 128) дискретных входа (IDM+9)	20 для токовых входов, 16 для входов напряжения	25,6 кГц, 12,8 кГц, 6,4 кГц, 3,2 кГц, 1,6 кГц, 1,25 МГц	Внутренний GPS приемник (Δ = 100 нс), IRIG-B, IRIG-J, NTP	ПАР, волновой метод двухсторонних измерений	± 150 м	Пороговое значение тока, дискретный вход, GOOSE	2 х 100 Base-T, 3 х RS-232, 1 х RS-485, 1 х USB	IEC 61850, IEC 60870-5, Modbus, DNP3, NTP
2	Qualitrol FL-1 (FL-8) (США)	Техническое средство	3 (6) аналоговых токовых входа с внешними разделительными трансформаторами, 2 (4) дискретных входа	12	20 МГц, 10 МГц, 5 МГц, 2,5 МГц, 1,25 МГц	Внутренний GPS приемник (Δ = 100 нс), NTP (Δ = 1 мкс)	Волновой метод двухсторонних измерений	± 60 м	Пороговое значение тока, дискретный вход, GOOSE	2 х 100 Base-T, 3 х RS-232, 1 х RS-485, 1 х USB	IEC 61850-8-1 (GOOSE), NTP, DNP3
3	Qualitrol TWS Mk VI (США)	Техническое средство	3 аналоговых токовых входа с внешними разделительными трансформаторами	-	1,25 МГц	Внутренний GPS приемник (Δ = 1 мкс)	Волновой метод двухсторонних измерений	± 150 м	Пороговое значение тока	1 х 100 Base-T, 1 х RS-232	DNP3
4	ISA TFS 2100 (Италия)	Техническое средство	3 – 12 аналоговых токовых входа	12	500 кГц – 4 МГц	IRIG-B, 1 PPS	Волновой метод двухсторонних измерений, односторонний волновой метод	± 50 м	Пороговое значение тока	1 х RS 232/422, 2 х RS 232, 1 х 100 Base-T	TCP/IP
5	Alstom Reason/RPV-310 (Франция)	Техническое средство	До 64 аналоговых входов (ток, напряжение), до 384 цифровых входов, до 256 дискретных входа	-	5 МГц	IRIG-B, SNTP	Односторонний по ПАР, волновой метод двухсторонних измерений	-	Пороговое значение напряжения, тока, мощности	1 х 100 Base-T, 1 х RS-232	Modbus, IEC 61850-8-1 (GOOSE)
6	Бреслер-0107.090 (Россия)	Техническое средство	8 аналоговых входов (ток, напряжение), 8 дискретных входов	-	2,5 МГц	Внутренний GPS приемник (Δ = 1 мкс)	Односторонний и двухсторонний по ПАР, волновой метод двухсторонних измерений	3 % (односторонний по ПАР), 1 % (двухсторонний по ПАР), ± 150 – ± 450 м (волновой метод)	Дискретный вход	1 х RS-485, 1 х RS-232, 1 х 100 Base-T, 1 х USB	IEC 60870-5-104, NMEA
7	WinBres (Россия)	Программное обеспечение	-	-	-	-	ПАР	-	-	-	-
8	HPR-7000 (Китай)	Техническое средство	-	-	1 МГц	Δ = 1 мкс	Волновой метод	-	-	-	-

							двухсторонних измерений, по ПАР				
9	АРМ-СРЗА (Россия)	Программное обеспечение	-	-	-	-	ПАР	-	-	-	-
10	Сириус-2-ОМП (Россия)	Техническое средство	4 аналоговых токовых входа, 4 аналоговых входа по напряжению, 21 дискретный вход	14	-	Δ = 1 мс	Односторонний и двухсторонний по ПАР	-	Пороговое значение, дискретный вход	1 x USB, 1 x RS-485, 1 x 100 BASE-T	Modbus RTU, Modbus TCP

Устройства IDM+ 9 (IDM+18, IDM+36), FL-1 (FL-8), TWS Mk VI фирмы Qualitrol позволяют обнаруживать место повреждения на ВЛ любой протяженности, включая линии с отпайками, неоднородностями (кабельные участки) [8], [9], [10]. Все устройства применяют волновой метод двухсторонних измерений (тип D) с контролем тока волны. Информацию о токе устройства получают с помощью промежуточных трансформаторов тока с разъемным сердечником и воздушным зазором, подключенных к измерительным трансформатором тока ПС. Согласно информационным материалам [8], [9], [10] погрешность устройств составляет не более ±150 м для устройств IDM+, TWS Mk VI и не более ±60 м для устройства FL-1. Устройство IDM+ может контролировать до 36 аналоговых сигналов (до 12 линий), FL-1 – до 2 линий, TWS Mk VI – 1 линию. Проверка работы устройства производится при включении выключателя линии. При этом устройство должно зафиксировать обрыв линии на расстоянии равном длине линии. Пуск устройства производится по внешнему сигналу, либо по превышению значения порога. После этого происходит запись осциллограмм аварийного процесса и передача ее на сервер. Обработка осциллограмм и расчет расстояния до места повреждения производится на персональном компьютере в помощью специального программного обеспечения.

Комплекс TFS 2100 [11] фирмы ISA состоит из модулей регистрации бегущих волн TDU 100, программного обеспечения для персонального компьютера и серверного модуля DPS 100. Комплекс может контролировать до 4 линий. Комплекс применяет волновой метод двухсторонних измерений (тип D), волновой односторонний метод (тип A) и метод, использующий волны, возникающие при коммутациях выключателя (тип E). Основным является двухсторонний метод, остальные методы являются резервными. Метод на волнах от коммутации выключателей применяется для определения места обрыва провода. Модуль регистрации бегущих волны TDU 100 может контролировать как ток волны, так и напряжение волны. Пуск модуля регистрации производится по внешнему сигналу, либо по превышению значения порога. Записанные осциллограммы передаются на серверный модуль, и далее на персональный компьютер диспетчера, где происходит их обработка и расчет расстояния до места повреждения.

Устройство Reason/RPV-310 [12] фирмы Alstom проводит ОМП по ПАР и волновое двухстороннее ОМП (тип D) при установке специального модуля высокочастотного АЦП. Пуск устройства производится при превышения порога по току, устройство записывает высокочастотную осциллограмму. Обработка осциллограмм с двух концов линии происходит на персональном компьютере с помощью специального программного обеспечения.

Устройство Бреслер-0107.090 [13] предназначено для ОМП в ВЛ 6–750 кВ с односторонним и двухсторонним питанием и состоит из одного или двух полукомплектов

(терминалов), устанавливаемых по концам ВЛ. Терминалы фиксируют расстояние до места повреждения, вид замыкания, дату и время возникновения повреждения. Пуск терминала производится встроенными пусковыми органами, которые контролируют текущие токи и напряжения. Кроме того, устройство имеет дискретный вход для внешнего запуска. В терминале реализованы методы по ПАР и волновой. Существуют три модификации устройства: для организации одностороннего ОМП по ПАР, для организации двухстороннего ОМП по ПАР и для организации двухстороннего волнового ОМП (тип D). Один терминал позволяет выполнять ОМП на 13 линиях (в исполнении по ПАР) и на 2 линиях (в исполнении с волновым методом). В расчете ОМП по ПАР используется алгоритмическая модель линии, что позволяет учесть ее неоднородность, ответвительные ПС, режим заземления грозозащитного троса на каждом участке и влияние параллельных линий. При волновом ОМП информация о волне извлекается из сигнала тока. Пусковые органы в момент возникновения повреждения выделяют отрезок высокочастотного сигнала, включающий участки как нормального режима, так и аварийного режима. Далее происходит обработка ВЧ сигнала и нахождение меток времени, которыми обмениваются полукомплекты. По меткам времени каждый из терминалов рассчитывает расстояние до места повреждения. Если в устройстве пропадает синхронизация, то осуществляется двухстороннее ОМП по ПАР. Если пропадает связь между терминалами, то каждый терминал производит односторонне ОМП по ПАР. Погрешность ОМП волновым методом составляет примерно 1 – 3 пролета ЛЭП (150 – 450 м). Погрешность ОМП по ПАР зависит от адекватности модели. Двухсторонний ОМП по ПАР имеет погрешность определения 0,3 – 1 % от длины линии, односторонний – 2 – 3 % от длины линии [13].

Все устройства, использующие волновой метод двухсторонних измерений обладают внутренним источником синхронизации от GPS, либо имеют вход для внешнего источника синхронизации. Производители устройств с функцией волнового ОМП [8], [9], [11] заявляют о минимальной погрешности ± 50 м и ± 60 м. Как правило, указанные погрешности - это минимальный шаг определения расстояния до места повреждения. Этот шаг определяется отношением $h = v/(2 \cdot \Delta t)$, где v - это скорость распространения волны (в расчетах используют скорость света), а Δt - максимальная частота дискретизации устройства.

Исходя из имеющихся информационных материалов, автоматический расчет расстояния при использовании волнового метода производит только Бреслер-0107.090, остальные устройства пересылают осциллограммы либо на сервер, либо на персональный компьютер диспетчера. В дальнейшем с помощью специального программного обеспечения диспетчер производит расчет расстояния до места повреждения. Таким образом все устройства волнового ОМП, кроме устройства Бреслер-0107.090, являются высокоскоростными

синхронизированными регистраторами аварийных процессов, а алгоритмы ОМП заложены в программное обеспечения персонального компьютера.

Все производители устройств волнового ОМП не раскрывают полной информации о используемых алгоритмах. Но косвенно можно предполагать, что в большинстве из них, применяется фильтр высоких частот для ослабления сигнала промышленной частоты и пороговый элемент. Во многих программах в случае необходимость оператор может вручную установить на осциллограммах маркеры времени в моменты появления высокочастотного сигнала. При этом программа производит только расчет расстояния по формуле (1.7).

Устройства волнового ОМП измеряют только ток волны, что объясняется широкой полосой пропускания измерительных ТТ и отсутствием ослабления тока волны при большом количестве линий, подключенный к шинам ПС [3]. Если к шине подключена только одна линия, то амплитуды тока волны незначительны при КЗ и необходимо измерять напряжение волны. Устройство ISA TFS 2100 [11] может измерять как ток волны, так и с напряжение волны. В линиях сверхвысокого напряжения замер напряжения производится при помощи ТТ с разъемным сердечником, подключенного к заземлению делителя напряжения емкостного ТН.

Наиболее распространенными сигналами пуска ОМП являются внутренний сигнал превышения порогового значения (как правило, превышение значения тока) и внешний сигнал (как правило, от основной и резервной защит линии).

1.5 Выводы

1. Проведен анализ современных способов и устройств ОМП. Анализ выявил основные достоинства и недостатки способов и устройств ОМП.
2. Обоснован выбор способа ОМП (предмет исследования), основанного на волновом методе двухсторонних измерений, для проведения исследований с целью повышения его эффективности. Указанный способ является одним из наиболее точных дистанционных способов ОМП.
3. Определены факторы, влияющие на погрешность волнового метода двухсторонних измерений. К этим факторам относятся:
   - длина ВЛ;
   - скорость распространения электромагнитной волны в ВЛ;
   - время достижения волной точки контроля.

   В свою очередь погрешность времени достижения волной точки контроля зависит от:
   - погрешности источника синхронизации;
   - достоверности формы волны, измеренной в точке контроля;

- погрешности метода определения времени достижения фронтом волны точки контроля.

4. Поставлена задача повышения достоверности определения формы волны и задача повышения точности определения времени достижения фронтом волны точки контроля с целью повышения эффективности волнового метода двухсторонних измерений.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ВЫДЕЛЕНИЯ ВОЛНОВОГО ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ИЗ СОВОКУПНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЛ 110 – 220 КВ

2.1 Методы исследования волновых переходных процессов в ВЛ

Рассмотрим аналитический расчет и имитационное моделирование как методы исследования волновых переходных в ВЛ.

2.1.1 Аналитический расчет волновых переходных процессов в ВЛ 110 – 220 кВ

При исследовании волновых переходных процессов ВЛ рассматривают как длинную линию с распределенными параметрами. Геометрические размеры, характеризующие линию, становятся существенно больше длины электромагнитной волны, распространяющейся в линии, при рассмотрении процессов содержащих в спектре собственные частоты ВЛ (например, для линии длиной 100 км: $\nu \approx \frac{c}{4 \cdot L} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 100 \cdot 10^3} = 750\ Гц$). Распределение напряжений и токов по времени и расстоянию в длинных линиях описываются телеграфными уравнениями [22], которые являются частным случаем решения уравнений Максвелла. Следует отметить, что в телеграфных уравнениях не учитываются неоднородность конструкции и провес проводов, а также эффект близости, наличие изоляционных элементов, концевые эффекты и излучения [23].

Пусть участок однопроводной линии элементарной длины *dx* имеет удельные сопротивление *R*, индуктивность *L*, емкость *C* и проводимость G (Рисунок 2.1).

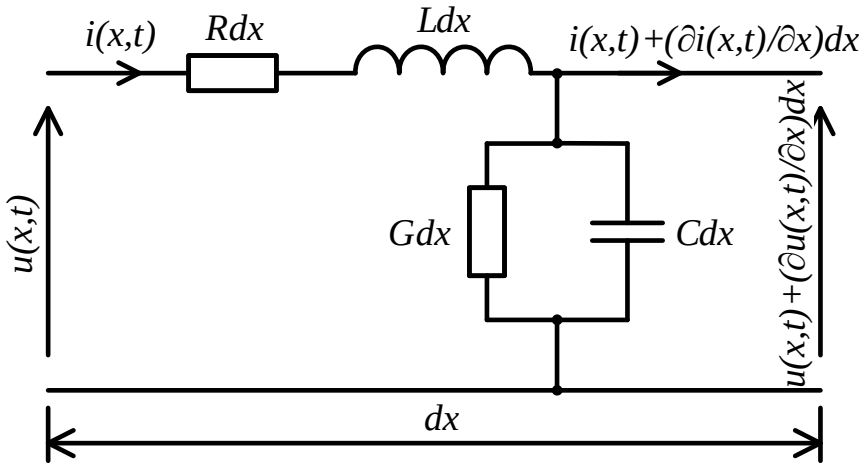


Рисунок 2.1 Участок однопроводной линии длиной *dx*

Тогда телеграфные уравнения для однопроводной линии имеют вид

$$-\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = (G + C\frac{\partial}{\partial t})u(x,t), \tag{2.1}$$

$$-\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = (R + L\frac{\partial}{\partial t})i(x,t). \tag{2.2}$$

Для гармонических колебаний токов и напряжений частотой ω уравнения (2.1) и (2.2) записываются как

$$\begin{cases} -\dfrac{\partial \overline{U}}{\partial x} = \overline{Z}\overline{I}; \\ -\dfrac{\partial \overline{I}}{\partial x} = \overline{Y}\overline{U}, \end{cases} \tag{2.3}$$

где $\overline{U}$ – комплексное напряжение, $\overline{I}$ – комплексный ток, $\overline{Z} = R + j\omega L$ – комплексное продольное удельное сопротивление линии, $\overline{Y} = G + j\omega C$ – комплексная поперечная удельная проводимость линии.

Распространение гармонического сигнала с частотой ω в n – проводной линии в общем случае описывается матричными телеграфными уравнениями

$$\begin{cases} -\dfrac{\partial \overline{\mathbf{U}}}{\partial x} = \overline{\mathbf{Z}} \times \overline{\mathbf{I}}; \\ -\dfrac{\partial \overline{\mathbf{I}}}{\partial x} = \overline{\mathbf{Y}} \times \overline{\mathbf{U}}, \end{cases} \tag{2.4}$$

где $\overline{\mathbf{U}}$ – матрица столбец комплексных значений напряжений, $\overline{\mathbf{I}}$ – матрица столбец комплексных значений токов, $\overline{\mathbf{Z}}$ и $\overline{\mathbf{Y}}$ – полные квадратные матрицы удельных комплексных продольных сопротивлений и поперечных проводимостей ВЛ.

Продифференцировав левую и правую часть системы уравнений (2.4) и подставив одно в другое получим

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 \overline{\mathbf{U}}}{\partial x^2} = \overline{\mathbf{Z}} \times \overline{\mathbf{Y}} \times \overline{\mathbf{U}}; \\ \dfrac{\partial^2 \overline{\mathbf{I}}}{\partial x^2} = \overline{\mathbf{Y}} \times \overline{\mathbf{Z}} \times \overline{\mathbf{I}}. \end{cases} \tag{2.5}$$

Матрицы $\overline{\mathbf{Z}}$ и $\overline{\mathbf{Y}}$ в общем случае не являются диагональными, т.к. имеется зависимость каждого фазного напряжения (тока) от всех остальных фазных напряжений (токов) в n - проводной линии.

Удобным способом для исследования волновых переходных процессов в линии является преобразование фазных токов и напряжений (фазные координаты) к волновым каналам

(модальные координаты) [23], [109], [110], [111], [112]. Выделение волновых каналов дает возможность получить независимые друг от друга *n* систем токов и напряжений в *n*-проводной линии.

Метод волновых каналов (модальный метод) применяется для расчета процессов в ЛЭП в задачах высокочастотной связи между ПС по ЛЭП, а также для формирования моделей ЛЭП при расчете переходных процессов в электрической сети.

Для применения метода волновых каналов в расчетах переходных процессов вводятся матрицы преобразований фазных токов и напряжений к модальным координатам

$$\overline{\mathbf{U}} = \overline{\mathbf{T}}_u \times \overline{\mathbf{U}}_м, \tag{2.6}$$

$$\overline{\mathbf{I}} = \overline{\mathbf{T}}_i \times \overline{\mathbf{I}}_м, \tag{2.7}$$

где $\overline{\mathbf{T}}_u$ и $\overline{\mathbf{T}}_i$ – квадратные матрицы преобразований напряжений и токов, $\overline{\mathbf{U}}_м$ и $\overline{\mathbf{I}}_м$ – матрицы столбцы модальных значений токов и напряжений.

Подставив (2.6) и (2.7) в (2.5) получим

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 \overline{\mathbf{T}}_u \times \overline{\mathbf{U}}_м}{\partial x^2} = \overline{\mathbf{Z}} \times \overline{\mathbf{Y}} \times \overline{\mathbf{T}}_u \times \overline{\mathbf{U}}_м; \\ \dfrac{\partial^2 \overline{\mathbf{T}}_i \times \overline{\mathbf{I}}_м}{\partial x^2} = \overline{\mathbf{Y}} \times \overline{\mathbf{Z}} \times \overline{\mathbf{T}}_i \times \overline{\mathbf{I}}_м. \end{cases} \tag{2.8}$$

Отсюда

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 \overline{\mathbf{U}}_м}{\partial x^2} = \overline{\mathbf{T}}_u^{-1} \times \overline{\mathbf{Z}} \times \overline{\mathbf{Y}} \times \overline{\mathbf{T}}_u \times \overline{\mathbf{U}}_м = \overline{\boldsymbol{\gamma}}_{\mathbf{u}}^{\mathbf{2}} \times \overline{\mathbf{U}}_м; \\ \dfrac{\partial^2 \overline{\mathbf{I}}_м}{\partial x^2} = \overline{\mathbf{T}}_i^{-1} \times \overline{\mathbf{Y}} \times \overline{\mathbf{Z}} \times \overline{\mathbf{T}}_i \times \overline{\mathbf{I}}_м = \overline{\boldsymbol{\gamma}}_i^{\mathbf{2}} \times \overline{\mathbf{I}}_м. \end{cases} \tag{2.9}$$

Из уравнения (2.9) видно, что

$$\overline{\mathbf{Z}} \times \overline{\mathbf{Y}} \times \overline{\mathbf{T}}_u = \overline{\mathbf{T}}_u \times \overline{\boldsymbol{\gamma}}_{\mathbf{u}}^{\mathbf{2}}. \tag{2.10}$$

Для нахождения матрицы $\overline{\mathbf{T}}_u$**,** которая диагонализирует матрицу $\overline{\mathbf{Z}} \times \overline{\mathbf{Y}}$, необходимо найти собственные вектора матрицы $\overline{\mathbf{Z}} \times \overline{\mathbf{Y}}$**.** Показатели распространения $\overline{\boldsymbol{\gamma}}_{\mathbf{u}}^{\mathbf{2}}$, являющиеся собственными значениями матрицы $\overline{\mathbf{Z}} \times \overline{\mathbf{Y}}$**,** находятся одновременно с нахождением собственных векторов. Собственные значения матриц $\overline{\mathbf{Z}} \times \overline{\mathbf{Y}}$ и $\overline{\mathbf{Y}} \times \overline{\mathbf{Z}}$ равны, следовательно $\overline{\boldsymbol{\gamma}}_{\mathbf{u}} = \overline{\boldsymbol{\gamma}}_{\mathbf{i}} = \overline{\boldsymbol{\gamma}}$.

Матрица $\overline{\mathbf{T}}_i$ находится из матрицы $\overline{\mathbf{T}}_u$ по условию нормирования матриц по евклидовой норме

$$\sum_{j=1}^{n} \mathbf{T}_{ij} = 1. \tag{2.11}$$

Из (2.11) следует что

$$\overline{\mathbf{T}}_\mathbf{i} = (\overline{\mathbf{T}}_\mathbf{u}^{-1})^{\mathrm{T}}. \tag{2.12}$$

где T – оператор транспонирования матрицы.

Каждый волновой канал имеет свои независимые удельные сопротивления, удельные проводимости, волновые сопротивления и коэффициенты распространения. Подставляя выражения (2.6) и (2.7) в (2.4) получим что

$$\overline{\mathbf{Z}}_\mathbf{м} = \overline{\mathbf{T}}_\mathbf{u}^{-1} \times \overline{\mathbf{Z}} \times \overline{\mathbf{T}}_\mathbf{i}, \tag{2.13}$$

$$\overline{\mathbf{Y}}_\mathbf{м} = \overline{\mathbf{T}}_\mathbf{i}^{-1} \times \overline{\mathbf{Y}} \times \overline{\mathbf{T}}_\mathbf{u}, \tag{2.14}$$

где $\overline{\mathbf{Z}}_\mathbf{м}$ – диагональная матрица удельных продольных сопротивлений волновых каналов линии, $\overline{\mathbf{Y}}_\mathbf{м}$ – диагональная матрица удельных поперечных проводимостей волновых каналов линии.

Матрица волновых сопротивлений в модальных координатах находится как

$$\overline{\mathbf{Z}}_\mathbf{в,м} = \sqrt{\frac{\overline{\mathbf{Z}}_\mathbf{м}}{\overline{\mathbf{Y}}_\mathbf{м}}}. \tag{2.15}$$

Решением системы обыкновенных дифференциальных уравнений (2.9) в модальных координатах являются выражения

$$\overline{\mathbf{U}}_\mathbf{м}(x) = e^{-\bar{\gamma}x} \times \overline{\mathbf{U}}_\mathbf{м}^\mathbf{пад} + e^{\bar{\gamma}x} \times \overline{\mathbf{U}}_\mathbf{м}^\mathbf{отр}, \tag{2.16}$$

$$\overline{\mathbf{I}}_\mathbf{м}(x) = e^{-\bar{\gamma}x} \times \overline{\mathbf{I}}_\mathbf{м}^\mathbf{пад} - e^{\bar{\gamma}x} \times \overline{\mathbf{I}}_\mathbf{м}^\mathbf{отр}, \tag{2.17}$$

где $\overline{\mathbf{U}}_\mathbf{м}^\mathbf{пад}$ и $\overline{\mathbf{I}}_\mathbf{м}^\mathbf{пад}$ – матрицы-столбцы падающих (прямых) волн токов и напряжений, $\overline{\mathbf{U}}_\mathbf{м}^\mathbf{отр}$ и $\overline{\mathbf{I}}_\mathbf{м}^\mathbf{отр}$ – матрицы-столбцы отраженных (обратных) волн токов и напряжений.

Из соотношений (2.16) и (2.17) получим выражение для напряжения падающей волны с учетом того что $\overline{\mathbf{U}}_м^{пад} = \overline{\mathbf{Z}}_\mathbf{в,м} \times \overline{\mathbf{I}}_м^{пад}$,

$$\overline{\mathbf{U}}_\mathbf{м}^\mathbf{пад} = \frac{\overline{\mathbf{U}}_\mathbf{м} + \overline{\mathbf{Z}}_\mathbf{в,м} \times \overline{\mathbf{I}}_\mathbf{м}}{2}. \tag{2.18}$$

Подставив в выражение (2.18) соотношения (2.16) и (2.17) без учета слагаемых, описывающих отраженные волны, получим

$$\overline{\mathbf{U}}^{\text{пад}}_{\text{м,т.к.}}(l_{повр}) = \frac{e^{-\overline{\gamma} l_{повр}} \times \overline{\mathbf{U}}_{\text{м,повр}} + \overline{\mathbf{Z}}_{\text{в,м}} \times e^{-\overline{\gamma} l_{повр}} \times \overline{\mathbf{I}}_{\text{м,повр}}}{2}. \tag{2.19}$$

где $\overline{\mathbf{U}}^{\text{пад}}_{\text{м,т.к.}}$ – матрица-столбец падающих волн в точке контроля, $\overline{\mathbf{U}}_{\text{м,повр}}$ и $\overline{\mathbf{I}}_{\text{м,повр}}$ – матрицы-столбцы напряжений и токов в месте возникновения повреждения. Выражение (2.19) является основным для определения значения напряжения в точке контроля для разных расстояний от места повреждения при известных значениях напряжения в месте повреждения и параметрах линии.

Примем форму электромагнитной волны, возникающей в месте повреждения, в первом приближении в виде ступенчатой функции. При расположении провода с активным сопротивлением над землей с конечной проводимостью волна, распространяющиеся вдоль проводов, перестает быть плоской [1]. Форма волны, особенно ее фронт, искажается при пробеге по длине линии, каждая частотная составляющая распространяется со своей скоростью. Процесс распространения зависит от числа проводов, материала, размера проводов, удаленности проводов от поверхности земли, а также характеристик земли. Необходимо учитывать частотную зависимость волновых сопротивлений, коэффициентов распространения, а также матрицы преобразования. В общем случае волновое сопротивление, зависимое от частоты, в модальных координатах

$$\overline{\mathbf{Z}}_{\text{в,м}}(\omega) = \sqrt{\frac{\overline{\mathbf{Z}}_{\text{м}}(\omega)}{\overline{\mathbf{Y}}_{\text{м}}(\omega)}} = \sqrt{\frac{\overline{\mathbf{T}}_{\text{u}}^{-1}(\omega) \times (\mathbf{R}(\omega) + j\omega\mathbf{L}(\omega)) \times \overline{\mathbf{T}}_{\text{i}}(\omega)}{\overline{\mathbf{T}}_{\text{i}}^{-1}(\omega) \times (\mathbf{G}(\omega) + j\omega\mathbf{C}(\omega)) \times \overline{\mathbf{T}}_{\text{u}}(\omega)}}. \tag{2.20}$$

Для упрощения принимаем удельную проводимость равной нулю ($\mathbf{G}(\omega) = 0$) и удельную емкость не зависящей от частоты ($\mathbf{C}(\omega) = C$). Для удельного продольного сопротивления $\mathbf{R}(\omega)$ и удельной продольной индуктивности $\mathbf{L}(\omega)$ необходимо учитывать зависимость от частоты, так как существенное влияние оказывает поверхностный эффект. Тогда получим что

$$\overline{\mathbf{Z}}_{\text{в,м}}(\omega) = \sqrt{\frac{\overline{\mathbf{T}}_{\text{u}}^{-1}(\omega) \times (\mathbf{R}(\omega) + j\omega\mathbf{L}(\omega)) \times \overline{\mathbf{T}}_{\text{i}}(\omega)}{\overline{\mathbf{T}}_{\text{i}}^{-1}(\omega) \times j\omega\mathbf{C} \times \overline{\mathbf{T}}_{\text{u}}(\omega)}}. \tag{2.21}$$

Коэффициент распространения в модальных координатах равен

$$\boldsymbol{\gamma}(\omega) = \sqrt{\overline{\mathbf{T}}_{\text{u}}^{-1}(\omega) \times (\mathbf{R}(\omega) + j\omega\mathbf{L}(\omega)) \times j\omega\mathbf{C} \times \overline{\mathbf{T}}_{\text{u}}(\omega)} = \boldsymbol{\alpha}_{м}(\omega) + j\boldsymbol{\beta}_{м}(\omega). \tag{2.22}$$

где $\boldsymbol{\alpha}_{м}(\omega)$ – частотно зависимый коэффициент затухания волны, $\boldsymbol{\beta}_{м}(\omega)$ – частотно зависимый коэффициент фазы волны.

Выражение (2.19) для напряжения падающей волны в точке контроля с учетом частотной зависимости параметров линии определяется примет вид

$$\overline{\mathbf{U}}^{\mathbf{пад}}_{\mathbf{м,т.к.}}(\omega, l_{повр}) = \frac{e^{-\overline{\gamma}(\omega) l_{повр}} \times \overline{\mathbf{U}}_{\mathbf{м,повр}}(\omega) + \overline{\mathbf{Z}}_{\mathbf{в,м}}(\omega) \times e^{-\overline{\gamma}(\omega) l_{повр}} \times \overline{\mathbf{I}}_{\mathbf{м,повр}}(\omega)}{2}. \quad (2.23)$$

С учетом (2.6) и (2.7) получаем

$$\overline{\mathbf{U}}^{\mathbf{пад}}_{\mathbf{м,т.к.}}(\omega, l_{повр}) = \frac{e^{-\overline{\gamma}(\omega) l_{повр}} \times \overline{\mathbf{T}}_{\mathbf{u}}^{-1}(\omega) \times \overline{\mathbf{U}}_{\mathbf{повр}}(\omega) + \overline{\mathbf{Z}}_{\mathbf{в,м}}(\omega) \times e^{-\overline{\gamma}(\omega) l_{повр}} \overline{\mathbf{T}}_{\mathbf{i}}^{-1}(\omega) \times \overline{\mathbf{I}}_{\mathbf{повр}}(\omega)}{2}. \quad (2.24)$$

Матрицы продольных сопротивлений ***Z*** и поперечных проводимостей ***Y*** линии целесообразно рассчитывать по уравнениям Карсона [24]. Следует отметить что, ***Z*** и ***Y*** можно найти на конкретной линии с помощью опытов короткого замыкании и холостого хода, а также с помощью синхронизированных векторных измерений по концам линии [3]. Значения ***Z*** и ***Y*** зависят от геометрического расположения проводов, параметров проводов и параметров земли.

Уравнения Карсона применяются к линии, проводники которой строго параллельны земле. Профиль провода ВЛ с расстоянием между опорами менее 500 м, как правило, аппроксимируют параболической функцией [25]. При этом среднее расстояние от провода до земли h_{avg} определяют по выражению

$$h_{avg} = h_{опоры} - \frac{2}{3} h_{провеса} \quad (2.25)$$

где $h_{опоры}$ – высота опоры, $h_{провеса}$ – стрела провеса.

Следуя алгоритму Карсона, вначале вычисляется матрица потенциалов (Рисунок 2.2) по выражению

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln\left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}}\right). \quad (2.26)$$

Если $i \neq j$, то $D_{ij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 - (Y_i + Y_j)^2}$ и $d_{ij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 - (Y_i - Y_j)^2}$.

Если $i = j$, то $D_{ij} = 2Y_i$ и $d_{ij} = R_i$.

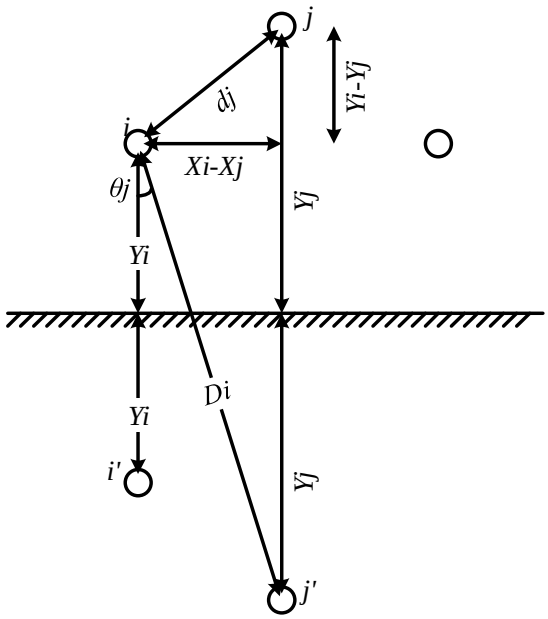


Рисунок 2.2 К определению матриц продольных сопротивлений ***Z*** и поперечных проводимостей ***Y***

Далее находится матрица удельных емкостей как обратная от матрицы ***P***

$$C = \mathbf{P}^{-1}. \tag{2.27}$$

Поперечная удельная проводимость вычисляется по выражению

$$\mathrm{Z}_{ij} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi}\left(\ln\left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}}\right) + 2\int_0^{\infty}\frac{e^{-\alpha\cos(\theta_{ij})}\cos(\alpha\cdot\sin(\theta_{ij}))}{\alpha+\sqrt{\alpha^2+j\cdot r_{ij}^2}}d\alpha\right). \tag{2.28}$$

Для удобства в выражении (2.28) используется упрощение интеграла [26]

$$2\int_0^{\infty}\frac{e^{-\alpha\cos(\theta_{ij})}\cos(\alpha\cdot\sin(\theta_{ij}))}{\alpha+\sqrt{\alpha^2+j\cdot r_{ij}^2}}d\alpha \approx \frac{\sqrt{(Y_i+Y_j+2\sqrt{\rho_з/2j\omega\mu_0})^2-(X_i+X_j)^2}}{d_{ij}} \tag{2.29}$$

где $\rho_з$ – удельное сопротивление земли, μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость.

Данное упрощение дает наибольшую ошибку в 5%, что приемлемо для расчетов с учетом погрешности значения сопротивления земли.

Итак, выражение (2.24) позволяет аналитически рассчитать параметры электромагнитных волн в ВЛ при различных расстояниях до места поведения и различных параметрах самой ВЛ. По выражениям (2.25) – (2.29) рассчитываются полные матрицы удельных проводимостей и сопротивление ВЛ. Полные матрицы удельных проводимостей и сопротивлений позволяют получить по выражению (2.10) матрицы преобразования фазных координат в модальные.

2.1.2 Имитационное моделирование волновых переходных процессов в ВЛ 110 – 220 кВ

Имитационное моделирование (при использовании адекватной модели) позволяет учесть дополнительные факторы, которые усложняют аналитический расчет. К таким факторам относятся учет шумов (помех), учет характеристик измерительных ТН и ТТ, нарушения однородности ВЛ (множество ответвлений, изменения геометрии опор) и т.д.

Наибольшее распространение, среди программ для моделирования электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах, получили программы на основе комплекса EMPT (ElectroMagnetic Transient Program) [25] [27].

Для выполнения имитационного моделирования в данной работе используется Alternative Transients Program (ATP), которая является свободной реализацией оригинальной программы EMPT и предназначена в первую очередь для нужд ученых-исследователей. Ввод модели осуществляется с помощью программы ATPDraw [28]. Программный комплекс ATP содержит модели электрических машин, линий электропередачи, выключателей, нагрузок, устройств защиты, различных ключевых преобразователей и т.д.

От выбора модели ЛЭП зависит достоверность моделирования волновых процессов. Модели ЛЭП в составе ATP разделяются на модели с сосредоточенными параметрами линии и с распределенными, последние подразделяются на модели частотной зависимостью параметров линии и без такой зависимости.

Полный перечень моделей ВЛ в ATP включает [25]:

- П – образная модель со сосредоточенными параметрами, параметры модели не зависят от частоты;
- Модель Бержерона – модель с распределенными параметрами и с сосредоточенными сопротивлениями потерь, параметры модели не зависят от частоты [29];
- Модель Нода – частотно-зависимая модель с распределенными параметрами и расчетом в фазных координатах [30];
- Модель Семлин – частотно-зависимая модель с аппроксимацией удельных сопротивлений и коэффициента распространения с помощью экспоненциальных функций [31];
- Модель Марти – частотно зависимая модель линии с распределенными параметрами и расчетом в модальных координатах [32].

Волновые переходные процессы в линиях электропередачи не могут анализироваться в модели со сосредоточенными параметрами (П – образная модель). Для анализа волны, с учетом пробега по линии (время пробега больше шага расчета), необходимо использовать модели с распределенными параметрами. Для анализа переходных процессов применяются модели, в которых учитываются зависимости удельных сопротивлений и проводимостей от частоты. Наибольшей точностью и стабильностью обладает модель Марти, в которой также учитывается поверхностный эффект, расщепления фаз и транспозиция. При построении модели Марти в программе ATP необходимо задать геометрию расположения проводов и их параметры. Из недостатков модели Марти нужно упомянуть то, что переход от фазных координат к модальным производится с помощью матрицы преобразования, которая рассчитана только для одной частоты. Модель Марти неоднократно верифицирована различными авторами [25], [32], что показывает возможность ее использования для исследования волновых переходных процессов.

2.1.3 Параметры ВЛ для исследования волновых переходных процессов

Зададим параметры ВЛ для имитационного моделирования процессов формирования и распространения электромагнитных волн. Объектом исследования в работе является ВЛ 110 – 220 кВ с эффективно заземленной нейтралью и без расщепления фазных проводов.

Наиболее распространенным расположением проводов в трехфазной ВЛ является горизонтальное, треугольное и шестиугольное (для двухцепной линии) (Рисунок 2.3). В ВЛ 110 – 220 кВ преобладает треугольное и шестиугольное расположение проводов.

По состоянию на 2007 год суммарная протяженность ВЛ 110 кВ – 330 кВ составляет около 90% от протяженности всех ВЛ в РФ [33] высокого и сверхвысокого напряжения. ВЛ 500 кВ и выше имеют преимущественно горизонтальное расположение проводов. Анализ формирования и распространения волн в ВЛ с горизонтальным расположением проводов детально представлен в [23], [34].

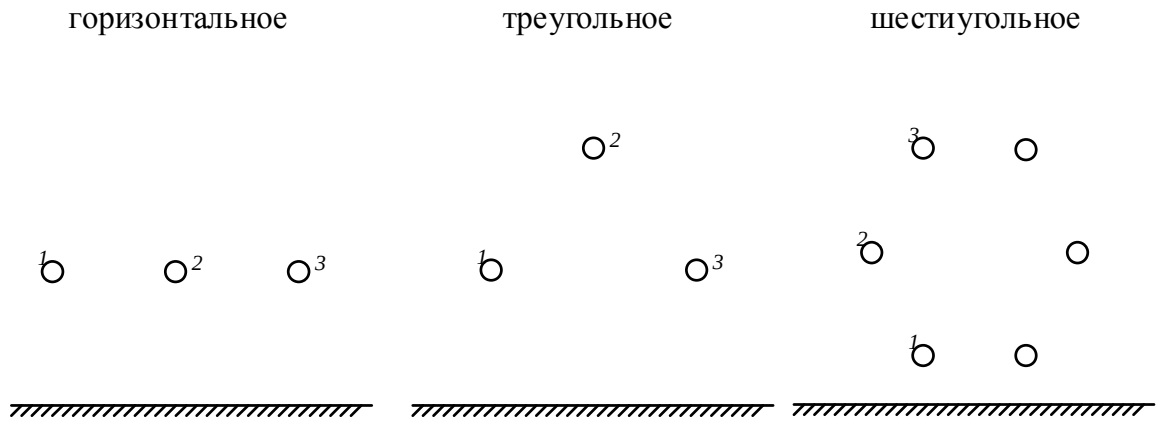


Рисунок 2.3 Расположение проводов ВЛ

В работе проведен анализ распространения волн при различных видах КЗ для двух типовых линий:

- ВЛ 220 кВ с треугольным расположением проводов (далее «ВЛ 1»);
- ВЛ 220 кВ с шестиугольным расположением проводов (далее «ВЛ 2»).

Результаты расчета, полученные для ВЛ 220 кВ, могут качественно характеризовать волновые процессы в ВЛ 110 кВ.

Существует множество типов опор, различающихся конструкцией и размерами. Для расчета выбраны опоры, конструктивные данные и эскизные рисунки которых приведены в Таблицах 2.1 и 2.2 и на Рисунках 2.4 и 2.5.

ВЛ 1 имеет треугольное расположение проводов, ВЛ 2 – шестиугольное. На ВЛ 1 грозозащитный трос заземлен только на анкерных пролетах, на промежуточных опорах трос изолирован от опоры через искровой промежуток. На ВЛ 2 трос заземлен только по концам ЛЭП. Параметры проводов и тросов приведены в Таблице 2.3. Удельное эквивалентное сопротивление грунта для всех расчетов принято равным 100 Ом.

Таблица 2.1 Конструктивные данные ВЛ 1

Параметр	Значение
Длина, км	90
Количество цепей	1
Основной тип опор	П 220-3
Среднее расстояние между опорами, км	0,4
Марка проводов в фазе	АС 240/32

Количество проводов в фазе	1
Стрела провеса провода в фазе при t = 20 °С, м	11,3
Длина гирлянды изолятора, м	2,2
Марка повода в тросе	С-70
Количество тросов	1
Стрела провеса троса при t = 20 °С, м	3,6

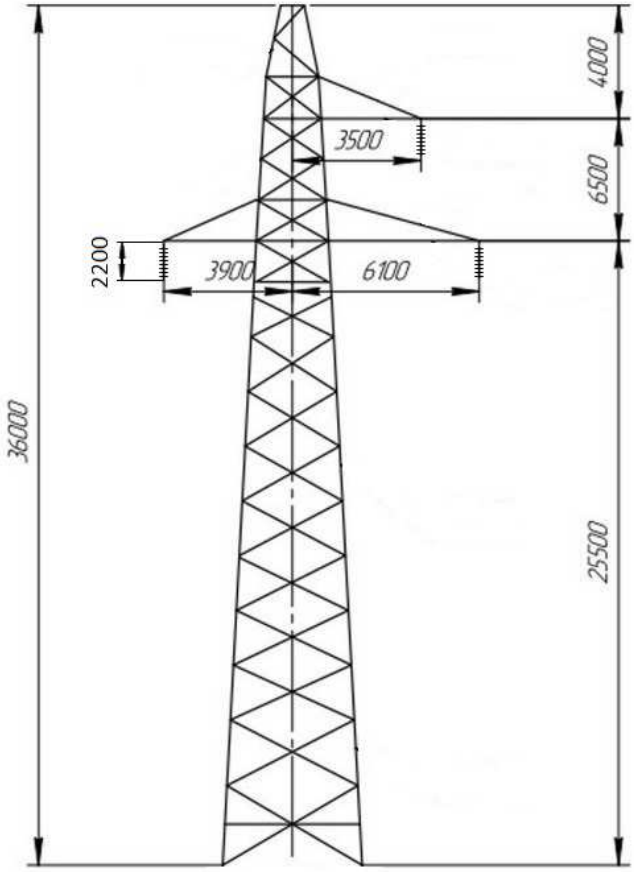


Рисунок 2.4 Эскизный чертеж опоры П 220-3

Таблица 2.2 Конструктивные данные ВЛ 2

Параметр	Значение
Длина, км	120
Количество цепей	2
Основной тип опор	П 220-2т
Среднее расстояние между опорами, км	0,4
Марка проводов в фазе	АС 300/39
Количество проводов в фазе	1
Стрела провеса провода в фазе при t = 20 °С, м	11,3

Длина гирлянды изолятора, м	2,2
Марка провода в тросе	С-70
Количество тросов	1
Стрела провеса троса при t = 20 °С, м	3,6

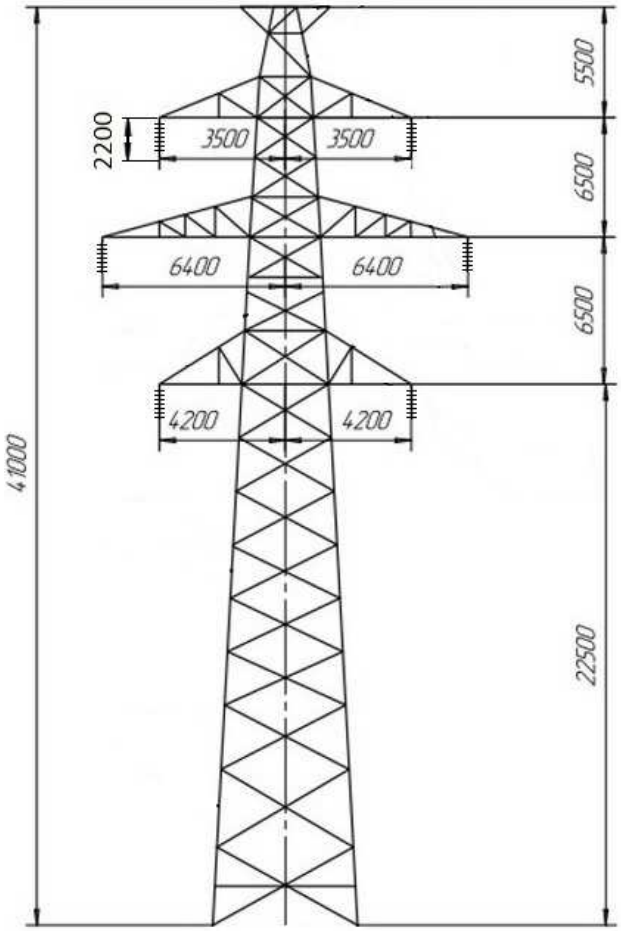


Рисунок 2.5 Эскизный чертеж опоры П 220-2

Таблица 2.3 Параметры проводов и тросов

Марка провода и троса	Сопротивление по постоянному току при 20 °С, Ом/км	Диаметр провода и троса, мм	Сечения алюминия, мм^2	Сечение стали, мм^2	Отношение сечения алюминиевой к стальной части
АС 240/32	0,118	21,6	244	31,7	7,71
АС 300/39	0,096	24,0	301	38,6	7,31
С-70	1,43	9,61	-	72,58	-

2.2 Исследование способа выделения волнового переходного процесса в ВЛ 110 – 220 кВ из фазных напряжений и токов

2.2.1 Способ выделения волнового переходного процесса с помощью метода волновых каналов

Метод волновых каналов (модальный метод) может применяться для восстановления формы волны, близкой к той, что сформировалась в месте КЗ по значениям фазных напряжений и токов. Можно подобрать коэффициенты для сигналов в фазных проводах так, чтобы сигналы, представленные в модальных координатах, распространялись с общей скоростью и одновременно затухали по экспоненциальному закону [1].

Предлагаемый способ выделения начальной стадии волнового процесса, заключается в расчете напряжения падающей волны $\boldsymbol{U}_{пад,м}$ в модальных координатах по выражению

$$\mathbf{U}_{м,пад} = \frac{\mathbf{T}_{\text{u}}^{-1} \times \mathbf{U}_{ф} + \overline{\mathbf{Z}}_{\mathbf{в,м}} \times (\mathbf{T}_{\text{i}}^{-1} \times \mathbf{I}_{\text{ф}})}{2}. \quad (2.30)$$

Расчет напряжения падающей волны позволяет минимизировать влияние эквивалентного сопротивления энергосистемы на форму волны на концах ВЛ. При подключении к шинам ПС n линий с одинаковым волновым сопротивлением амплитуда волны напряжения изменяется в $2/n$ раз, а тока волны в $(2n\text{-}2)/n$ раз [3]. При увеличении количества линий на шине (при уменьшении эквивалентного сопротивления) амплитуда напряжения волны стремятся к нулю, а амплитуда тока волны удваивается. И наоборот, при одной линии на шине (например, на тупиковых ПС) амплитуда тока волны мала, а амплитуда напряжения волны удваивается. Поэтому предлагается рассчитывать напряжение падающей волны, в расчетное выражение которого входит и ток и напряжение. Стоит отметить, что на падающую волну в меньшей степени влияют отраженные волны, а также волны, внешние по отношению к ВЛ. Необходимым условием для правильного расчета напряжения падающей волны является правильное подключение устройства, реализующего расчет падающей волны, к измерительным ТН и ТТ (правильная «фазировка»), а также использование достоверного значения волнового сопротивления $\mathbf{Z}_{\mathbf{в,м}}$.

Ключевой особенностью предложенного способа является расчет матриц преобразования фазных сигналов в модальные координаты $\boldsymbol{T_u}$ и $\boldsymbol{T_i}$ с учетом геометрии расположения проводов. Способ предполагает предварительный расчет матриц преобразования фазных координат в модальные ($\boldsymbol{T_u}$ и $\boldsymbol{T_i}$), а также значения волновых сопротивлений волновых каналов для конкретной ВЛ. Вначале необходимо получить матрицы удельных поперечных проводимостей

$\boldsymbol{Y}$ и продольных сопротивлений $\boldsymbol{Z}$ по уравнениям Карсона (2.27), (2.28), (2.29) исходя из геометрии расположения проводов и параметров проводов.

Матрицы $\boldsymbol{Z}$ и $\boldsymbol{Y}$ получены в программе power_lineparam, входящей в программный комплекс Matlab и использующей уравнения Карсона. Расчет $\boldsymbol{Z}$ и $\boldsymbol{Y}$ проведен для ВЛ 1 и ВЛ 2 (Таблица 2.1 и 2.2, 2.3, Рисунок 2.4 и 2.5) с учетом поверхностного эффекта для частот в диапазоне от 1 Гц до 1 МГц с шагом 10 точек на декаду.

Как показано в [1] и [23] непрерывно заземленный стальной трос не оказывают существенного влияния на распространение волн. Поэтому для ВЛ 1, имеющий трос, заземленный на анкерных опорах, расчет производится без учета тросового канала для трех волновых каналов.

Результатом диагонализация матриц произведения $\boldsymbol{Z}\cdot\boldsymbol{Y}$ являются матрицы преобразования $\boldsymbol{T}_u$ (Рисунок 2.6 – действительная часть, Рисунок 2.7 – мнимая часть) и коэффициенты распространения $\boldsymbol{\gamma}$ (коэффициент затухания – Рисунок 2.8, коэффициент фазы – Рисунок 2.9). Значения матрицы $\boldsymbol{T}_u$ нормированы по первой строке. Модальные волновые сопротивления $\boldsymbol{Z}_{в,м}$ рассчитаны по (2.13), (2.14), (2.15). Фазовая скорость распространения волн (Рисунок 2.11) рассчитана как $v = \omega/\beta$. Полный текст программы для расчета матриц $\boldsymbol{T}_u$, $\boldsymbol{\gamma}$, $\boldsymbol{Z}_в$, $\boldsymbol{v}$ на языке Matlab приведен в приложении 2.

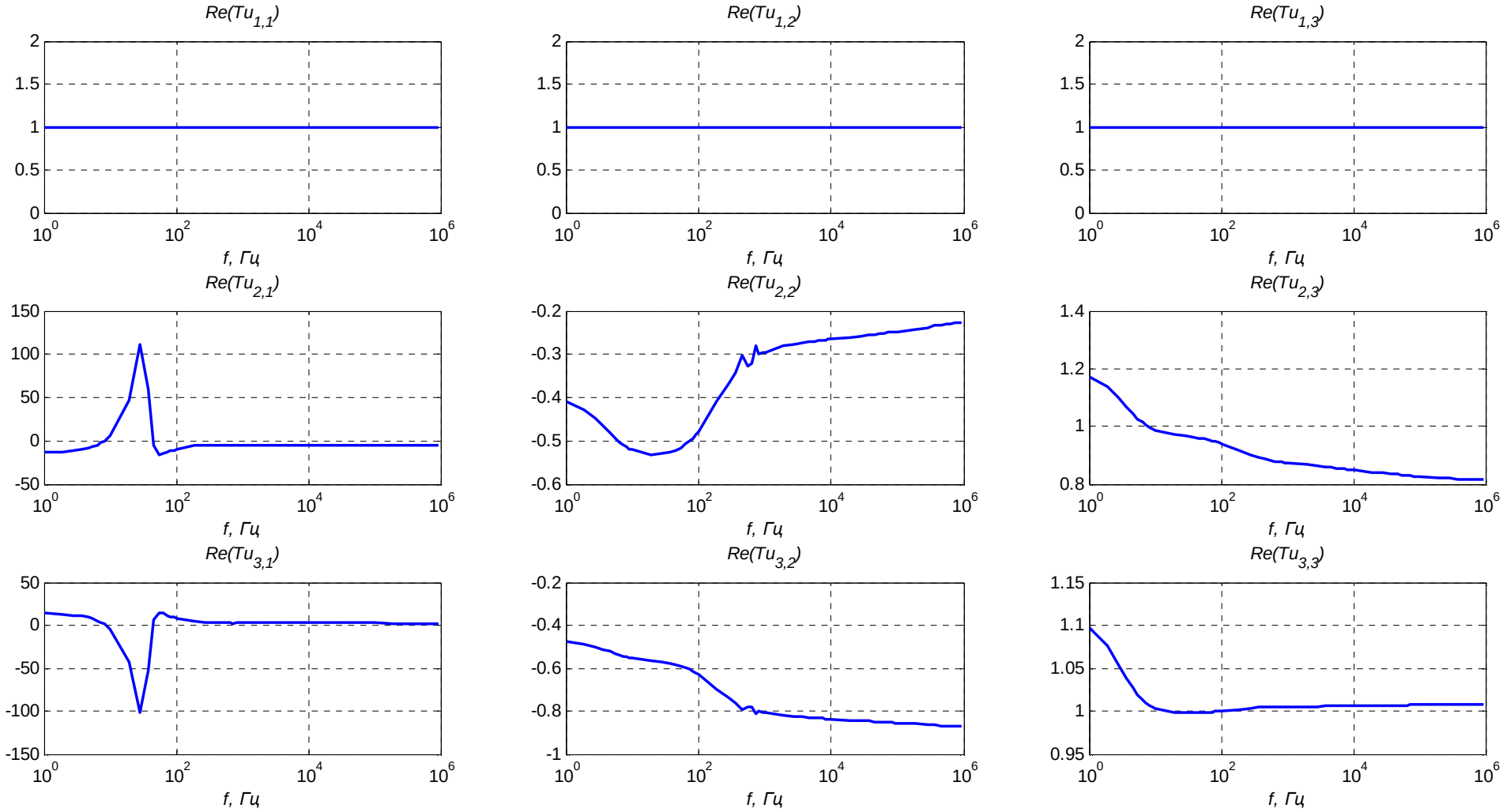


Рисунок 2.6 Зависимости действительной части элементов матрицы $\boldsymbol{T_u}$ от частоты для ВЛ 1

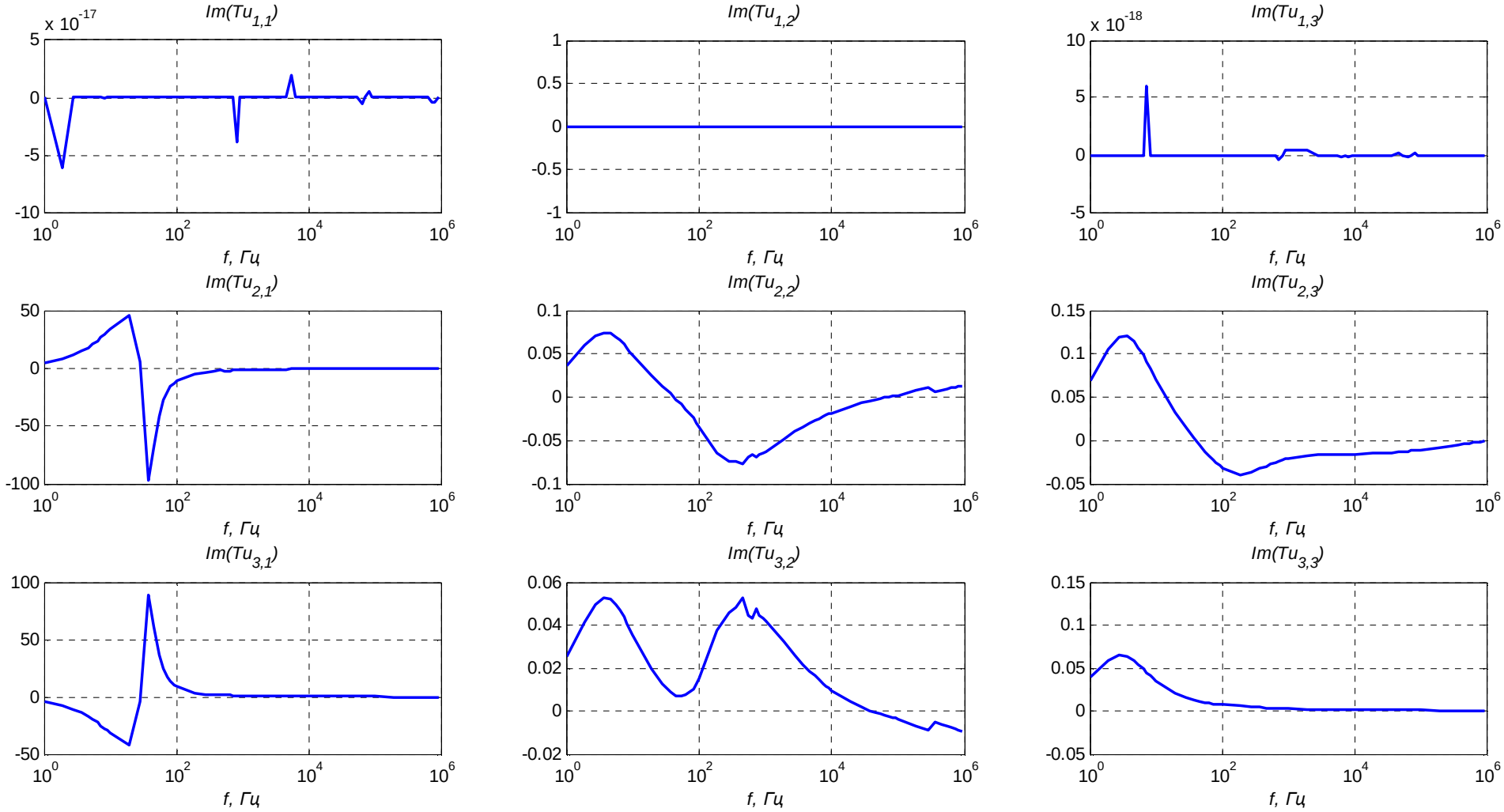


Рисунок 2.7 Зависимости мнимой части элементов матрицы $\boldsymbol{T_u}$ от частоты для ВЛ 1

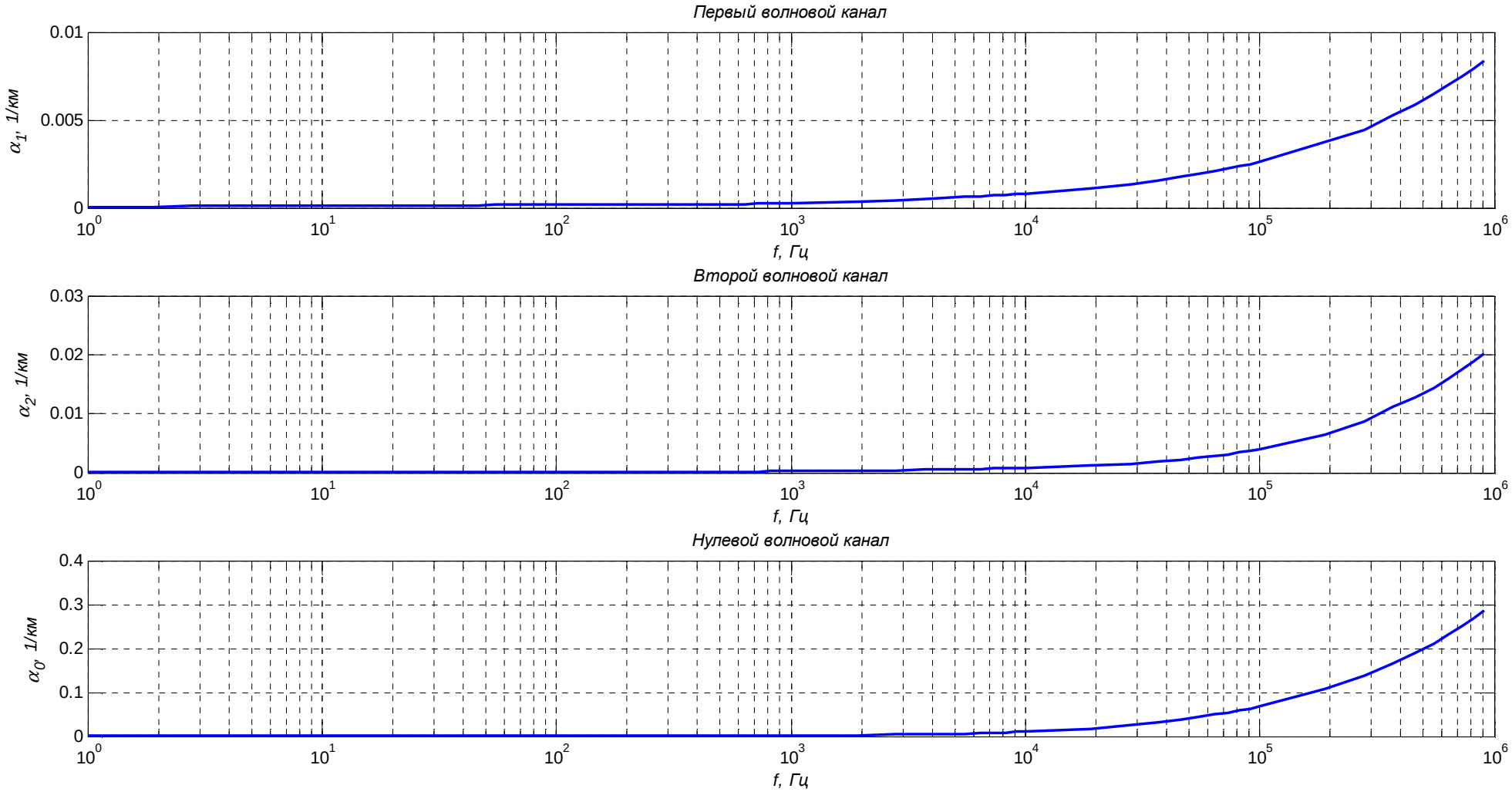


Рисунок 2.8 Зависимости модальных коэффициентов затухания α_1, α_2, α_0 от частоты дли ВЛ 1

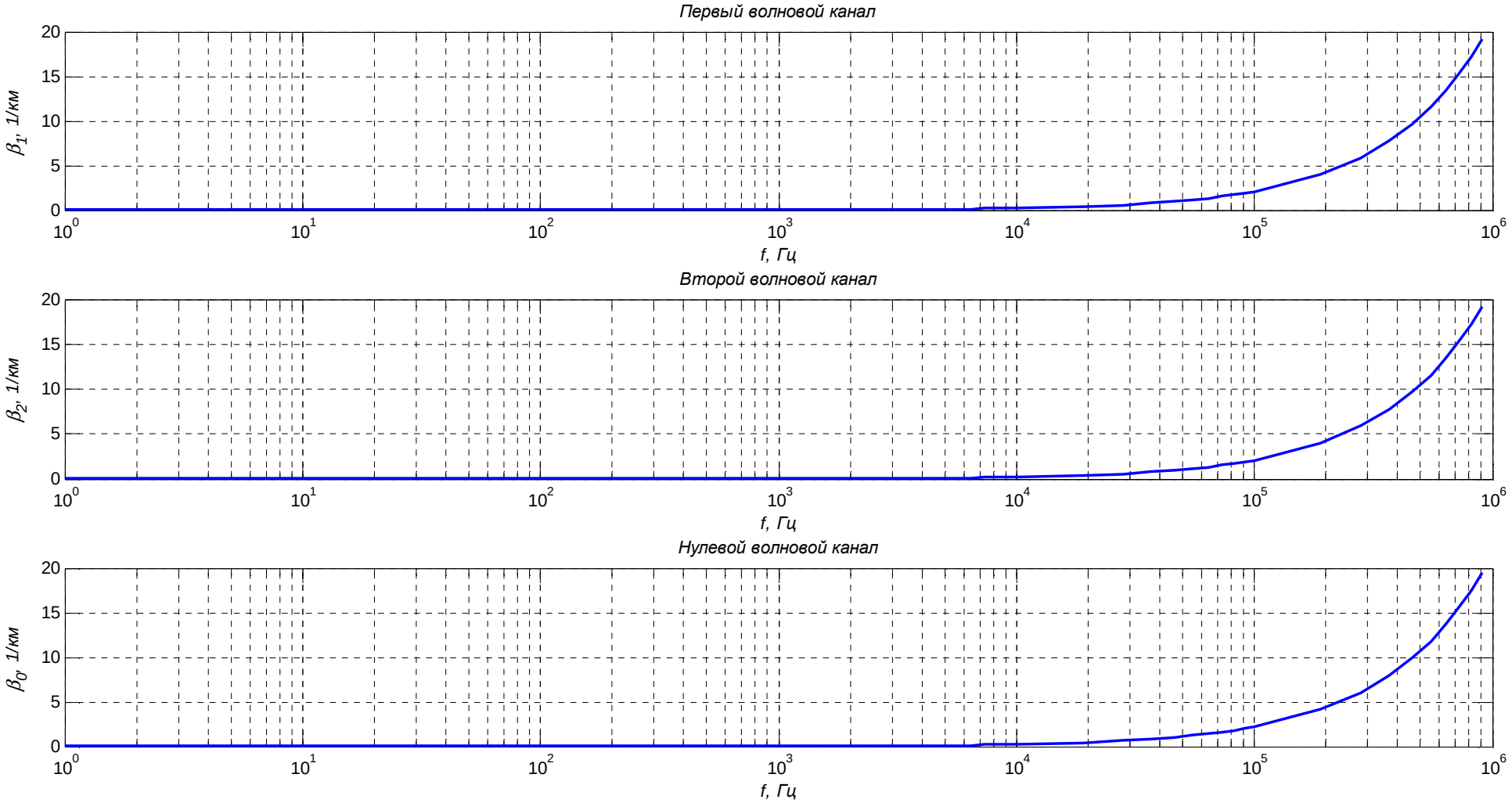


Рисунок 2.9 Зависимости модальных коэффициентов фазы β_1, β_2, β_0 от частоты для ВЛ 1

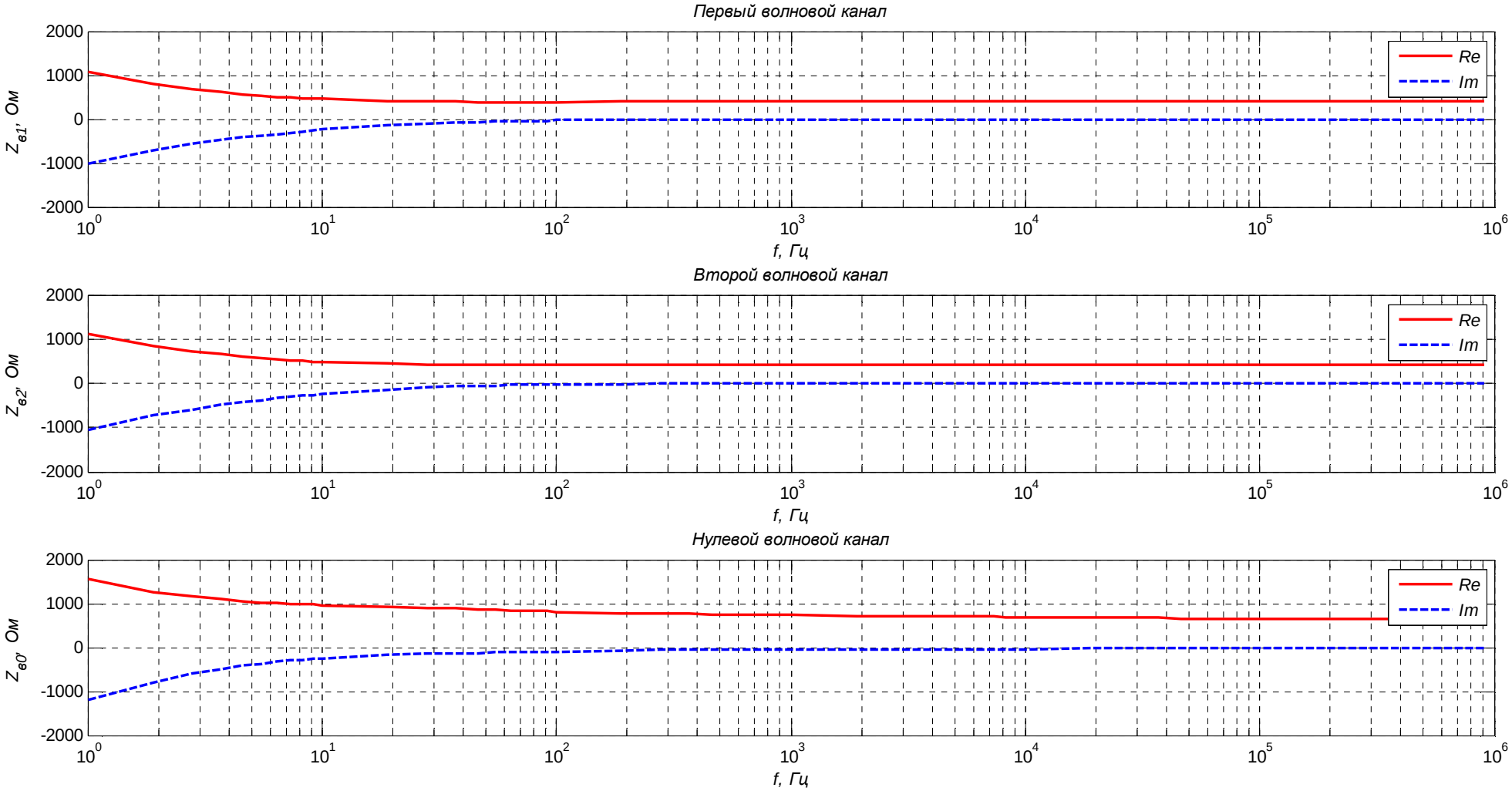


Рисунок 2.10 Зависимости действительной и мнимой частей модальных волновых сопротивлений $Z_{в1}$, $Z_{в2}$, $Z_{в0}$ от частоты для ВЛ 1

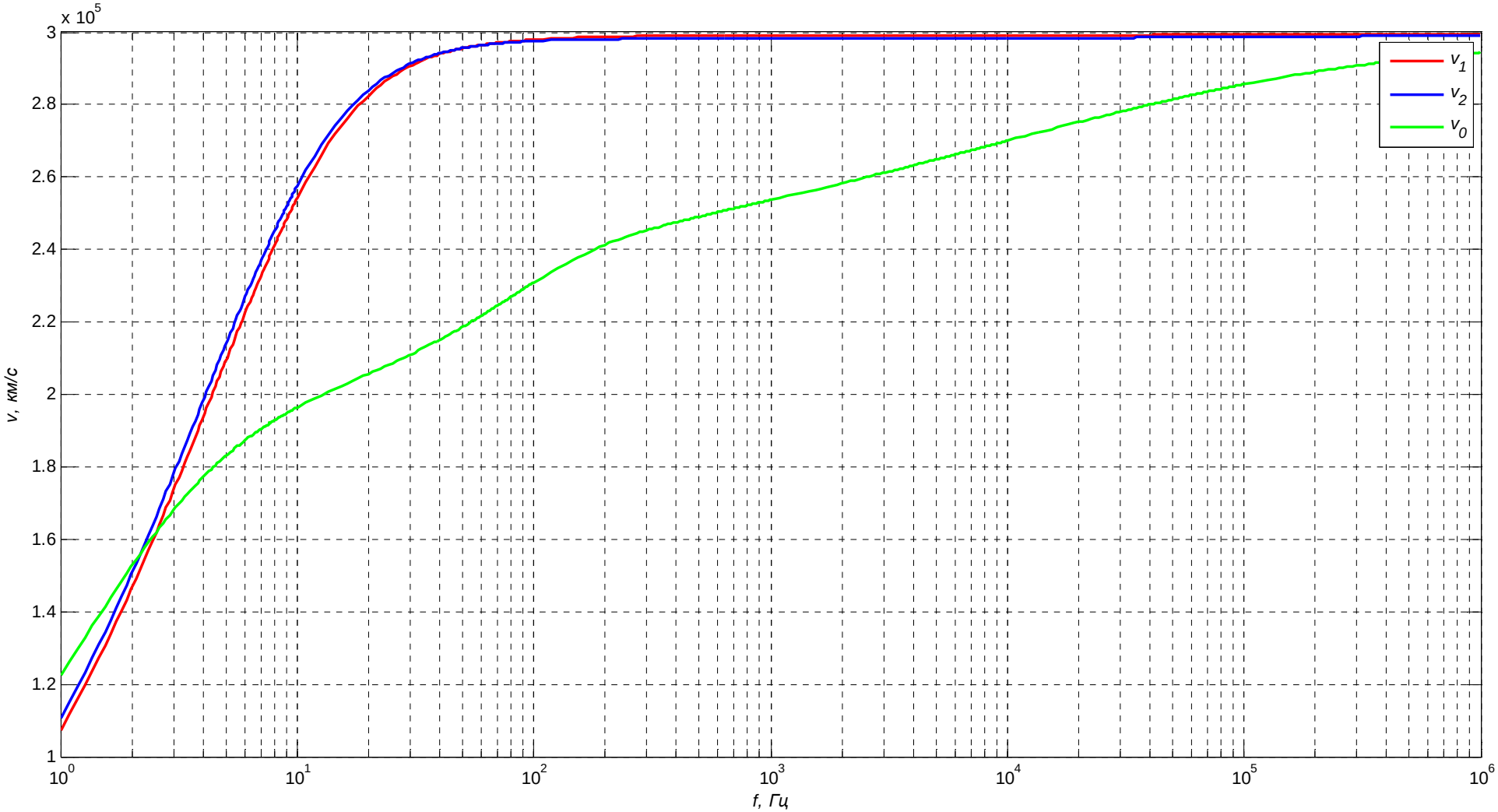


Рисунок 2.11 Зависимости скорости распространения сигналов v_1, v_2, v_0 в волновых каналах от частоты для ВЛ 1

Мнимая часть элементов матрицы $\boldsymbol{T}_u$ (Рисунок 2.7) достаточно мала по сравнению с действительной частью (Рисунок 2.6), поэтому мнимой частью элементов матрицы можно пренебречь. Зависимости действительной части элементов матрицы $\boldsymbol{T}_u$ от частоты (Рисунок 2.6) можно считать постоянными и не зависящими от частоты в диапазоне от 1 кГц до 1 МГц. В [1] также показано, что мнимой частью матрицы $\boldsymbol{T}_u$ можно пренебречь для практических расчетов, и что сами элементы матрицы $\boldsymbol{T}_u$ постоянны в диапазоне 30 кГц – 1 МГц, при этом погрешности элементов матрицы во многих случаях не превышают 3%. Отсутствие мнимой части и зависимости от частоты матрицы $\boldsymbol{T}_u$ позволяет использовать в практических целях усредненное значение матрицы в диапазоне частот, а именно производить эффективное преобразование фазных токов и напряжений в модальные координаты. Резкие изменения значений матрицы $\boldsymbol{T}_u$ (Рисунок 2.6) в диапазоне 1 Гц – 1 кГц связаны с плохой обусловленностью матриц $\boldsymbol{Z}$ и $\boldsymbol{Y}$ и с вычислительной погрешностью при нахождении собственных чисел и собственных векторов матрицы $\boldsymbol{Z \cdot Y}$.

Среднее значение действительной части матрицы $\boldsymbol{T}_u$ для ВЛ 1 в диапазоне частот 1 кГц – 1 МГц после нормирования элементов по первой строке составляет

$$T_u = (T_i^{-1})^T \approx \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -4{,}96 & -0{,}25 & 0{,}83 \\ 2{,}42 & -0{,}84 & 1 \end{pmatrix}. \qquad (2.31)$$

Соответствующая ей обратная матрица после нормирования по первому столбцу равна

$$T_u^{-1} = T_i^T \approx \begin{pmatrix} 1 & -4{,}06 & 2{,}38 \\ 1 & -0{,}20 & -0{,}82 \\ 1 & 0{,}67 & 0{,}97 \end{pmatrix}. \qquad (2.32)$$

По значениям элементов матрицы $\boldsymbol{T}_u^{-1}$ (2.32) можно графически сопоставить волновые каналы с фазными проводами ВЛ 1 (Рисунок 2.12).

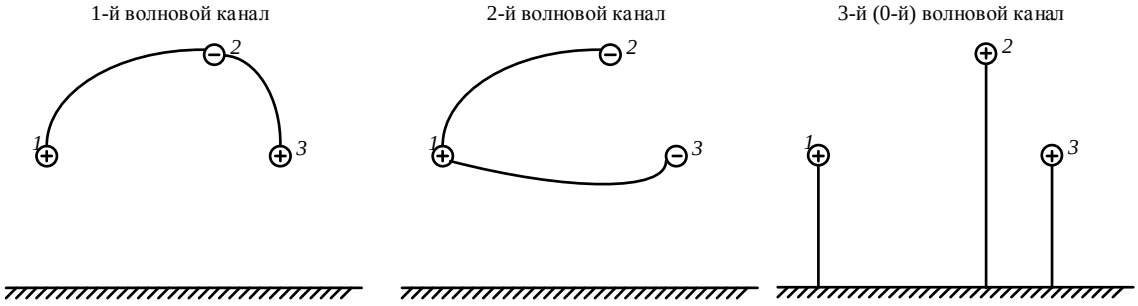


Рисунок 2.12 Формирование волновых каналов в ВЛ 1

В ВЛ 1 образуются следующие волновые каналы: первый канал: средняя фаза – две крайние, второй канал: крайняя левая фаза – средняя и крайняя правая, третий (нулевой) канал: все три фазы – земля.

Коэффициент затухания α (Рисунок 2.8) нулевого волнового канала в среднем в 35 выше, чем у первого и в 14 раз выше чем у второго. Кроме того, изменение сопротивления грунта оказывает сильное влияние на параметры нулевого волнового канала [23]. Формирование первого и второго волновых каналов происходит между фазными проводами, в пространстве заполненным воздухом с постоянными параметрами по всей длине линии, поэтому коэффициенты затухания этих каналов минимальны.

Коэффициент фазы β (Рисунок 2.9) примерно одинаков для всех волновых каналов. Фазовая скорость распространения сигналов (Рисунок 2.11) в первом и втором волновом канала составления 0,99 от скорости света в вакууме для составляющих выше 100 Гц. Скорость распространения сигналов в нулевом канале изменяется от $1{,}95\cdot10^5$ км/с до $2{,}94\cdot10^5$ км/с при частотах от 100 Гц до 1 МГц.

Модальные волновые сопротивления $\boldsymbol{Z_{в,м}}$ (Рисунок 2.10) в диапазоне частот 1 кГц – 1 МГц можно также принять постоянными отбросив мнимую часть. Среднее значение матрицы модальных волновых сопротивлений для ВЛ 1 в диапазоне частот 1 кГц – 1 МГц составляет

$$\mathbf{Z}_{\text{в,м}} \approx \begin{pmatrix} 396 & 0 & 0 \\ 0 & 415 & 0 \\ 0 & 0 & 692 \end{pmatrix}. \qquad (2.33)$$

Рассчитанные матрицы преобразований $\boldsymbol{T_u}$ и модальных волновых сопротивлений $\boldsymbol{Z_{в,м}}$ схожи с результатами, полученными в [23].

Передаточная характеристика $\boldsymbol{H(\omega,l)}$ участка ВЛ 1 позволяет оценить степень затухания гармонических составляющих в зависимости от пробега волны по ЛЭП. В модальных координатах матрица $\boldsymbol{H(\omega,l)}$ диагональная и каждому волновому каналу соответствует своя передаточная характеристика.

Выражение (2.16) для падающей волны

$$\overline{\mathrm{U}}_{\text{м}}^{\text{пад}}(\omega, l) = \mathrm{e}^{-\overline{\gamma(\omega)}l} \times \overline{\mathrm{U}}_{\text{м}}(\omega), \qquad (2.34)$$

является зависимостью частотных составляющих падающей волны от длины пробега волны. Выражение применяется для «первичной» волны от места повреждения до прихода отраженных волн от неоднородностей.

Если включить в начало линии единичный импульс (импульс Дирака)

$$U_м(t) = \begin{cases} 1, t = 0 \\ 0, t \neq 0 \end{cases}, \quad (2.35)$$

имеющий частотный спектр постоянной амплитуды и бесконечной ширины $U_м(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ . \\ . \\ 1 \end{pmatrix}$,

то выражение (2.34) после умножения на $\sqrt{2\pi}$ и можно записать как как

$$\overline{H}(\omega, l) = e^{-\overline{\gamma(\omega)}l}, \quad (2.36)$$

где $H(\omega,l)$ – передаточная характеристика участка многопроводной линии длиной l. Текст программы на языке Matlab для расчета амплитудно-частотных характеристик $|\boldsymbol{H}(\omega,l)|$ волновых каналов приведен в приложении 3.

В нулевом волновом канале гармонические сигналы с частотами более 10 кГц (Рисунок 2.15) затухают более чем на 3 дБ после пробега более 10 км. Первый и второй волновой каналы обладают существенно меньшей степенью ослабления сигнала волны. При пробеге по всей длине ВЛ 1 (90 км) степень ослабления сигналов составляет менее 1 дБ. (Рисунок 2.13, Рисунок 2.14).

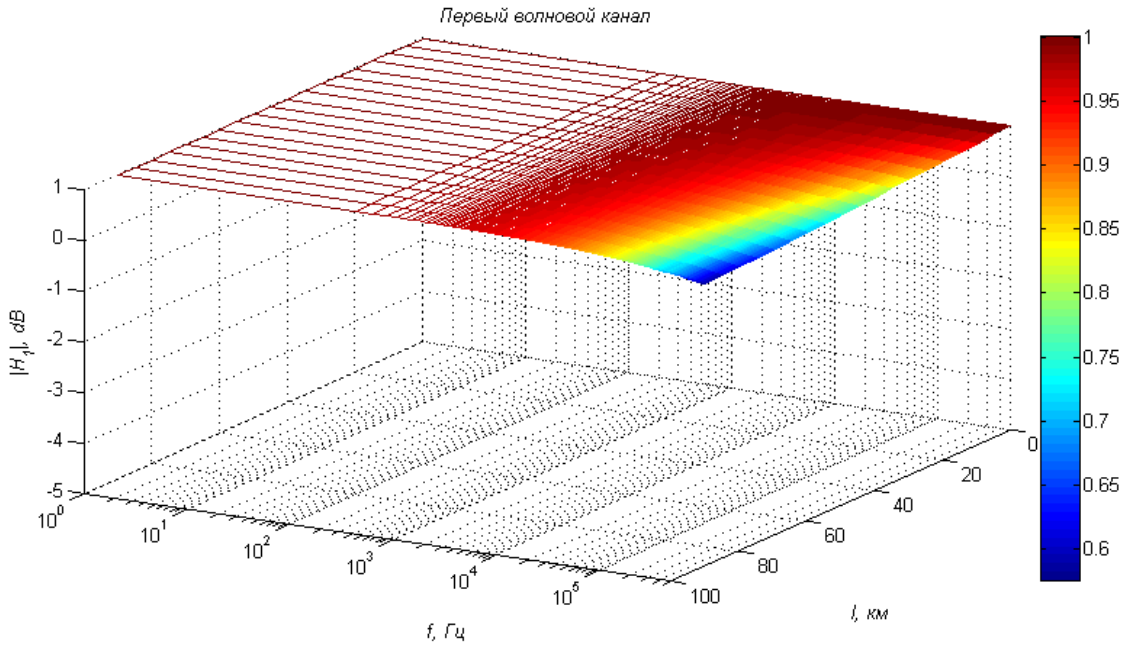


Рисунок 2.13 Амплитудно-частотная характеристика первого волнового канала в зависимости от пробега по ВЛ 1

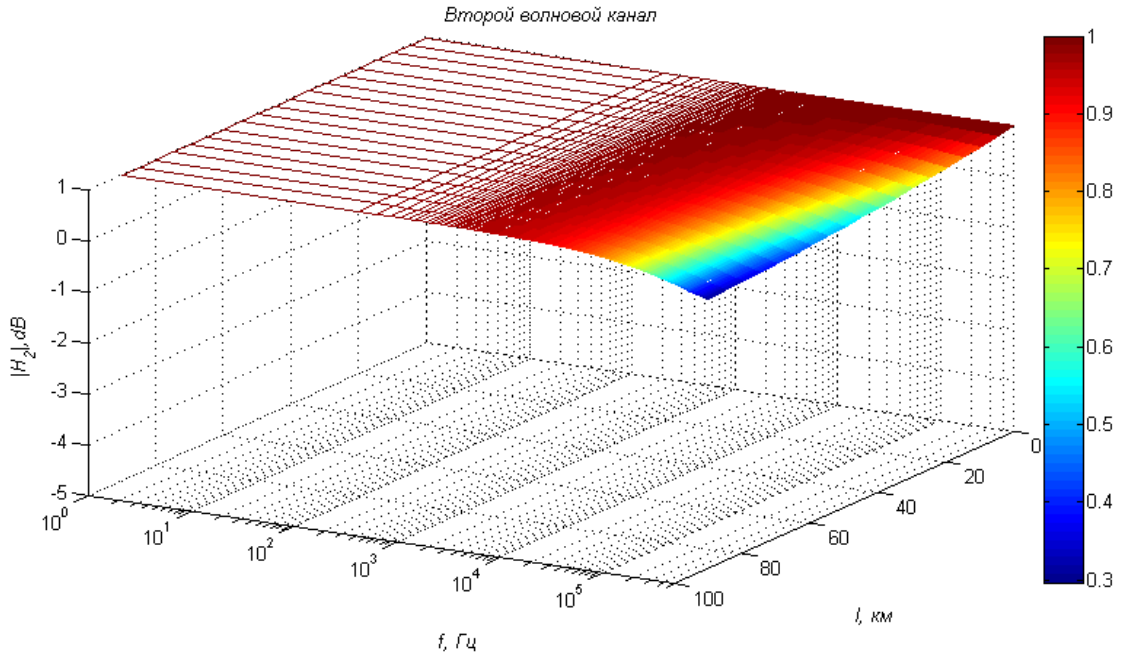


Рисунок 2.14 Амплитудно-частотная характеристика второго волнового канала в зависимости от пробега по ВЛ 1

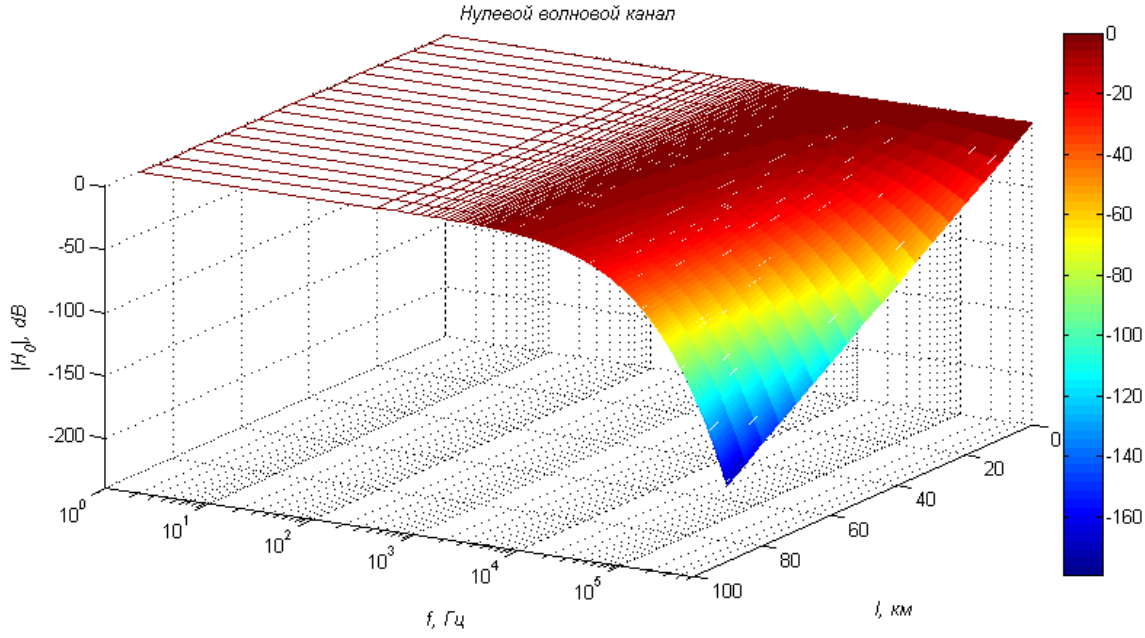


Рисунок 2.15 Амплитудно-частотная характеристика нулевого волнового канала в зависимости от пробега по ВЛ 1

При предельной длине ВЛ 220 кВ согласно [33] равной 400 км полоса пропускания первого волнового канала для ВЛ 1 достигает 10 кГц на уровне -3 дБ.

Деформация сигналов при прохождении по ВЛ объясняется наличием зависимости коэффициента затухания α и фазовой скорости распространения *v* от частоты составляющих сигнала [23].

Основными причинами затухания сигналов в ВЛ являются сопротивление проводов и грунта [23], а также коронный разряд. Наличие коронного разряда в ВЛ увеличивает комплексную проводимость фазного провода на землю. Импульсная корона проявляется при перенапряжениях, возникающих, например, при коммутациях. Однако при появлении короткого замыкания в ВЛ мгновенное значение напряжения в первый момент снижается, что не способствует возникновению короны, поэтому влияние короны на волну, возникшую в месте КЗ не рассматривается [35].

Влияние сопротивления провода и грунта усиливается поверхностным эффектом. На затухание сигналов в междуфазных волновых каналах оказывает влияние поверхностный эффект в проводах. Повышенный коэффициент затухания в нулевом волновом канале объясняется поверхностным эффектом в проводах и в большей степени сопротивлением грунта ($R_з >> R_п$) и поверхностным эффектом в нем.

Для волнового ОМП ВЛ 1 предпочтительнее проводить контроль волн в первом волновом (междуфазном) канале, так как он обладает наименьшим значением коэффициента затухания α. Однако, для междуфазного КЗ фаз А и С предпочтительные второй волновой канал, вследствие того, что отношение коэффициентов формирующих второй (междуфазный) канал по фазам А и С больше, чем отношение коэффициентов формирующих первый канал $\boldsymbol{T_u^{-1}{}_{31}/T_u^{-1}{}_{23} > T_i^{-1}{}_{11}/T_i^{-1}{}_{13}}$.

Следует отметить, еще одно существенное преимущество применения междуфазных каналов. Так как в пространстве между фазными проводами находится преимущественно воздух, обладающий относительной диэлектрической проницаемостью (ε) и относительной магнитной проницаемостью (μ) близкими к единице, то фазовая и групповая скорости распространения сигналов в междуфазных каналах близки к скорости света в вакууме ($c \approx 299793\frac{км}{с}$) [1]. Средняя скорость в ВЛ 1 для первого волнового канала в диапазоне 1 кГц – 1 МГц составляет 299258 км/с, для второго – 298623 км/с. Использовании значения скорости света в вакууме в расчетном выражении (1.7) вместо скорости для волновых каналов вносит ошибку $\Delta l = (L/2) \cdot (c/v - 1) = (90000 / 2) \cdot (299793/298623 - 1) = 176$ м при частоте дискретизации 1 МГц. Равенство скоростей распространения в междуфазных волновых каналах для частот выше 1 кГц способствует получению формы волны с минимальной деформацией после пробега по ВЛ.

Допущение $v = c$ для фазных координат некорректно, так как грунт также является средой распространения электромагнитной волны, что приводит к существенному снижению фазовой и групповой скоростей распространения электромагнитных волн.

Аналогичный расчет матриц $\boldsymbol{T_u}$, $\boldsymbol{\gamma}$ и $\boldsymbol{Z}$ для ВЛ 2 проведен для частот от 100 Гц до 1 МГц. В двухцепной ВЛ 2 трос заземлен по концам ЛЭП и учитывался при формировании волновых каналов. Всего в ВЛ 2 формируется семь волновых каналов.

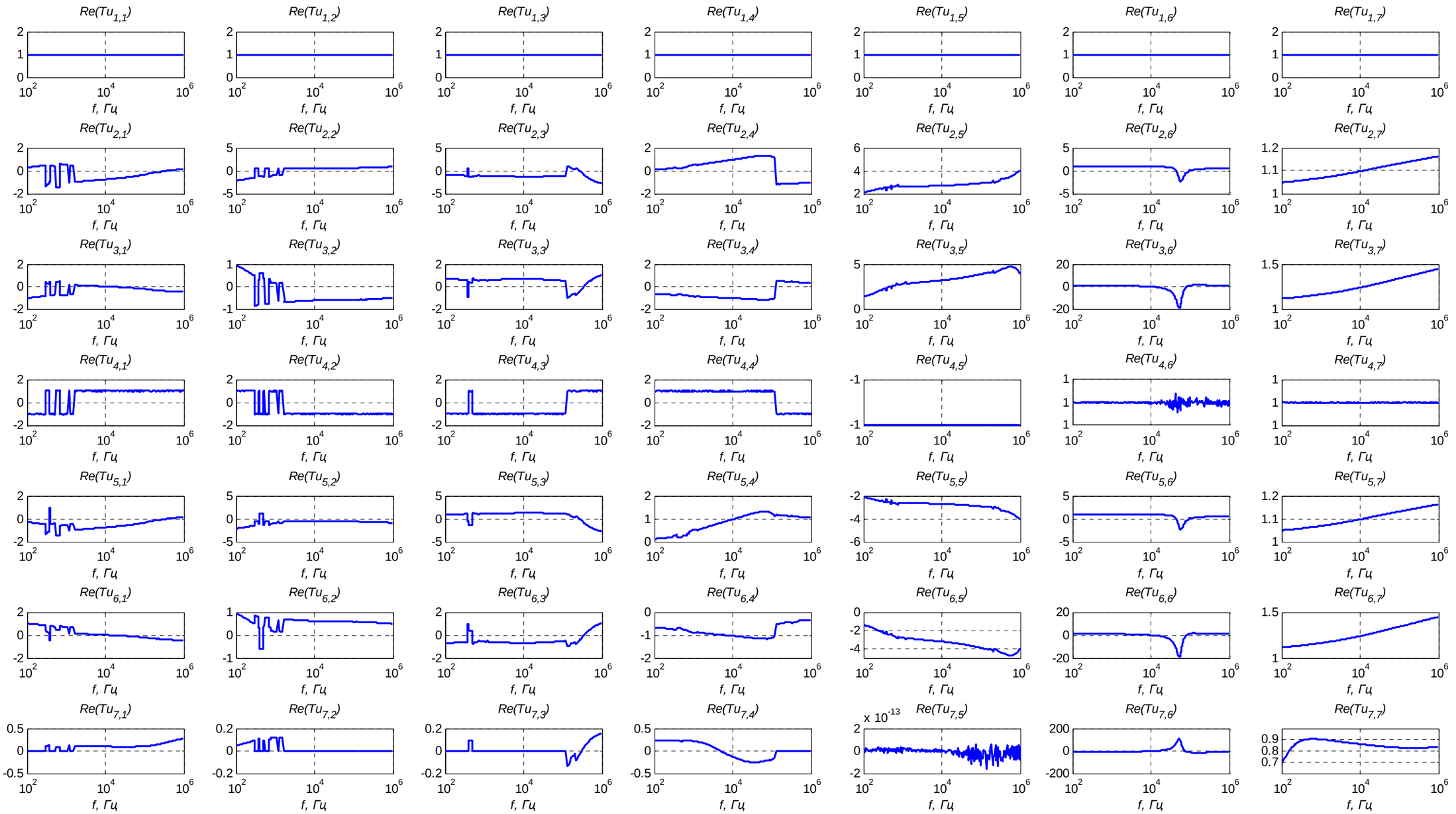


Рисунок 2.16 Зависимости действительной части элементов матрицы $\boldsymbol{T_u}$ от частоты для ВЛ 2

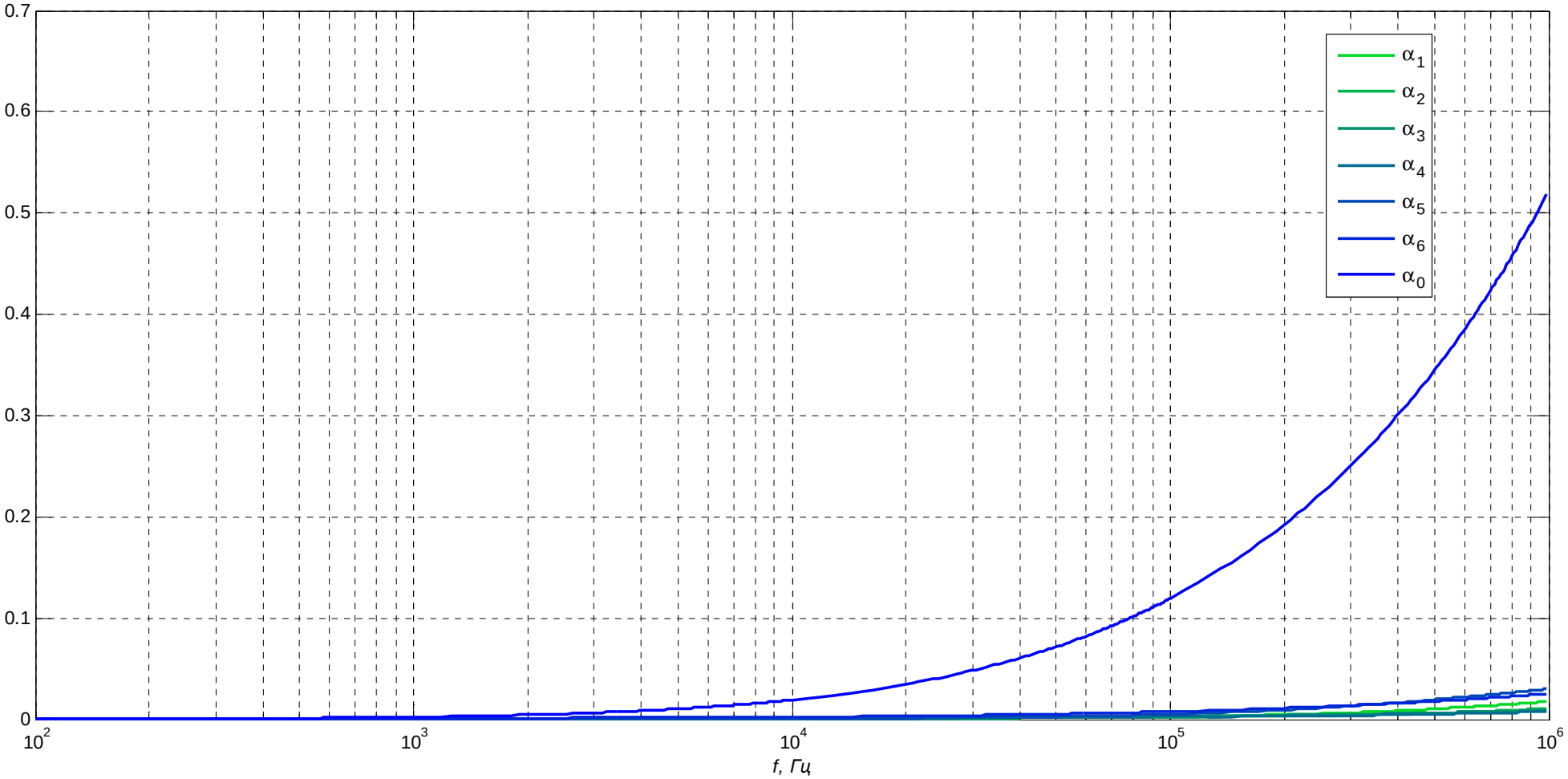


Рисунок 2.17 Зависимости модальных коэффициентов затухания α от частоты дли ВЛ 2

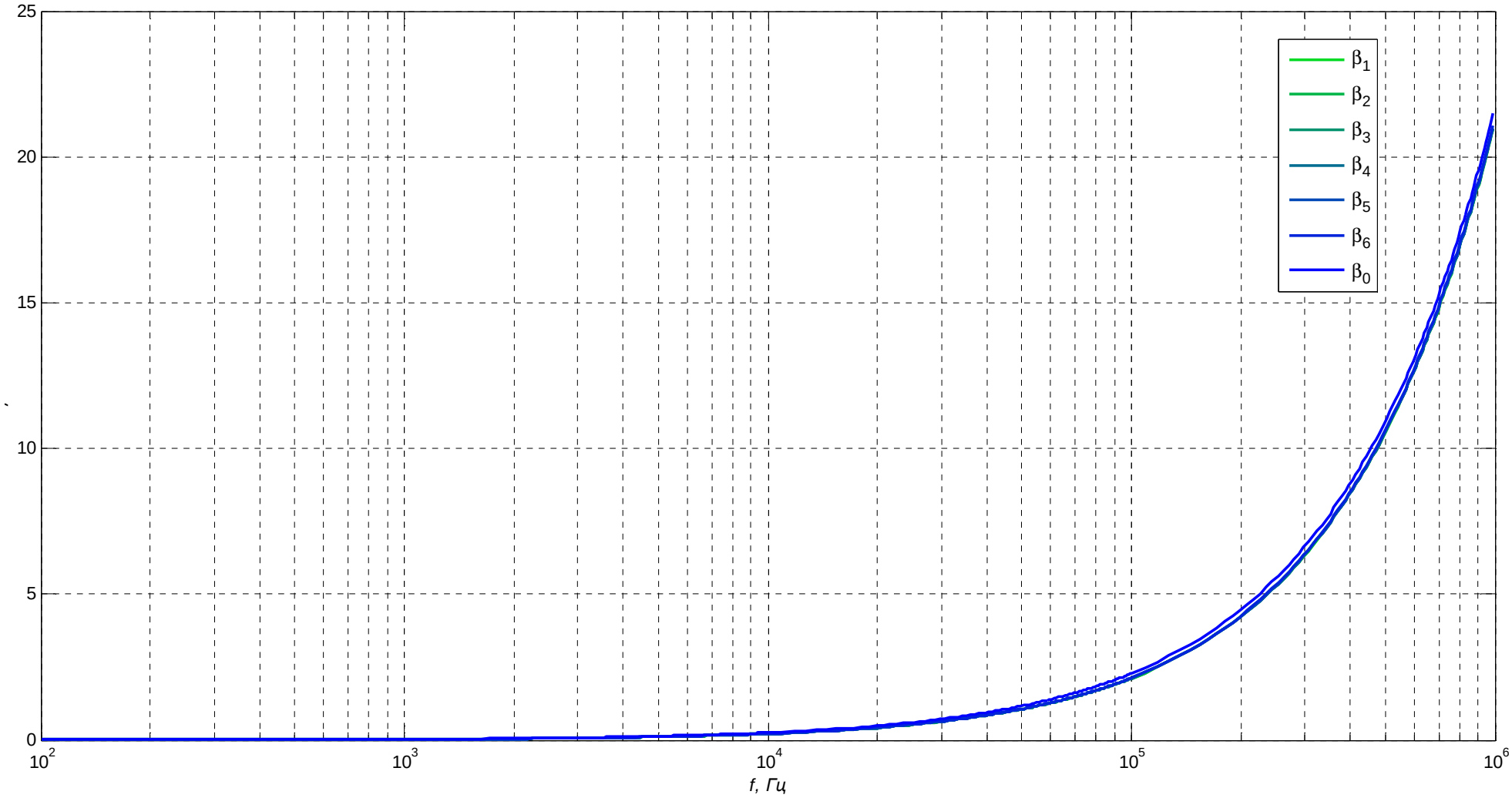


Рисунок 2.18 Зависимости модальных коэффициентов фазы β от частоты для ВЛ 2

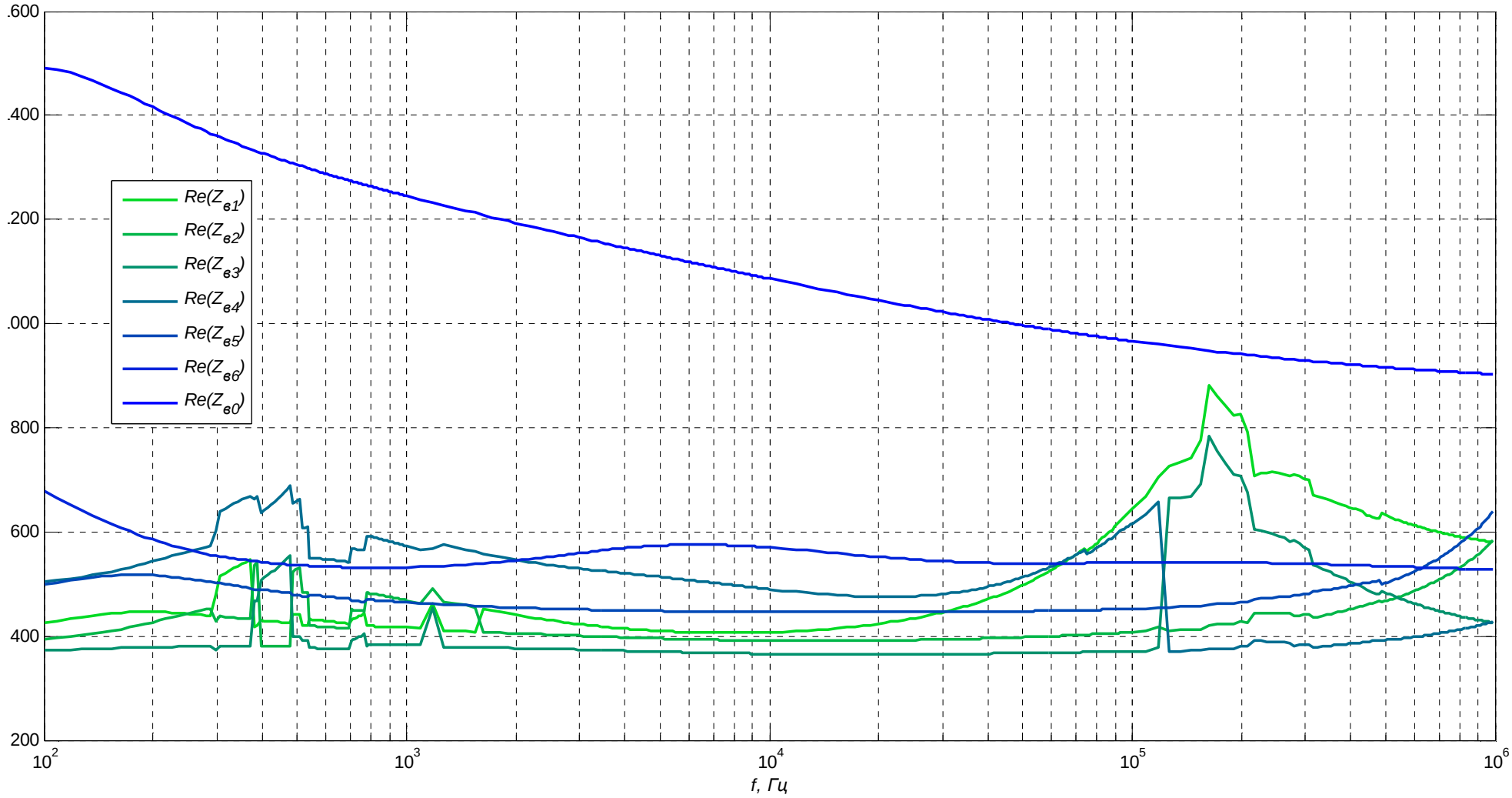


Рисунок 2.19 Зависимости действительной части модальных волновых сопротивлений $Z_в$ от частоты для ВЛ 2

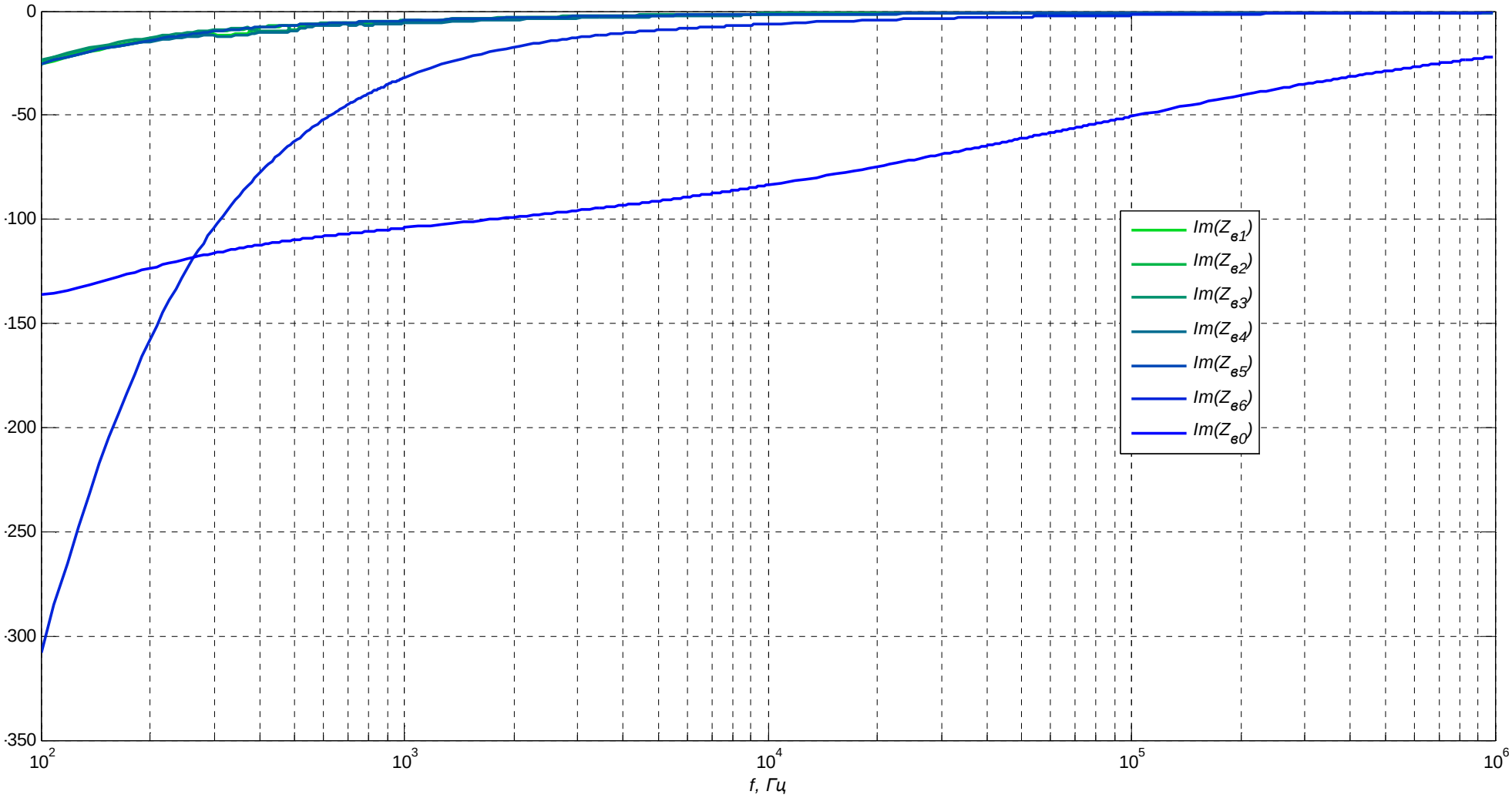


Рисунок 2.20 Зависимости мнимой части модальных волновых сопротивлений $Z_в$ от частоты для ВЛ 2

Мнимая часть коэффициентов матрицы $\boldsymbol{T}_u$ (Рисунок 2.16) значительно меньше действительной части, следовательно мнимой частью можно пренебречь. Колебания значений элементов матрицы $\boldsymbol{T}_u$ (Рисунок 2.16) с частотами до 1 кГц и выше 100 кГц вызваны погрешностью расчета собственных векторов и собственных значений матрицы $\boldsymbol{ZY}$. Такая ошибка в расчетах не будет оказывать сильного влияния на средние значения элементов матрицы $\boldsymbol{T}_u$. Средние значения действительной части элементов матрицы $\boldsymbol{T}_u$ для ВЛ 2 в диапазоне частот 1 кГц – 100 кГц после нормирования по первой строке равны

$$T_u \approx (T_i^{-1})^T \approx \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -0{,}54 & 0{,}54 & -0{,}82 & 0{,}57 & 2{,}80 & 0{,}41 & 1{,}11 \\ -0{,}10 & -0{,}60 & 0{,}32 & -0{,}72 & 3{,}53 & -0{,}97 & 1{,}28 \\ 1 & -1 & -0{,}56 & 0{,}56 & -1 & 1 & 1 \\ -0{,}54 & -0{,}54 & 1{,}10 & 1{,}09 & -2{,}80 & 0{,}41 & 1{,}11 \\ -0{,}10 & 0{,}60 & -0{,}68 & -0{,}94 & -3{,}53 & -0{,}97 & 1{,}28 \\ 0{,}10 & 0 & 0 & -0{,}10 & 0 & 1{,}66 & 0{,}84 \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

Соответствующая ей обратная матрица, нормированная по первому столбцу равна

$$T_u^{-1} \approx T_i^T \approx \begin{pmatrix} 1 & -0{,}90 & 0{,}02 & 0{,}96 & -0{,}86 & -0{,}01 & -0{,}01 \\ 1 & 0{,}46 & -0{,}64 & -1{,}02 & -0{,}50 & 0{,}67 & 0{,}02 \\ 1 & -1{,}59 & 1 & -1{,}24 & 1 & -0{,}40 & 0{,}13 \\ 1 & 0{,}45 & -0{,}58 & 0{,}45 & 1{,}09 & -0{,}89 & -1{,}66 \\ 1 & 2{,}94 & 4{,}10 & -0{,}95 & -2{,}88 & -4{,}16 & -0{,}05 \\ 1 & 0{,}87 & 2{,}71 & 1{,}38 & 0{,}44 & 2{,}94 & -13{,}08 \\ 1 & 1{,}51 & 2{,}37 & 1{,}04 & 1{,}47 & 2{,}40 & 0{,}44 \end{pmatrix} \quad (2.38)$$

В ВЛ 2 можно выделить (Рисунок 2.21) нулевой волновой канала (все фазы и трос – земля) по последней строчке в матрице T_u^{-1} и «тросовый» волновой канал (все фазы – трос).

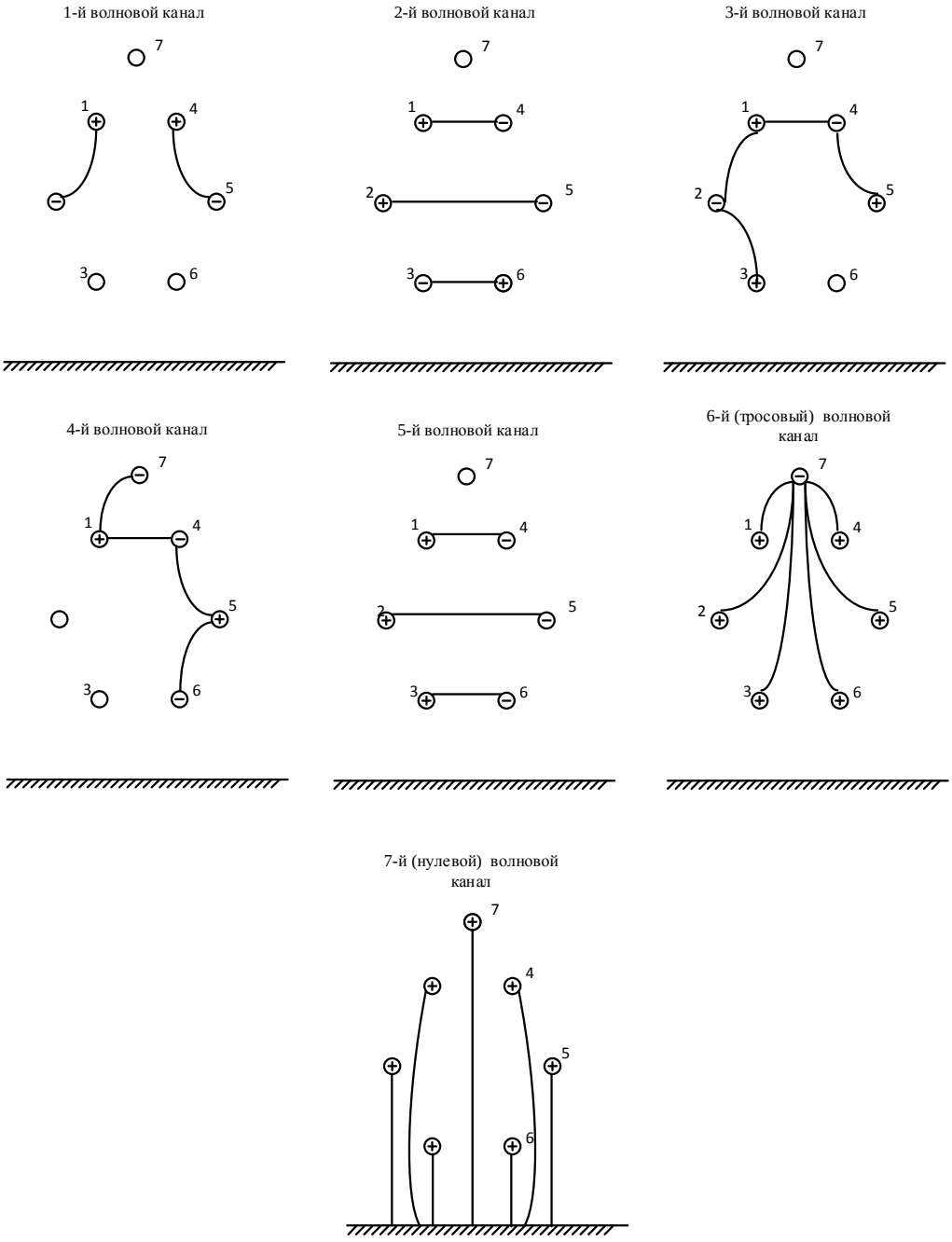


Рисунок 2.21 Формирование волновых каналов в ВЛ 2

Максимальным коэффициентом затухания α во второй линии обладает нулевой волновой канал (Рисунок 2.17). Коэффициенты фазы β (Рисунок 2.18) примерно одинаковы для всех волновых каналов.

Волновые сопротивления в диапазоне частот 1 кГц – 100 кГц для всех каналов (Рисунок 2.19, Рисунок 2.20), кроме нулевого и тросового, можно также принять независимыми от частоты и отбросить мнимую часть. Среднее значение действительной части элементов матрицы модальных волновых сопротивлений для ВЛ 2 равно

$$Z_{в} \approx \begin{pmatrix} 523 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 427 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 412 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 483 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 474 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 547 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1018 \end{pmatrix}. \quad (2.39)$$

При выборе рабочего волнового канала для ВЛ 2 следует учитывать, что, как правило, одно устройство ОМП контролирует только одну цепь двухцепной ВЛ и не имеет возможности контролировать ток и напряжение в тросе. Следовательно, каналы с сильным влиянием троса и второй цепи не желательно использовать при ОМП. В ВЛ 2 наименьшим влиянием второй цепи на первую обладают первый и третий волновые каналы.

2.2.2 Сравнение способов выделения волнового переходного процесса

Распространенным способом выделения волнового процесса является преобразование Кларк [36] по сигналам тока

$$\begin{pmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix}. \quad (2.40)$$

Преобразование Кларк является предельным случаем диагонализации матриц ***Z*** и ***Y*** идеально симметричной ЛЭП, когда все провода находятся в одинаковых условиях. Преобразование Кларк разлагает фазные сигналы на три модальных канала (Рисунок 2.22): по первой строке –нулевой канал (i_0) с контуром все фазы—земля, по второй и третьей строке – первый (i_1) и второй (i_2) каналы с контурами фаза–фаза.

В работах посвященных волновому ОМП [6], [37] преобразование Кларк используется для токовых сигналов, что объясняется более широкой полосой пропускания измерительных ТТ на ПС по сравнению с измерительными ТН [38].

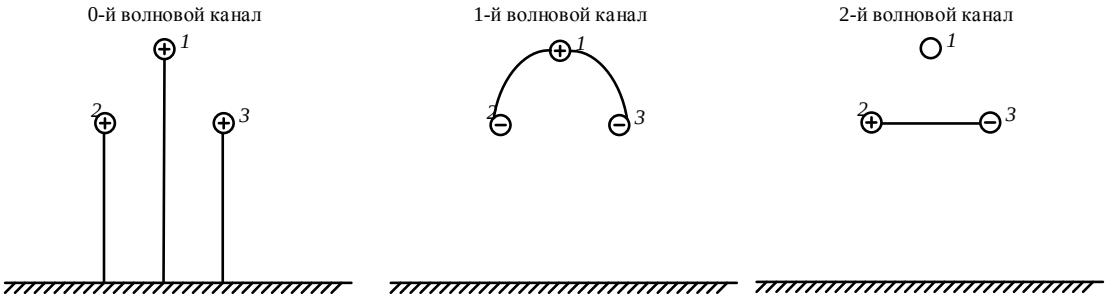


Рисунок 2.22 Формирование каналов при преобразовании Кларк

В других исследованиях, посвященных волновому ОМП [39], применяют преобразование Парка [40] и метод симметричных составляющих [22].

Необходимо отметить, что любые другие системы напряжений и токов, например системы симметричных составляющих, не обладают свойством независимости распространения, так как каждая из них не характеризуется одним коэффициентом распространения, и поэтому распространение каждой симметричной составляющей зависит от наличия напряжений и токов других составляющих. В связи с этим метод симметричных составляющих, преобразование Кларк и преобразование Парка для общего случая несимметричной линии является приближенным. Однако на промышленной частоте, когда длина волны больше длины линии, а затухание и искажение волны невелико, возможная погрешность этих методов невелика и их использование вполне оправдано [22].

Для моделирования начальной стадии волнового процесса в программе ATP/EMTP создана модель (Рисунок 2.24) электрической сети (Рисунок 2.23), содержащей ВЛ и нагрузку.

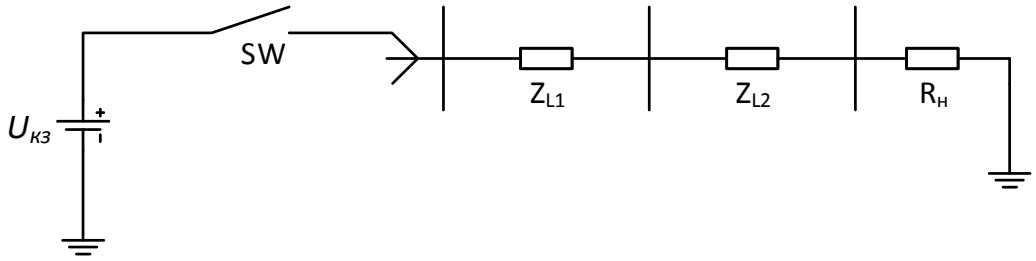


Рисунок 2.23 Схема замещения

Волновой процесс сформирован подключением источника напряжения постоянного тока к фазе А ВЛ (КЗ фазы А на землю) и имеет форму ступенчатой функции. После замыкания ключа

SW по ВЛ начинается распространяться электромагнитная волна. Для исключения отраженных волн ко второму концу исследуемой ВЛ подключена линия с точно такими же параметрами, но с максимально возможной длиной, которую можно установить в программе АТР. Таким образом вторая ВЛ является для первой полностью согласованной нагрузкой. Все провода ВЛ находятся в разных условиях, поэтому характер распространения волн различается для различных видов КЗ. Для междуфазного КЗ источник ЭДС подключается между фазами через ключ. В модели получены фазные напряжения и токи после пробега волной расстояния 20 км, 40 км, 60 км, 80 км, 100 км и 120 км.

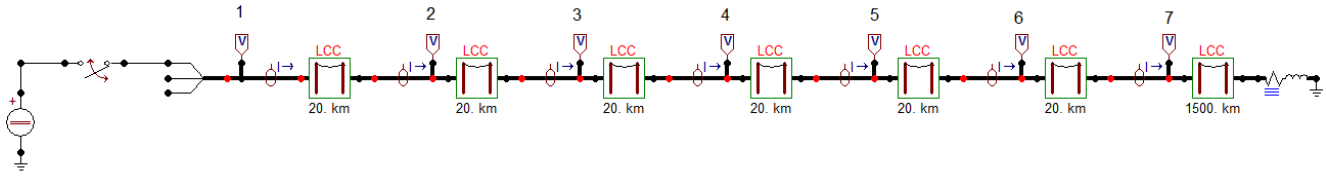


Рисунок 2.24 Модель электрической сети в программе АТР для определения формы волны при КЗ фазы А на землю

Расчет производился для частот от 0,05 Гц до 500 кГц. Значение напряжения на выходе источника напряжения постоянного тока принято $U_{кз}$ = 10 кВ. Интервал моделирования 0 – 0,02 с, момент времени замыкания ключа – 0,01 с. Шаг моделирования равен 1 мкс. В модель ВЛ (модель Марти) введены параметры ВЛ 1 (Таблица 2.1, Таблица 2.3, Рисунок 2.4).

Проведем сравнение начальной стадии волнового процесса при КЗ фазы А на землю представленных: в фазных координатах по напряжению (Рисунок 2.25) и по току (Рисунок 2.26), в модальных координатах по напряжению (Рисунок 2.27) и по току (Рисунок 2.28), в модальных координатах (преобразование Кларк) по току (Рисунок 2.29), и падающей волной в модальных координатах (Рисунок 2.30).

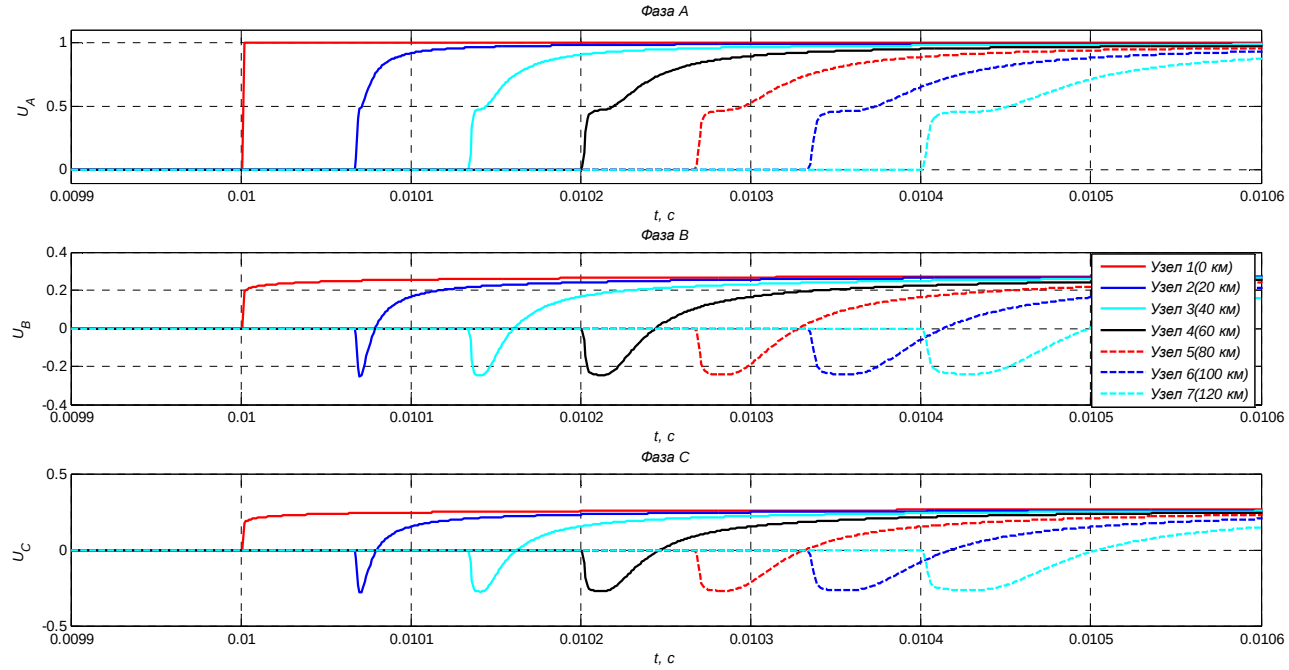


Рисунок 2.25 Формы фронтов волн по фазным напряжениям при КЗ фазы А на землю в зависимости от длины пробега по ВЛ 1

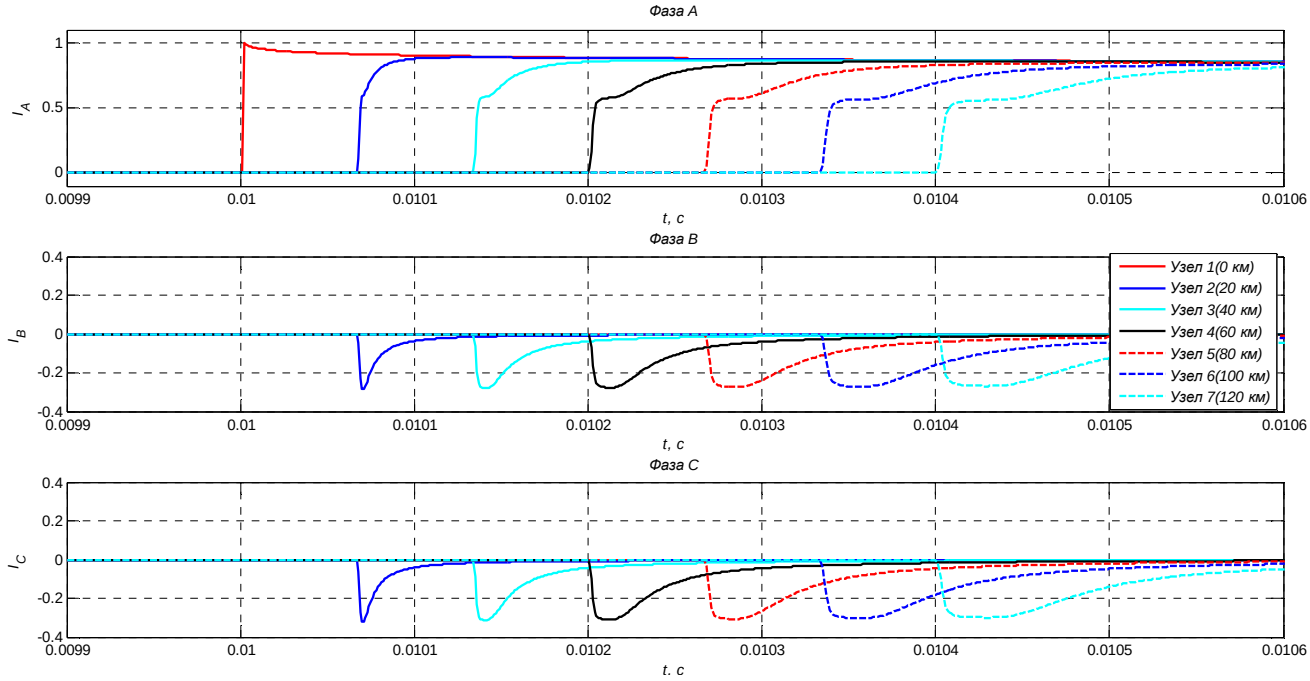


Рисунок 2.26 Формы фронтов волн по фазным токам при КЗ фазы А на землю в зависимости от длины пробега по ВЛ 1

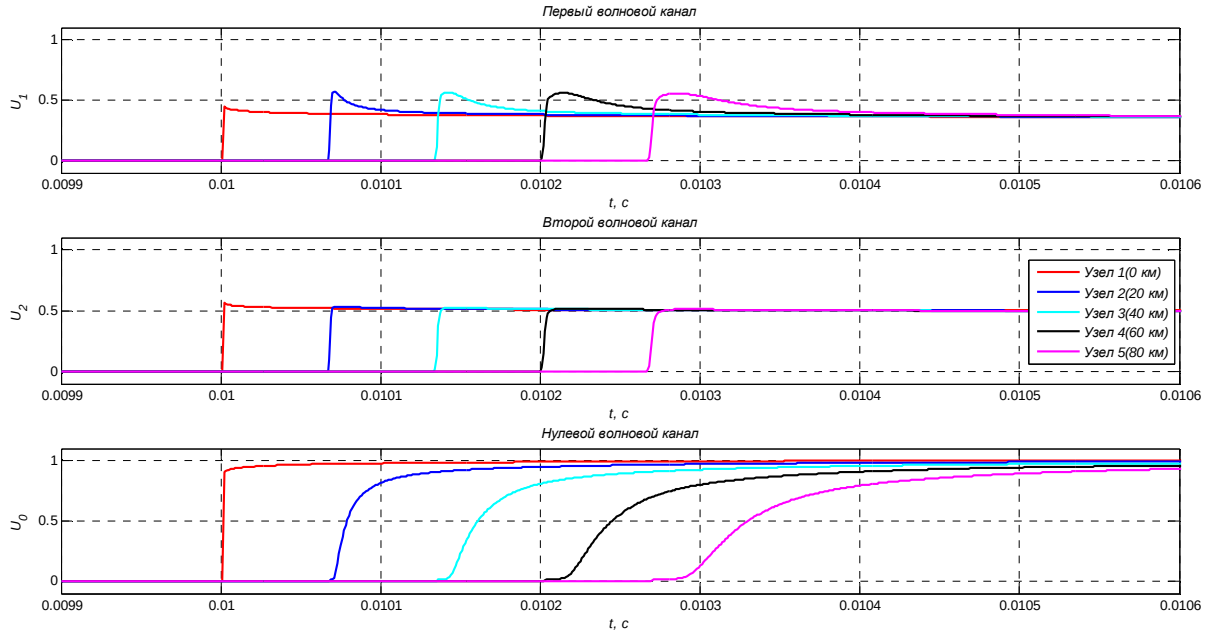


Рисунок 2.27 Формы фронтов волн в зависимости от пробега по ВЛ 1 при КЗ фазы А на землю (в модальных координатах по сигналам напряжения)

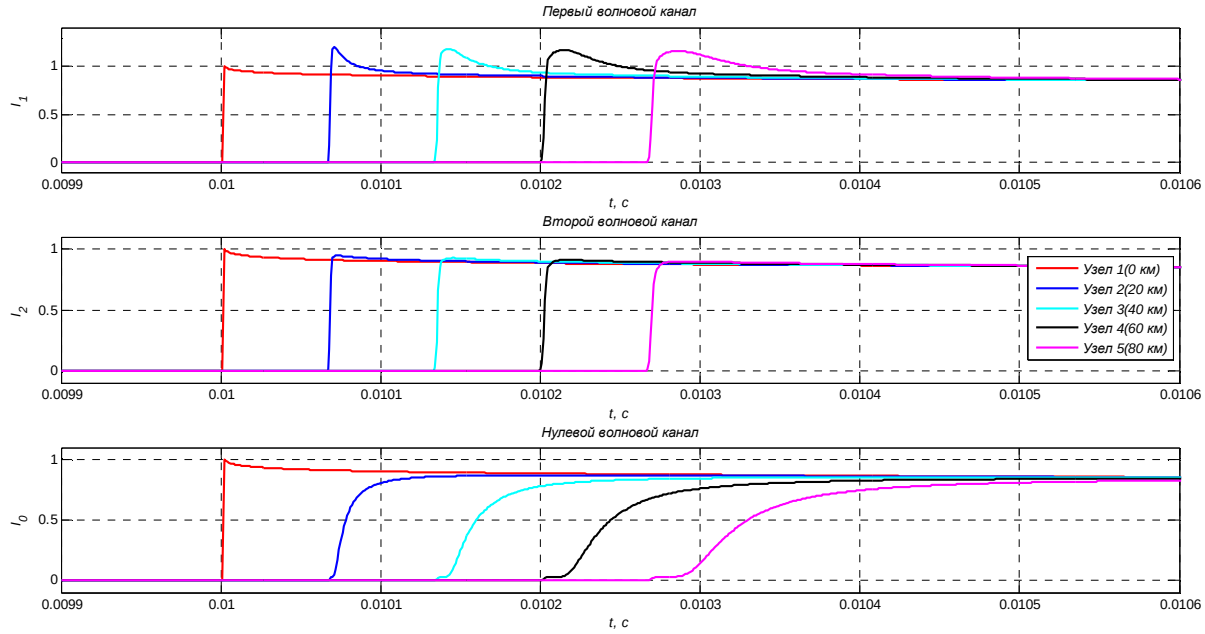


Рисунок 2.28 Формы фронтов волн в зависимости от пробега по ВЛ 1 при КЗ фазы А на землю (в модальных координатах по сигналам тока)

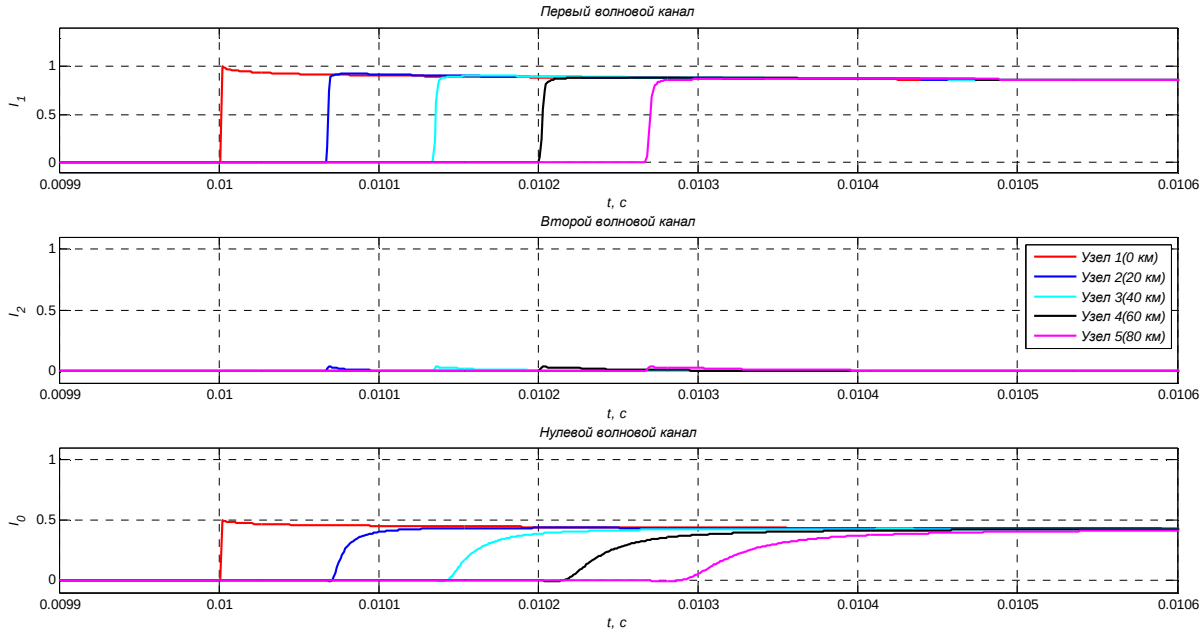


Рисунок 2.29 Формы фронтов волн в зависимости от пробега по ВЛ 1 при КЗ фазы А на землю (преобразование Кларк по токовым сигналам)

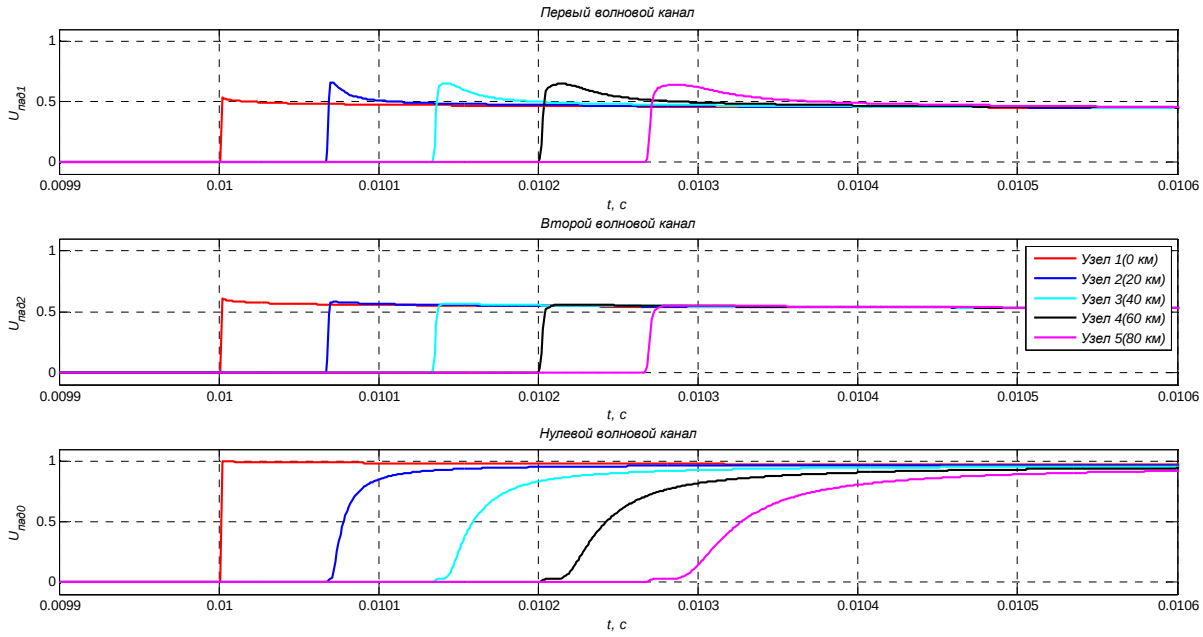


Рисунок 2.30 Формы фронтов волн в зависимости от пробега по ВЛ 1 при КЗ фазы А на землю (напряжение падающей волны в модальных координатах)

Фронт волны подвергается наибольшим искажения в нулевом канале при всех видах модального преобразования, в том числе при преобразовании Кларк. Это связано с тем, что большая часть токов КЗ замыкается через землю (через которую формируется нулевой

волновой канал), распространение сигналов в которой имеет сильную частотную зависимость. Имеет место как увеличение длительности фронта, так и его запаздывание.

Сравнение фронтов производится по времени между сигналом на уровне 10 % и 90 % от амплитуды волны. Для оценки скорости нарастания фронты волн построены в одном масштабе для волн с пробегом 20 км (близкие КЗ) (Рисунок 2.31) и 80 км (удаленные КЗ) (Рисунок 2.32) для первого волнового канала при модальном представлении и фазы А при фазном представлении. Графики также содержат первую производную фронта волны и время нарастания фронта.

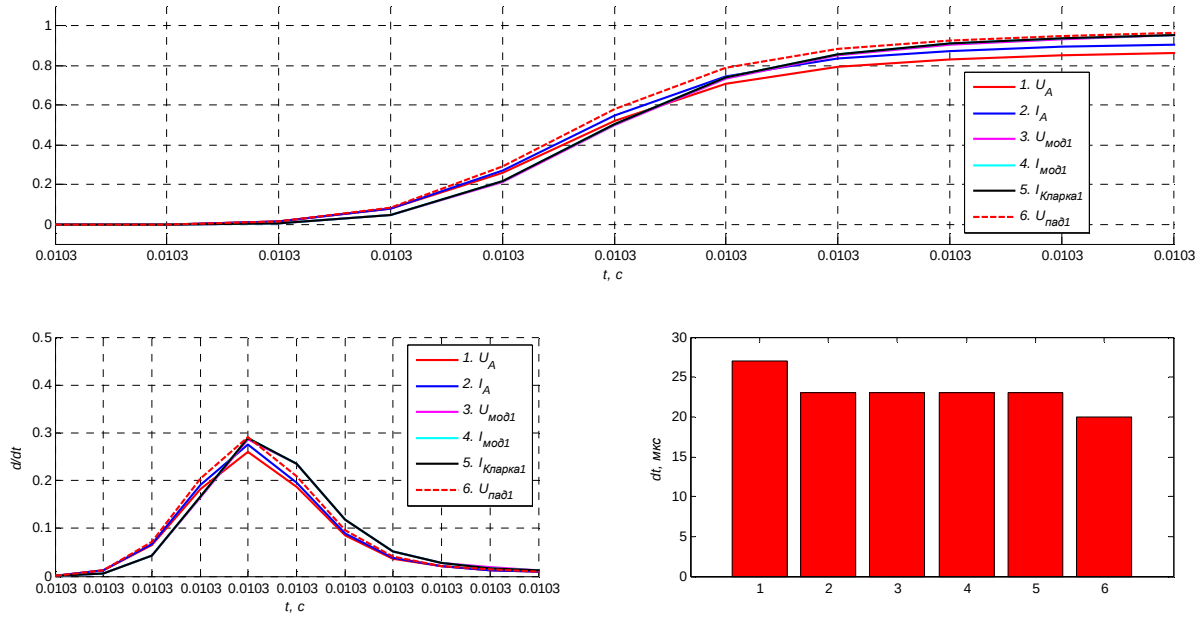


Рисунок 2.31 Сравнение форм фронтов волн при КЗ фазы А на землю и при пробеге 20 км по ВЛ 1

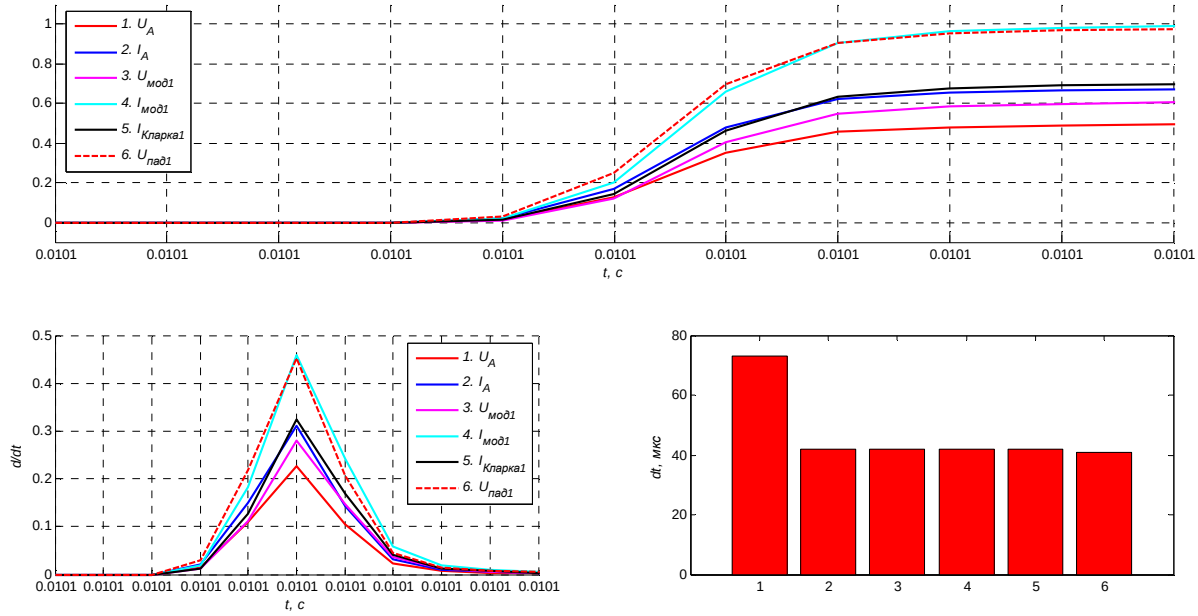


Рисунок 2.32 Сравнение форм фронтов волн при КЗ фазы А на землю и при пробеге 80 км по ВЛ 1

Для волн с пробегом 20 км время нарастания фронта в первом волновом канале в среднем составляет 20 мкс, с пробегом 80 км – 40 мкс при КЗ фазы А на землю.

Наименьшей длительностью обладает фронт волны, представленной падающей волной в модальных координатах. Максимальной скоростью нарастания обладает фронт волны по напряжению фазы А.

Проведем аналогичное сравнение начальной стадии волнового процесса при КЗ фаз А и В представленных: в фазных координатах по напряжению (Рисунок 2.33) и по току (Рисунок 2.34), в модальных координатах по напряжению (Рисунок 2.35) и по току (Рисунок 2.36), в модальных координатах (преобразование Кларк) по току (Рисунок 2.37), и падающей волной в модальных координатах (Рисунок 2.38).

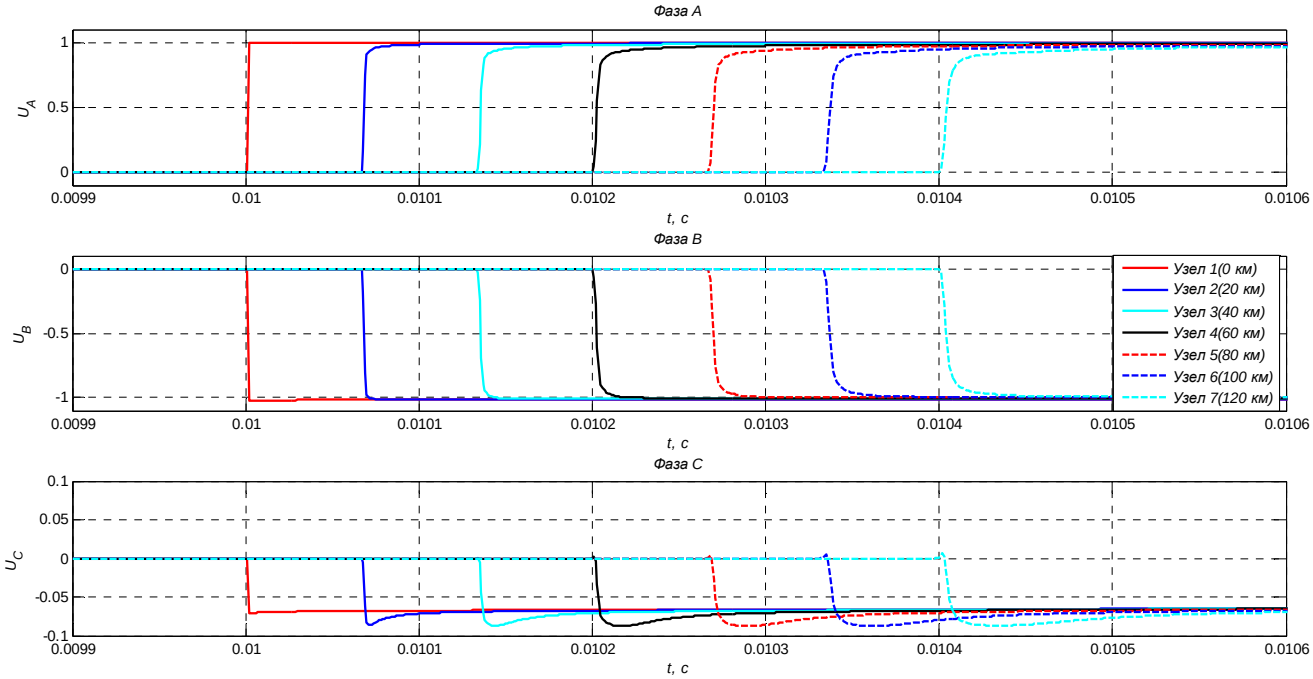


Рисунок 2.33 Формы фронтов волн по фазным напряжениям при КЗ фаз А и В в зависимости от длины пробега по ВЛ 1

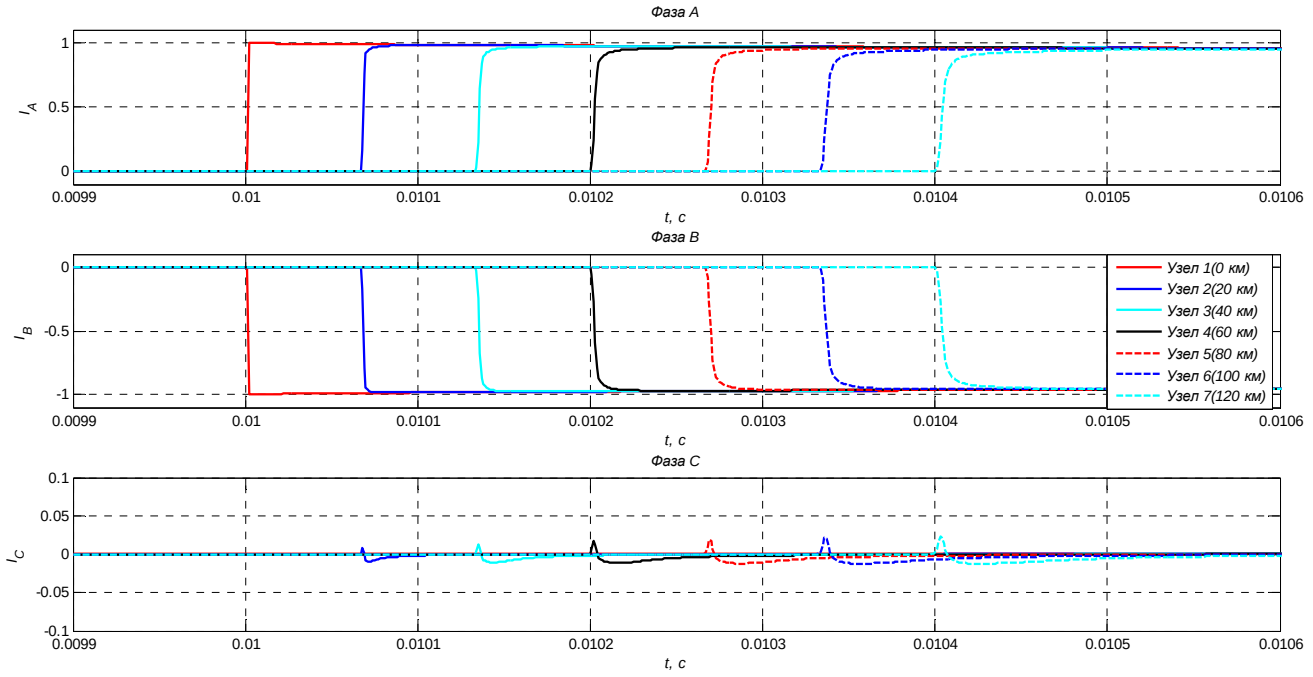


Рисунок 2.34 Формы фронтов волн по фазным токам при КЗ фаз А и В в зависимости от длины пробега по ВЛ 1

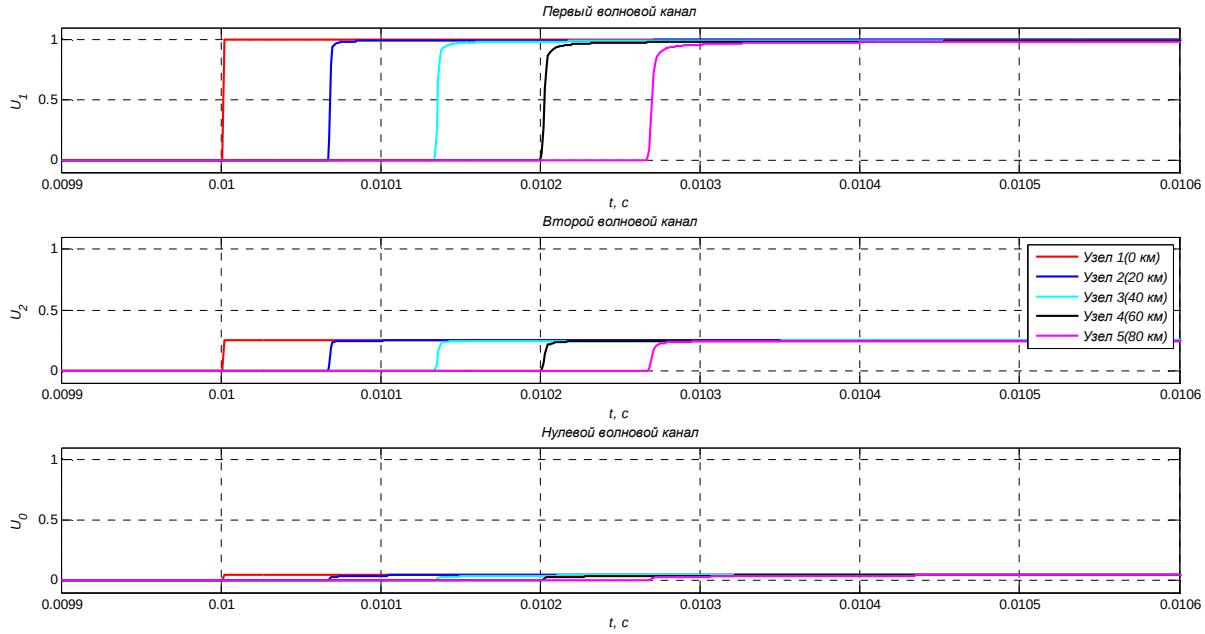


Рисунок 2.35 Формы фронтов волн в зависимости от пробега по ВЛ 1 при КЗ фаз А и В (в модальных координатах по сигналам напряжения)

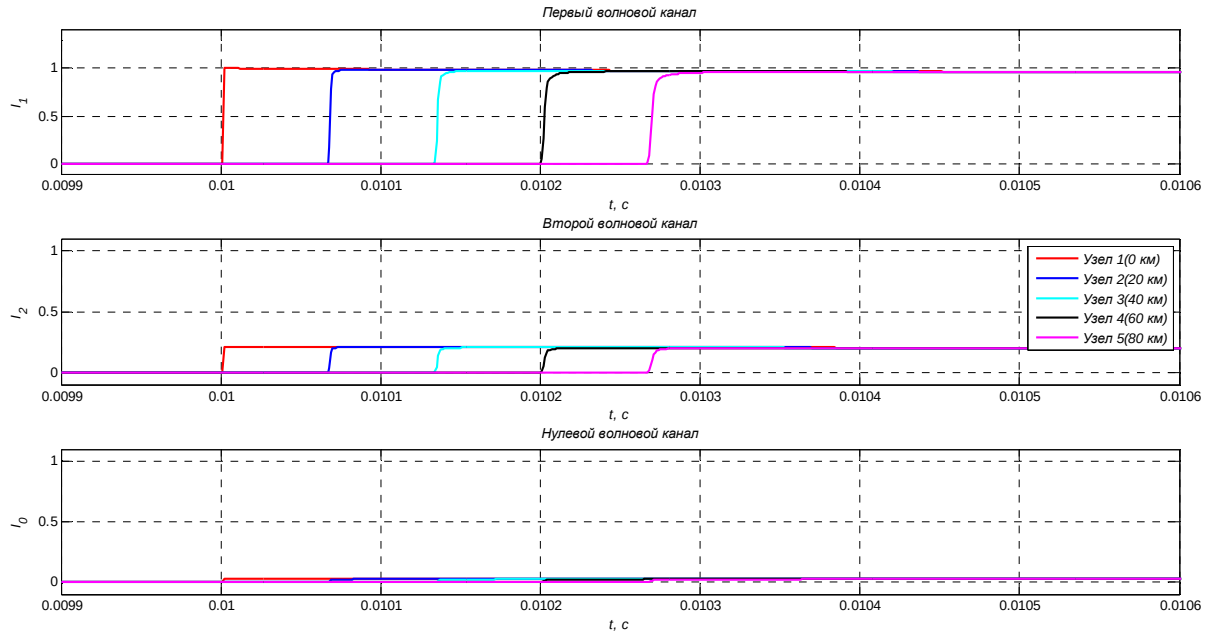


Рисунок 2.36 Формы фронтов волн в зависимости от пробега по ВЛ 1 при КЗ фаз А и В (в модальных координатах по сигналам тока)

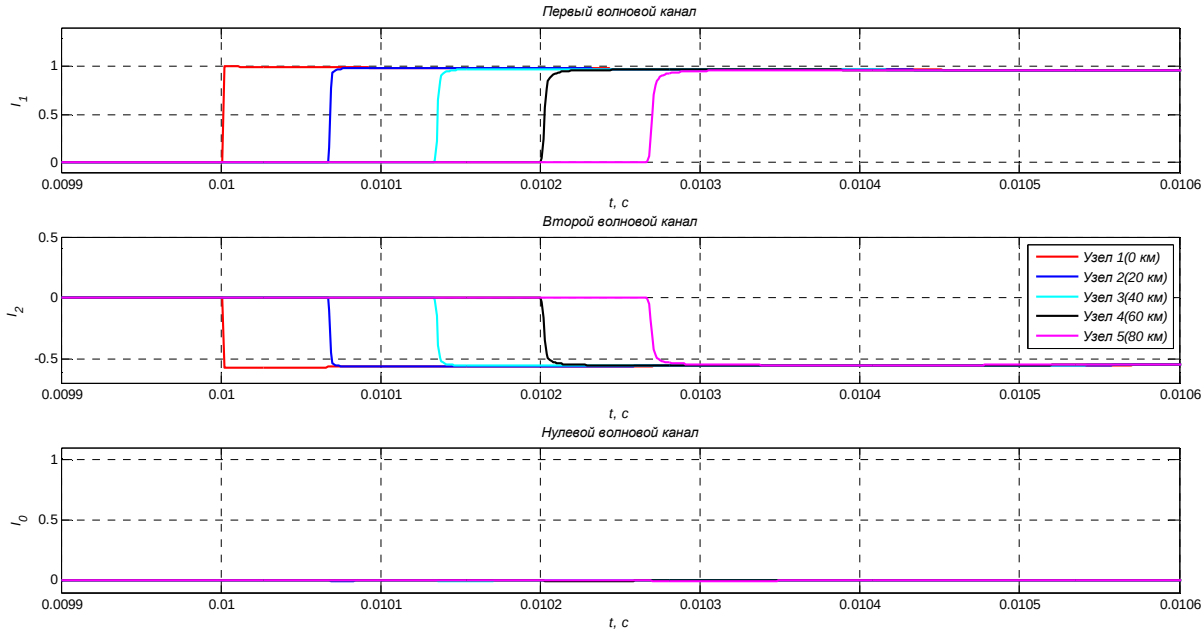


Рисунок 2.37 Формы фронтов волн в зависимости от пробега по ВЛ 1 при КЗ фаз А и В (преобразование Кларк по токовым сигналам)

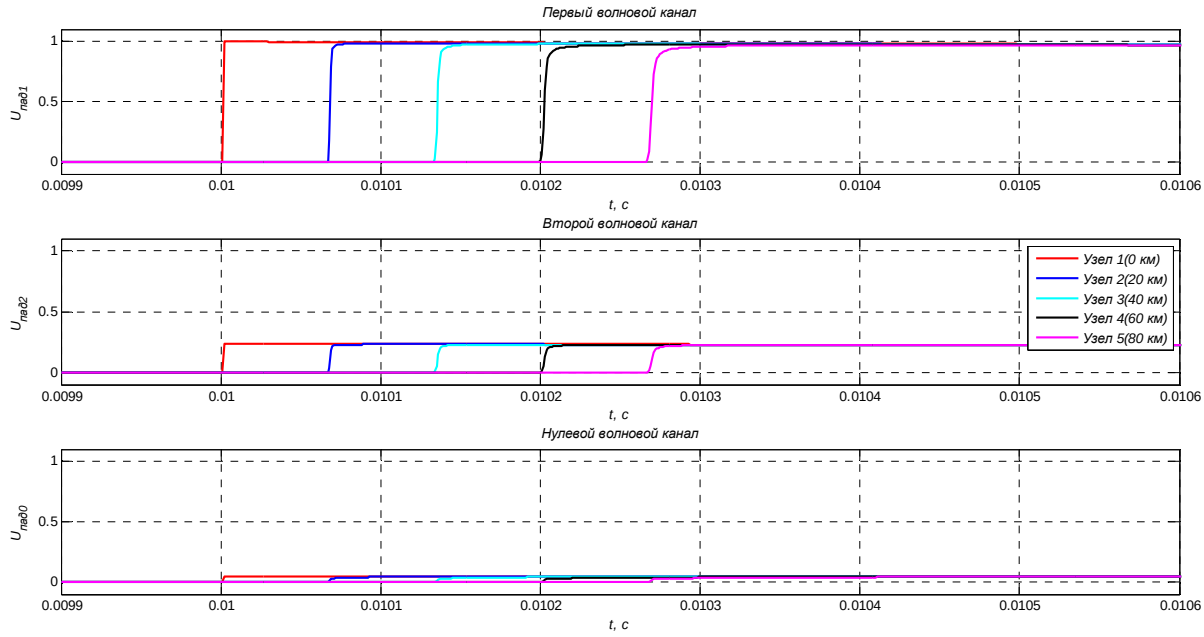


Рисунок 2.38 Формы фронтов волн в зависимости от пробега по ВЛ 1 при КЗ фаз А и В (напряжение падающей волны в модальных координатах)

При междуфазном КЗ уровень сигнала в нулевом волновом канале составляет не более 6 % процентов от уровня сигнала в первом волновом канале. Появление сигнала в нулевом волновом канале связано с неточностью элементов матрицы преобразования.

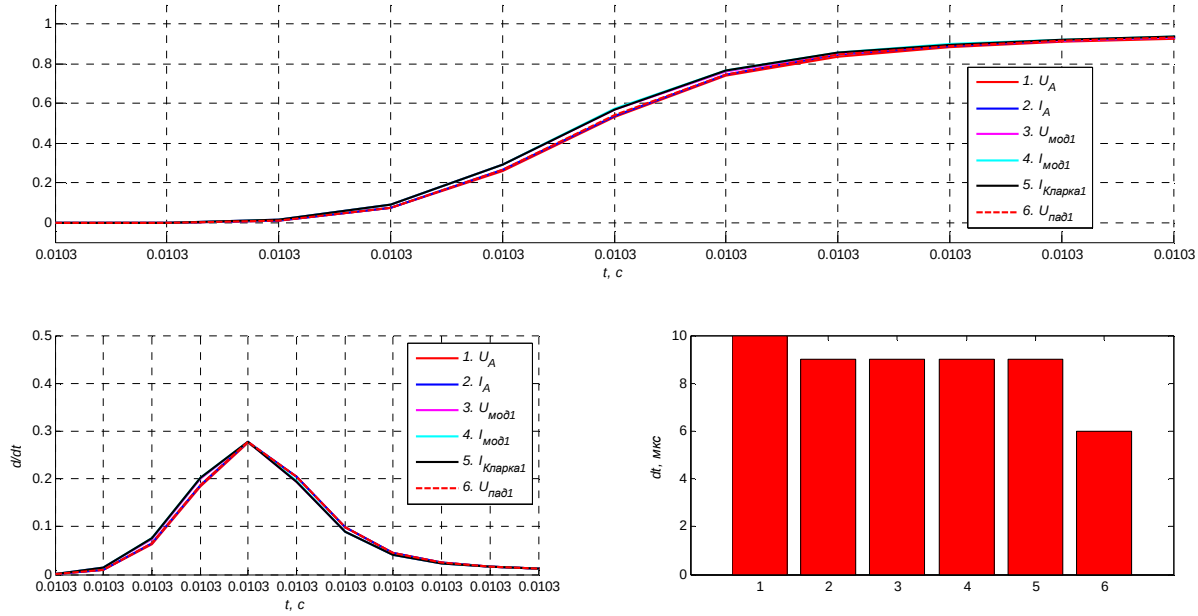


Рисунок 2.39 Сравнение форм фронтов волн при КЗ фаз А и В и при пробеге 20 км по ВЛ 1

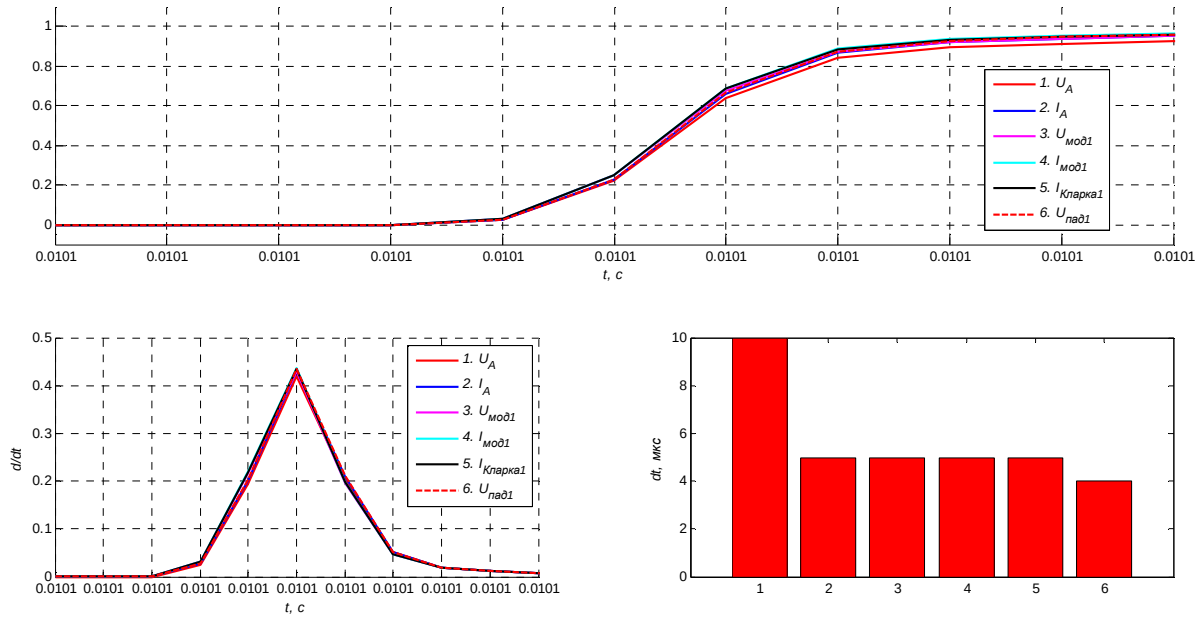


Рисунок 2.40 Сравнение форм фронтов волн при КЗ фаз А и В и при пробеге 80 км по ВЛ 1

Для волн с пробегом 20 км время нарастания фронта в первом волновом канале в среднем составляет 4 мкс (Рисунок 2.39), с пробегом 80 км (Рисунок 2.40) – 9 мкс при КЗ фаз А и В.

При междуфазном КЗ предложенный метод уже не обладает большим преимуществом перед остальными, как при КЗ на землю. Время нарастания примерно одинаково как в фазных координатах, так и в модальных. Сопротивление грунта уже не оказывает сильного влияния на распространения волны, как в случае замыкания на землю.

2.2.3 Подавление стационарных сигналов

Отметим, что напряжение падающей волны междуфазных составляющих содержит сигнал с частотой равной частоте промышленной сети, на который накладываются переходные процессы в ВЛ. Поэтому необходимо осуществлять подавление сигнала промышленной частоты с помощью фильтра аварийных составляющих, который можно выполнить различными способами. Различают временные способы выделения аварийных составляющих (вычислением разности значений, разделенных периодом или половиной периода) и частотные (фильтр верхних частот, полосно-заграждающий фильтр).

Для способа ОМП предлагается выделять аварийные составляющие путем вычисления разности значений электрических величин, разделенных интервалом, кратным периоду промышленной частоты *T*, в соответствии с выражением

$$F(t) = f(t) - f(t-T), \tag{2.41}$$

где t - время [41]. Если мгновенные значения $f(t)$ периодически повторяются, то аварийная составляющая отсутствует. Любые изменения на интервале T приводят к несовпадению мгновенных величин, разделенных указанным интервалом, и появлению аварийных составляющих. Для реализации данного способа в микропроцессорных системах необходимо сохранять в циклический буфер мгновенные значения сигнала в течении периода.

К достоинствам этого способа следует отнести, то, что помимо основной составляющей, фильтр подавляет и кратные ей гармонические составляющие, к недостаткам – зависимость достоверности выделения аварийных составляющих при использовании фиксированного интервала задержки от величины отклонения периода основной частоты сети, которая может изменяться в широких пределах (в аварийных режимах возможны колебания ±5 Гц), а также проблемы при выделении аварийных составляющих при асинхронном режиме сети. Для решения проблемы изменения частоты фильтр аварийных составляющих должен постоянно отслеживать текущее значение периода *T*.

Частотные способы выделения аварийных составляющих не имеют указанных выше недостатков, однако они вносят дополнительные искажения в форму волны и дополнительные задержки. Наиболее совершенным способом, возможно, может стать комбинация временных и частотных способов.

2.3 Влияние мест нарушения однородности ВЛ 110 –- 220 кВ на распространение электромагнитных волн в ней

Места нарушения однородности ВЛ (места резкого изменения электрических параметров ВЛ), такие как, транспозиция, ответвления от линии, обходы промежуточных ПС, изменение

вида опор, оказывают влияние на распространение электромагнитных волн [23]. В этих местах происходит преломление и отражение электромагнитных волн. При использовании модальных координат для представления волновых процессов в местах нарушения однородности имеет место перераспределение энергии между волновыми каналами. Рассмотрим влияние транспозиции и ответвления на форму электромагнитной волны, распространяющейся от места повреждения.

Согласно ПУЭ на ВЛ 110 кВ и выше длиной более 100 км для ограничения несимметрии токов и напряжений должен выполняться один полный цикл транспозиции [42], при этом шаг транспозиции не нормируется.

Рассмотрим, в качестве примера, влияние транспозиции на распространение волн в ВЛ 1, которая имеет треугольное расположения проводов. Линия с таким расположение проводов имеет слабую несимметрию параметров линии, поэтому транспозиция в этой линии оказывает меньшее влияние на параметры, чем в линии, например, с горизонтальным расположением проводов.

Примем шаг транспозиции равным 30 км, а также установим одинаковый порядок перестановки фаз для всех транспозиционных опор (Рисунок 2.41).

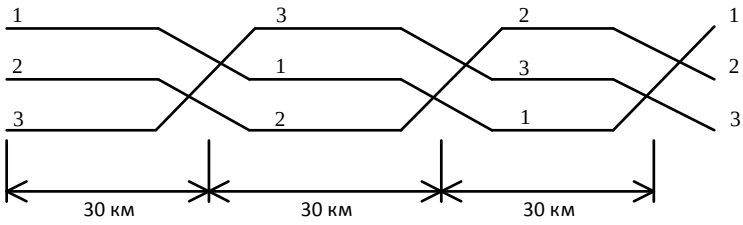


Рисунок 2.41 Транспозиция ВЛ 1

В модели ВЛ 1 для программы ATP/EMTP контролируются фазные токи и напряжения после каждой опоры транспозиции (Рисунок 2.42). Исследование влияния транспозиции производится при КЗ фазы А на землю.

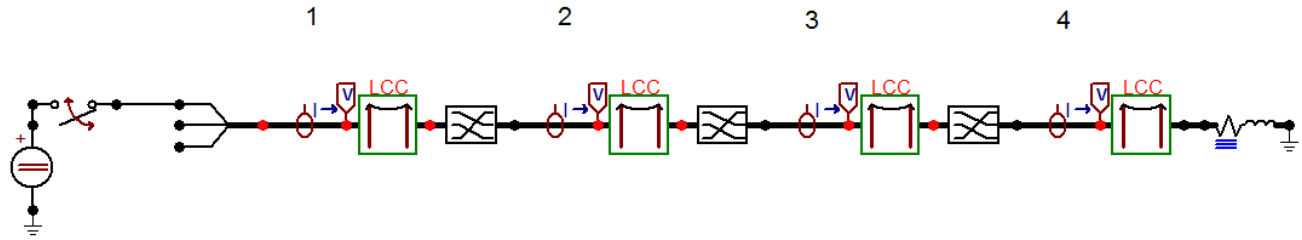


Рисунок 2.42 Модель ВЛ 1 с транспозицией в программе ATPDraw

Для построения зависимостей распространения волны в волновых каналах фазные токи и напряжения переводятся в модальные координаты с помощью матриц преобразования ($\boldsymbol{T_u}$, $\boldsymbol{T_i}$), рассчитанных для ВЛ 1 без учета транспозиции. Применение матриц $\boldsymbol{T_u}$, $\boldsymbol{T_i}$ с учетом влияния опор транспозиции не возможно для ОМП, когда начало распространения волны заранее не известно.

Зависимость формы волны от пробега (Рисунок 2.43, Рисунок 2.44) для первого и второго волновых каналов показывает, что наличие транспозиции не оказывает существенного влияния на фронт волны, сформированной в месте повреждения. На осциллограммах видно, что в каждой точке контроля наблюдается появление волн, отраженных от опор транспозиции, например, в узле 1 в моменты времени 0,0102 с и 0,0104.

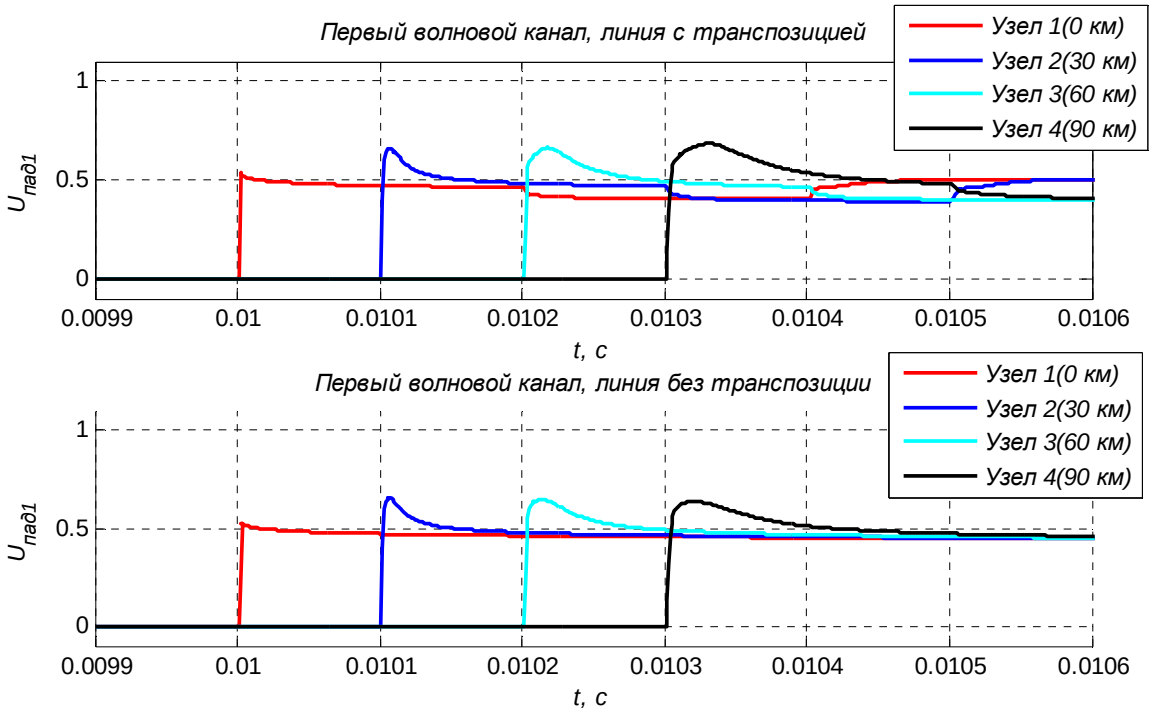


Рисунок 2.43 Влияние транспозиции на форму фронта волны в первом волновом канале

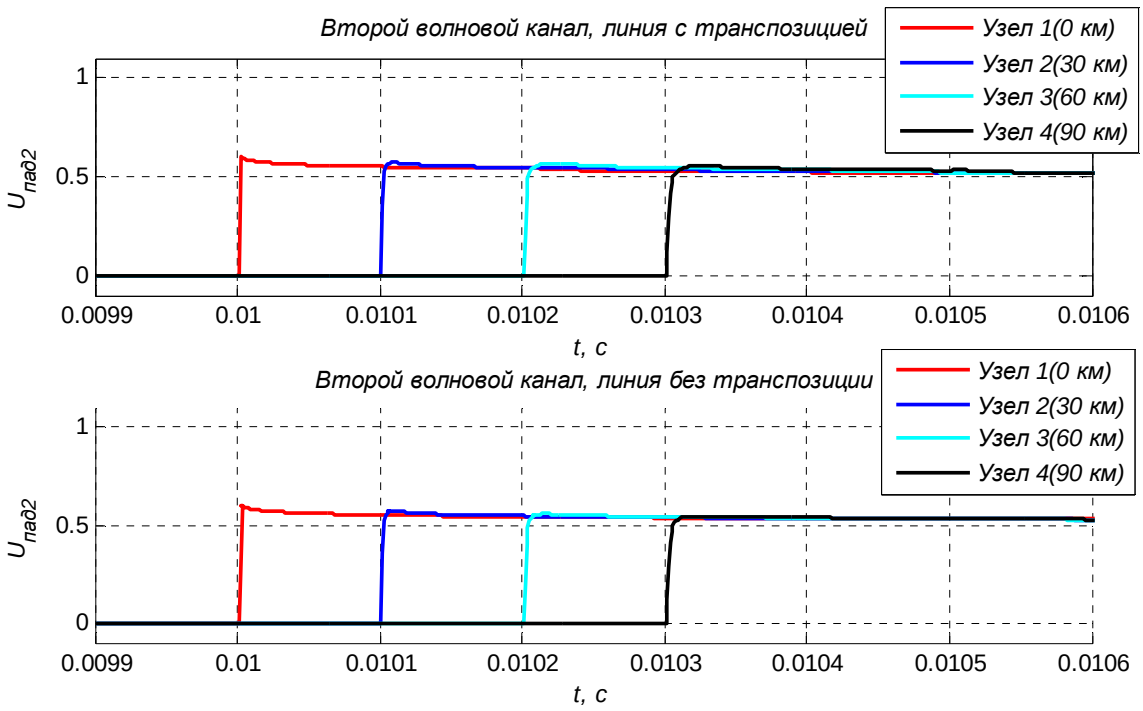


Рисунок 2.44 Влияние транспозиции на форму фронта волны во втором волновом канале

Во втором волновом канале отражение от опор транспозиции не наблюдается. Это связано со слабой зависимостью второго волнового канала от сигнала в фазе А для ВЛ 1.

По осциллограммам видно, что транспозиция не оказывает существенного влияния на фронт первоначальной волны, а лишь вызывает появления отраженных от нее волн. Поэтому для способа ОМП, в котором ведется контроль только начальной стадии волны, учет транспозиции не требуется.

Влияние ответвлений на распространение волн в ВЛ 220 кВ анализировалось на модели (Рисунок 2.45) содержащей две линии длиной по 50 км, и две линии с длиной, максимально возможной в программе ATP. Параметры линии соответствуют параметрам ВЛ 1. Контроль токов и напряжений осуществляется в узле 1 (волна до пробега по линии), в узлах 2 и 3 (непосредственно до и после ответвления), в узле 4 (после ответвления и пробега по линии).

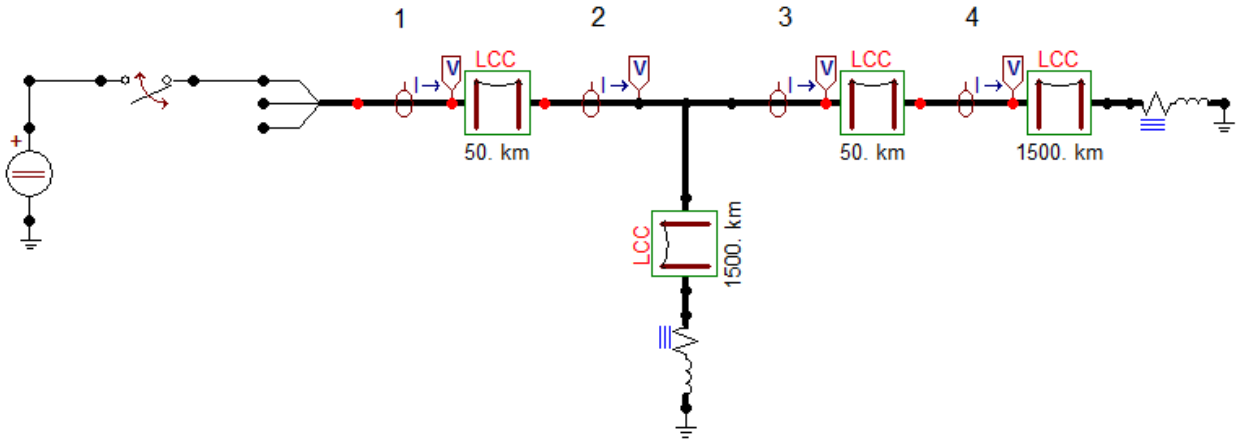


Рисунок 2.45 Модель ВЛ 1 с ответвлением в программе ATP

По значениям напряжения падающей волны в узлах 2 и 3 (Рисунок 2.46, Рисунок 2.47) при КЗ фазы А на землю видно, что в ВЛ с ответвлением наблюдаются волны, отраженные от опоры с ответвлением (например, на графике напряжения в узле 1 в интервал времени 0,0103 – 0,0104 с).

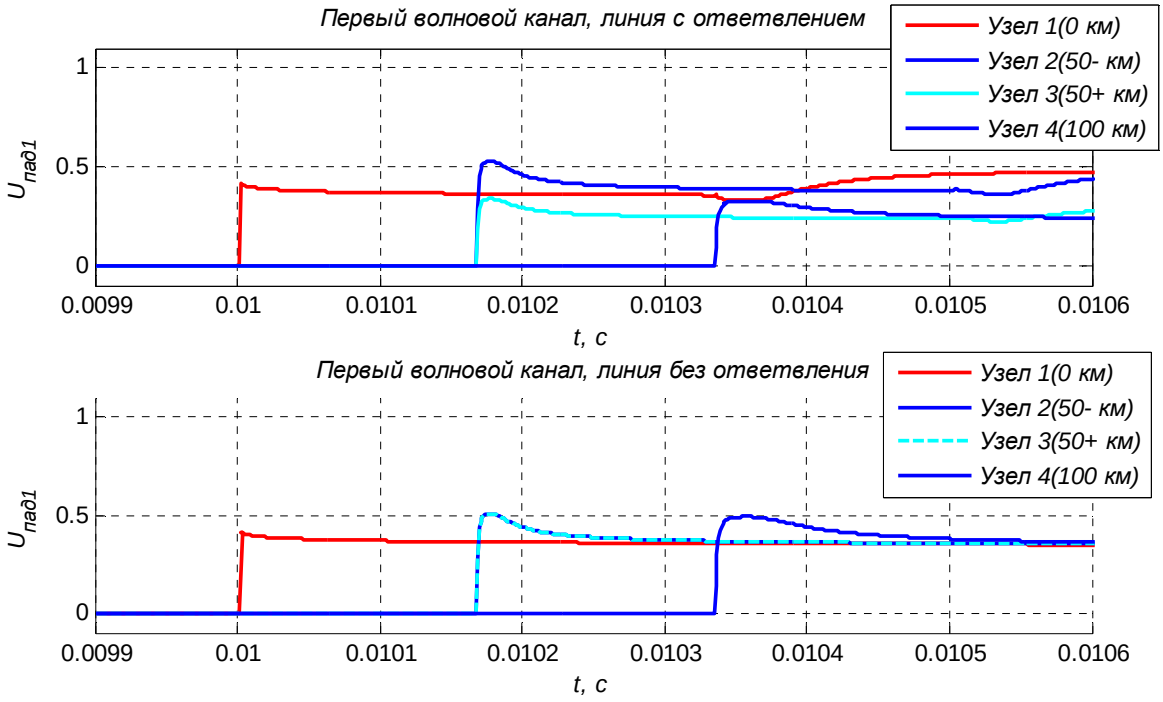


Рисунок 2.46 Влияние ответвления на форму фронта волны в первом волновом канале

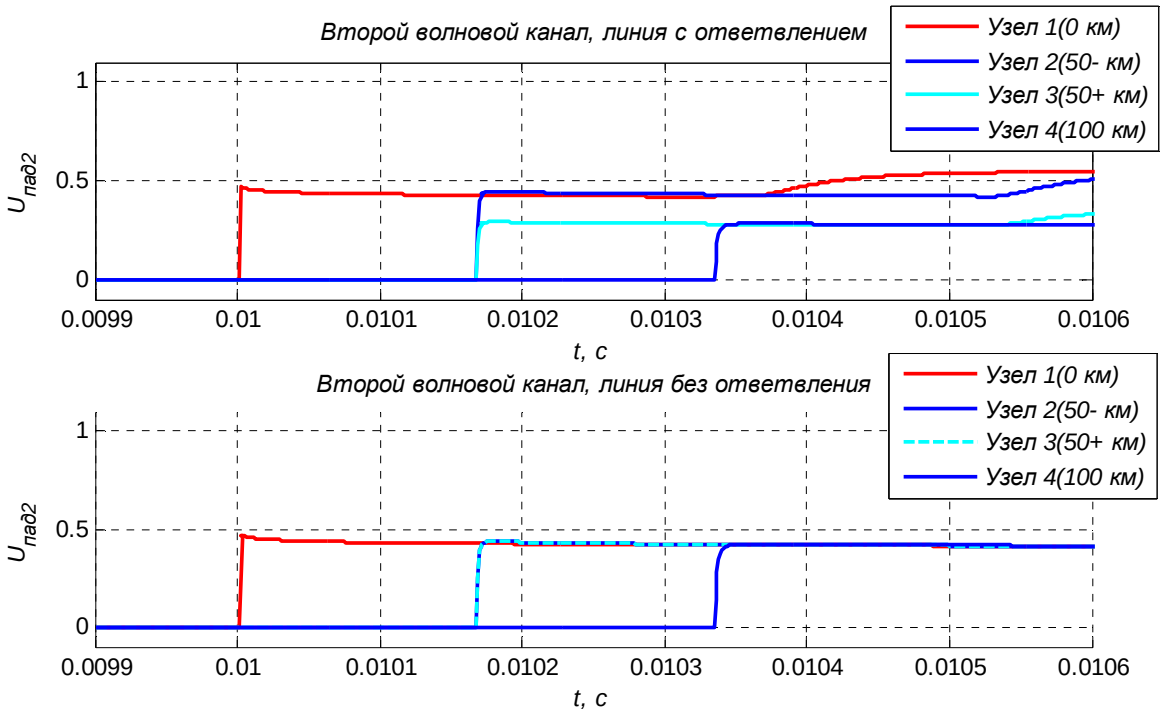


Рисунок 2.47 Влияние ответвления на форму фронта волны во втором волновом канале

В узлах 2 и 3 имеет место ослабление волны после опоры ответвления. Качественно ответвление не влияет на форму волны, возникшей в месте повреждения. Поэтому наличие ответвлений не влияет на работу волнового метода двухсторонних измерений. Однако имеет место неопределенность определения места повреждения при КЗ в ответвлении. Данная проблема решается установкой третьего устройства на конце ответвления.

2.4 Выводы

1. Рассмотрена задача выделения волнового переходного процесса (электромагнитной волны) при КЗ в ВЛ 110 – 220 кВ. Для выделения электромагнитной волны на концах ВЛ (в точках контроля) из измеренных фазных напряжений и токов с минимальными искажениями фронта (начальной стадии волнового переходного процесса) предложено использовать преобразование фазных напряжений и токов в модальные координаты (волновые каналы).
2. Получены матрицы преобразования фазных координат в модальные для различной геометрии расположения проводов и их параметров. Проведен анализ влияния параметров волновых каналов на искажения фронта волны. Показано, что наименьшее искажение фронта волны имеет место в междуфазных волновых каналах.
3. Рассмотрено влияние неоднородностей (транспозиция, ответвление) ВЛ на форму электромагнитной волны, распространяющейся от места повреждения. Показано, что

неоднородности ВЛ 110 – 220 кВ не оказывают существенного влияния на форму падающей волны в модальных координатах.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ДОСТИЖЕНИЯ ФРОНТОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ТОЧКИ КОНТРОЛЯ

На точность определения времени появления фронта волны в точке контроля влияют искажение формы фронта волны и электромагнитные помехи. Как показано в Главе 2, представление волны в модальных координатах позволяет уменьшить ее «запаздывание», а также увеличить скорость нарастания фронта по сравнению с представлением волны в фазных координатах. Но полностью восстановить форму волны, близкой к той, что сформировалась в месте КЗ, при проведении измерения токов и напряжений по концам линии, невозможно. Поэтому первым требованием к способу определения времени появления фронта волны является обеспечение минимальной зависимости способа от скорости нарастания фронта.

Электромагнитные помехи по отношению к ВЛ могут быть как распространяющимися по проводам (кондуктивными), так и помехами излучения. К источникам кондуктивных помех относятся внешние КЗ, нелинейная нагрузка (преобразователи, дуговые печи и т.д.), переходные процессы, вызванные переключение коммутационных аппаратов, коронный разряд. Также к ним можно отнести оборудование ПС, подключенное ко вторичным обмоткам измерительных ТН и ТТ, и другое оборудование ПС (например, электромеханические реле) близкорасположенное к устройству ОМП. По своему спектру помехи подразделяются на стационарные (белый шум), квазистационарные (сложение множества случайных процессов) и нестационарные (случайные).

Проблему отстройки от некоторых нестационарных помех (от внешних КЗ, переходных процессов при коммутации) частично решает расчет напряжения падающей волны. Но если в ВЛ имеется неоднородность (например, ответвление), то часть волны, вызванной внешней помехой, отразится от нее, а другая часть пройдет через неоднородность, тем самым став «внутренней» волной. Такие «внутренние» волны могут распознаваться способом как волны от места КЗ. Для надежного определения факта внутреннего КЗ и отстройки от внешних КЗ устройство ОМП должно осуществлять пуск алгоритма расчета по сигналу от устройств защиты ВЛ с абсолютной селективностью

Как показано в [1], удельная мощность помех от короны в ограниченной полосе частот равномерно распределена по частотному спектру. Поэтому, помехи от короны можно рассматривать как гауссов шум с равномерной спектральной плотностью. Если говорить о шумах вызванных оборудованием ПС, то их интенсивность зависит от прокладки кабелей вторичных цепей и от устройств подключенных ко вторичным цепям.

Основным источником нестационарных помех излучения являются близко расположенные ВЛ. Переходной процесс в близко расположенной линии при наличии сильной взаимоиндукции, особенно в двухцепных ВЛ, формирует волны в линии с установленными устройствами ОМП.

Итак, сигналы во вторичных обмотках измерительных ТТ и ТН имеют сложный состав, зависящий от конкретной ВЛ, ПС и нагрузок. В качестве примера приведены осциллограммы фазных напряжений и токов на ВЛ 220 кВ (Рисунок 3.1), а также разложение в спектр сигнала тока фазы А (Рисунок 3.2) с той же ВЛ. Отметим, что спектр сигнала тока (Рисунок 3.2) близок к равномерно распределенному (на уровне 10^{-4} в диапазоне 1 Гц – 1 МГц), что соответствует характеристикам стационарного белого шума. Отношении сигнал/шум для сигналов напряжения в ВЛ 220 кВ Тамбовская-500 – Давыдовская со стороны ПС Давыдовская (Рисунок 3.1) составляет 90 – 100 дБ, для сигналов тока 65 – 80 дБ.

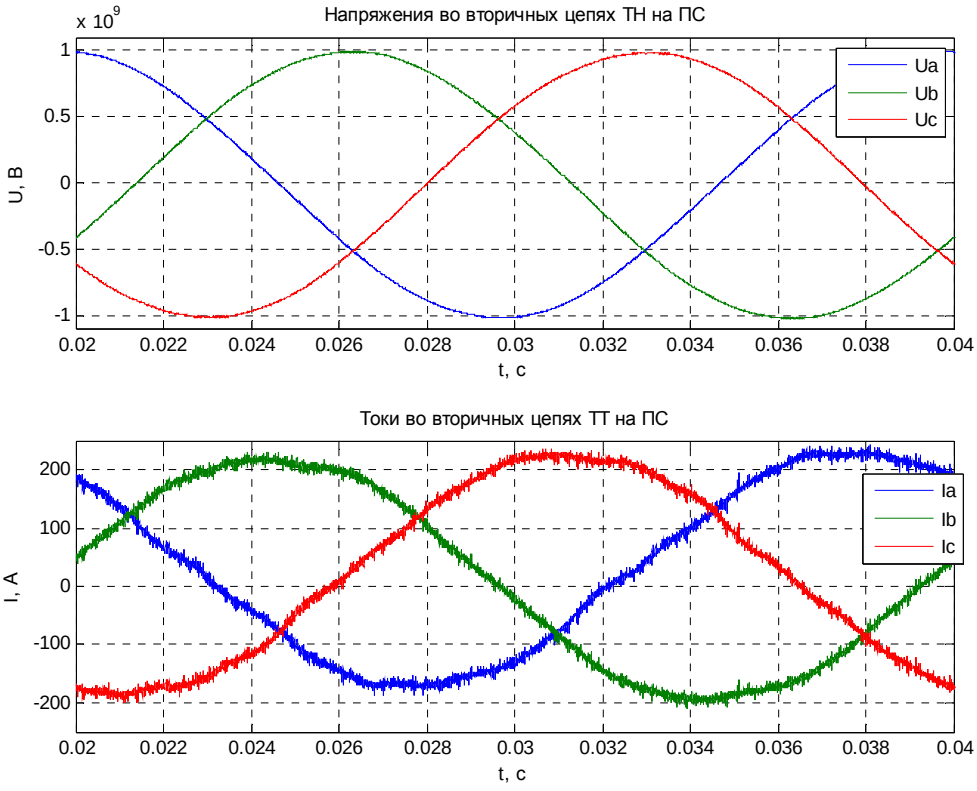


Рисунок 3.1 Напряжения и токи фаз ВЛ 220 кВ Тамбовская-500 – Давыдовская со стороны ПС Давыдовская

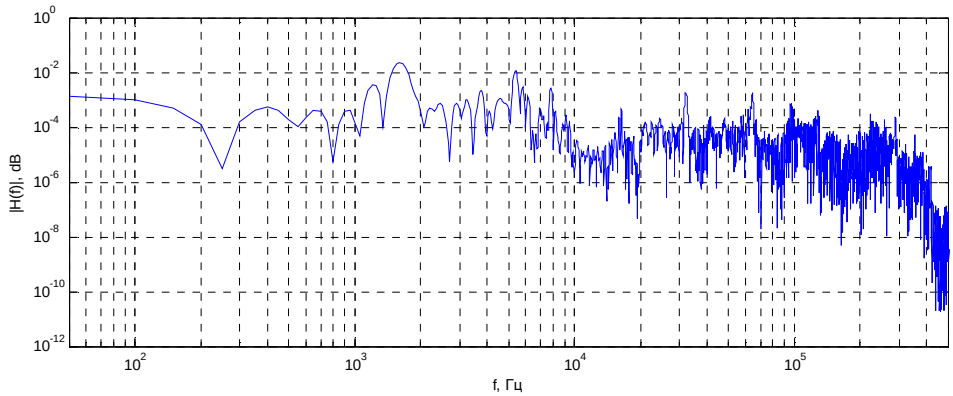


Рисунок 3.2 Частотный спектр напряжения фазы А ВЛ 220 кВ Тамбовская-500 – Давыдовская со стороны ПС Давыдовская

Плотность распределения (Рисунок 3.3) тока фазы А в ВЛ 220 кВ близка к нормальному гауссовому распределению. При этом математическое ожидание сигнала $\mu \approx 0$, дисперсия $\sigma^2 \approx 1$ А (по первичной стороне).

Исходя из полученных характеристик сигналов во вторичных цепях ТН и ТТ ВЛ 220 кВ примем для целей исследования основной компонентой помех белый гауссовский шум, обладающий равномерной спектральной плотностью и нормально распределенным значением амплитуды. В свою очередь установим второе требование к способу определения появления фронта волны в точке контроля: способ должен иметь минимальную зависимость от помех, представляющих собой белый гауссовский шум.

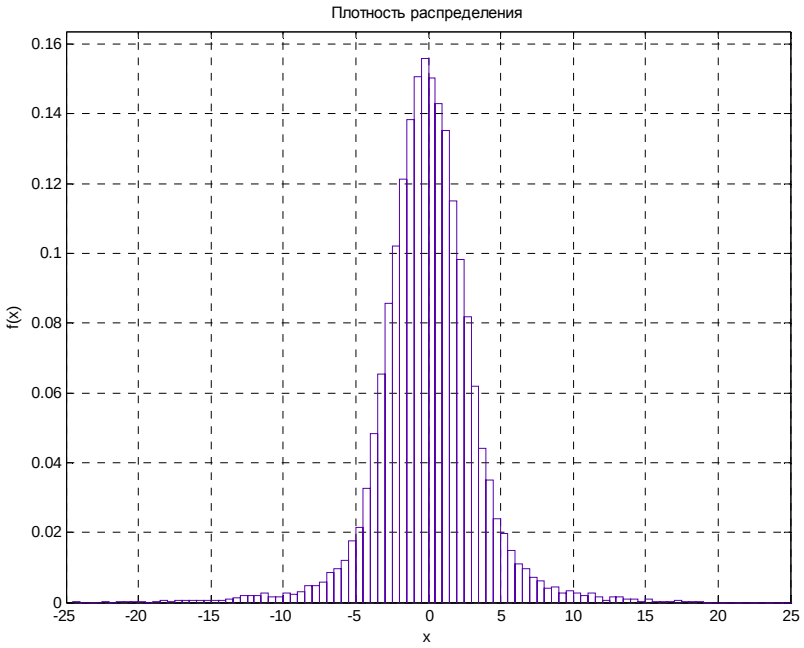


Рисунок 3.3 Плотность распределения случайных величин в токе фазы А

Рассмотрим математические методы определения фронта волны, основанные на использовании анализа сигналов в частной, частотно-временной и во временной областях.

3.1 Методы анализа сигналов для определения времени достижения фронтом электромагнитной волны точки контроля

3.1.1 Методы анализа сигналов в частотной области

Преобразование Фурье (ПФ) является традиционным математическим аппаратом для анализа стационарных сигналов. Разложение сигналов при ПФ происходит в базисе косинусов и синусов, и поэтому ПФ широко распространен в анализе электрических цепей, так как гармонические функции при прохождении линейных элементов электрической цепи не изменяют своей формы.

Прямое непрерывное ПФ позволяет сопоставить сигнал *x(t)* во временной области и его изображение в частотной *X(ω)*

$$\overline{\mathrm{X}}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-it\omega} dt \,, \tag{3.1}$$

где i – комплексная единица, t – время, ω – круговая частота.

В микропроцессорных системах широко применяется дискретное преобразование Фурье (ДПФ)

$$\overline{\mathrm{X}}(\mathrm{n}) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-i\frac{2\pi nk}{N}} \,, \tag{3.2}$$

где i – комплексная единица, n – номер спектральной компоненты, k – номер временной компоненты, N – количество отсчетов входной последовательности. Стоит отметить, что несмотря на ограниченный размер входного сигнала, ДПФ подразумевает неявное периодическое продолжение анализируемого фрагмента, что приводит к возникновению «боковых лепестков» у спектральных линий [43].

С практической точки зрения, особенно при анализе нестационарных сигналов, каким является фронт волны, ПФ имеет ряд ограничений и недостатков. Обладая хорошей локализацией по частоте, ПФ не обладает временным разрешением. ПФ требует знания сигнала не только в прошлом, но и в будущем. Локальные особенности сигнала (разрывы, ступеньки, пики) дают едва заметные составляющие спектра, по которым обнаружить эти особенности, и тем более их место, практически не возможно [44]. Для получения о сигнале высокочастотной

информации с хорошей точностью следует извлекать ее из относительно малых временных интервалов, т.е. проводить оконное ПФ.

3.1.2 Методы анализа сигналов в частотно-временной области

В современных работах по волновым ОМП часто применяется преобразование сигнала в частотно-временной области, в частности оконное ПФ и вейвлет – преобразования (ВП) [45], [46].

Основное отличие оконного ПФ от непрерывного ПФ является предварительная операция умножения сигнала на весовое окно (прямоугольное окно, треугольное окно, окно Хэмминга и т.д.). Перемещением окна вдоль оси времени можно вычислить ПФ в разных позициях, в результате получается частотно-временное описание сигнала. Поскольку каждое окно выделяет свой небольшой участок по времени, точно представления во времени можно повысить. С другой стороны окну с узкой шириной во времени будет соответствовать плохое разрешение по частоте. Еще одним недостатком оконного ПФ является фиксированное разрешение по времени и частоте для всех точек входного сигнала, которое не может быть адаптировано к локальным свойствам сигнала.

При определении времени появления фронта волны с помощью оконного ПФ спектральные составляющие малого интервала входного сигнала сравниваются с фиксированным порогом. Если порог превышен, то фиксируется время фронта, в противном случае анализируется следующий интервал входного сигнала. Уменьшая интервал входного сигнала можно увеличить локализацию по времени, но при этом уменьшается спектральное разрешение, что не позволит произвести корректное сравнение спектральных составляющих с порогом. Таким образом ПФ нецелесообразно применять для локализации фронта волны.

ВП позволяет обнаружить сильно локализованные изменения сигналов, в отличие от оконного дискретного преобразования Фурье, которое не может одновременно обеспечить высокое разрешение по частоте и по времени. Вейвлеты представляют собой особые функции в виде коротких волн (всплесков) с нулевым интегральным значением, способные к сдвигу по оси абсцисс и масштабированию (сжатию и растяжению). ВП способно выявить различие характеристик процесса на различных шкалах, а посредством сдвига можно проанализировать свойства сигнала в различных точках на всем исследуемом интервале [44].

Дискретное вейвлет преобразование (ДВП) представляет собой свертку функции с применением сдвигов и масштабирования

$$DWT(m,n) = \frac{1}{\sqrt{\left|a_o^m\right|}} \sum_k x(k)\Psi\left(\frac{n - kb_o a_o^m}{a_o^m}\right). \quad (3.3)$$

где $\Psi(t)$ – базовый (материнский) вейвлет, n - параметр, характеризующий время, m - параметр, характеризующий размер материнского вейвлета, a_0, b_0 - вейвлет коэффициенты, $x(t)$ - исследуемый сигнал.

Выбор материнского вейвлета зависит от характера поставленной задачи и от конкретного анализируемого сигнала. Как показали зарубежные исследования по волновому ОМП, максимальную корреляцию с аварийным сигналом показали биортогональные вейвлеты [6]. Подчеркнем, что практически все исследования проводились без учета влияния помех в анализируемом сигнале.

Способ определения фронта волны с помощью ВП заключается в сравнении коэффициентов вейвлет-разложения с пороговым значениям на различных уровнях детализации. В качестве базового вейвлета для оценки возможностей способа в зависимости от уровня помех выбран биортогональный вейвлет *bior1.1*.

На иллюстрациях (Рисунок 3.4, Рисунок 3.5, Рисунок 3.6), показывающих возможности ВП по определению фронта, самыми верхним графиком является осциллограмма фронта волны во временной области, ниже зависимости коэффициентов разложения от времени на разных уровнях. Разложение сигнала проводилось до 5 уровня, т.е. масштаб материнского вейвлета на пятом уровне увеличивался в 32 раз. Уровню d_1 соответствуют максимальные частоты, уровню d_5 минимальные.

Осциллограмма фронта волны получена при моделировании КЗ фазы А на землю на расстоянии 40 км от точки контроля в ВЛ 1 в программе АТР с последующим выделением аварийных составляющих падающей волны первого волнового канала.

При использование вейвлет-преобразования для сигнала без помех (Рисунок 3.4) наблюдается рост коэффициентов разложения на всех уровнях, что позволяет достаточно точно определить фронт волны.

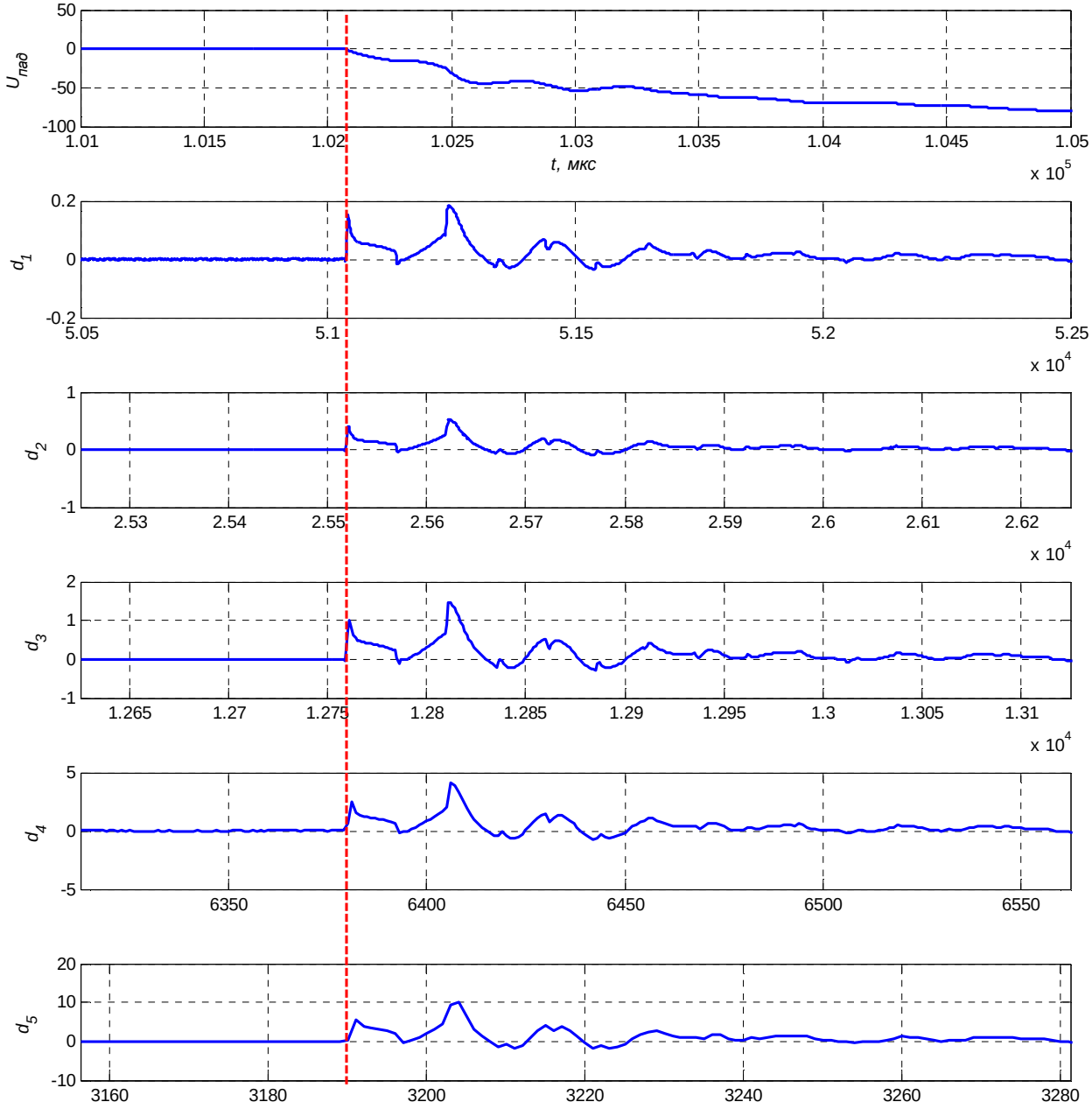


Рисунок 3.4 Определение времени появления фронта волны с помощью вейвлет-преобразования

Для исследования влияния помех к сигналу фронта волны путем сложения мгновенных значений добавляется гауссовский белый шум, который имеет математическое ожидание μ = 0 и дисперсию (σ^2), определяемую как

$$\sigma^2 = \left(\frac{U_{\max}}{10^{SNR/20}} \right)^2, \tag{3.4}$$

где *SNR* – отношения сигнал/помеха, U_{max} – максимальным значением полезного сигнала.

При отношении сигнал/помеха около 60 дБ использование ВП для определения фронта волны затруднительно (Рисунок 3.5). Коэффициенты вейвлетов на уровнях 4 и 5 (самый большой масштаб) еще могут характеризовать появление первой волны, однако уровени коэффициентов для последующей волны (в момент времени 1,025 с) выше, чем для первой волны, что может привести к ошибкам при ОМП.

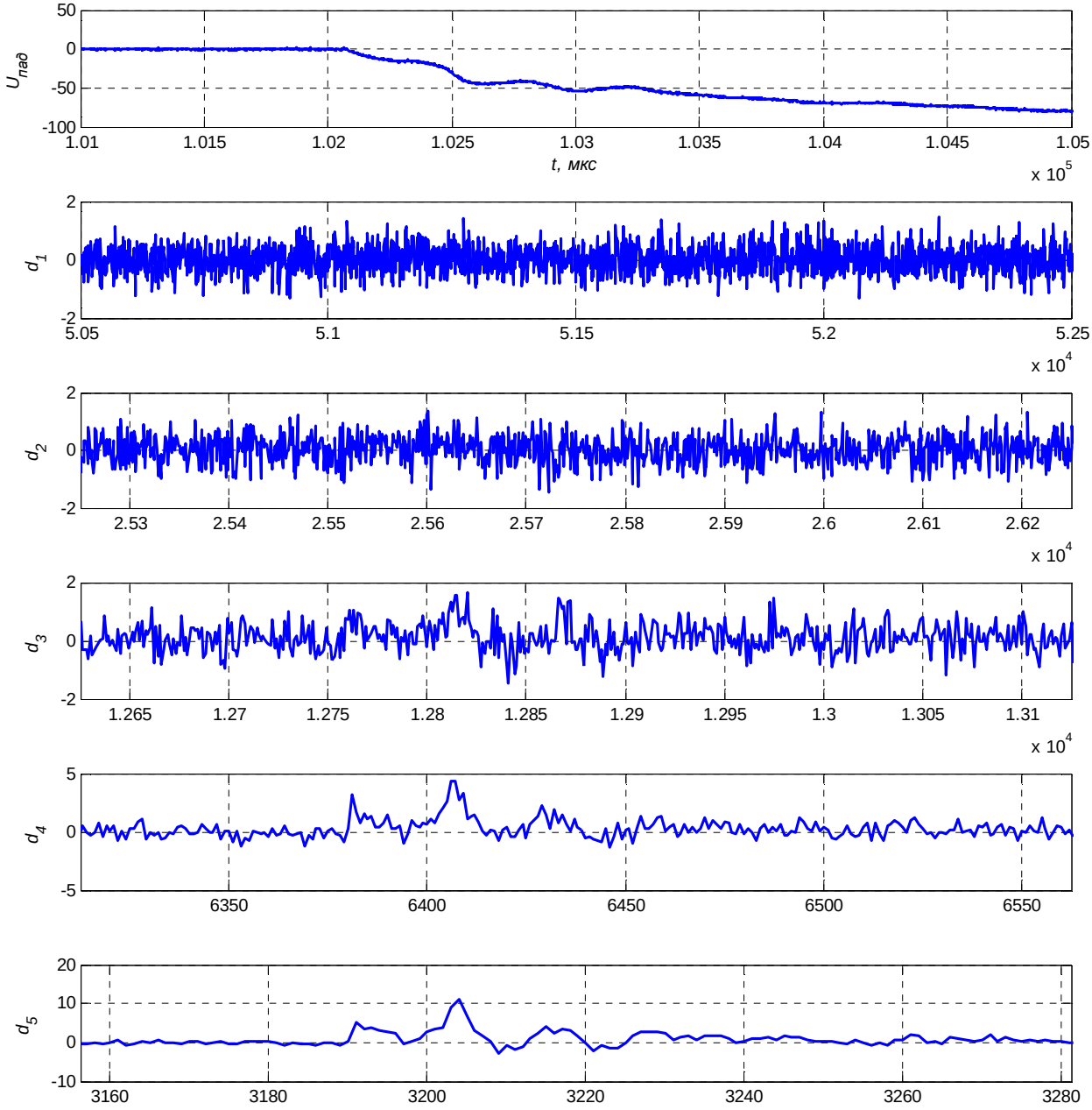


Рисунок 3.5 Определение времени появления фронта волны с помощью вейвлет-преобразования при отношении сигнал/помеха 60 дБ

При отношении сигнал/помеха менее 40 дБ ВП уже не позволяет различить фронт волны (Рисунок 3.6). Небольшой всплеск наблюдается на пятом уровне детализации, но он имеет смещение относительно фронта первой волны.

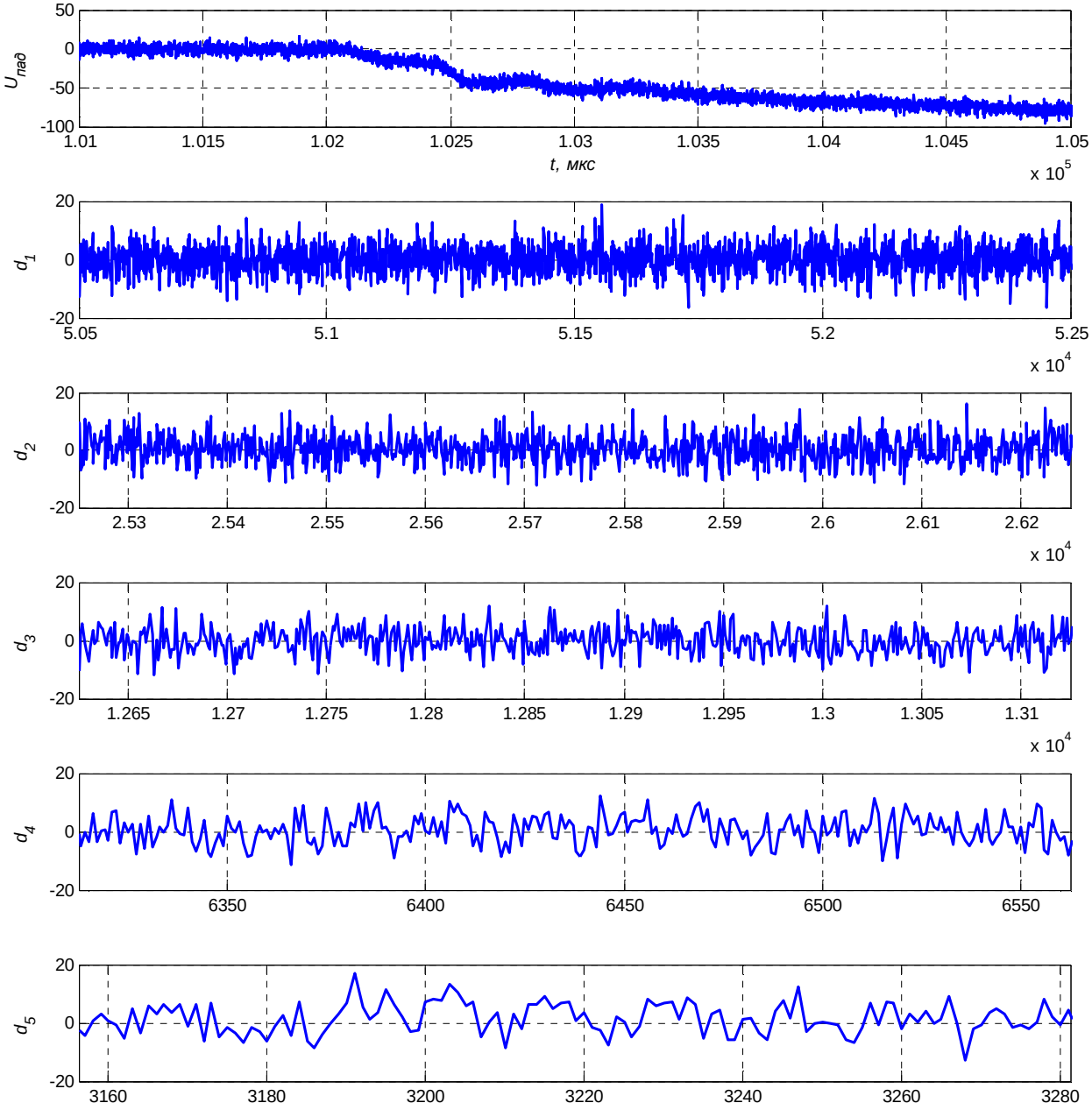


Рисунок 3.6 Определение времени появления фронта волны с помощью вейвлет-преобразования при отношении сигнал/помеха 40 дБ

3.1.3 Методы анализа сигналов во временной области

Наибольшее распространение среди способов анализа сигналов во временной области получили: непосредственное сравнение сигнала с пороговом значением, метод спуска, производная сигнала и статистические методы.

Первым способом определения времени появления волны в точке контроля во временной области является использование порога без каких-либо дополнительных преобразований над сигналов аварийных составляющих. Развитием данного способа является

способ аппроксимация фронта волны до пересечения с нулевым значением сигнала (метод спуска). Метод расчет производной сигнала и сравнения с порогом позволяет определить места «резкого» изменения значения сигнала.

Скорость нарастания фронта сильно зависит от пробега по линии и поэтому, например в случае близких КЗ, имеется сильное различие в крутизне фронта на концах ВЛ. Поэтому при использовании статического порога значение времени появления фронта волны будет зависеть от скорости нарастания фронта волны и, следовательно, эти способы могу приводить к существенным ошибкам при ОМП. Описанные способы также не позволяют фиксировать фронт в случае наличия сильных помех.

Исходя из проведенного анализа способов фиксации времени фронтов волн в работе предложено использовать статистические методы, а именно коэффициент эксцесса [47]. Для ОМП предлагается рассчитывать коэффициент эксцесса для аварийных составляющих падающих волн междуфазных волновых каналов [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54]. Коэффициент эксцесса является мерой остроты пика распределения случайной величины и рассчитывается по выражению

$$K_E = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3, \tag{3.5}$$

где μ_4 и σ – четвертый и второй центральные моменты статистического распределения соответственно, определяемые как

$$\mu_4 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^4, \tag{3.6}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2, \tag{3.7}$$

где x_i — исследуемый сигнал, n — число точек в сигнале, $\bar{x}$ — среднее арифметическое значение [47].

При отсутствии переходного процесса (до появления фронта волны) сигнал аварийных составляющих определяется уровнем помех в токах и напряжениях ВЛ и подчиняется нормальному распределению, поэтому значение коэффициента эксцесса для данного сигнала будет находиться на уровне нуля. При наличии переходного процесса коэффициент эксцесса сигнала резко возрастает, и появление фронта волны фиксируется в момент превышения коэффициентом эксцесса величины заданного порогового значения. Чувствительность коэффициента эксцесса к отклонению функции распределения от нормального закона очень высока. Это позволяет достаточно точно определить факт появления фронта волны [53], [54].

Уровень помех в сигнале также, как и для вейвлет преобразования оказывает влияние на эффективность метода (Рисунок 3.7, Рисунок 3.8, Рисунок 3.9). Однако, в отличие от вейвлет преобразования способ работает до отношений сигнал/помеха около 40 дБ. Представленные зависимости (Рисунок 3.7, Рисунок 3.8, Рисунок 3.9) получены при однофазном КЗ фазы А на расстоянии 40 км в ВЛ 1 с последующим расчетом аварийных составляющих падающей волны первого волнового канал. Размер окна коэффициента эксцесса принят равным 1000.

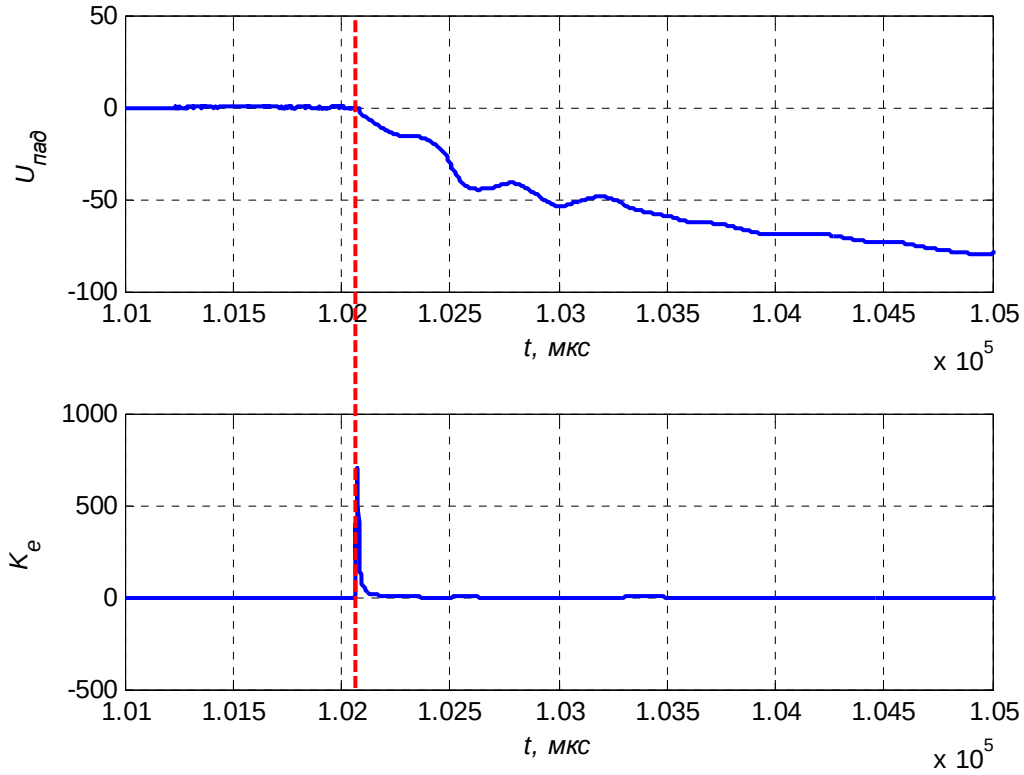


Рисунок 3.7 Определение времени появления фронта волны с помощью коэффициента эксцесса

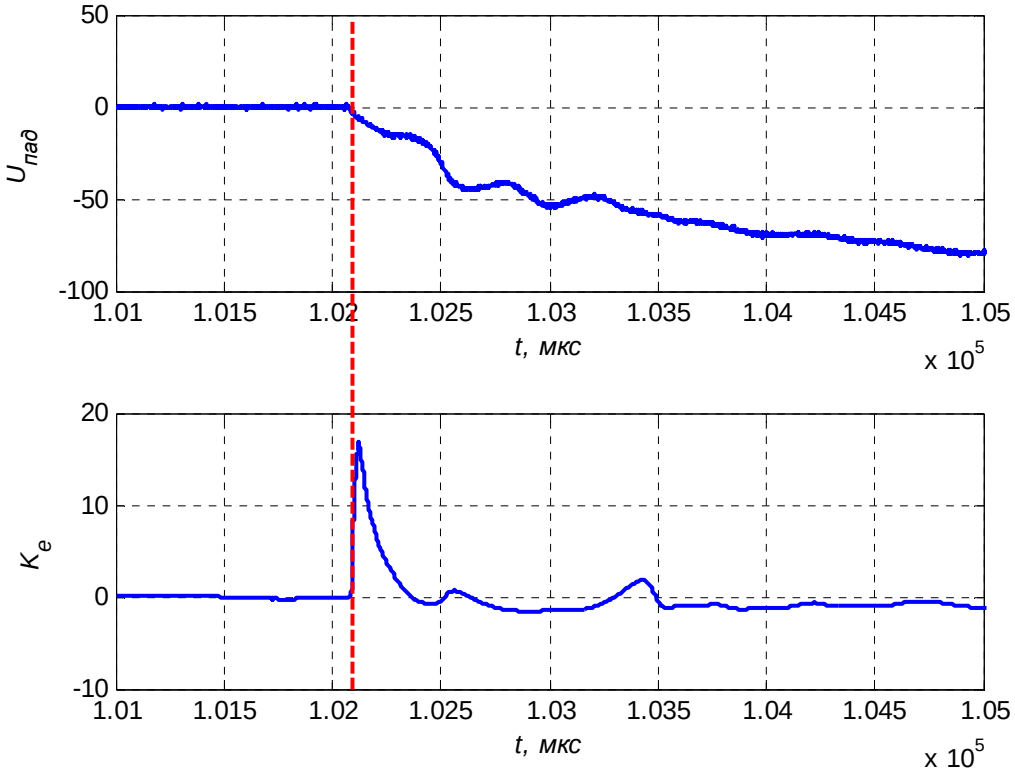


Рисунок 3.8 Определение времени появления фронта волны с помощью коэффициента эксцесса при отношении сигнал/помеха 60 дБ

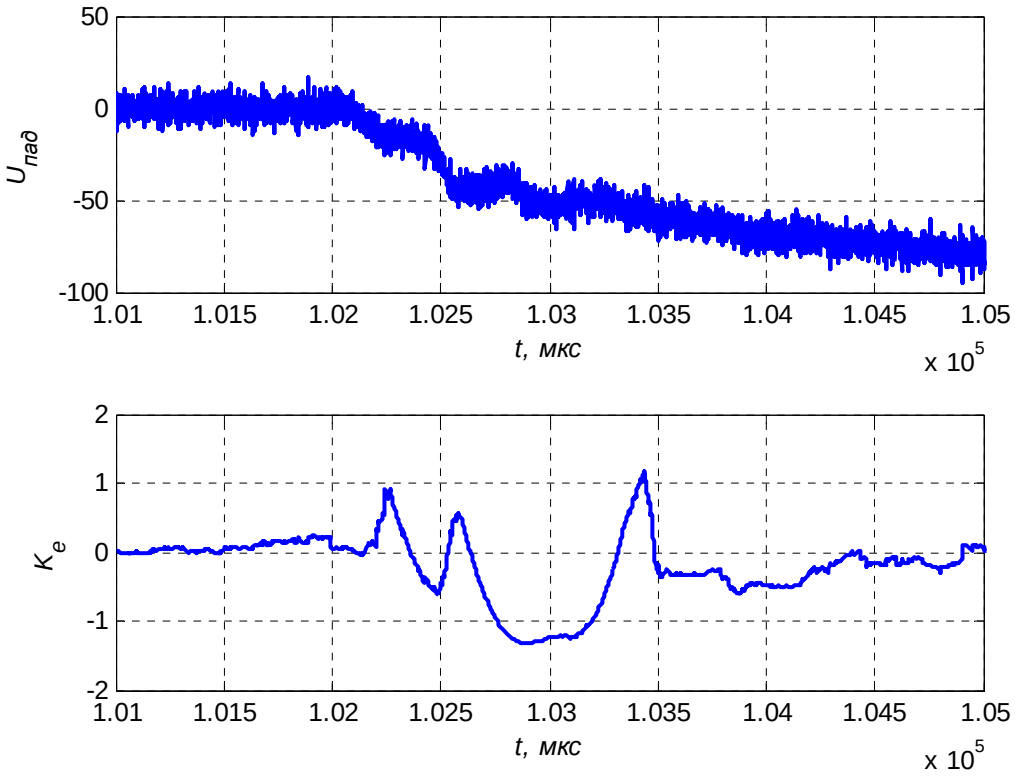


Рисунок 3.9 Определение времени появления фронта волны с помощью коэффициента эксцесса при отношении сигнал/помеха 40 дБ

Выбор порога зависит от уровня помех, так как чем сильнее шумы, тем меньше степень увеличения коэффициента эксцесса. Увеличить чувствительность коэффициента эксцесса можно увеличив размер окна расчета (Рисунок 3.10).

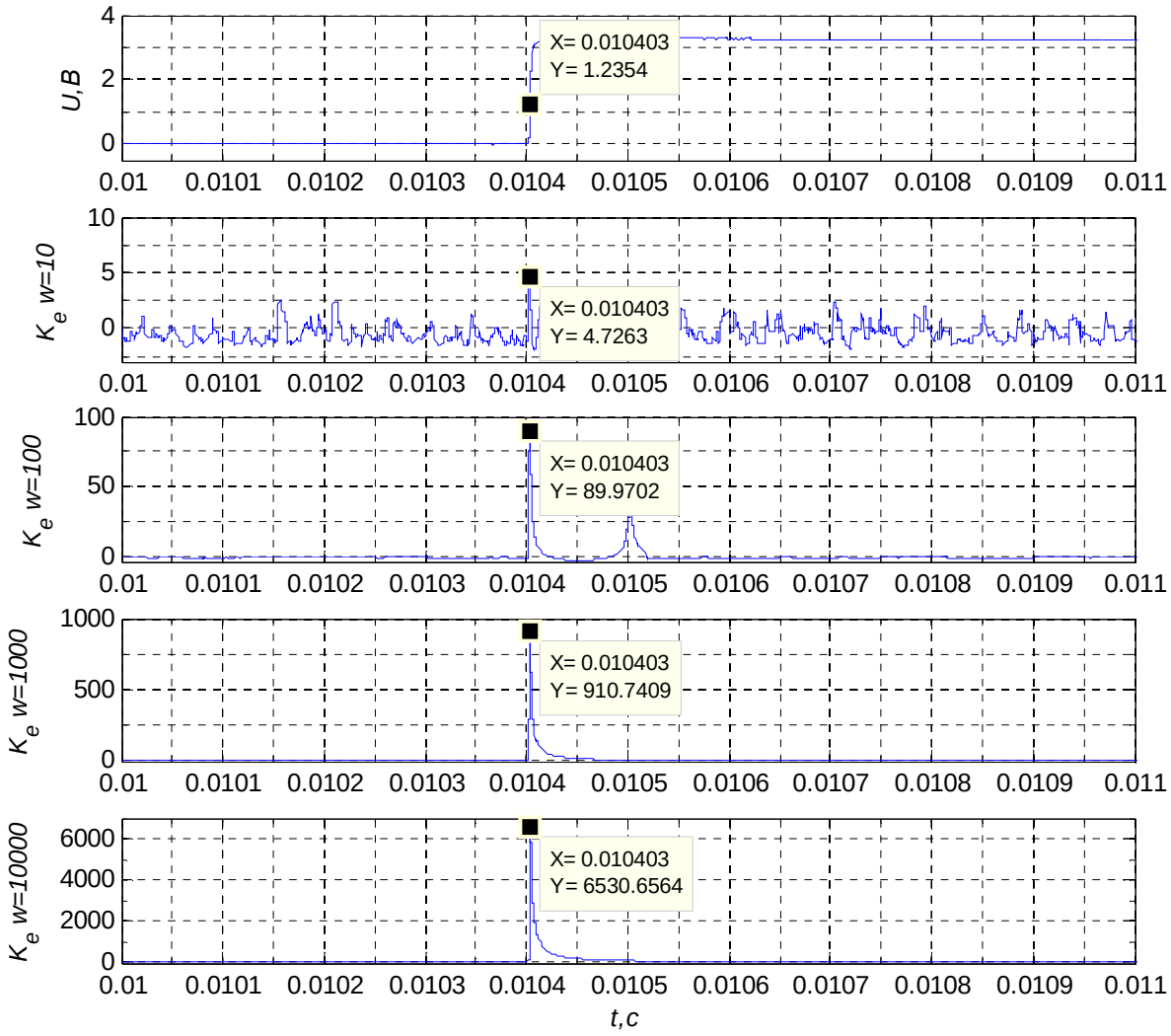


Рисунок 3.10 Влияние размера окна расчета коэффициента эксцесса

Кроме того, следует отметить еще одну особенность расчета коэффициента эксцесса — это то, что его значение не зависит от абсолютных значений входных сигналов (Рисунок 3.11).

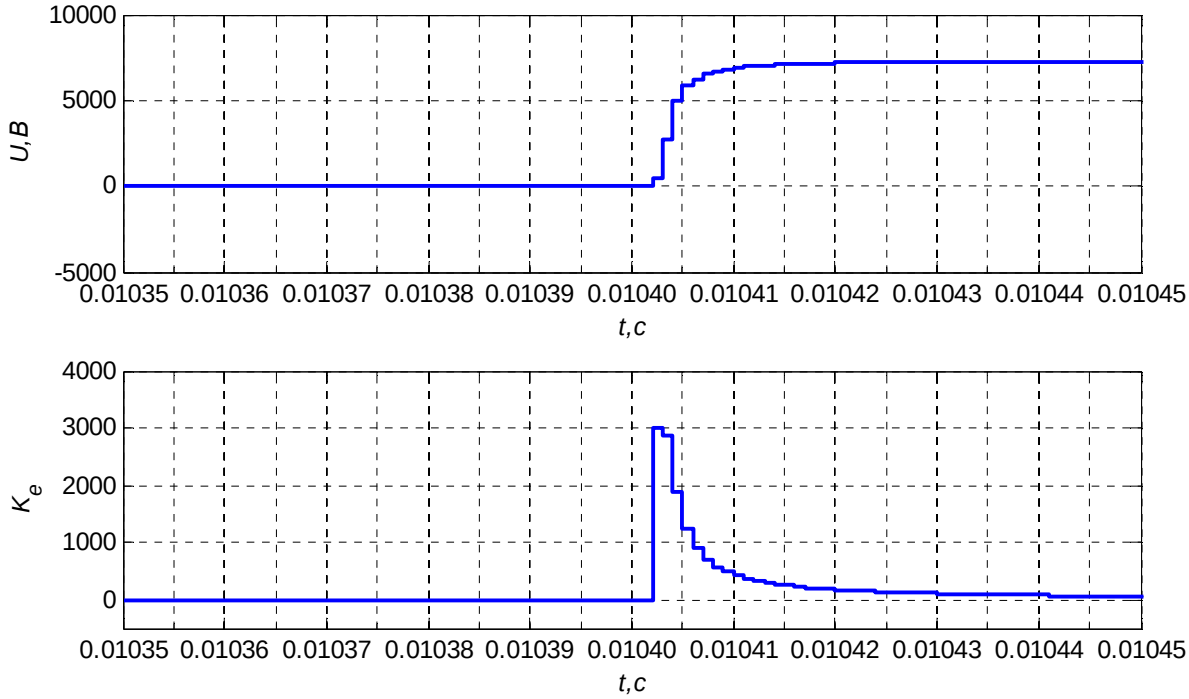


Рисунок 3.11 Независимость коэффициента эксцесса от абсолютных значений входного сигнала

3.2 Имитационное моделирование ОМП волновым методом двухсторонних измерений с применением предложенных способов повышения эффективности

При исследовании ОМП волновым методом двухсторонних измерений с применением предложенных способов повышения эффективности (далее – способа ОМП) на имитационных моделях ВЛ 110–220 кВ поставлены следующие задачи:

- оценка погрешности способа ОМП при различных параметрах повреждения (расстояние до места КЗ, вид КЗ, значение напряжения в момент КЗ, величина переходного сопротивления в месте КЗ);
- оценка погрешности способа ОМП при различных параметрах ВЛ;
- оценка погрешности способа ОМП при наличии транспозиции ВЛ;
- оценка погрешности способа ОМП при различном количестве отходящих ВЛ;
- оценка погрешности способа ОМП при различных частотных характеристиках измерительных трансформаторов тока и напряжения;
- оценка погрешности способа при различных отношениях полезный сигнал/помеха.

Дополнительно поставлена задача оценки работоспособности способа на сигналах, полученных регистраторами на ПС ЕНЭС.

Благодаря особенностям волновых процессов и работе способа на аварийных составляющих в работе опущена задача оценки погрешности способа ОМП при различных режимах работы энергосистемы.

При моделировании (Рисунок 3.12) используются программа ATP/EMTP для проведения имитационного моделирования переходных процессов в электрической сети и программа Matlab/Simulink для имитационного моделирования способа ОМП. Программы Matlab/Simulink и ATP/EMTP не имеют механизмов взаимодействия в реальном времени. Их взаимодействие происходит через файловую систему. При этом формат выходных данных программы ATP/EMTP не совместим с программой Matlab и перед передачей данных в Matlab проводится преобразование файлов ATP/EMTP с помощью программы GTPPlot.

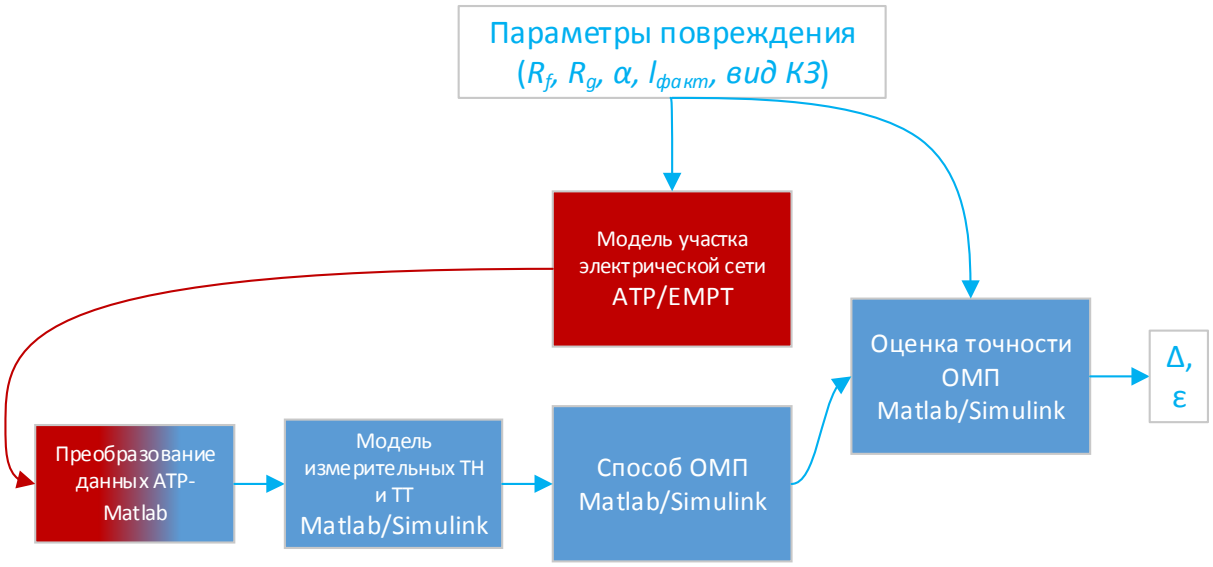


Рисунок 3.12 Схема имитационного моделирования способа ОМП и электрической сети

Параметры повреждения задаются вручную при вводе модели ВЛ в программе ATPDraw. К ним относятся: активное переходное сопротивление в месте КЗ (сопротивление на землю – R_g, междуфазное сопротивление – R_f), мгновенное значение напряжения в момент повреждения в месте повреждения (определяется углом напряжения в месте повреждения, при котором возникает повреждение (α)), расстояние до места повреждения ($l_{факт}$), вид короткого замыкания (однофазные замыкания на землю $K^{(1)}$ (*AG*, *BG*, *CG)*, междуфазные замыкания $K^{(2)}$ (*AB*, *BC*, *AC*), междуфазные замыкания на землю $K^{(2)}$ (*ABG*, *BCG*, *ACG*), трехфазные замыкания $K^{(3)}$ (*ABC*, *ABCG*)).

В блоке оценки точности ОМП определяется относительная погрешность по выражению

$$\varepsilon = \left| \frac{l_{факт} - l_{рассчит}}{L} \right| \cdot 100\% , \quad (3.8)$$

где $l_{факт}$ – фактическое расстояние до места повреждения, заданное при моделировании электрической сети, $l_{рассчит}$ – расстояние до места повреждения, зафиксированное способом ОМП, L – длина линии.

Абсолютная погрешность определяется по выражению

$$\Delta = \left| l_{факт} - l_{рассчит} \right| . \quad (3.9)$$

При фиксации результатов моделирования в выражениях (3.8) и (3.9) используется максимальное значение разницы $|l_{факт} - l_{рассчит}|$ в случае проведения нескольких опытов.

Комплексная схема реализации способа ОМП (Рисунок 3.13) содержит два устройства ОМП, подключаемых к измерительным ТН и ТТ, систему синхронизации, информационную сеть для обмена метками времени появления волн и пусковой орган. При моделировании способа ОМП и электрической сети не учитывались: погрешность синхронизации, особенности технического обеспечения устройства ОМП, характеристики пускового органа и информационной сети.

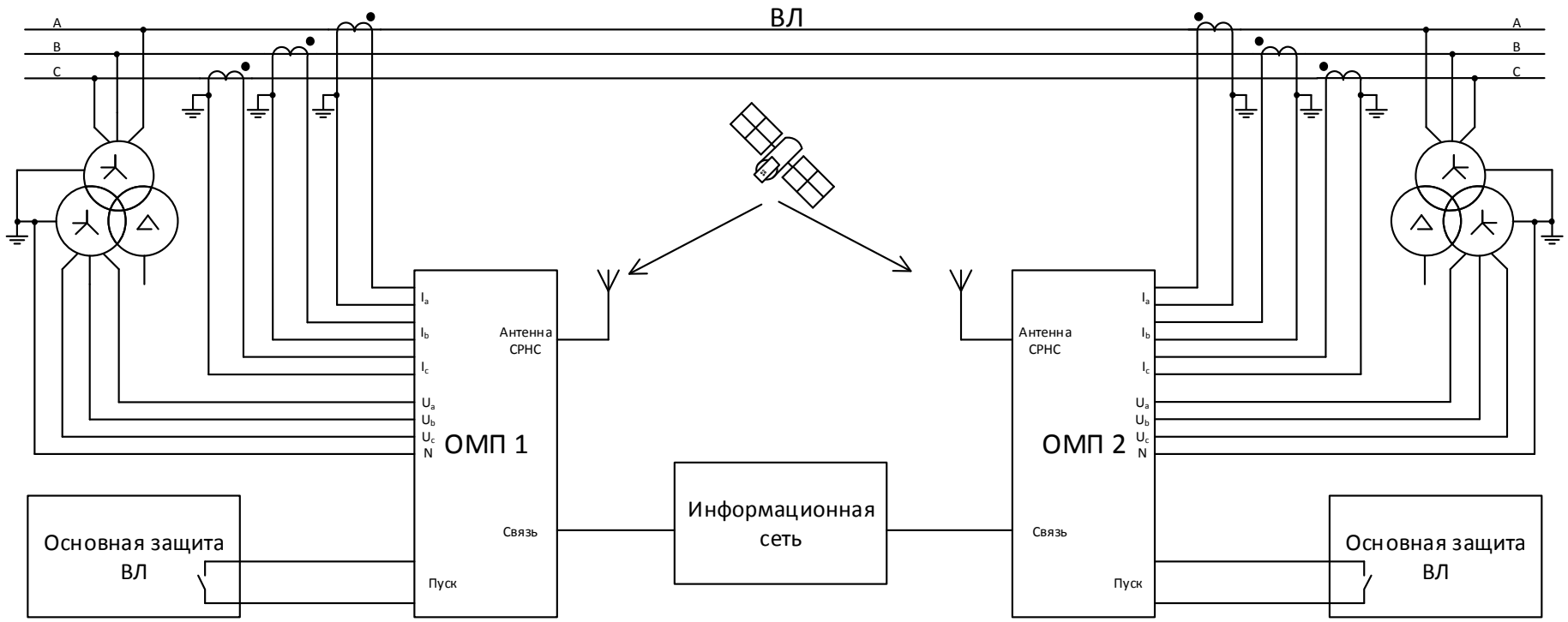


Рисунок 3.13 Комплексная схема ОМП волновым методом двухсторонних измерений

Модель способа ОМП (Рисунок 3.14) содержит два блока определения времени появления фронта волны (*Fault Location A*, *Fault Location B*) и блок расчета расстояния до места повреждения (*Fault Distance Estimation*). На входы блоков определения времени появления фронта волны подаются данные о фазных токах и напряжениях с противоположных концов ВЛ. Блок расчета расстояния *Fault Distance Estimation* получает информацию о метках времени и рассчитывает расстояние до места повреждения по выражению (1.7). Параметрами блока расчета расстояния являются скорость распространения волны в линии, принятая равной скорости света в вакууме ($c \approx 299793 \frac{км}{с}$), и длина исследуемой линии (L).

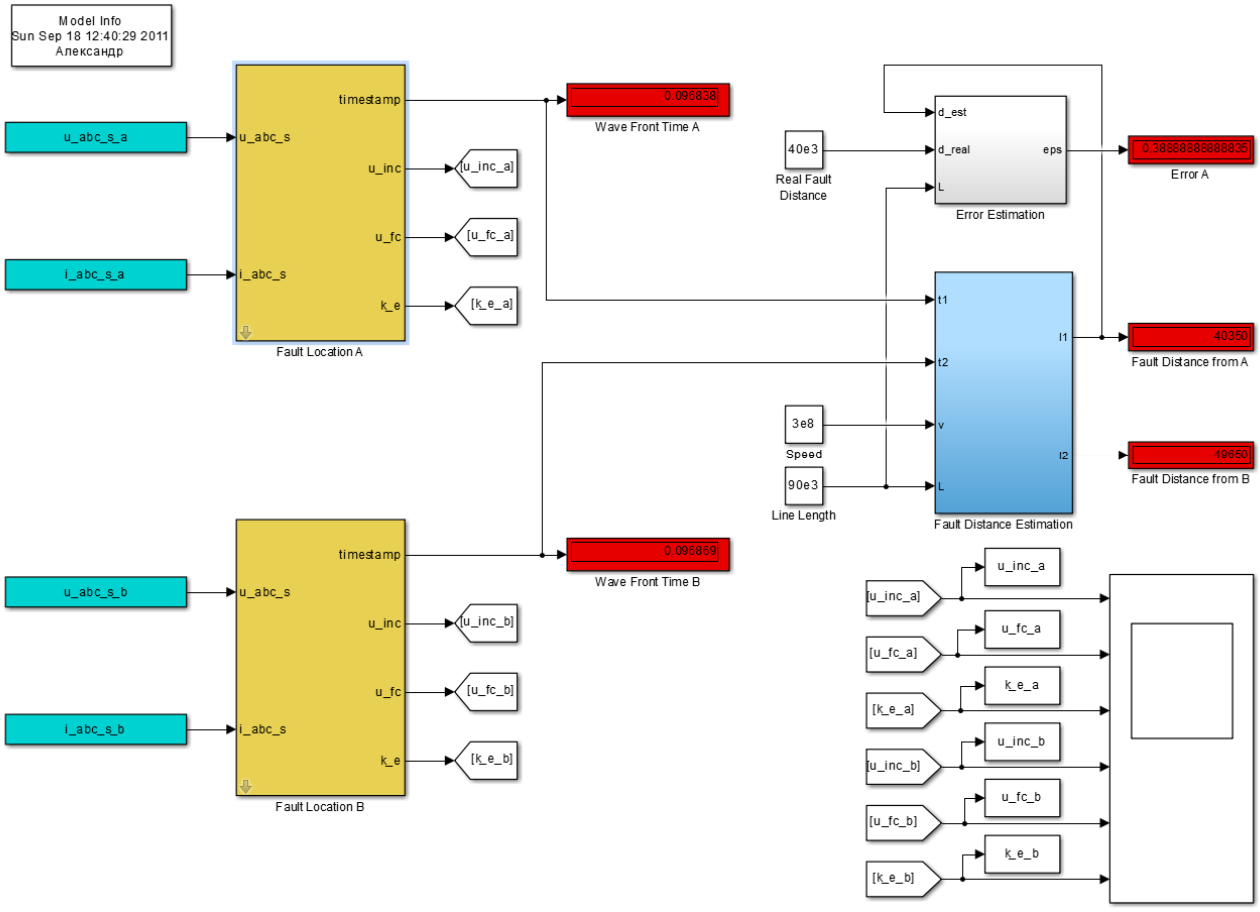


Рисунок 3.14 Модель способа ОМП в программе Simulink

Способ ОМП частично описан на языке Matlab, частично состоит из базовых элементов программы Simulink (Рисунок 3.15). В блоке определения времени появления фронта волны (*Fault Location*) задаются следующие параметры: матрицы преобразований напряжений $\boldsymbol{T_u}$ и токов $\boldsymbol{T_i}$ в модальные координаты, матрица волновых сопротивлений $\boldsymbol{Z_{в,м}}$, размер окна расчета коэффициента эксцесса (*ke_buf_size*) и величина порога срабатывания (*th_value*). Размер окна коэффициента эксцесса принят равным 1000, величина порога срабатывания – 100.

Матрицы $\boldsymbol{T_u}$ и $\boldsymbol{T_i}$ для соответствующих ВЛ получены в Главе 2. Волновое сопротивление предварительно приведено ко вторичной стороне по выражению

$$Z' = Z \cdot \frac{\frac{U_{ns}}{U_{np}}}{\frac{I_{ns}}{I_{np}}}. \tag{3.10}$$

где U_{np}, U_{ns} – номинальные значения на первичных и вторичных обмотках измерительных ТН, I_{np}, I_{ns} – номинальные значения тока на первичных и вторичных обмотках измерительных ТТ, $\boldsymbol{Z_{в,м}}$ – волновое сопротивление, по первичной стороне.

Матрица $\boldsymbol{Z'_{в,м}}$ для ВЛ 1 (2.33), пересчитанная на вторичную сторону, равна

$$Z'_{в,м} \approx \begin{pmatrix} 180 & 0 & 0 \\ 0 & 188 & 0 \\ 0 & 0 & 314 \end{pmatrix}. \tag{3.11}$$

Матрица $\boldsymbol{Z'_{в,м}}$ для ВЛ 2 (2.39) равна

$$Z'_{в,м} \approx \begin{pmatrix} 237 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 194 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 187 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 219 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 215 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 248 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 462 \end{pmatrix}. \tag{3.12}$$

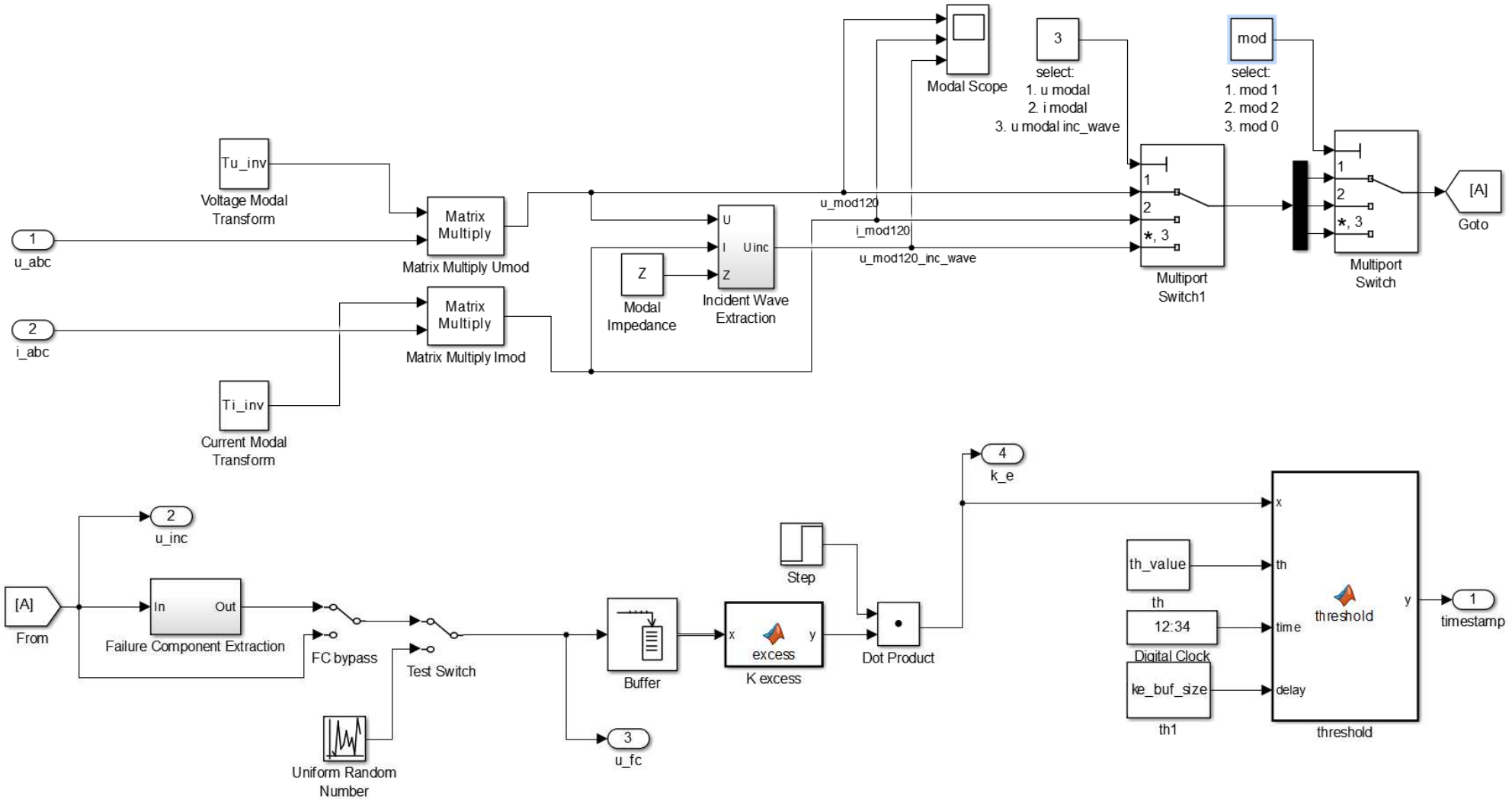


Рисунок 3.15 Модель способа определения времени появления фронта волны в точке контроля

Схема участка электрической сети (Рисунок 3.16) состоит из источников напряжения E_a, E_b, активно-индуктивных сопротивлений Z_a, Z_b, силовых выключателей Q_a, Q_b и модели ВЛ. Параметры модели ВЛ равны параметрами ВЛ 1(Таблица 2.1). Действующее значение фазного напряжения источников E_a, E_b составляет 220/√3 кВ, частота напряжения 50 Гц. Эквивалентные сопротивления энергосистем Z_a, Z_b приняты равными $1 + i \cdot 15$ Ом. Активно-индуктивный характер сопротивлений Z_a, Z_b соответствует наиболее тяжелому случаю для измерения волн [107], когда амплитуда тока волны в первый момент времени минимальна.

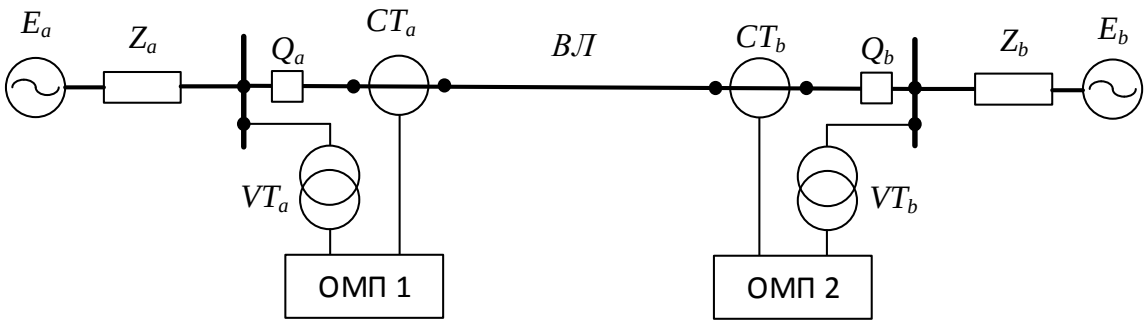


Рисунок 3.16 Схема участка электрической сети с ВЛ 1

Для передачи мощности по линии между источниками напряжения установлен постоянный угол, который определяется по выражению

$$\delta = \arcsin\left(\frac{P \cdot x}{U_1 \cdot U_2}\right), \tag{3.13}$$

где x – реактивное сопротивление линии и энергосистемы, U_1, U_2 – линейные напряжения источников, P – передаваемая по линии мощность. Среднее значение пропускной способности ВЛ 220 кВ согласно [33] составляет 135 МВт. Реактивное сопротивление ВЛ 1 прямой последовательности составляет $x = 1{,}38 \cdot 10^{-3}$ Гн/км. Значение угла между источниками напряжения составляет

$$\delta = \arcsin\left(\frac{135 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (1{,}38 \cdot 10^{-3} \cdot 90 + 2 \cdot 50 \cdot 10^{-3})}{220 \cdot 10^3 \cdot 220 \cdot 10^3}\right) \cdot \frac{180}{\pi} = 11{,}3^\circ \tag{3.14}$$

Выключатели Q_a и Q_b отключают ВЛ через 40 мс после возникновения повреждения, имитируя срабатывания средств РЗ.

В программе ATP производится серия моделирований с различными состояниями ключей *SWL*, задающих расстояние до места повреждения $l_{факт}$ (Рисунок 3.17). Величина переходного сопротивления на землю задается параметром R_g, междуфазного сопротивления – R_f. Как

правило, R_g редко превышает 1 кОм, а R_f = 0,5 Ом [5]. Вид КЗ определяется состоянием ключей *SWF*. В программе ATP сопротивления Z_a, Z_b дополнительно шунтированы активным сопротивлением величиной 1 МОм.

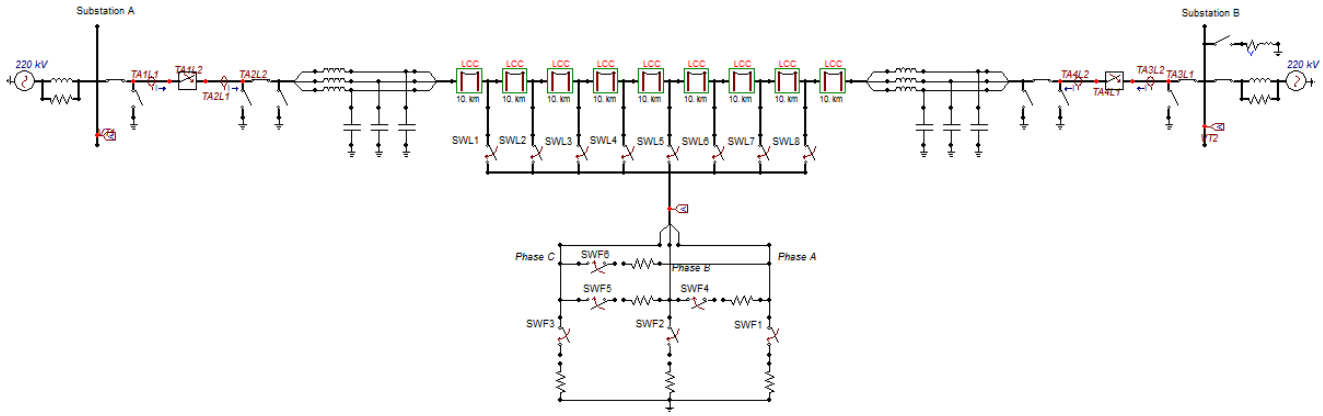


Рисунок 3.17 Модель ВЛ 1 в программе ATPDraw

Шаг моделирования принят равным 0,5 мкс. Повреждение моделируется замыканием одного из ключей в момент времени t_f, значение которого определяется углом напряжения повреждаемой фазы в случае КЗ на землю или углом междуфазного напряжения. В интервале времени $t_0 - t_f$ наблюдается установившийся режим, t_f – (t_f + 30 мс) – аварийный процесс, (t_f + 30 мс – 200 мс) – после аварийный процесс.

Перед началом исследования модель участка электрической сети для программы ATP/EMTP была верифицирована с помощью программы Matlab/Simulink и входящего в него блока SimPowerSystems. Параметры модели в программе Matlab/Simulink установлены равными параметрам в программе ATP/EMTP. Ниже (Рисунок 3.18) представлены осциллограммы переходного процесса при КЗ фазы А на землю, рассчитанные в двух программах и наложенные друг на друга.

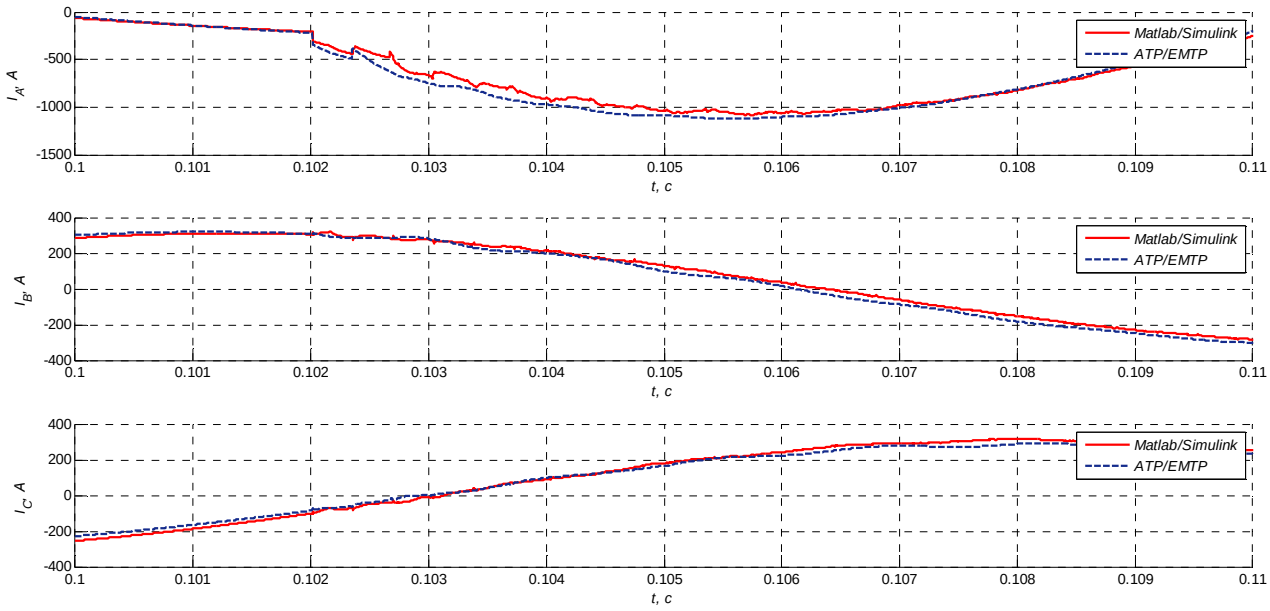


Рисунок 3.18 Сравнение осциллограмм фазных токов, полученные в программах Matlab/Simulink и ATP/EMTP

Осциллограммы начала переходного процесса, полученные в программах Matlab/Simulink и ATP/EMTP (Рисунок 3.18), качественно совпадают между собой и согласуются с результатами полученными в [6]. Стоит отметить, что применяемая в Matlab/Simulink модель Бержерона не учитывает поверхностный эффект, поэтому волны в осциллограммах из ATP/EMTP затухают сильнее. Кроме того, среднеквадратические значения предаварийных и аварийных токов, полученные в программе ATP/EMPT ($I_{пред}$ = 195 А, $I_{авар}$ = 748 А) совпадают с токами, полученными в программе Matlab/Simulink ($I_{пред}$ = 190 А, $I_{авар}$ = 770 А) Совпадение результатов моделирования показывает возможность применения модели электрической сети для исследования переходных процессов.

3.2.1 Оценка погрешности способа ОМП при различных видах КЗ

Для исследования влияния вида КЗ на погрешность способа установлены следующие параметры модели: тип линии – ВЛ 1, величина переходного сопротивления R_g = 100 Ом (для КЗ на землю), R_f = 0,5 Ом (для междуфазных КЗ), угол напряжения, при возникновении повреждения – 30°.

В качестве примера показаны промежуточные результаты работы способа ОМП (Рисунок 3.19) со стороны ПС А при КЗ фазы А на землю и расстоянии до места КЗ равном 30 км. Значение коэффициента эксцесса по аварийным составляющим начинает резко возрастать в момент появления волны.

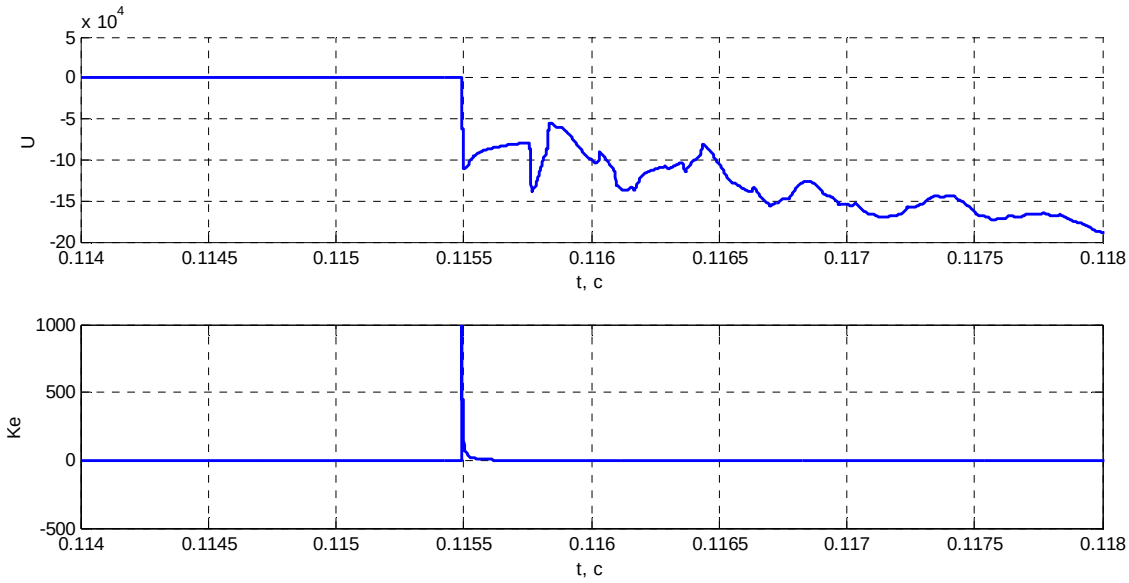


Рисунок 3.19 Аварийные составляющие падающей волны первого волнового канала и коэффициент эксцесса по аварийным составляющим при КЗ фазы А на землю со стороны ПС А

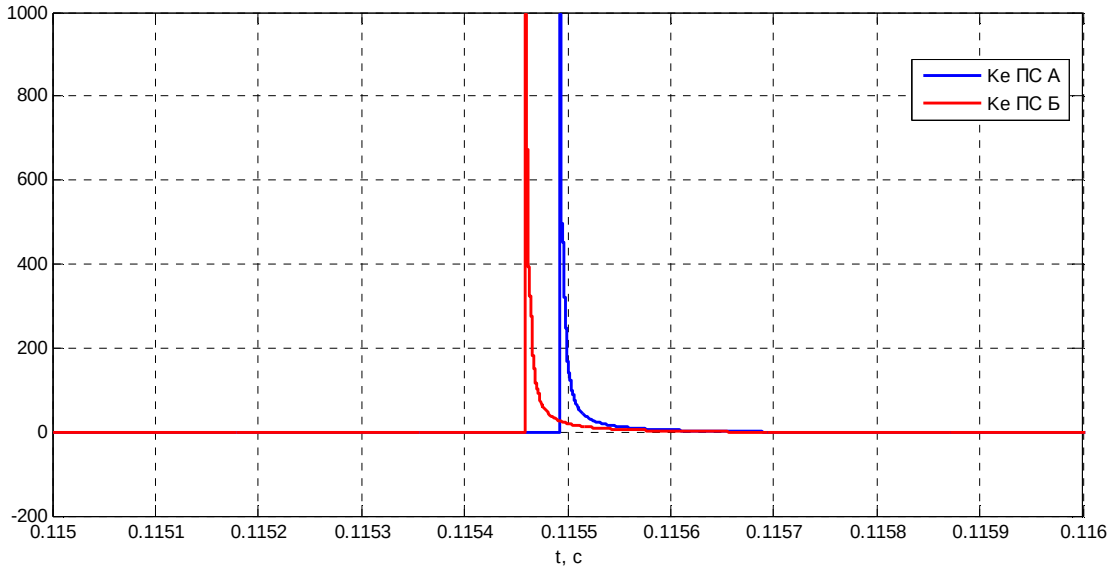


Рисунок 3.20 Значение коэффициента эксцесса на ПС А и ПС Б

Разница между временами «резкого» увеличения коэффициента эксцесса (Рисунок 3.20) на ПС А и ПС Б определяет Δt в расчетном выражении (1.7). Таблица 3.1 и Таблица 3.2 содержат полные результаты моделирования, при котором оценивалась абсолютная (Δ) и относительная (ε) погрешности в зависимости от вида КЗ и расстояния до места повреждения для различных волновых каналов. Основным параметром оценки волнового ОМП является абсолютная погрешность, относительная является вспомогательной для сравнения с методами по ПАР.

Таблица 3.1 Погрешность способа ОМП при различных видах КЗ и различных расстояниях до места повреждения (первый волновой канал)

Δ, м/ε, %	Расстояние до места повреждения, км							
Вид КЗ	10	20	30	40	50	60	70	80
AG	373/0,41	267/0,29	10/0,01	53/0,05	53/0,05	10/0,01	267/0,29	224/0,24
BG	224/0,24	267/0,29	10/0,01	96/0,10	203/0,22	10/0,01	267/0,29	373/0,41
CG	224/0,24	267/0,29	10/0,01	96/0,10	203/0,22	10/0,01	267/0,29	224/0,24
AB	224/0,24	117/0,13	10/0,01	53/0,05	53/0,05	160/0,17	267/0,29	373/0,41
BC	373/0,41	416/0,46	160/0,17	53/0,05	53/0,05	10/0,01	267/0,29	523/0,58
AC	224/0,24	267/0,29	160/0,17	53/0,05	203/0,22	160/0,17	267/0,29	224/0,24
ABG	224/0,24	117/0,13	10/0,01	53/0,05	53/0,05	160/0,17	267/0,29	373/0,41
BCG	373/0,41	416/0,46	160/0,17	53/0,05	53/0,05	10/0,01	267/0,29	523/0,58
ACG	224/0,24	267/0,29	160/0,17	53/0,05	53/0,05	160/0,17	267/0,29	373/0,41
ABC	523/0,58	267/0,29	10/0,01	96/0,10	203/0,22	10/0,01	267/0,29	373/0,41
ABCG	523/0,58	267/0,29	10/0,01	96/0,10	203/0,22	10/0,01	267/0,29	373/0,41

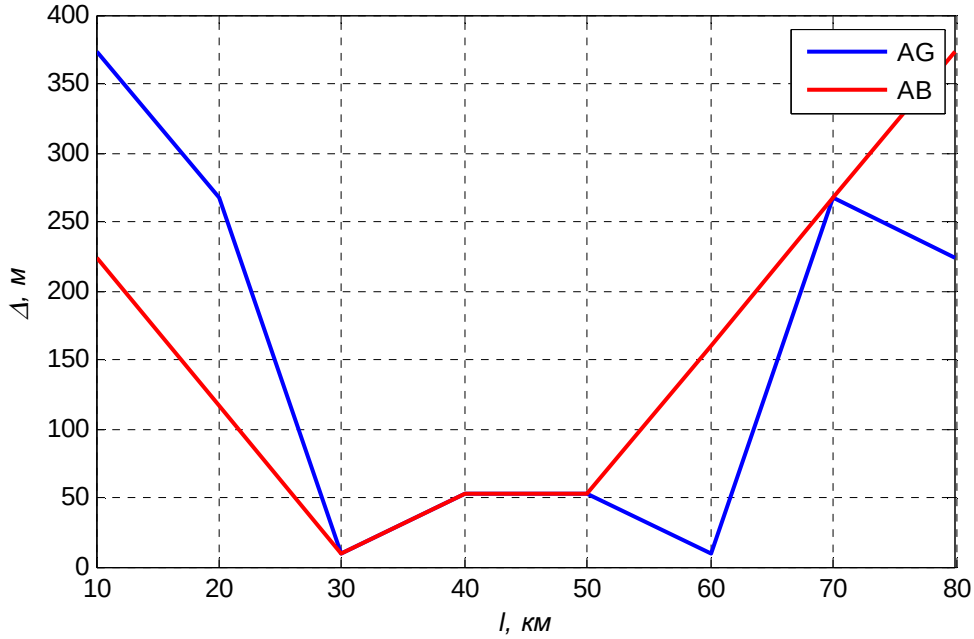


Рисунок 3.21 Абсолютная погрешность способа ОМП при различных видах КЗ и различных расстояниях до места повреждения (первый волновой канал)

Таблица 3.2 Погрешность способа ОМП при различных видах КЗ и различных расстояниях до места повреждения (второй волновой канал)

Δ, м/ε, %	Расстояние до места повреждения, км							
Вид КЗ	10	20	30	40	50	60	70	80
AG	373/0,41	267/0,29	10/0,01	96/0,10	53/0,05	10/0,01	267/0,29	373/0,41
BG	75/0,08	267/0,29	10/0,01	53/0,05	53/0,05	10/0,01	267/0,29	224/0,24
CG	224/0,24	267/0,29	10/0,01	96/0,10	203/0,22	10/0,01	267/0,29	224/0,24
AB	224/0,24	117/0,13	10/0,01	53/0,05	53/0,05	160/0,17	267/0,29	373/0,41
BC	373/0,41	416/0,46	160/0,17	53/0,05	53/0,05	10/0,01	267/0,29	523/0,58
AC	373/0,41	267/0,29	310/0,34	53/0,05	203/0,22	310/0,34	267/0,29	224/0,24

ABG	224/0,24	117/0,13	10/0,01	53/0,05	53/0,05	160/0,17	267/0,29	373/0,41
BCG	523/0,58	416/0,46	160/0,17	53/0,05	53/0,05	10/0,01	267/0,29	523/0,58
ACG	373/0,41	267/0,29	310/0,34	53/0,05	203/0,22	310/0,34	267/0,29	224/0,24
ABC	373/0,41	267/0,29	10/0,01	96/0,10	53/0,05	10/0,01	267/0,29	224/0,24
ABCG	373/0,41	267/0,29	10/0,01	96/0,10	53/0,05	10/0,01	267/0,29	224/0,24

Из таблиц видно, что значения абсолютной погрешности при различных расстояниях от места повреждения и различных видах КЗ не превышают 523 м. Существенной разницы погрешностей в зависимости от используемых волновых каналов при одном виде КЗ не наблюдается. Поэтому в способе ОМП может использовать любой междуфазный волновой канал, однако рабочие волновые каналы на удаленных устройствах должны совпадать, иначе их различие может привести к увеличению погрешности способа.

Можно заметить увеличение погрешности при близких КЗ (l < 20 км). Случай близких КЗ дополнительно рассмотрен для однофазного и междуфазного КЗ.

Таблица 3.3 Относительная погрешность способа ОМП при различных видах КЗ и различных расстояниях до места повреждения (первый волновой канал)

Δ, м/ε, %	Расстояние до места повреждения, км									
Вид КЗ	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
AG	729/0,81	527/0,58	626/0,69	125/0,13	373/0,41	172/0,19	28/0,03	229/0,25	431/0,47	267/0,29
AB	1028/1,14	527/0,58	776/0,86	425/0,47	373/0,41	172/0,19	28/0,03	229/0,25	431/0,47	267/0,29

Моделирование близких КЗ (Таблица 3.3) указывает на высокую погрешность способа ОМП при КЗ на расстоянии менее 5 км до ПС.

3.2.2 Оценка погрешности способа ОМП при различных значениях переходного сопротивления в месте КЗ

За основу принята модель из § 3.2.1 со следующими параметрами: тип линии – ВЛ 1, вид повреждения – КЗ фазы А на землю (AG), угол напряжения фазы А, при возникновении повреждения – 30°, расчет по первому волновому каналу.

Таблица 3.4 Погрешность способа ОМП при различных расстояниях до места повреждения и различных переходных сопротивлениях в месте КЗ

Δ, м/ε, %	Расстояние до места повреждения, км							
$R_п$, Ом	10	20	30	40	50	60	70	80
10^{-3}	373/0,41	267/0,29	10/0,01	96/0,10	53/0,05	10/0,01	267/0,29	224/0,24
10	373/0,41	267/0,29	10/0,01	96/0,10	53/0,05	10/0,01	267/0,29	224/0,24
100	373/0,41	267/0,29	10/0,01	53/0,05	53/0,05	10/0,01	267/0,29	224/0,24
1000	373/0,41	267/0,29	10/0,01	53/0,05	53/0,05	160/0,17	267/0,29	373/0,41

Абсолютная погрешность при всех значениях R_n не превышает 373 м. Подтверждается отсутствие зависимости погрешности волновых способов от величины переходного сопротивления в месте КЗ.

3.2.3 Оценка погрешности способа ОМП при различных мгновенных значениях напряжения при возникновении повреждения

Мгновенное значение напряжения задается углом напряжения. Параметры модели: тип линии – ВЛ 1, вид повреждения – КЗ фазы А на землю (AG), переходное сопротивление R_n = 100 Ом, расчет по первому волновому каналу.

Таблица 3.5 Погрешность способа ОМП при различных расстояниях до места повреждения и различных углах напряжения при возникновении повреждения

Δ, м/ε, %	Расстояние до места повреждения, км							
α	10	20	30	40	50	60	70	80
0˚	373/0,41	182/0,20	160/0,17	53/0,05	53/0,05	160/0,17	267/0,29	75/0,08
15˚	373/0,41	267/0,29	160/0,17	96/0,10	53/0,05	160/0,17	267/0,29	373/0,41
30˚	373/0,41	267/0,29	10/0,01	53/0,05	53/0,05	10/0,01	267/0,29	224/0,24
45˚	373/0,41	117/0,13	10/0,01	53/0,05	96/0,10	160/0,17	117/0,13	373/0,41
60˚	224/0,24	267/0,29	160/0,17	53/0,05	203/0,22	160/0,17	267/0,29	224/0,24
75˚	373/0,41	267/0,29	10/0,01	53/0,05	53/0,05	10/0,01	416/0,46	224/0,24
90˚	373/0,41	117/0,13	160/0,17	53/0,05	53/0,05	310/0,34	117/0,13	373/0,41
105˚	224/0,24	267/0,29	160/0,17	53/0,05	203/0,22	10/0,01	267/0,29	224/0,24
120˚	373/0,41	267/0,29	160/0,17	96/0,10	53/0,05	160/0,17	267/0,29	373/0,41
135˚	224/0,24	117/0,13	10/0,01	53/0,05	53/0,05	310/0,34	117/0,13	373/0,41
150˚	373/0,41	267/0,29	160/0,17	96/0,10	53/0,05	160/0,17	267/0,29	224/0,24
165˚	373/0,41	267/0,29	10/0,01	53/0,05	53/0,05	160/0,17	267/0,29	373/0,41

Абсолютная погрешность при различных углах α не превышает 416 м. Явной зависимости погрешности способа от угла напряжения не наблюдается.

3.2.4 Оценка влияния транспозиции на погрешность способа ОМП

Параметры модели: тип линии – ВЛ 1, вид повреждения – КЗ фазы А на землю (AG), переходное сопротивление R_n = 100 Ом, угол напряжения фазы А, при возникновении повреждения – 30˚, расчет по первому волновому каналу. В модель ВЛ 1 (§ 3.2.1) добавлен полный цикл транспозиции с шагом 30 км.

Таблица 3.6 Влияния транспозиции на погрешность способа ОМП при различных расстояниях до места повреждения

Δ, м/ε, %	Расстояние до места повреждения, км							
Транспозиция	10	20	30	40	50	60	70	80
да	373/0,41	267/0,29	10/0,01	96/0,10	203/0,22	10/0,01	267/0,29	373/0,41
нет	373/0,41	267/0,29	10/0,01	53/0,05	53/0,05	10/0,01	267/0,29	224/0,24

Абсолютная погрешность при наличии транспозиционных опор на линии не превышает 373 м. Явной зависимость погрешности способ от наличия опор транспозиции не наблюдается.

3.2.5 Исследование способа ОМП на двухцепной линии

Исследование способа производится на модели ВЛ 2, параметры которой указаны в Главе 2. В двухцепной линии с тросом формируется 7 волновых каналов (Рисунок 2.21) и для достоверного преобразования фазных сигналов в модальные координаты требуется измерение напряжений и токов во всех цепях, а также в тросе. Однако предполагается, что устройство, реализующее предложенный способ ОМП, подключается к измерительным ТН и ТТ только одной цепи. Поэтому при преобразовании фазных сигналов в модальные принято допущение, при котором производится расчет только по трем фазам и только в тех волновых каналах, которые обладают наименьшей зависимостью от второй цепи. Например, для ВЛ 2 это первый, второй и третий волновые каналы, так как сумма модулей коэффициентов для фаз первой цепи больше, чем для второй цепи в матрицах преобразования ($\boldsymbol{T_u}$, $\boldsymbol{T_i}$).

Состояния цепей оказывают сильное влияние на параметры друг друга, и как следствие изменяются характеристики волновых каналов. Рассмотрены четыре варианта состояния двухцепной ВЛ с устройствами ОМП, установленными в первую цепь:

- обе цепи в работе, КЗ в первой цепи;
- обе цепи в работе, КЗ во второй цепи;
- первая цепь в работе, вторая цепь отключена, КЗ в первой цепи;
- первая цепь в работе, вторая цепь заземлена, КЗ в первой цепи.

Для всех вариантов включения ВЛ 2 применяются следующие параметры модели: тип линии – ВЛ 2, вид повреждения – КЗ фазы А на землю (*AG*) и междуфазное КЗ (*AB*), переходное сопротивление R_g = 100 Ом (для КЗ на землю), R_f = 0,5 Ом (для междуфазного КЗ), угол напряжения фазы А, при возникновении повреждения – 30°. Действующее значение фазного напряжения источников E_a, E_b составляет 220/√3 кВ, частота напряжения 50 Гц. Эквивалентные сопротивления энергосистемы Z_a, Z_b приняты равными $1 + i \cdot 15$ Ом. Угол между источниками напряжения соответствует суммарной передаваемой мощности по ВЛ равной 270 МВт. Места установки устройств ОМП условно обозначены как ТН и ТТ (Рисунок 3.22), при этом характеристики измерительных ТН и ТТ не учитываются.

В первом случае КЗ возникает в цепи с подключенным устройствами ОМП, а вторая цепь линии находится в нормальном режиме работы (Рисунок 3.22).

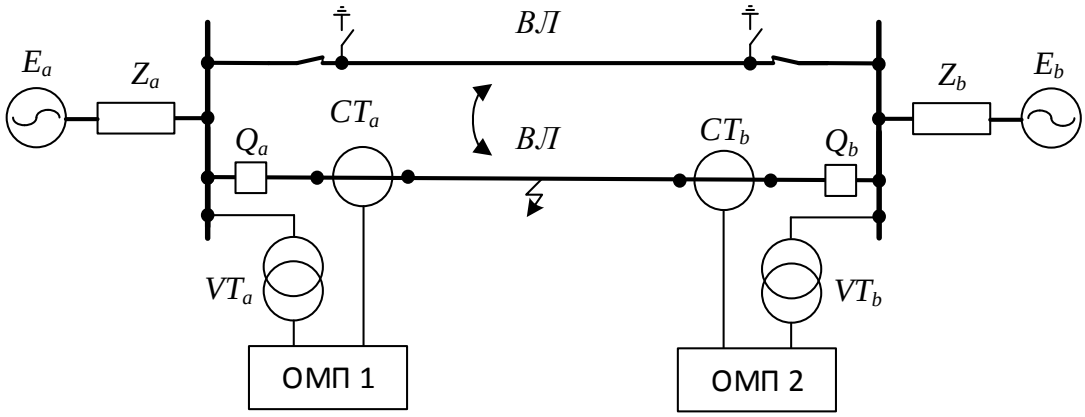


Рисунок 3.22 Схема участка электрической сети с исследуемой ВЛ

Таблица 3.7 Погрешность способа ОМП при различных расстояниях до места повреждения и различных видах КЗ

Δ, м/ε, %	Расстояние до места повреждения, км										
Вид КЗ	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
AG	534/0,44	427/0,35	320/0,26	63/0,05	256/0,21	0/0,0	43/0,03	363/0,30	320/0,26	427/0,35	534/0,44
AB	534/0,44	277/0,23	320/0,26	213/0,17	106/0,08	0/0,0	256/0,21	63/0,05	320/0,26	277/0,23	534/0,44

Абсолютная погрешность не превышает 534 м, что показывает возможность применения предложенного способа ОМП на двухцепных линиях с контролем только одной цепи.

Представляет интерес влияние КЗ во второй цепи на возможность ложных срабатываний способа. Цепь с подключенным устройствами ОМП находится в нормальном режиме работы, КЗ происходит во второй цепи (Рисунок 3.23).

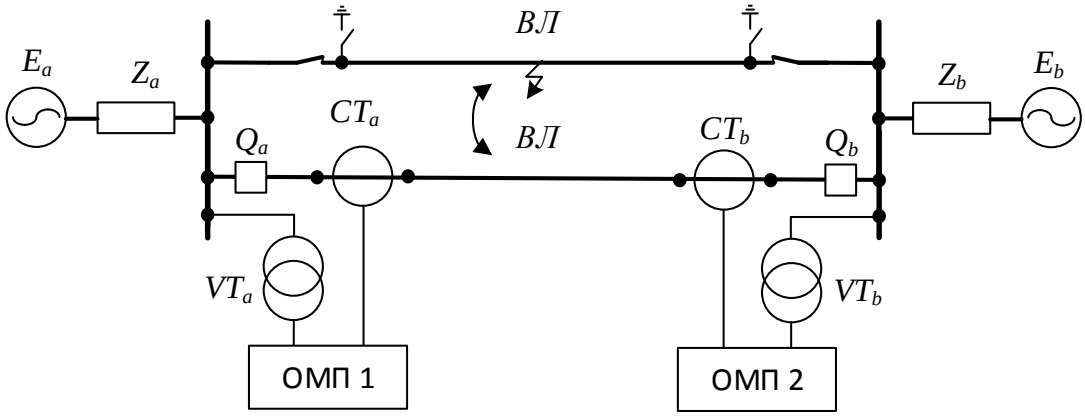


Рисунок 3.23 Схема участка электрической сети с исследуемой ВЛ

Таблица 3.8 Погрешность способа ОМП при различных расстояниях до места повреждения и различных видах КЗ во второй цепи

Δ, м/ε, %	Расстояние до места повреждения, км										
Вид КЗ	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
AG	534/0,44	427/0,35	170/0,14	213/0,17	106/0,08	0/0,0	106/0,08	213/0,17	320/0,26	427/0,35	534/0,44
AB	384/0,32	277/0,23	170/0,14	213/0,17	106/0,08	0/0,0	256/0,21	63/0,05	320/0,26	277/0,23	534/0,44

Достоверное ОМП при КЗ во второй цепи показывает, что пуск ОМП должен осуществляться от средств РЗ с абсолютной селективностью. Однако в случае КЗ во обоих цепях, произошедшем в интервале близком ко времени реакции РЗ (40 мс), вероятно недостоверное определение места повреждения.

Возможен случай когда вторая цепь выведена из эксплуатации (отключена) и КЗ возникает в цепи с подключенным устройствами ОМП (Рисунок 3.24).

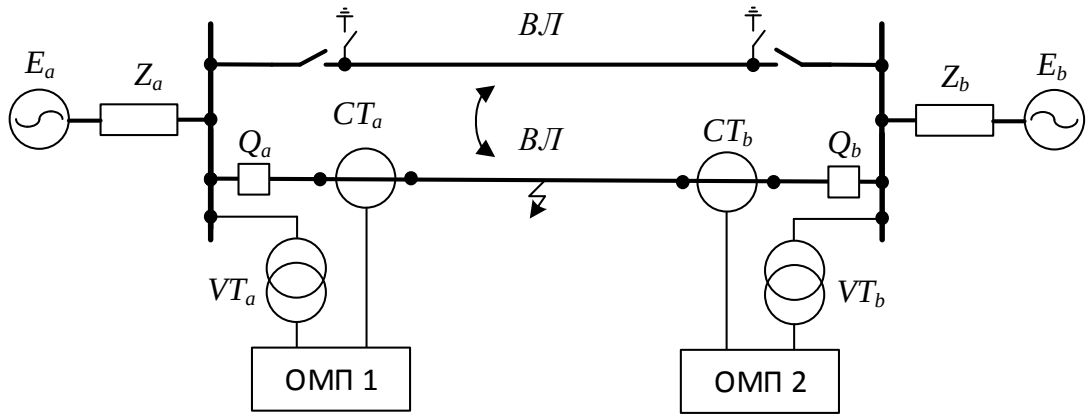


Рисунок 3.24 Схема участка электрической сети с исследуемой ВЛ

Таблица 3.9 Погрешность способа ОМП при различных расстояниях до места повреждения и отключенной второй цепи

Δ, м/ε, %	Расстояние до места повреждения, км										
Вид КЗ	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
AG	534/0,44	427/0,35	320/0,26	63/0,05	106/0,08	0/0,0	43/0,03	363/0,30	470/0,39	427/0,35	534/0,44
AB	534/0,44	277/0,23	320/0,26	213/0,17	256/0,21	0/0,0	256/0,21	213/0,17	320/0,26	277/2,23	534/0,44

Отключение второй цепи не оказывает существенного влияния на точность предлагаемого способа.

Также возможен случай когда отключенную цепь ВЛ в целях безопасности заземляют и КЗ возникает в цепи с подключенным устройствами ОМП (Рисунок 3.25).

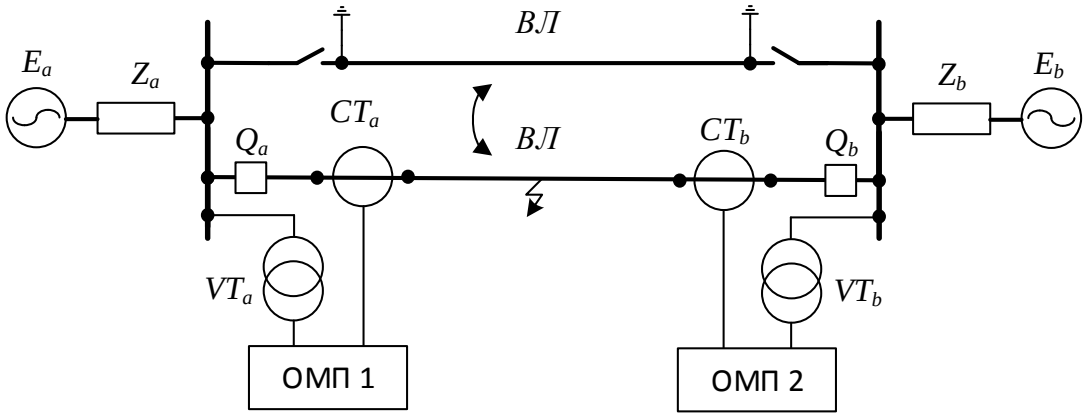


Рисунок 3.25 Схема участка электрической сети с исследуемой ВЛ

Таблица 3.10 Погрешность способа ОМП при различных расстояниях до места повреждения и заземленной второй цепи

Δ, м/ε, %	Расстояние до места повреждения, км										
Вид КЗ	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
AG	534/0,44	427/0,35	320/0,26	63/0,05	256/0,21	0/0,0	43/0,03	363/0,30	470/0,39	427/0,35	534/0,44
AB	534/0,44	277/0,23	320/0,26	213/0,17	256/0,21	0/0,0	256/0,21	213/0,17	320/0,26	277/0,23	534/0,44

Заземление второй цепи не оказывает существенного влияния на точность предлагаемого способа.

3.2.6 Исследование влияния частотных характеристик измерительных трансформаторов на точность способа ОМП

Точность способа ОМП напрямую зависит от характеристик используемых на ПС измерительных ТТ и ТН. Использование высокой частоты дискретизации (более 1 кГц) входных сигналов токов и напряжений линий требует от измерительных ТН и ТТ, установленных на ПС, широкой полосы пропускания с минимальными искажениями. Применяемые в ЕНЭС измерительные ТН и ТТ проектировались для измерения сигналов промышленной частоты. Как показали данные сторонних исследований, верхняя граница полосы пропускания измерительных ТТ (на уровне 3 дБ) составляет не менее 100 кГц [5] [38] [55] [113], и достигает 200 кГц [6], 300 кГц [56]. Что касается ТН, то его частотные характеристики таковы, что не позволяют достоверно измерять частоты выше 2,5 кГц [57]. Хотя в [58] проведено исследование емкостных ТН, показавшее что верхняя граница полосы пропускания достигает 1 МГц за счет паразитных емкостей. Однако величина этой границы различна для различных марок трансформаторов, что не позволяет достоверно утверждать о

широкой полосе пропускания емкостных ТН всех марок. Кроме того, емкостные ТН, как правило, применяются на линиях 500 кВ и выше.

Наличие лучших частотных характеристик у ТТ объясняет то, что в большинстве средств волнового ОМП [9], [10], [11], [12] используются только токовые сигналы. Однако предлагаемый способ выделения начальной стадии волнового переходного процесса использует токи и напряжения, но при этом напряжения играют вспомогательную роль при малых уровнях амплитуды тока волны.

Поставлена задача оценки точности способа по сигналам предварительно обработанных упрощенной моделью измерительных трансформаторов. Поэтому к сигналам на вторичных обмотках трансформаторов добавляются помехи, который, как показано ранее, имеет нормальное (гауссово) распределение в ограниченной полосе.

Модели измерительных трансформаторов (Рисунок 3.26) отражают только основные характеристики трансформаторов (передаточная характеристика и насыщение трансформатора). Такие эффекты как резонанс трансформатора напряжения и нелинейность кривой намагничивания сердечника в модели не учитываются. Модель состоит из преобразователя уровня с коэффициентами усиления, равными коэффициентам трансформации (K_u, K_i), фильтра нижних частот, моделирующего передаточную характеристику, и ограничительного элемента, моделирующего насыщение трансформатора.

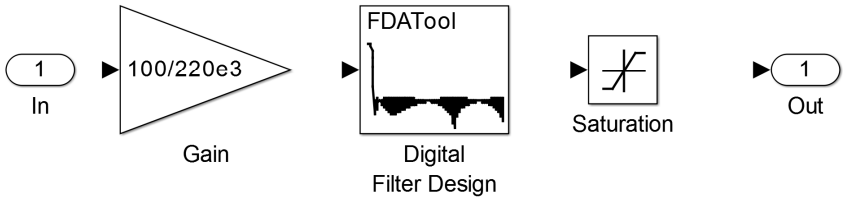


Рисунок 3.26 Модель измерительного ТН

Элементы модели измерительных трансформаторов обладают следующими параметрами: коэффициент трансформации измерительного ТН составляет K_u = 100/(220·10^3), коэффициент трансформации измерительного ТТ – K_i = 1/1000. Для ТН пороги насыщения составляют 120% от номинального значения напряжения на вторичной обмотке (U_{sn}) [59]. Для ТТ 10000% от номинального значения тока во вторичной обмотке I_{sn}, что соответствует номинальной предельной кратности равной 10 [60]. Оценка влияния характеристик ТН и ТН оценивается путем изменения частоты среза f_{cp} НЧ фильтра входящего в модель. Модель измерительных трансформаторов создает фазовую задержку сигнал и уменьшает амплитуды высокочастотных составляющих в спектре сигнала (Рисунок 3.27).

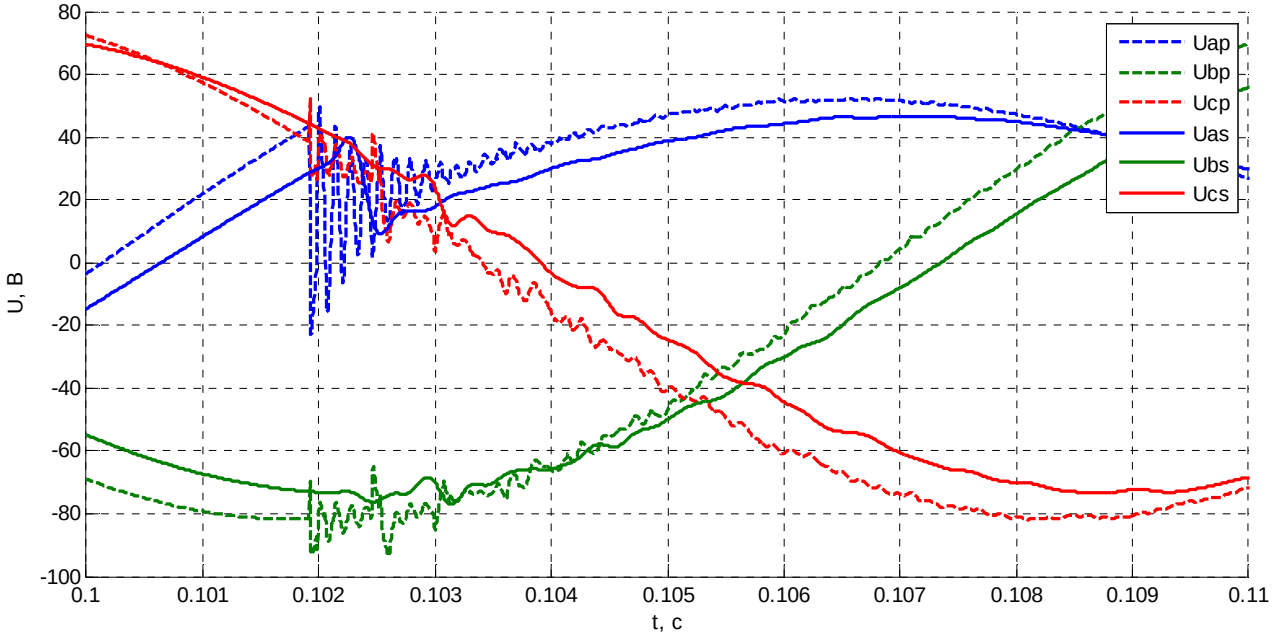


Рисунок 3.27 Фазные напряжения до (U_{ap}, U_{bp}, U_{cp}) и после (U_{as}, U_{bs}, U_{cs}) обработки моделью ТН (f_{cp} = 2,5 кГц)

Исследование влияния измерительных ТН и ТТ, а также интенсивности помех проводилось на модели с параметрами: тип линии – ВЛ 1, вид повреждения – КЗ фазы А на землю (AG), переходное сопротивление R_g = 100 Ом, расстояние до места повреждения – 20 км, угол напряжения фазы А, при возникновении повреждения – 120˚ (положительная полярность падающей волны), расчет по первому волновому каналу.

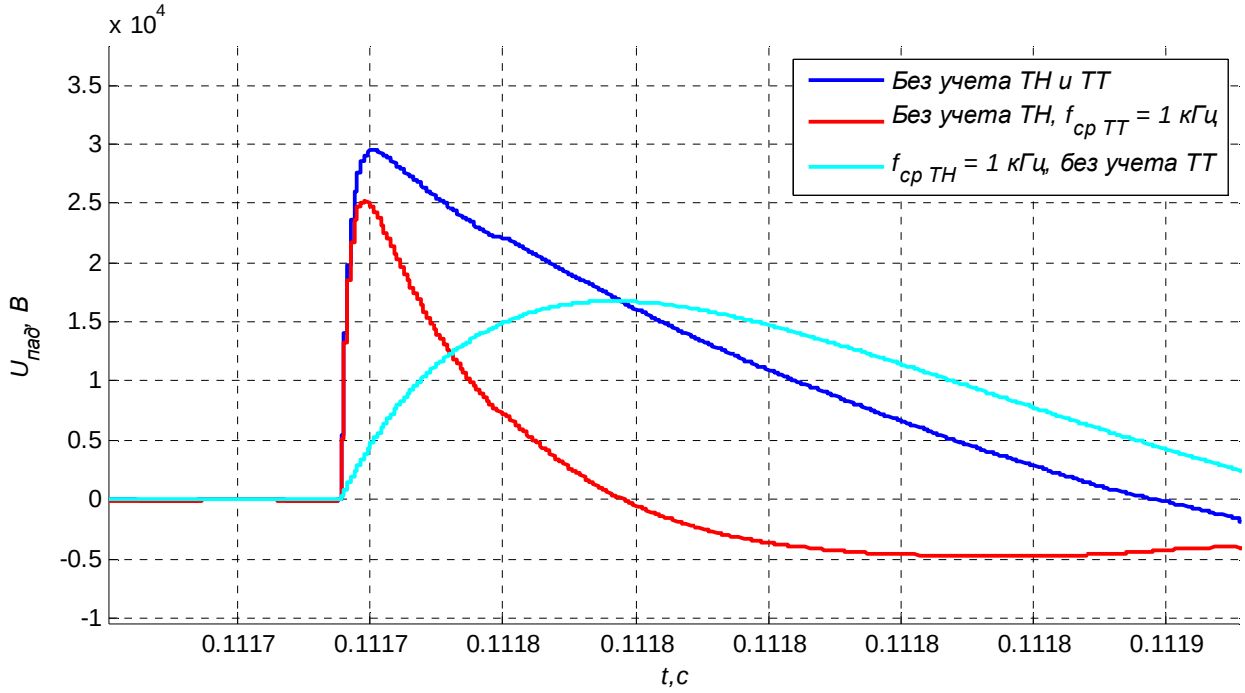


Рисунок 3.28 Влияние частотных характеристиках измерительных ТН и ТТ на напряжение падающей волны

Предельные случаи частотных характеристик измерительных ТН и ТТ (Рисунок 3.28) качественно подтверждают достоверность проведенного моделирования. Эквивалентное сопротивление энергосистемы составляет $1 + i \cdot 15$ Ом и носит активно-индуктивный характер. Поэтому в первый момент времени после падения волны на точку контроля ток волны минимальный, а напряжение волны максимально.

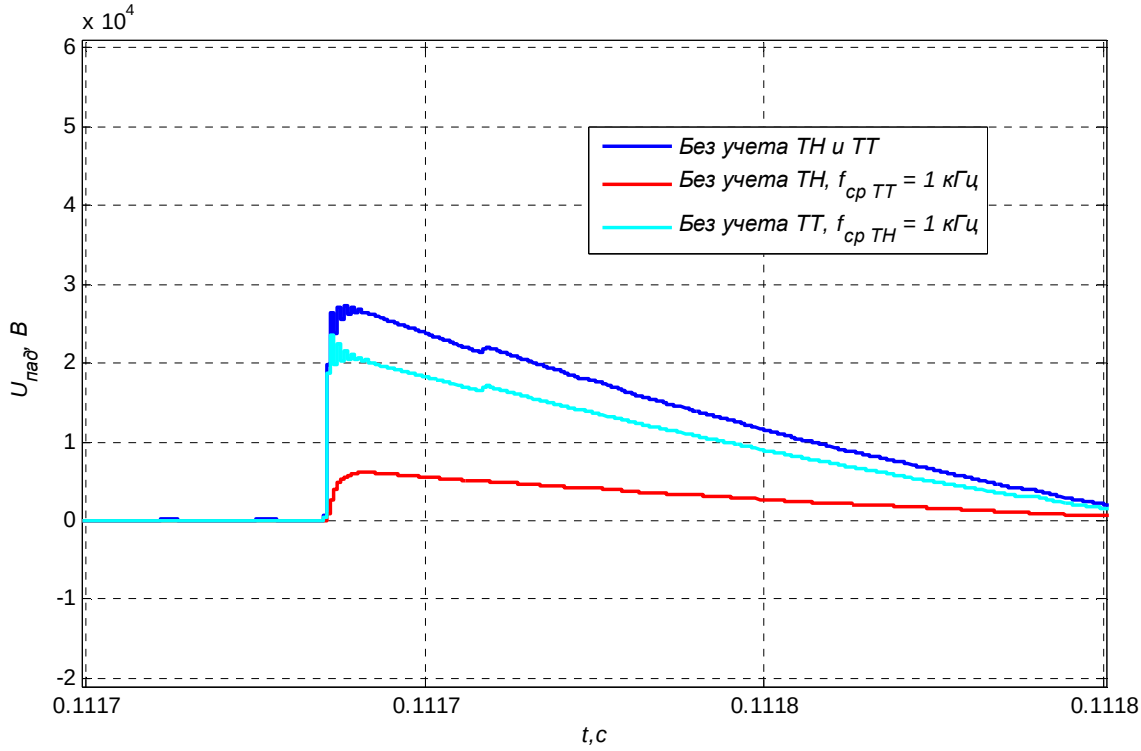


Рисунок 3.29 Влияние частотных характеристиках измерительных ТН и ТТ на напряжение падающей волны при наличии отходящих линий

Моделирование влияния частотных характеристики измерительных ТН и ТТ на напряжение падающей волны (Рисунок 3.28) при наличие четырех отходящих линий с параметрами равными параметрам ВЛ 1 качественно показывает, что наибольший вклад в величину амплитуды напряжения падающей волны вносит ток измеренный в точке контроля.

Таблица 3.11 Влияние характеристик измерительных ТН без учета характеристик ТТ на погрешность способа ОМП

$f_{ср}$, Гц	$500 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$
Δ, м/ε, %	267/0,29	267/0,29	267/0,29	267/0,29	267/0,29	267/0,29

Абсолютная погрешность при различных частотных характеристиках измерительных ТН и при отсутствии влияния частотных характеристик ТТ всегда постоянна.

Таблица 3.12 Влияние характеристик измерительных ТТ без учета характеристик ТН на погрешность способа ОМП

$f_{ср}$, Гц	$500 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$
Δ, м/ε, %	267/0,29	267/0,29	267/0,29	267/0,29	267/0,29	267/0,29

Абсолютная погрешность при различных частотных характеристиках измерительных ТТ и при отсутствии влияния частотных характеристик ТН всегда постоянна.

В следующей серии экспериментов (Рисунок 3.30) оценивалась погрешность ОМП для частотных характеристик наиболее вероятных для ТН и ТТ применяемых на ПС ЕНЭС. Для ТТ $f_{ср}$ = 100 кГц [55] и $f_{ср}$ = 500 кГц [6], для ТН – $f_{ср}$ = 2,5 кГц [57] и $f_{ср}$ = 1 кГц.

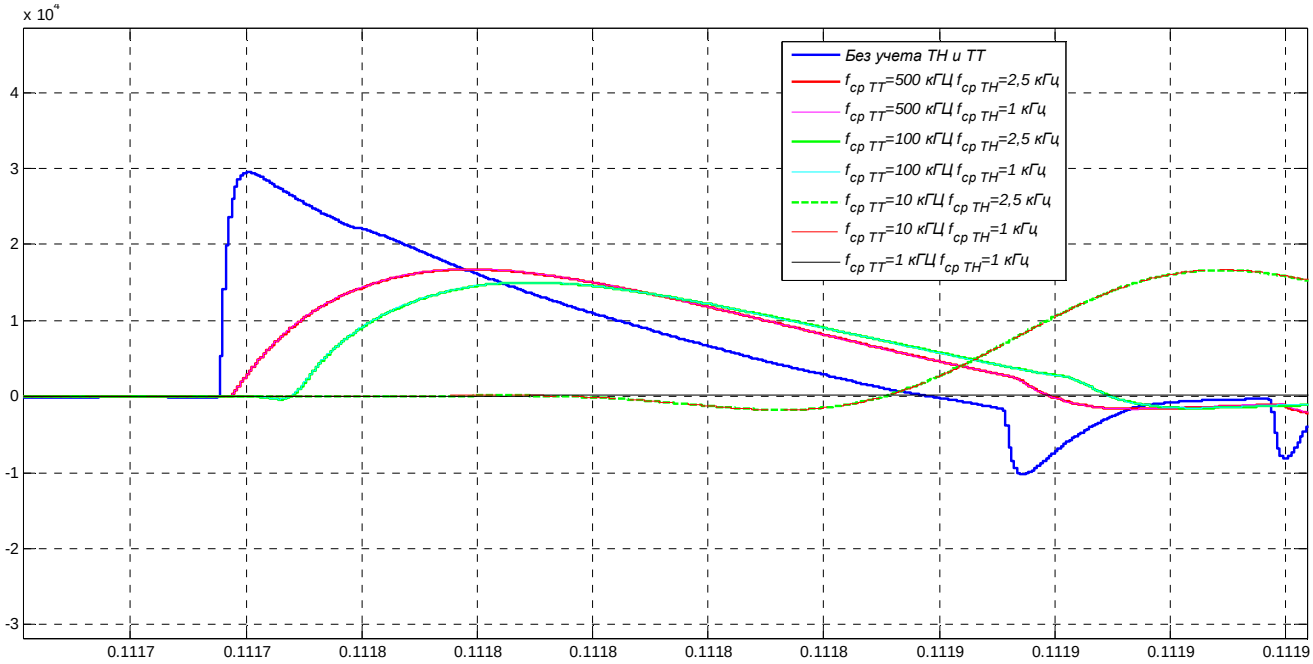


Рисунок 3.30 Напряжение падающей волны при различных частотных характеристиках измерительных ТН и ТТ

Таблица 3.13 Влияние характеристик измерительных ТН и ТТ на погрешность способа ОМП

$f_{ср\ ТТ}$, Гц	$500 \cdot 10^3$	$500 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$	$50 \cdot 10^3$
$f_{ср\ ТН}$, Гц	$2{,}5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$2{,}5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$2{,}5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$
Δ, м/ε, %	267/0,29	267/0,29	267/0,29	267/0,29	267/0,29	267/0,29

$f_{ср\ ТТ}$, Гц	$10 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$
$f_{ср\ ТН}$, Гц	$2{,}5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$2{,}5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$	$2{,}5 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$
Δ, м/ε, %	482/0,53	482/0,53	707/0,78	632/0,70	1606/1,78	1081/1,20

Способ дает удовлетворительные результаты вплоть до $f_{ср}$ = 10 кГц для ТТ и $f_{ср}$ = 1 кГц для ТН. При характеристиках хуже указанные наблюдается значительное увеличение погрешности способа.

3.2.7 Исследование влияния различных отношений сигнал/помеха на точность способа ОМП

Интенсивность помех задается параметром *SNR*, который для блока *Gaussian* (стандартный блок программы Simulink) пересчитывается в значение дисперсии кривой распределения помех для напряжения по выражению

$$\sigma = \left(\frac{\sqrt{2} \cdot U_n}{\sqrt{3}} \right)^2 \Big/ 10^{SNR/20}. \qquad (3.15)$$

Аналогичное выражение используется для токовых сигналов. Добавление помех производится после пропускания сигналов через модели ТН (f_{cp} = 2,5 кГц) и ТТ (f_{cp} = 100 кГц).

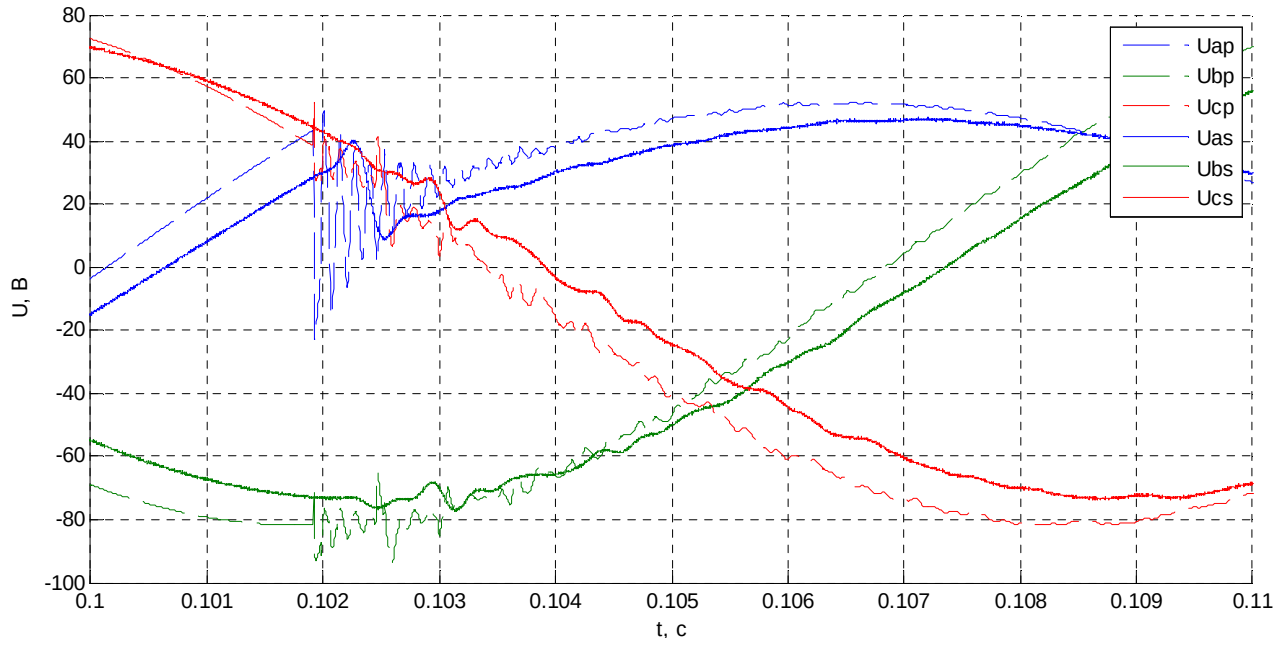


Рисунок 3.31 Фазные напряжения до (U_{ap}, U_{bp}, U_{cp}) и после (U_{as}, U_{bs}, U_{cs}) обработки моделью ТН (f_{cp} = 2,5 кГц) с добавлением шумов (70 дБ)

Таблица 3.14 Погрешность способа ОМП при различных расстояниях до места повреждения и различных отношениях сигнал/помеха

Δ, м/ε, %	Расстояние до места повреждения, км							
Отношение сигнал/помеха, дБ	10	20	30	40	50	60	70	80
120	75/0,08	32/0,03	139/0,15	96/0,10	96/0,10	139/0,15	182/0,20	225/0,25
90	225/0,25	32/0,03	139/0,15	53/0,05	53/0,95	139/0,15	32/0,03	225/0,25
80	75/0,08	182/0,20	139/0,15	53/0,05	96/0,10	10/0,01	182/0,20	75/0,08

70	225/0,25	32/0,03	10/0,01	53/0,05	203/0,22	10/0,01	32/0,03	225/0,25
60	1248/1,24	716/0,79	289/0,32	353/0,39	203/0,22	139/0,15	32/0,03	1123/1,24
50	2622/2,91	3564/3,96	1659/1,84	1102/1,22	1552/1,72	2108/2,34	2665/2,96	9967/11,07
40	-	-	-	-	-	-	-	-

При отношении сигнал/помеха меньше чем 50 дБ способ перестает работать. Абсолютные погрешности при близких КЗ превышают 1 км при отношении сигнал/помеха менее 70 дБ. Колебания погрешности при отношениях сигнал/помеха в диапазоне 120 – 80 дБ связаны со случайным характером помех.

3.2.8 Оценка способа ОМП и характеристик ТН и ТТ по осциллограммам процессов в ВЛ 110 кВ Пугачи – Акбулак, ВЛ 220 кВ Тамбовская-500 – Давыдовская-1, ВЛ 220 кВ Парская – Сасово

Помимо исследования способа на имитационной модели электрической сети проведена оценка способа по данным, полученным в ходе измерения токов и напряжений на действующих ВЛ 110 кВ Пугачи – Акбулак в 2009 году [61], на ВЛ 220 кВ Тамбовская – Давыдовская1 в 2012 году [50] с помощью макета устройства ОМП (§ 4.8), а также на ВЛ 220 кВ Парская – Сасово во время опытно-промышленной эксплуатации опытного образца устройства ОМП (§ 4.9) в 2015 году.

В 2009 году на ВЛ 110 кВ Пугачи – Акбулак установлены высокочастотные регистраторы ($f_{дискр}$ = 1 МГц) токов и напряжений для исследования возможности применения волновых методов в устройствах защиты и ОМП. На ВЛ 110 кВ Пугачи – Акбулак входные цепи регистраторов токов и напряжений подключались к вторичным цепям измерительных ТТ и к приспособлениям для измерения напряжения (ПИН) вводов масляных выключателей. Следует отметить, что указанные ПИН имеют более широкую полосу пропускания частот и меньшие искажения, чем измерительные ТН.

За время работы регистратора зафиксировано несколько аварийных событий. Наиболее характерным случаем является междуфазное КЗ, зафиксированное в октябре 2009 года (Рисунок 3.32), когда в результате обхода ВЛ в зоне повреждения обнаружена обгоревшая ветка, предположительно вызвавшая КЗ.

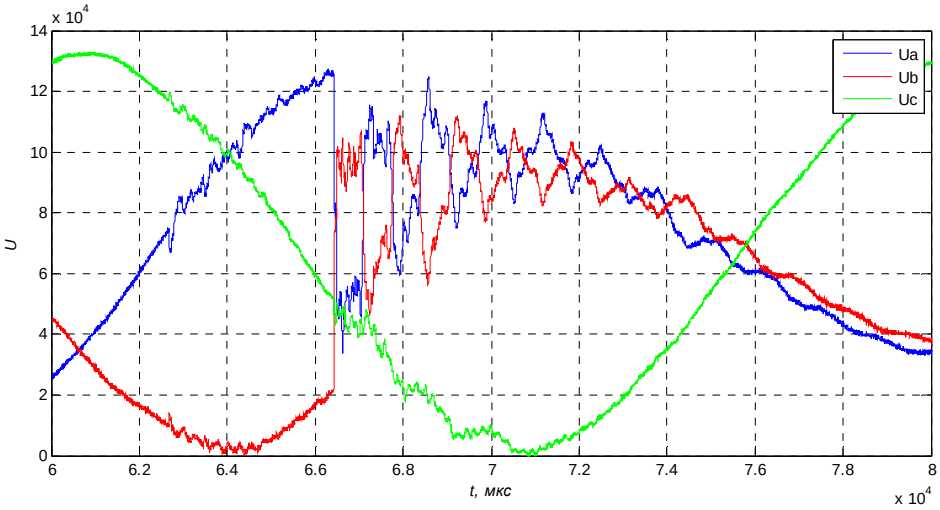


Рисунок 3.32 Осциллограмма напряжения при КЗ в линии Пугачи – Акбулак со стороны ПС Пугачи

Обработка данного аварийного процесса (Рисунок 3.33) предложенным в работе способом определения времени появления фронта волны в точке контроля показала эффективность способа, на данных с действующей ВЛ ЕНЭС.

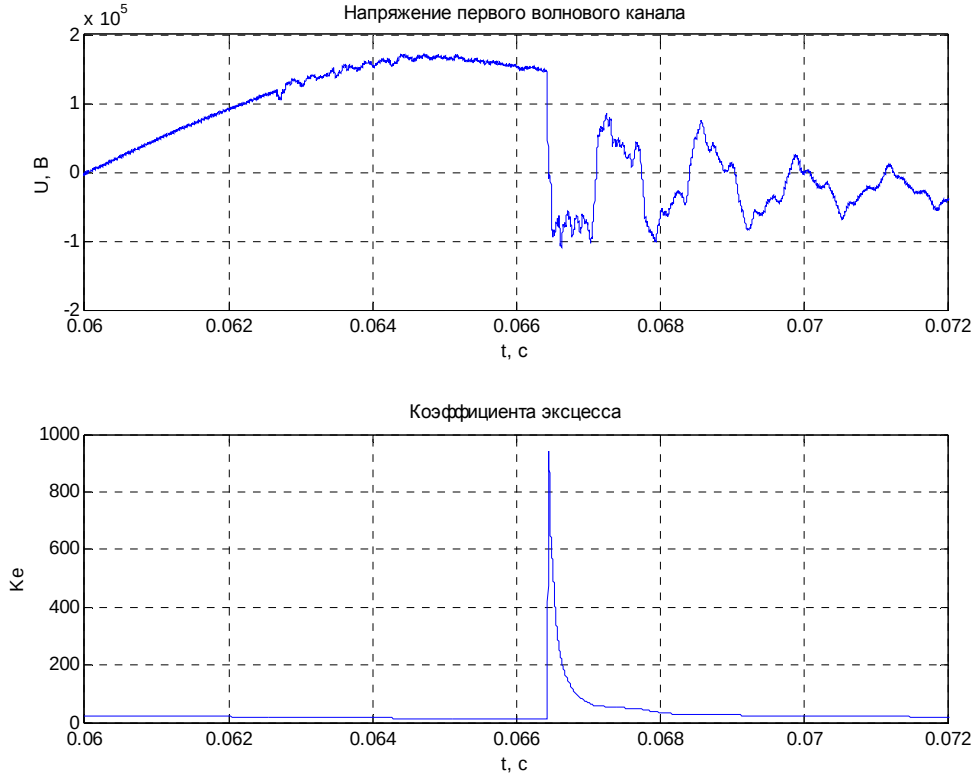


Рисунок 3.33 Напряжение первого волнового канала и коэффициент эксцесса по аварийным составляющим при КЗ в линии Пугачи - Акбулак

Резкое увеличение коэффициента эксцесса начинается в момент скачка напряжения первого волнового канала (относительное время t = 0,666487 с). Переходной процесс, развитие

которого началось приблизительно за 2 мс до момента КЗ, не вызвал резкого роста коэффициента эксцесса.

Макеты устройства ОМП, установленные на ВЛ 220 кВ Тамбовская-500 – Давыдовская-1, подключались к вторичным цепям измерительных ТН и ТТ. За время работы устройства КЗ в ВЛ зафиксированы не были.

Расчет аварийных составляющих и коэффициента эксцесса (Рисунок 3.34) в установившемся режиме работы ВЛ, зафиксированному, например, в октябре 2012 года на ПС Тамбовская-500 показал, что способ не чувствителен к помехам в линии, имеющим нормальное распределение.

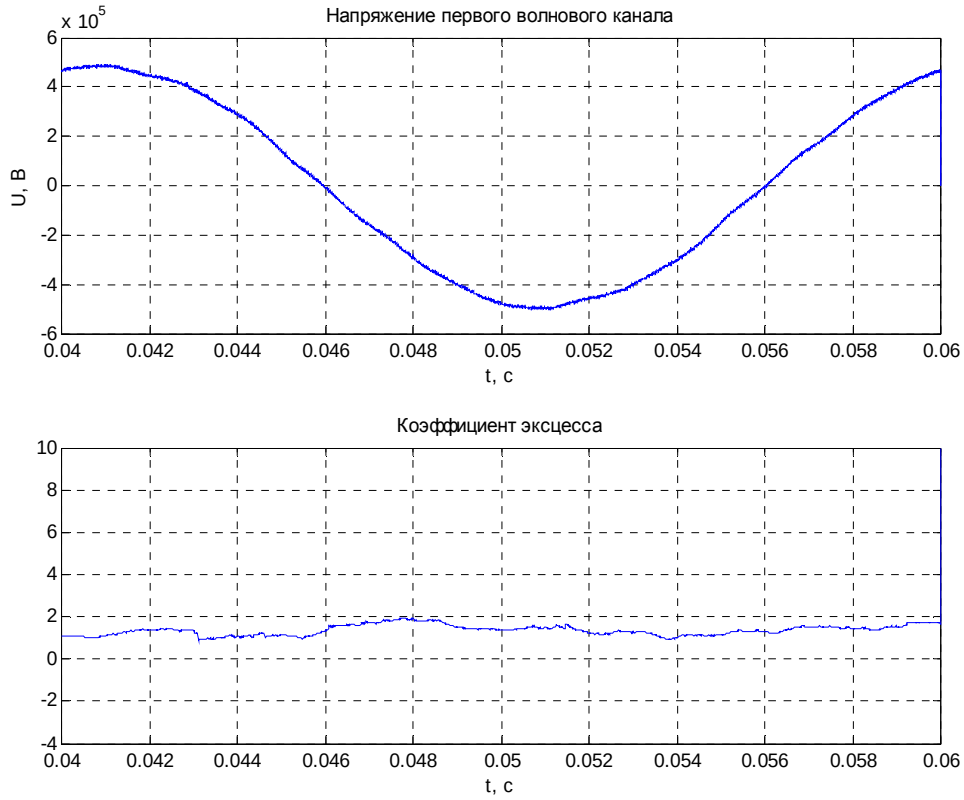


Рисунок 3.34 Напряжение первого волнового канала и коэффициент эксцесса по аварийным составляющим в установившемся режиме на ПС Тамбовская-500

Во время опытно-промышленной эксплуатации опытных образцов устройства ОМП на ВЛ 220 кВ Парская – Сасово произошло одно аварийное событие – КЗ фазы В 3 сентября 2015 (Рисунок 3.35). Предаварийный ток в фазах составлял 30 А, аварийный ток в фазе В – 3300 А. Линия отключилась по команде основной защиты, после отключения произошло успешное АПВ.

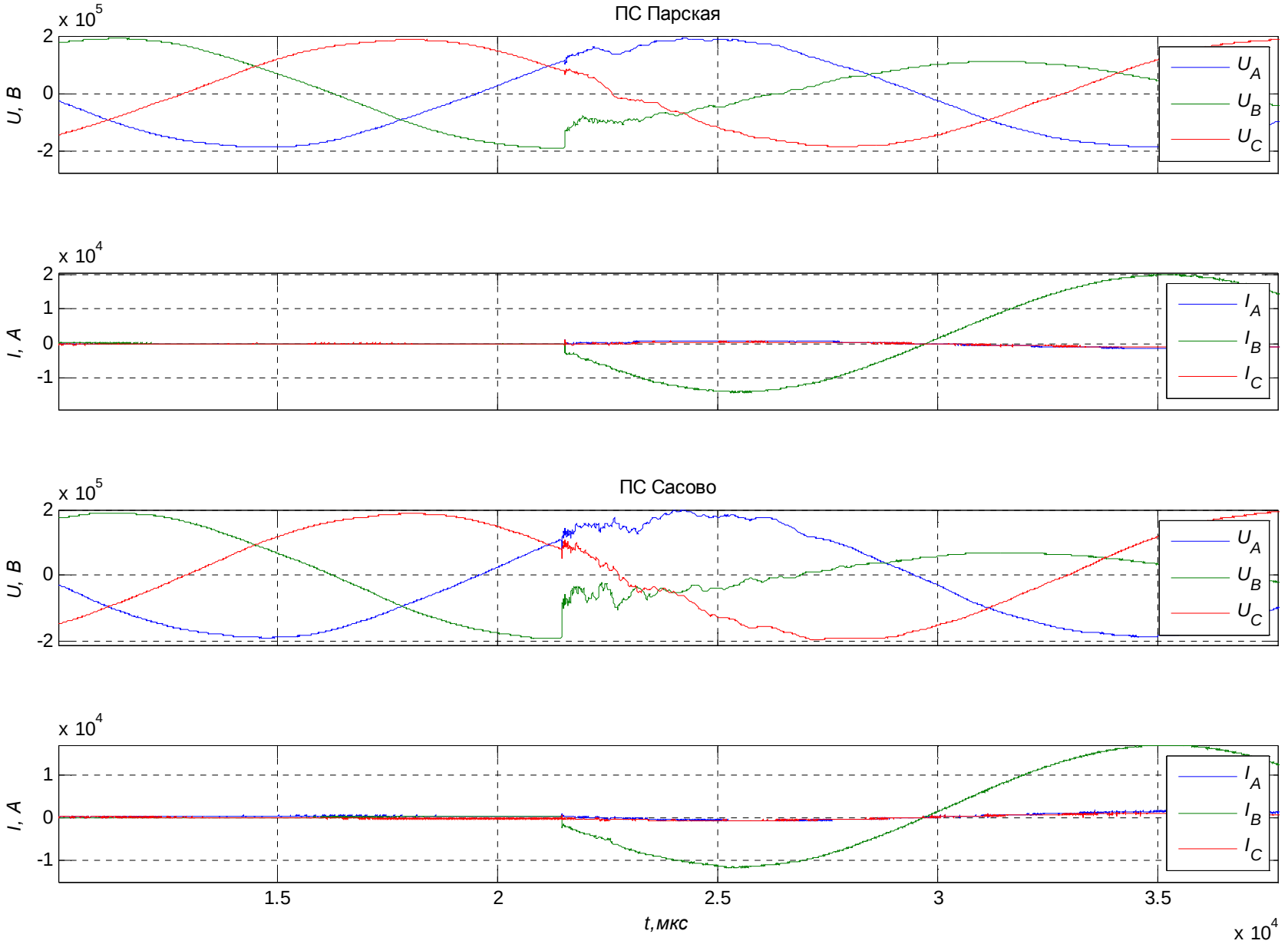


Рисунок 3.35 Фазные напряжения и токи при КЗ фазы В на ВЛ 220 кВ Парская – Сасово

Обработка аварийного процесса на ВЛ 220 кВ Парская – Сасово (Рисунок 3.35) предложенным способом определения времени появления фронта волны в точке контроля также показала его эффективность. Расстояние, рассчитанное предложенным способом (а также рассчитанное опытном образцом устройства ОМП в автоматическом режиме), составило 44,85 км от ПС Парская. Расстояние до места повреждение, полученное специалистами службы релейной защиты, составило 46,7 км от ПС Парская. Однако обход зоны места повреждения не выявил явных следов КЗ, поэтому не возможно провести достоверную оценку результата работы способа (и устройства).

Опытный образец устройства ОМП подключен к измерительным ТН и ТТ на ПС, поэтому осциллограммы КЗ могут быть использованы для оценки частотных характеристик измерительных ТН и ТТ. Как было показано ранее частотные характеристики ТН и ТТ имеют большое значение при измерении волновых переходных процессов. На графиках (Рисунок 3.36, Рисунок 3.37, Рисунок 3.38, Рисунок 3.39) приведены осциллограммы фазы В и гармонический состав данных фрагментов. По данным осциллограммам определено малое время нарастания фронтов напряжения волны (~ 25 мкс) и тока волны (~ 5 мкс).

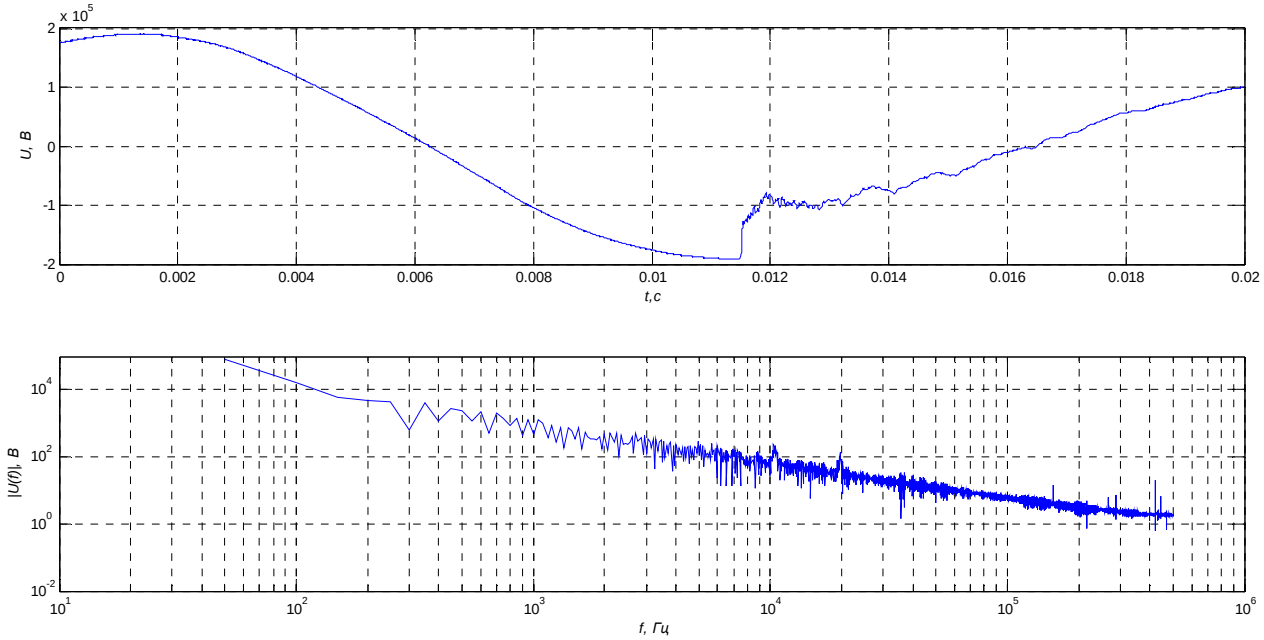


Рисунок 3.36 Напряжение фазы В при КЗ во временной и частотной областях

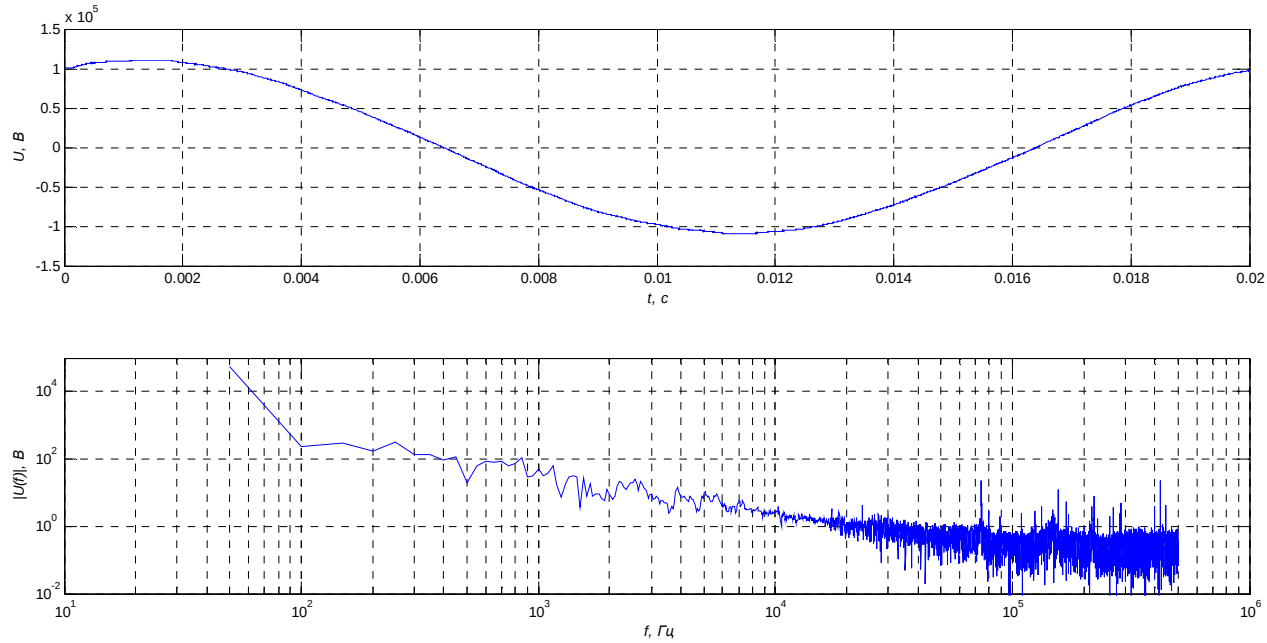


Рисунок 3.37 Напряжение фазы в установившемся аварийном режиме В во временной и частотной областях

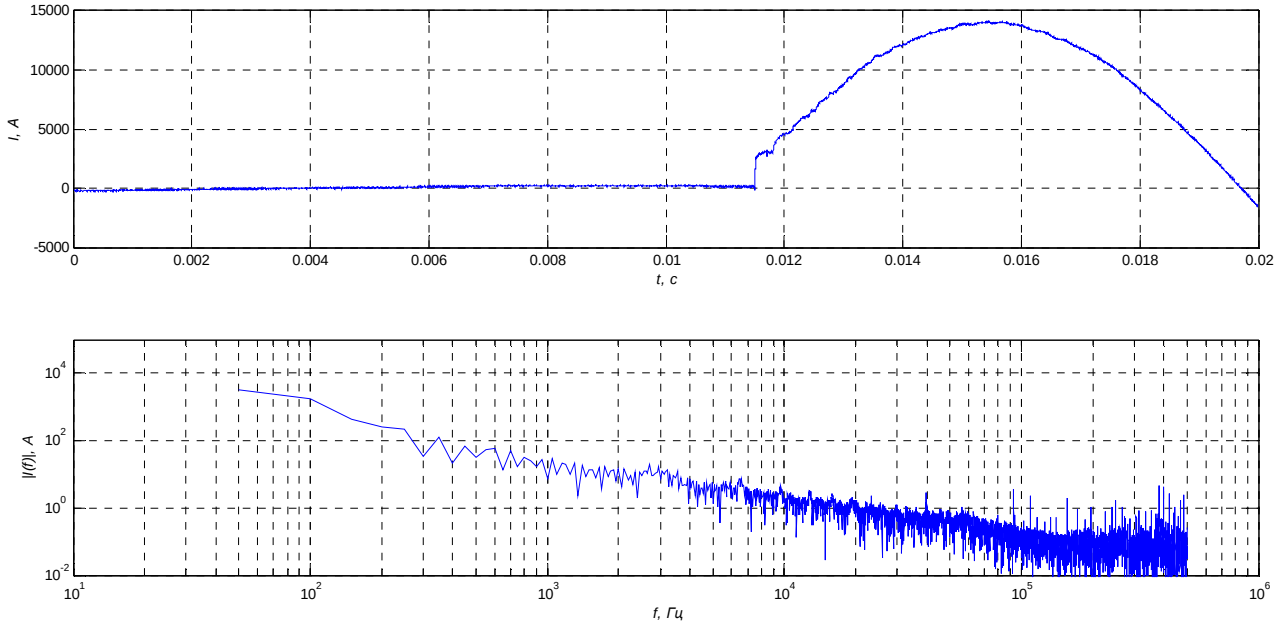


Рисунок 3.38 Ток фазы В при КЗ во временной и частотной областях

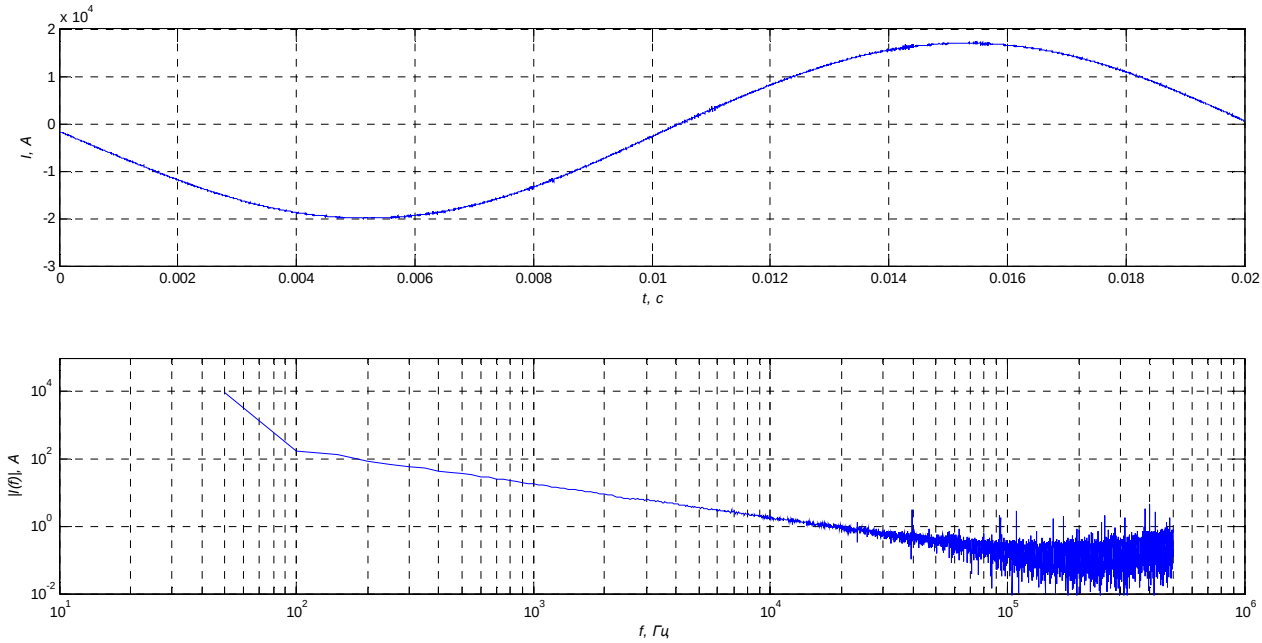


Рисунок 3.39 Ток фазы В в установившемся аварийном режиме во временной и частотной областях

На осциллограммах с волновым переходным процессов (Рисунок 3.36, Рисунок 3.38) можно заметить появление высокочастотных составляющих вплоть до 1 МГц по сравнению с осциллограммами установившегося режима на той же ПС (Рисунок 3.37, Рисунок 3.39) в спектре которых амплитуды составляющих с частотам больше 10 кГц меньше единицы.

3.3 Выводы

1. Предложен способ определения времени появления фронта волны в точке контроля, основанный на применении статистических методов к аварийным составляющим падающей волны в междуфазных волновых каналах.
2. Проведен анализ и сравнение различных методов определения времени появления фронта волны в точке контроля. Показано преимущество предложенного метода при высоких отношениях сигнал/помеха.
3. Проведена оценка точности предложенного способа ОМП на имитационных моделях участка электрической сети для различных ВЛ и при различных видах и параметрах КЗ. Показано, что для рассматриваемых имитационных моделей абсолютная погрешность способа ОМП составляет не более 523 м.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТРОЙСТВА ОМП ВОЛНОВЫМ МЕТОДОМ ДВУХСТОРОННИХ ИЗМЕРЕНИЙ

4.1 Многофункциональные устройства для сетей 110 кВ и выше

В конце XX века уровень развития микроэлектроники позволил перевести на микропроцессорную основу все средства управления, измерения, защиты и автоматики применяемые на ПС и электростанциях (ЭС). К этим средствам относятся: релейная защита и автоматика (РЗА) (в том числе релейная защита линий, трансформаторов, шин, генераторов, двигателей, средства определения места повреждения (ОМП), регистраторы аварийных процессов (РАП), устройства автоматического включения резерва (АВР) и так далее), средства измерений синхронизированных векторов (СВИ), противоаварийная автоматика (ПА), телемеханика (ТМ), средства учета электрической энергии, средства измерения показателей качества электрической энергии (ПКЭ). Современное состояние микроэлектроники позволяет провести централизацию средств управления, измерения, защиты и автоматики ПС. В централизованных системах вся обработка информации и принятие решений сосредоточены в микропроцессорной системе, которая подключена к оборудованию ПС с помощью датчиков и исполнительных устройств. При этом разделение на функции происходит на уровне программных модулей (логических узлов). Но большинство различных средства управления, измерения, защиты и автоматики на ПС не подверглись централизации. Связано это с высокими требованиями, предъявляемыми к надежности указанных средств, в особенности к надежности средств РЗА и ПА. Однако для средств измерения и диагностики, таких как РАП, ТМ, ПКЭ, СВИ, ОМП, все же наблюдается тенденция к централизации.

Отметим два направления централизации средств измерений и диагностики на ПС. С одной стороны появляются устройства, имеющие ограниченный функционал, но при этом обслуживающие несколько присоединений одновременно. Например, устройства ОМП, обслуживающие до 8 линий [10] или устройства регистрации аварийных процессов контролирующие до 192 аналоговых сигналов [62]. С другой стороны разработаны устройства, имеющие расширенный набор функций (многофункциональные), но работающие только с одним присоединением [8, 63, 64]. Хотя некоторые из них, например [8], могут, согласно технической документации, обслуживать до 2-х присоединений, при сохранении многофункциональности, но конструктивно устройство представляет собой два независимых блока в одном корпусе с общим источником питания. Оба направления централизации направлены на повышение технико-экономических показателей, таких как цена устройства, стоимость монтажа, пуско-наладочных работ и обслуживания.

Проведем обзор возможностей современных многофункциональных устройств для определения их ключевых особенностей. Из представленных устройств (Таблица 4.1) функцией ОМП обладают IDM+[8] и RPV-310 [12]. Причем в IDM+ применяется двухсторонний волновой метод ОМП, а в RPV-310 – двухсторонний волновой метод совместно с методом по ПАР. Отметим что, в устройстве IDM+ волновой метод работает только по сигналам фазных токов, что накладывает некоторые ограничения на возможности ОМП при установке устройства на линию с относительно большим эквивалентным сопротивлением энергосистемы (например, тупиковые линии).

Устройства IDM+, ЭНИП-3 [63], SIMEAS R [65], МИП-02 [66] и RPV-310 обладают функцией измерения синхронизированных векторов. Современный стандарт [67] поддерживается только ЭНИП-3, остальные поддерживают устаревший стандарт [68].

В большинстве устройств синхронизация измерений обеспечивается с помощью внешнего источника через интерфейс IRIG-B [69] или с помощью внутреннего приемника сигналов GPS. Синхронизацию от системы ГЛОНАСС использует только МИП-02.

Устройства IDM+, ЭНИП-3, SIMEAS R, МИП-02, КИПП-2М [70] и RPV-310 позволяют измерять ПКЭ. Измерение ПКЭ в IDM+ производится в соответствии с [71]. Остальные не указывают методов измерений ПКЭ и имеют ограниченный печень измеряемых ПКЭ.

Наиболее распространенными протоколами передачи данных в представленном перечне устройств (Таблица 4.1) являются:

- МЭК 61850-8-1 (MMS) [72];
- МЭК 61850-8-1 (GOOSE) [72];
- МЭК 60870-5-104 [73];
- IEEE Std 1815–2012 (DNP3) [74];
- Modbus [75].

Протокол Modbus разработан в 70-х годах XX века и получил широкое распространение на ПС ЕНЭС. Этот протокол используется в IDM+, КИПП-2М, RPV-310 и 1133А. Современные протоколы МЭК 61850-8-1 (MMS) и МЭК 61850-8-1 (GOOSE) – важнейшая часть концепции цифровой подстанции (ЦПС). С помощью МЭК 61850-8-1 (MMS) происходит передача информации в диспетчерский пункт и на другие ПС, а протокол МЭК 61850-8-1 (GOOSE) является заменой кабелей дискретного управления и контроля. Протокол MMS поддерживаются только устройством IDM+. Протокол DNP3 поддерживается 1133А и практически не используется на ПС ЕНЭС. Основное назначение протокола МЭК 60870-5-104 объединение устройств телемеханики. Он применяется в IDM+, ЭНИП-3, SIMEAS R, КИПП-2М, МИП-02, то есть в устройствах, обладающих функциями телеизмерения и телеуправления.

Все устройства используют в качестве интерфейсов передачи 100BASE-T (Ethernet), RS-232 и RS-485. Интерфейс 100BASE-T фактически является стандартом для построения локальных вычислительных сетей [76], в том числе информационных сетей ПС. Использование трансформаторной гальванической развязки и витой пары для обеспечения помехозащищенности, а также большой выбор вспомогательного оборудования объясняет широкое распространение стандарта в электроэнергетике. Поверх интерфейса 100BASE-T, как правило, применяются протоколы MMS и Modbus. Стандарты RS-232 и RS-485/RS-422 являются устаревшими и их применяют для совместимости с уже установленным оборудованием. Поверх RS-232 и RS-485/RS-422 обычно применяется Modbus и МЭК 60870-5-104.

Таблица 4.1 Перечень современных многофункциональных устройств

№	Наименования	Входы	Разрядность АЦП	Частота дискретизации	Синхронизация	Функции устройства				Интерфейсы	Протоколы
						ПКЭ	ОМП	СВИ	РАП		
1	Qualitrol IDM+ 9 (IDM+18, IDM+36) (США)	9 (18, 36) аналоговых и 32 (64, 128) дискретных входа (IDM+9)	20 для токовых входов, 16 для входов напряжения	25,6 кГц, 12,8 кГц, 6,4 кГц, 3,2 кГц, 1,6 кГц	Внутренний GPS приемник (Δ = 100 нс), IRIG-B, IRIG-J, NTP	+ (Класс А IEC 61000-4-30)	+ (односторонне по ПАР, волновой метод двухсторонних измерений)	+ (IEEE Std C37.118–2005)	+	2 x 100 Base-T, 3 x RS-232, 1 x RS-485, 1 x USB	IEC 61850, IEC 60870-5, Modbus, DNP3, NTP
2	ЭНИП-3 (Россия)	ЭНИП-3-5(1) – 3 аналоговых токовых входа, 3 аналоговых входа напряжения, 5 дискретных входов	-	-	IRIG-A или внутренний приемник GPS (Δ = 1 мкс)	+ (ограниченный перечень измеряемых ПКЭ)	–	+ (IEEE Std C37.118.1–2011)	+	1 x 100 Base-T, 1 x RS-485	МЭК 60870-5-104-2004, C37.118.2 – 2011, IRIG-A
3	SIEMENS/SIMEASR (Германия)	VCDAU – 8 аналоговых (4 тока и 4 напряжения) и 16 дискретных входов, CDAU – 8 аналоговых (токи) и 16 дискретных входов, VDAU – 8 аналоговых (напряжения) и 16 дискретных входов, DAU – 32 дискретных входа, DDAU – 8 цифровых входа	-	-	DCF77, IRIG-B	+	–	+ (IEEE Std C37.118 – 2005)	+	1 x LPT1, 2 x RS232, 1 x 100 Base-T	IEC 60870-5-103
4	КИПП-2М (Россия)	3 токовых входа, 3 входа напряжения, 10 дискретных входов с возможностью расширения до 16	-	-	Встроенный приемник GPS	+ (ГОСТ 13109-97)	–	–	–	1 x 10/100 Base-TX, 1 x RS-485, 2 x RS-232, 1 x Оптический интерфейс	МЭК 60870-5-104/101, МЭК 60870-5-101, Modbus, TSIP, МЭК 60870-5-

											101/104
5	МИП-02 серии 40 (42) (Россия)	6 токовых входа и 6 входа напряжения, 32 дискретных входа и 4 дискретных выхода	-	-	Встроенные приемник GPS/ГЛОНАСС (Δ = 1 мкс)	+	–	–	+	1 x 10/100 Base-T, 1 x RS-422, 1 x RS-232	МЭК 60870 – 5 – 104
6	Alstom Reason/RPV-310 (Франция)	До 64 аналоговых входов (ток, напряжение), до 384 цифровых входов, до 256 дискретных входа	-	-	IRIG-B, SNTP	+	+ (одностороннее по ПАР, волновой метод двухсторонних измерений)	+ (IEEE Std C37.118–2005)	+	1 x 100 Base-T, 1 x RS-232	Modbus
7	Arbiter Systems Model 1133A (США)	3 аналоговых токовых входа, 3 аналоговых входа напряжения, 5 дискретных входа		-	Встроенный приемник GPS (Δ = 1 мкс)	+ (IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-15)	–	+ (IEEE Std C37.118–2005)	–	1 x 10 Base-T, 1 x RS-232, 1 x RS-422/485	DNP3, Modbus, PQ-DIF, C37.118

4.2 Цель разработки устройства и основные функции

Целью разработки многофункционального устройства (МФУ) является реализация ОМП волновым методом двухсторонних измерений, предложенных способов повышения эффективности данного метода, а также централизация средств измерений и диагностики для сетей высокого напряжения 110 – 220 кВ. Основными функциями устройства являются ОМП, измерение ПКЭ и измерение синхронизированных векторов. Приведенные функции актуальны для электрических сетей 110 – 220 кВ и могут успешно сочетаться в структуре одной аппаратной-программной платформы.

Устройства синхронизированных векторных измерений (УСВИ) напряжения или тока представляют собой средства измерение амплитуды и фазы составляющей напряжения или тока с номинальной частотой сети одновременно во всей электрической сети относительно единой метки времени (единого опорного вектора). Важной задачей диспетчерских служб является обеспечение устойчивости работы ЭЭС. С внедрением измерений синхронизированных векторов в узлах электрической сети диспетчеры имеют возможность получать оперативную информацию о текущем режиме работы энергосистемы, кроме того расширяются возможности ПА [77].

Задача мониторинга ПКЭ в сетях высокого напряжения стала актуальной с введением стандарта [78]. Обеспечение контроля качества электроэнергии в электрических сетях высокого напряжения позволяет обнаруживать источник ухудшения качества электроэнергии. ПКЭ можно условно разделить на три группы: к первой группе относятся отклонение частоты и отклонение напряжения от номинального значения, ко второй группе – показатели, характеризующие несинусоидальность формы кривой напряжения, несимметрию и колебания напряжения (фликер), к третьей группе – показатели, характеризующие различные электромагнитные явления (провалы напряжения, перенапряжения и импульсы напряжения) [79].

Частота сети f определяется балансом активной мощности. При возникновении дефицита электроэнергии генерируемой в ЭЭС происходит снижение частоты до такого значения, при котором устанавливается новый баланс генерируемой и потребляемой энергии с учетом потерь в элементах ЭЭС, при избытке, наоборот, частота повышается [79]. Напряжение в узлах ЭЭС может быть различным и определяется балансом реактивной мощности в этих узлах.

Значительную долю нагрузки в электрической сети составляют электроприемники с нелинейной вольтамперной характеристикой (выпрямители, статические тиристорные компенсаторы, дуговые сталеплавильные печи, преобразователи частоты, индукционные печи и т.д.). Такие электроприемники потребляют ток, форма которого существенно отличаются от

синусоидальной. Протекание несинусоидального тока по элементам электрической сети создает в них падения напряжения, определяемые кривой тока, что и является причиной искажения синусоидальной формы напряжения в узлах сети [79].

Электроприемники, которые получают питание только от одной или двух фаз трехфазной сети, образуют несимметричную нагрузку. В электрических сетях причиной несимметрии являются ВЛ, фазные провода которых в силу своего расположения обусловливают несимметричные сопротивления фаз линии [79]. Несимметрия напряжения характеризуется коэффициентом несимметрии напряжения основной частоты по обратной последовательности и по нулевой последовательности.

К провалам напряжения относится внезапное значительное снижение напряжения в точке электрической сети, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкому к нему уровня через промежуток времени от нескольких периодов до нескольких десятков секунд. Причинами провалов являются КЗ и грозы, когда срабатывают средства РЗА системы электроснабжения (АПВ или АВР). Провалы напряжения также могут быть обусловлены ошибками оперативного персонала и ложными срабатываниями средств РЗА. Временное перенапряжение – это повышение напряжения в точке электрической сети, возникающее в системах электроснабжения при коммутациях или КЗ. Причинами появления кратковременных перенапряжений являются коммутации ненагруженных ЛЭП, конденсаторных батарей или малонагруженных трансформаторов, подключение или отключение большой нагрузки.

Отклонения напряжения создаются под воздействием относительно медленных изменений нагрузки, определяемых ее графиком, быстрые изменения нагрузки создают колебания напряжения. Характеристикой колебаний напряжений является доза фликера. Необходимость введения дозы фликера возникла в результате обнаружения воздействия этого явления на зрение человека, вызывающего усталость от мерцания светового потока, создаваемого источником света. Стандарт [71], действующий для сетей низкого, среднего и высокого напряжений, нормирует значение дозы фликера. Однако источники света питаются только от сетей низкого напряжения и измерение дозы фликера целесообразно проводить непосредственно у потребителя в сетях низкого напряжения.

Следует отметить, что в сетях высокого напряжения при использовании электромагнитных измерительных трансформаторов напряжения (ТН) в цепи измерения точное определение гармонических составляющих затруднено ввиду отсутствия утвержденных методик поверки ТН для частот отличных от частоты промышленной сети. Поэтому для электрических сетей 110 – 220 кВ можно измерять и регистрировать с требуемой согласно [71] точностью следующие ПКЭ:

- частота;
- среднеквадратическое значение напряжения;
- коэффициенты несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательности;
- глубина и длительность провалов напряжения;
- коэффициент перенапряжения и длительность перенапряжения.

4.3 Общие технические требования и структура МФУ

На данном этапе внедрения и развития концепции ЦПС интеграция МФУ с функцией волнового ОМП в ЦПС по шине процесса МЭК 61850-9-2 [80] не возможна. Источником сигналов для шины процесса являются либо цифровые ТН и ТТ [81], либо устройства сопряжения с шиной (УСШ, в английской литературе Merging Unit) [82], подключаемые к электромагнитным измерительным ТН и ТТ. Данные устройства поддерживают только стандарты SV80 и SV256 [80], с частотой дискретизации 80 или 256 отсчетов за период основной частоты. Следовательно, полоса пропускания сигналов по шине процесса ограничена $f_{max} = 50 \cdot 256 = 12{,}8$ кГц, что дает большую погрешность при волновом ОМП ($\Delta = c/f_{max} = 23$ *км*), но является достаточным для устройств РЗА, средств учета и средств измерения параметров электрического режима. Поэтому для МФУ с функцией волнового ОМП необходимо измерять сигналы со вторичных обмоток электромагнитных измерительных ТТ и ТН.

Задачи, решаемые МФУ, должны удовлетворять российским и международным нормативным документам. Основным документом для разработки СИ ПКЭ является [71]. В стандарте отсутствуют требования к интерфейсам и протоколам передачи измеренных величин, поэтому выбор интерфейса и протокола передачи оставлен за разработчиками устройств. Для сетей высокого напряжения нет возможности достоверного измерение всего перечня ПКЭ в соответствии с [83] и [84], поэтому стандарт [71] полностью охватывает все необходимые методы измерений.

Стандарт [67] вводит основные термины, методы оценки погрешностей измерений, а также определяет протокол передачи синхронизированных векторов по информационной сети.

Общие требования к устройствам и способам ОМП сформулированы в [3]. Конкретно на устройства волновых ОМП стандартов не существует. Передача результатов не стандартизирована и выбор интерфейсов и протоколов оставлен за разработчиком. Пуск любого устройства ОМП должен осуществлять от внутреннего пускового органа или по сигналу от селективной защиты ВЛ. Этот сигнал может быть, как дискретным, так сигналом по протоколу МЭК 61850-8-1 (GOOSE).

Стоит отметить, что при повреждении на контролируемой ВЛ устройство с функцией волнового ОМП осуществляет в темпе процесса лишь измерения и запоминания токов и напряжений. Поэтому устройство с функцией волнового ОМП обладает такой функций как регистрация аварийных процессов.

Регистрация аварийных процессов позволяет службам эксплуатации проводить анализ электромагнитных процессов, а также рассчитывать расстояние до места повреждения с помощью специализированного программного обеспечения. Регистратор аварийных процессов в МФУ дополняет функцию ОМП, позволяя проводить резервное ОМП [85] с помощью программ [14] [16] в случае высокой погрешности основного и отсутствии синхронизации или связи. Требования к регистраторам также не стандартизированы. Можно установить общие требования, например, возможность гибкой настройки своих основных параметров: длительность записи, частота дискретизации, событие для запуска.

Помимо основного способа ОМП устройство должно проводить расчет расстояния до места повреждения резервным способом, отличающимся принципом действия, например, методом по ПАР.

Таким образом, на все функции МФУ кроме ОМП имеются требования к входным сигналам и результатам измерений, а также частично к методам измерений. Исходя из вышесказанного и по результатам анализа возможностей схожих устройств проведем декомпозицию МФУ на блоки: модуль аналого-цифрового преобразования (АЦП), модуль цифровой обработки сигналов (ЦОС), модуль синхронизации, интерфейсный преобразователь (Рисунок 4.1).

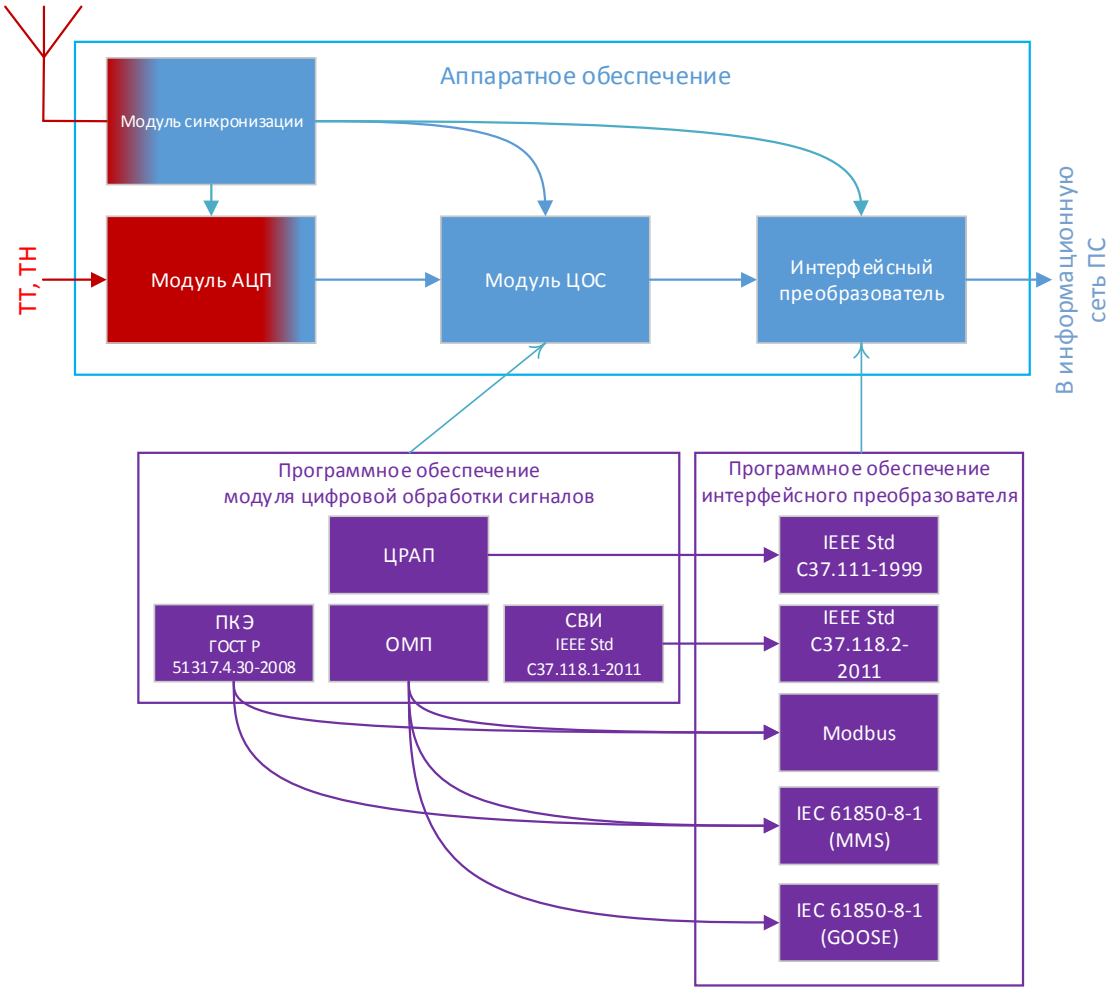


Рисунок 4.1 Структура аппаратно-программных средств МФУ

Входной измерительный преобразователь МФУ (модуль АЦП) производит дискретизацию и квантование аналоговых электрических сигналов для последующей обработки вычислителем уже цифрового сигнала. Модуль АЦП должен соответствовать совокупности технических требований, например, обеспечивать высокие метрологические характеристики для измерителя ПКЭ и синхронизированных векторов, минимальные нелинейные искажения и широкую полосу пропускания для волнового ОМП.

В задачу модуля ЦОС входит математическое обеспечение выполняемых функций и при большом объеме вычислений, связанных с преобразование цифровых сигналов в реальном времени, он должен быть выполнен на основе цифрового сигнального процессора.

Устройство синхронизации может неявно входить в состав модуля ЦОС в виде встроенных часов реального времени, при условии, что точность синхронизации не является критичной для основной функции устройства (например, для регистратора аварийных процессов). Однако в устройствах с повышенными требованиями к точности синхронизации,

таких как МФУ с функцией измерения синхронизированных векторов и волнового ОМП, необходимо применять источники синхронизации с погрешностью не более 1 мкс, основанные на приемниках спутниковых радионавигационных систем (СРНС) GPS/ГЛОНАСС, либо внешние источники на основе стандартов IRIG-B или IEEE 1588 [86].

Задачей интерфейсного преобразователя является интеграция устройства в информационную сеть ПС. Информационная сеть ПС обычно объединяет систему сбора, обработки, отображения и архивирования (SCADA система), автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУ ТП) и автоматизированную систему контроля и учета энергоресурсов (АСКУЭ). Поэтому для максимальной совместимости с различными системами интерфейсный преобразователь должен поддерживать максимально возможное количество интерфейсов и протоколов, применяемых в электроэнергетике. Хотя МФУ с функцией волнового ОМП не может быть элементом цифровой ПС со стороны входов (по шине процессов МЭК 61850-9-2), однако возможна частичная интеграция за счет поддержки интерфейсным преобразователем протокола МЭК 61850-8-1 (MMS шина подстанции).

В настоящее время целесообразно осуществлять интеграцию в информационную сеть с помощью интерфейса 100BASE-T. Для совместимости с устаревшим оборудованием интерфейсный преобразователь должен поддерживать интерфейсы RS-232 или RS-485/RS-422 и протокол Modbus.

4.4 Разработка аппаратного обеспечения основных модулей

4.4.1 Модуль аналого-цифрового преобразования

МФУ предназначено для работы совместно с электромагнитными измерительными ТТ и ТН уже находящимися в эксплуатации на действующей ПС. Характеристики измерительных ТН и ТТ нормируются только для частоты промышленной сети в соответствии с [59] и [60] и при этом, как правило, нет возможности оценить те метрологические характеристики, которые влияют на погрешность измерений в соответствии с [71].

В связи с важностью метрологических характеристик ТН и ТТ для измерения ПКЭ и синхронизированных векторов выделим элементы входящие в средство измерения (СИ). В полную измерительную цепь СИ входят измерительные преобразователи (ТН и ТТ) и измерительное устройство (в данном случае МФУ). Соответствие классу по измерению ПКЭ и синхронизированных векторов можно гарантировать только для МФУ без учета влияния метрологических характеристик измерительных ТН и ТТ. Класс точности полной измерительной цепи может быть ниже класса точности МФУ. Стандарт [71] допускает частичное вхождение элементов полной измерительной цепи в состав СИ. Поэтому нельзя утверждать, что производится измерение ПКЭ в электрической сети, а можно лишь говорить о

возможности измерения ПКЭ в электрической сети при наличии измерительных ТТ и ТН, имеющих метрологические характеристики, позволяющие получить погрешности измерений в соответствии с [71].

В МФУ для упрощения конструкции в модуле АЦП производится контроль только трех фазных напряжений и трех фазных токов. Токи и напряжения нулевой последовательности, кабели подключения к которым, как правило, подводят к средствам защиты и измерений, не используются. Токи и напряжения нулевой последовательности, также, как и прямой и обратной, можно получить преобразованием фазных сигналов.

Модуль АЦП в первую очередь должен обеспечивать совместимость по электрическим параметрам со вторичными цепями измерительных ТТ и ТН, устанавливаемых на ПС. Рассмотрим подробно вопросы подключения устройства к ТТ и ТН.

Измерительные ТН согласно [59] имеют номинальное фазное напряжение вторичных обмоток 100/√3. Классы точности ТН определяются рядом: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0; 3Р; 6Р. Метрологические характеристики измерительных ТН и ТТ нормируются для частоты сети 50 Гц. В связи с этим возникает проблема достоверности измерения ПКЭ в диапазоне частот до 2,5 кГц (50 гармоника). Метрологические характеристики ТН таковы, что иногда не позволяют измерять гармонический состав до 50 гармоники основной частоты [57] в соответствии с [71]. Для соответствия измерителя ПКЭ классу S (максимальная погрешность ±0,5 % в диапазоне 20 – 120% $U_{ном}$) устройство должно подключаться к обмоткам с самым высоким классом точности (0,2 или 0,1).

Общие технические условия к измерительным ТТ, в том числе высоковольтным, зафиксированы в [60]. Согласно [60] ТТ могут иметь следующие среднеквадратические значения номинального вторичного тока: 1 А, 2 А и 5А. На большинстве ПС применяются ТТ с номинальными токами 1 А и 5 А, при проектировании необходимо ориентироваться именно на эти номинальные токи вторичных цепей. Значение номинального вторичного тока 2 А применяется крайне редко.

Вторичные обмотки ТТ подразделяются на обмотки для измерений и учета, и обмотки для защиты. Для обмоток измерения и учета применяется следующий ряд значений классов точности: 0,1; 0,2; 0,2S; 0,5; 0,5S; 1; 3; 5; 10, для обмоток защиты: 5Р и 10Р. Обмотки класса S отличаются расширенным диапазоном (20 – 120 % от $I_н$) нормирования метрологических характеристик, обмотки класса Р имеют номинальную предельную кратность измерений ($I_{макс}/I_н$) более 5.

При регистрации переходных процессов, в особенности аварийных, необходимо фиксировать изменения мгновенных значений в широких пределах. Поэтому устройства ЦРАП подключаются к обмоткам защиты, обладающими номинальной предельной кратностью более

5. Устройства ОМП также, как правило, подключаются к обмоткам защиты, это связано с тем, что в большинстве устройств применяются методы по ПАР, в которых используется контроль аварийных токов. Измерители синхронизированных векторов предназначены как для работы в составе системы мониторинга переходных режимов (СМПР), в которых необходимо получать достоверные значения векторов при переходных (аварийных) процессах, так и для измерения параметров установившегося режима. В первом случае, измерители подключатся к обмоткам защиты, во-втором – к обмоткам учета и измерений.

Обмотки учета и измерений ТТ не нормируются по предельной кратности. Основным требованием является обеспечение метрологических характеристик в рабочем диапазоне до 120% · Iн. Для МФУ ограничен перечень измеряемых ПКЭ показателями только по напряжению для ликвидации противоречия возникающего в необходимости обеспечения высокой предельной кратности для функций ОМП и ЦРАП и одновременно низких погрешностей при измерении ПКЭ по току. Применительно к качеству электроэнергии измерения тока дополняют измерения напряжения, особенно если необходимо определить причины таких событий, как изменение значения напряжения, провал напряжения, прерывания напряжения или несимметрия.

Если ограничить сферу применения измерителя синхронизированных векторов мониторингом переходных режимов, то возможно подключение токовых каналов МФУ к обмоткам защиты.

Радикальным решением проблемы подключения МФУ к измерительным ТТ является введение 3-х дополнительных каналов измерения тока, при этом устройство будет обладать шестью каналами измерения тока, три из которых подключается к обмоткам защиты, оставшиеся – к обмоткам измерения и учета, что позволит измерять ПКЭ по току.

Мощность по каждому измерительному входу тока и входу напряжения не должна превышать 3 ВА в соответствии с [87].

На основе [67], [71] разработаны основные метрологические требования к модулю АЦП (Таблица 4.2). Отметим, что суммарная погрешность измерений складывается из неопределенности, вносимой аппаратным обеспечением и методами измерения, применяемыми в программе расчета.

Таблица 4.2 Метрологические требования к аппаратному обеспечению

Параметр	Значение			
	ЦРАП	ОМП	СИ ПКЭ	СВИ

Диапазон измерений напряжения	-	0 – 1,5 $U_н$	0,1 $U_н$ – 2,0 $U_н$	0,1 $U_н$ – 1,2 $U_н$
Погрешность измерений напряжения	±1 % $U_н$	±1 % $U_н$	±0,1 % $U_н$	±1 %
Диапазон измерений тока	0,05 $I_н$ – 10,0 $I_н$	0,05 $I_н$ – 10,0 $I_н$	-	0,1 $I_н$ – 2,0 $I_н$
Погрешность измерений тока	±1 % $I_н$	±0,1 % $I_н$	-	±1 %
Частотный диапазон измерений	более 1 кГц	до 500 кГц	до 2,5 кГц	до 100 Гц

Максимальный код АЦП для каналов измерения напряжения по классу точности S определяется как

$$q_u = \frac{K_{u\max} \cdot U_н}{\Delta_u} = \frac{2{,}0 \cdot U_н}{0{,}1\% \cdot U_н} = \frac{2{,}0}{0{,}001} = 2000, \quad (4.1)$$

где K_{umax} – коэффициент верхней границы диапазона измерений напряжения, Δ_u – неопределенность измерений напряжения, $U_н$ – номинальное значение напряжения.

Соответственно для каналов измерения тока

$$q_i = \frac{K_{i\max} \cdot I_н}{\Delta_i} = \frac{10{,}0 \cdot I_н}{0{,}1\% \cdot I_н} = \frac{10{,}0}{0{,}001} = 10000, \quad (4.2)$$

где K_{imax} – коэффициент верхней границы диапазона измерений тока, Δ_i – неопределенность измерения, $I_н$ – номинальное значение тока.

Меньшим шагом квантования обладает канал измерения тока т.к. $q_i > q_u$. Ближайшее число большее, чем q_i = 10000 и являющееся степенью числа 2, является 2^{14} = 16384. Следовательно, при однополярном измерении разрядность АЦП токового канала должна быть не менее 14 и с добавлением одного разряда для знака – не менее 15 при двухполярном измерении. Как правило, все серийно производимые интегральные схемы АЦП имеют разрядность кратную числу 2, поэтому минимальная разрядность АЦП должна равняться 16. Для унификации узлов модуля АЦП целесообразно выполнять каналы измерения токов и каналы измерения напряжений на единой элементной базе, в частности с одинаковыми типами АЦП.

Частота дискретизации модуля АЦП для обеспечения диапазона измерения 0 – 500 кГц, согласно теореме Котельникова, должна составлять не менее 1 МГц.

Таблица 4.3 Технические требования к модулю аналого-цифрового преобразования

Параметр	Значение

Диапазон измерений напряжения	0,1 $U_н$ – 2,0 $U_н$
Неопределенность измерений напряжения	±0,1 % $U_н$
Диапазон измерений тока	0,1 $I_н$ – 10,0 $I_н$
Неопределенность измерений тока	±0,1 % $I_н$
Частотный диапазон измерений	до 500 кГц
Разрядность АЦП	16

В итоге (Таблица 4.3) в состав модуля АЦП должно входить не менее 6 одноканальных 16-ти разрядных АЦП, с частотой дискретизации не менее 1 МГц. Использование одноканальных АЦП, вместо одного многоканального АЦП с мультиплексором, обусловлено необходимостью гарантировать одновременную выборку аналогового сигнала и быстрое чтения результата преобразования. Современные многоканальные АЦП, как правило, имеют одно устройство выборки и хранения, к которому через мультиплексор по очереди подключаются входные сигналы. АЦП производит дискретизацию и квантование аналогово сигнала, сохраненного в устройстве выборки и хранения, поэтому невозможно обеспечить одновременную «оцифровку» нескольких сигналов. Интерфейс модуля АЦП должен быть согласован с модулем цифровой обработки сигналов. Для объединения одноканальных АЦП в один интерфейс целесообразно использовать параллельный интерфейс. Сигналом начала преобразования должен являться сигнал от модуля синхронизации (Рисунок 4.1). Еще одним важным условия является необходимость обеспечения модулем АЦП гальванической развязки, которую целесообразно применять для уже «оцифрованных» входных сигналов, чтобы не учитывать погрешности вносимые устройствами гальванической развязки в аналоговый сигнал.

4.4.2 Модуль цифровой обработки сигналов

Модуль ЦОС производит считывание сигналов с модуля АЦП, их обработку и выдачу результатов вычислений на интерфейсный преобразователь. В качестве основного компонента модуля используется цифровой сигнальный процессор (ЦСП), так как в большинстве вычислений применяются методы цифровой обработкой сигналов (цифровые фильтры и быстрое преобразование Фурье).

Особое значение при проектировании модуля ЦОС имеет выбор способа привязки кодов из модуля АЦП к всемирному координированному времени (UTC). Основными сигналами синхронизации являются сигналы «1МГц» и «1с» (смена секунды UTC по фронту данного импульса), полученные от СРНС с помощью модуля синхронизации. Сигнал «1МГц» является одновременно сигналом запуска преобразования в модуле АЦП и сигналом для формирования временной базы микросекунды UTC. Для создания временной базы целесообразно использовать два таймера-счетчика в составе ЦСП в режиме счетчика внешних импульсов. По

каждому фронту импульсов «1МГц» и «1с» происходит увеличение кода в счетчиках на единицу. Счетчик «1МГц» сбрасывается по фронту сигнала «1с», чем обеспечивается «выравнивание» кода микросекунды относительно сигнала «1с». В счетчик сигнала «1с» предварительно загружается значения всемирного координированного времени, полученного от СРНС в формате POSIX TIME [88]. Таким образом, код в регистре первого счетчика является микросекундой в текущей секунде всемирного координированного времени, а во втором – текущая секунда всемирного координированного времени. Максимальный код в счетчике сигнала «1МГц» составляет 1 000 000, что соответствует разрядности 20 бит, разрядность счетчика сигнала «1с» соответствует формату POSIX TIME, т.е. равна 32 бит. Программное обеспечение может в любой момент считать код из таймеров, тем самым получить точное время и время последнего «оцифрованного» отсчета. Использование аппаратных средств для формирования временной базы позволит избежать проблем со сложностью учета всех состояний (например, при использовании вложенных прерываний и обработке сигналов «1МГц» и «1с» по прерываниям) программного обеспечения при чтении текущего времени, которые могут привести к рассинхронизации устройств.

Требования к вычислительной производительности ЦСП возможно оценить только после нескольких этапов разработки программного обеспечения (проектирования и разработки алгоритмов). Чаще всего начальные требования задаются эмпирически и, применяя итерационный подход к разработке устройства, вырабатываются окончательные требования к вычислительной производительности ЦСП. В большинстве случаев достаточно двух итераций. На первом этапе реализуются основные алгоритмы на так называемых оценочных комплектах (evaluation kit), на которых производят оценку требуемой производительности ЦСП. На втором этапе переносят разработанные алгоритмы на процессор, выбранный с учетом оценки проведенной на предыдущем этапе. Процессор для оценочного комплекта выбирается по наличию необходимых периферийных модулей (различные интерфейсы, таймеры и т.д.), а его производительность, исходя из эмпирической оценки. В данном случае, очевидно, что производительность ЦСП должна быть не менее 12 MIPS (миллион операций в секунду), только для организации чтения и сохранения данных из АЦП. Как видно далее из структурных схем программного обеспечения для обеспечения функции измерителя ПКЭ и синхронизированных векторов требуется не менее 3-х цифровых фильтров различных типов на один канал измерения, а также множество вспомогательных операций. Фильтры имеют в среднем по 100 коэффициентов, следовательно, минимальная производительность составляет $6 \cdot 3 \cdot 100 \cdot 10^6$ = 1800 MIPS. Как правило, производительность процессора в оценочном комплекте выбирают с запасом, чтобы после оценки выбрать наиболее подходящий процессор сократив по возможности конечную стоимость устройства.

Устройство должно обладать внешним оперативным запоминающим устройством (ОЗУ) для хранения массива оцифрованных данных и осциллограмм аварийных процессов, и перепрограммируемым постоянным запоминающим устройством (ППЗУ) для хранения различных констант и уставок. Исходя из минимальной длительности записи 100 мс определим минимальный размер буфера для сохранения осциллограммы: $V = 6 \cdot t_A \cdot f_s \cdot q = 6 \cdot (100 \cdot 10^3) \cdot (1 \cdot 10^6) \cdot 16 = 9{,}6$ Мбит. Следовательно, модуль ЦОС должен иметь в своем составе ОЗУ объемом не менее 9,6 Мбит.

4.4.3 Модуль синхронизации

Модуль синхронизации должен обеспечивать привязку измерений электрических величин к всемирному координированному времени, заключающийся в синхронизации моментов запуска аналого-цифрового преобразования во всех МФУ и получения текущей даты и времени.

Согласно [67] ошибка вычисления фазы вектора должна быть не более 0,01 радиана (0,57 эл. град.). При этом максимальная ошибка синхронизации для частоты 50 Гц должна быть не более ±31 мкс. Для реализации волнового ОМП требуется источник синхронизации с погрешностью не более ± 1 мкс (Глава 1). Цифровой регистратор должен обеспечивать привязку отсчетов к всемирному координированному времени с погрешностью не более, чем период максимальной частоты дискретизации ±1 мкс. Измеритель ПКЭ согласно [71] требует привязки измерений ко времени с погрешностью не более ±20 мс (для частоты сети 50 Гц) для класса А и не более ±5 с в течение 24 часов для класса S.

Наиболее распространенными источниками синхронизации в электроэнергетических системах являются СРНС. В настоящее время полностью функционируют две системы NAVSTAR GPS и ГЛОНАСС. Системы Галилео, Бэйдоу находятся на этапе вывода группировок спутников на орбиту и не работают на большей части поверхности Земли.

Системы NAVSTAR GPS и ГЛОНАСС работают по одинаковому принципу, но имеют различные несущие частоты, методы модуляции и кодирования сигнала. Основным назначением данных систем является определение координат приемника за счет измерения моментов времени сигнала, посылаемого каждую секунду синхронно со всех спутников (при известных координатах спутников). Секундный сигнал на спутниках синхронизирован с международной шкалой всемирного координированного времени с высокой точностью. Точность хода часов обеспечивается наличием на борту спутников атомных часов, а также постоянной корректировкой их с помощью станций наземного базирования.

Современные приемники сигналов СРНС формируют синхроимпульс «1с» с максимальным отклонением от всемирного координированного времени (UTC), не превышающим ±100 нс [19], [20] с вероятностью 99%. Сигнал «1с» является опорным сигналом

для умножителей частоты на основе устройств фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Применение устройств ФАПЧ совместно с синхроимпульсом «1с» позволяет получить сигнал синхронизации с частотой более 1 МГц с высокой точностью (не более ±500 нс с вероятностью 99% [19]) и стабильностью (среднеквадратическое значение джиттера в полосе 1 Гц – 1 МГц не более 10 нс [19]).

Приемник сигналов СРНС может быть внутренним модулем устройства, либо составной частью внешнего источника синхронизации стороннего производителя. Внешний источник при этом обычно использует протоколы IRIG-B [69], IEEE 1588 [86] и другие узкоспециализированные протоколы для передачи сигналов синхронизации.

Стандарт IRIG-B поддерживает несколько способов передачи сигналов синхронизации: уровни транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ), амплитудная модуляция и модифицированный манчестерский код. Наиболее распространенным является передача двоично-десятичных кодов времени с помощью амплитудной модуляции несущего сигнала частотой 1 кГц, синхронизированного с секундой UTC. Стандарт IEEE 1588 [86] относительно новый и на данный момент не столь распространен как IRIG-B. Однако возможности устройств с поддержкой данного стандарта позволяют осуществлять синхронизацию с погрешностью менее ±1 мкс по широко распространенному интерфейсу Ethernet (IEEE 802.3). Применение внешних источников синхронизации актуально при наличии на ПС большого количества различных устройств, производящих синхронизированные измерения. Наличие единого источника гарантирует синхронность измерений в пределах ПС для всех устройств, а также упрощает монтаж оборудования (нет необходимость в установке антенн для каждого устройства, компенсации задержек от длины кабеля антенны и т.д.).

Итак, для модуля синхронизации в составе МФУ целесообразно применять внутренний приемник СРНС GPS/ГЛОНАСС, что обеспечивает независимость устройства в месте установки от наличия внешних источников синхронизации, и позволит эксплуатировать устройства круглосуточно в любой точке поверхности Земли. Требования по точности синхронизации должны опираться на требования ОМП и ЦРАП, т.е. максимальное отклонение для сигналов «1с» и «1МГц» должно составлять не более ±1 мкс с вероятностью 99%.

4.5 Разработка алгоритмов и программного обеспечения МФУ

Цикл разработки сложного программного обеспечения включает в себя этапы [89]:

- выработка требований;
- высокоуровневое проектирование (проектирование архитектуры);
- детальное проектирование;
- кодирование и отладка;

- блочное тестирование;
- интеграция;
- тестирование системы;
- корректирующее сопровождение.

Задача исследователя, как правило, оканчивается детальным проектированием ПО. Кодирование и отладка, а также различные виды тестирования, при известных алгоритмах и полностью прописанных требованиях к ПО, сводятся к инженерным задачам.

Этап выработки требований к ПО пересекается с этапом выработки требований к аппаратному обеспечению при разработке встраиваемых систем, поэтому частично требования к ПО были выдвинуты в § 4.3.

После декомпозиции (высокоуровневого проектирования) программного обеспечения МФУ основными программными компонентами (программными модулями) по их функциональному назначению являются программные модули:

- регистрации аварийных процессов;
- определения времени появления фронта волны;
- определения аварии;
- обмена метками времени;
- расчета расстояния до места повреждения;
- расчета и усреднения ПКЭ трехфазной сети;
- расчета и усреднения синхронизированных векторов трехфазной сети;
- интерфейсного преобразователя.

Помимо функциональных программных модулей необходимы подпрограммы чтения входных сигналов, формирования буферов, механизмы распределения процессорного времени и памяти, подпрограммы настройки параметров МФУ и другое системное программное обеспечение. Для снижения накладных вычислительных расходов программное обеспечение в модуле ЦОС работает без операционной системы.

Чтение данных из АЦП (Рисунок 4.2) и их буферизация осуществляется подпрограммой обработчиком прерывания по завершению цикла работы контроллера прямого доступа к памяти. По окончанию работы подпрограммы, если буфер данных полностью заполнился, происходит последовательный запуск программных модулей определения аварии, регистрации аварийных процессов, измерения ПКЭ и синхронизированных векторов. По данным из буфера модули ПКЭ и синхронизированных векторов производят расчет и усреднение требуемых электрических параметров, а программный модуль ЦРАП сохраняет буфер как предысторию аварийного процесса. Сигналом для начала сохранения осциллограмм является сигнал от

устройств РЗ, либо сигнал от внутреннего модуля определения аварии. Запуск программного модуля ОМП идет по команде от модуля ЦРАП после окончания процесса сохранения аварийной осциллограммы. По окончании работы каждый из функциональных модулей передает результат своей работы в интерфейсный преобразователь. Важным условием работы системы является условие выполнения всех функций в реальном времени, то есть завершение работы программных модулей до момента готовности очередного буфера.

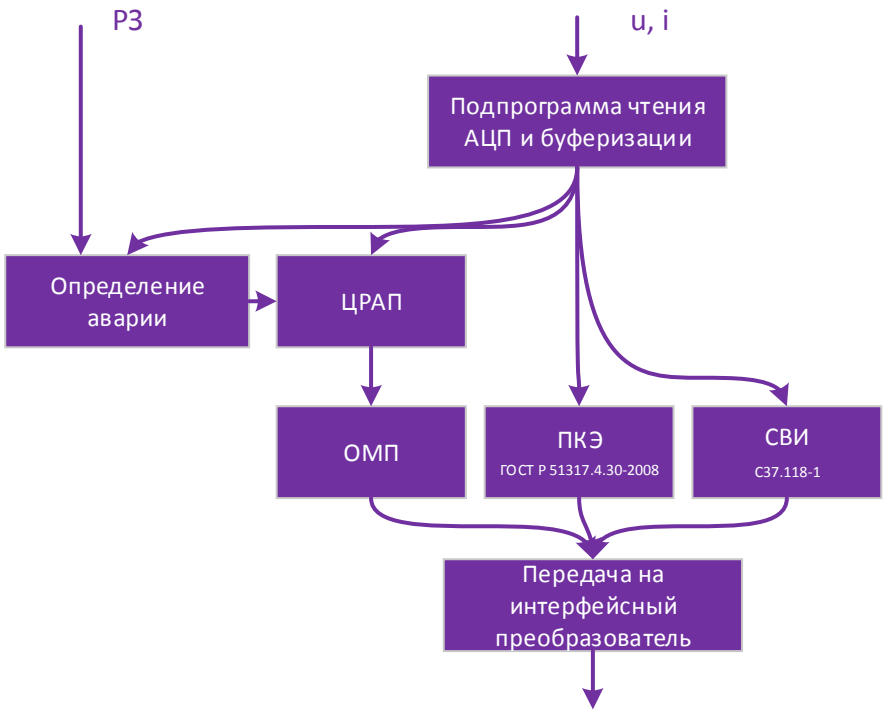


Рисунок 4.2 Структурная схема программного обеспечения модуля цифровой обработки сигналов

4.5.1 Определение времени появления фронта волны, обмен метками времени и расчет расстояния до места повреждения

В перечень задач программного обеспечения для реализации ОМП (Рисунок 4.3) входят:

- определение аварии;
- регистрация аварийного процесса;
- определение времени появления фронта волны;
- обмен метками времени между удаленными устройствам;
- расчет расстояния до места повреждения.

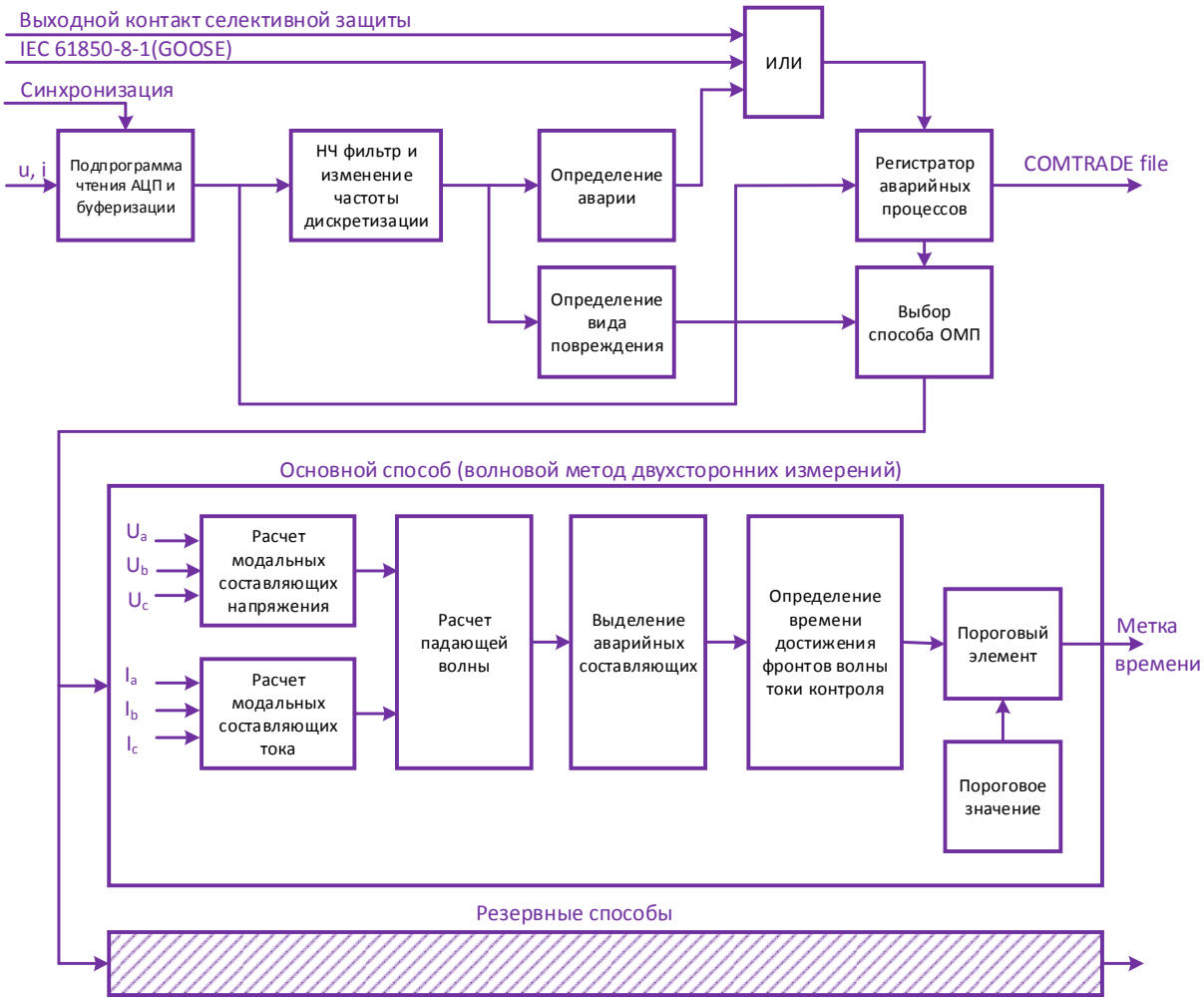


Рисунок 4.3 Структурная схема программного обеспечения для реализации ОМП

Запуск подпрограммы определения времени появления фронта волны осуществляется модулем регистрации аварийных процессов по окончании сохранении осциллограммы аварийного процесса. Программный модуль регистрации аварийных процессов осуществляет сохранение мгновенных значений токов и напряжений в течение заданного интервала времени в память устройства по сигналу начала записи.

Сигналом начала записи является либо сигнал от внешних средств релейной защиты, либо внутренний сигнал от программного модуля обнаружения аварийного процесса. Сигнал от внешних средств РЗ является сигналом от селективной защиты ВЛ в которой производится ОМП. Внутренний программный модуль определения аварии работает как максимальная токовая защита, либо как направленная токовая защита.

В случае пуска регистрации от модуля определения аварии, работающего как максимальная токовая защита, сигнал от средств РЗ может служить критерием корректной (селективной) работы модуля определения аварии. Если модуль определения аварии выдал

сигнал на сохранение осциллограммы, но позже сигнал от средств РЗ не поступил в устройство, то ОМП по данной осциллограмме не проводится.

Пуск ОМП от внутренней направленной токовой защиты аналогичен принципу работы направленной токовой защиты с высокочастотной (ВЧ) блокировкой. Запуск подпрограммы определения времени появления фронта волны осуществляется в случае превышения значения тока порогового и срабатывания пускового органа направления мощности. Вместо ВЧ блокировки используется сигнал с меткой времени от противоположного конца ВЛ, который осуществляет запуск расчета расстояния до места повреждения. Если после запуска подпрограммы расчета времени появления фронта волны метка времени с противоположного конца не поступила, то расчет расстояния не производится. Использование пуска от внутренней направленной токовой защиты позволяет выявлять повреждения в данной ВЛ (абсолютная селективность) при отказе основных и резервных защит.

Осциллограмма аварийного процесса подразделяется на доаварийную запись, аварийную и послеаварийную. Минимальная длительность записи складывается из доаварийной записи длительностью не менее 2 периодов промышленной частоты ($t_{ДАмин}$ = 40 мс для обеспечения работы фильтра аварийных составляющих в предложенном способе ОМП) и аварийной записи. Время аварийной записи складывается из времени срабатывания измерительных органов современных средств релейной защиты (не более $t_{РЗ}$ = 40 мс [33]) и времени срабатывания выключателей ($t_{выкл}$ = 20 мс). Следовательно, минимальная длительность осциллограммы должна составлять $t_{мин} = t_{РЗ} + t_{ДАмин} + t_{выкл}$ = 100 мс. Вследствие того, что сигнал пуска записи осциллограммы поступает через $t_{РЗ}$ = 40 мс после возникновения КЗ в ВЛ, циклический буфер предаварийной записи должен быть не менее. $t_{ПАмин} = t_{РЗ} + t_{ДАмин}$ = 60 мс.

На следующем этапе производится определение времени появления фронта волны с применением предложенных способов повышения эффективности (Глава 2 и Глава 3). Мгновенные значения фазных токов и напряжений преобразуются в напряжения падающих волн в модальных координатах по выражению

$$U_{пад} = \frac{\mathrm{T_u^{-1}} \times U + Z \times T_i^{-1} \times I}{2}, \qquad (4.3)$$

где $U_{пад}$ – матрица-столбец напряжений падающей волны, T_u, T_i – квадратные-матрицы преобразований в модальные координаты, Z – квадратная-матрица модальных волновых сопротивлений, U, I – матрицы-столбцы фазных напряжений и токов. Расчет времени происходит в каналах с наименьшим искажением фронта волны (в первом и во втором). Матрицы T_u, T_i, Z, а также номера каналов с наименьшими искажениями рассчитываются для конкретной линии до введения устройства в эксплуатацию.

Аварийные составляющие вычисляются из массива мгновенных значений напряжения падающей волны как разность значений, разделенных интервалом, кратным периоду промышленной частоты T в соответствии с выражением

$$U_{пад,а}(t) = U_{пад}(t) - U_{пад}(t-T), \tag{4.4}$$

где $U_{пад,\ а}$ – аварийная составляющая напряжения падающей волны в модальных координатах. Из выражения (4.4) следует, что для корректного выделения аварийных составляющих требуется предыстория аварийного процесса длительностью не менее одного периода промышленной частоты. Значение периода T определяется периодом составляющей промышленной частоты в начале осциллограммы.

Фиксация времени прихода фронта волны осуществляется с помощью расчета коэффициента эксцесса. После расчета полученные значения сравнивается с пороговым значением, по превышении порога фиксируется номер отсчета, по которому определяется время начала переходного процесса.

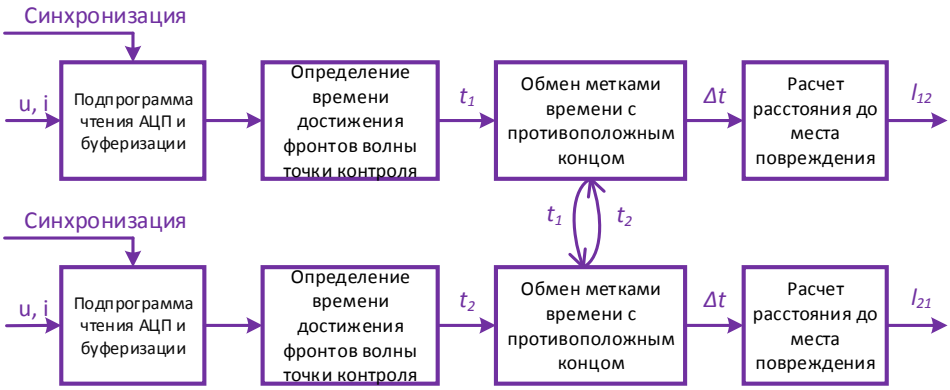


Рисунок 4.4 Структурная схема программного обеспечения для реализации ОМП

Полученная метка времени передается на интерфейсный преобразователь, который производит обмен метками времени. Целесообразно организовать два режима обмена метками: с использованием центрального сервера и без использования сервера. В первом случае все устройства передают метки времени на сервер, который рассылает полученные метки времени каждому устройству. Вариант с центральным сервером целесообразно использовать при установки устройств на линии с ответвлениями, а также при отсутствии выделенных IP адресов устройств. Второй вариант применяется для линии без ответвлений и при наличии прямого IP адреса у каждого устройства, и предполагает передачу каждым устройством рассчитанной им метки времени другому. Обмен метками производится по внутреннему протоколу поверх протокола TCP с использованием сервера и поверх протокола UDP без использования сервера. Канал связи до сервера организуется через сеть Интернет, при обмене без сервера – через сеть

Интернет, через GSM или проводной модем, ВЧ связь или оптоволоконную связь между ПС с организацией соединения «точка-точка». Расстояние до места повреждения рассчитывается и отображается каждым устройством независимо, и впоследствии передается в информационную сеть ПС.

Сервер в общем случае производит расчет расстояния по следующему алгоритму (Рисунок 4.5)

$$\begin{aligned} t_i &= \min\{t_0, t_1, ..., t_N\}, \\ t_j &= \min^{-1}\{t_0, t_1, ..., t_N\}, \\ l_i &= \frac{L_{ij} + (t_i - t_j)v}{2}, \end{aligned} \tag{4.5}$$

где N – количество ответвлений, t_i, t_j – метки времени фронтов волн первыми достигших ПС, L_{ij} – длина участка линии, с минимальным пробегом волны, l_i – расстояние от ПС i до места повреждения.

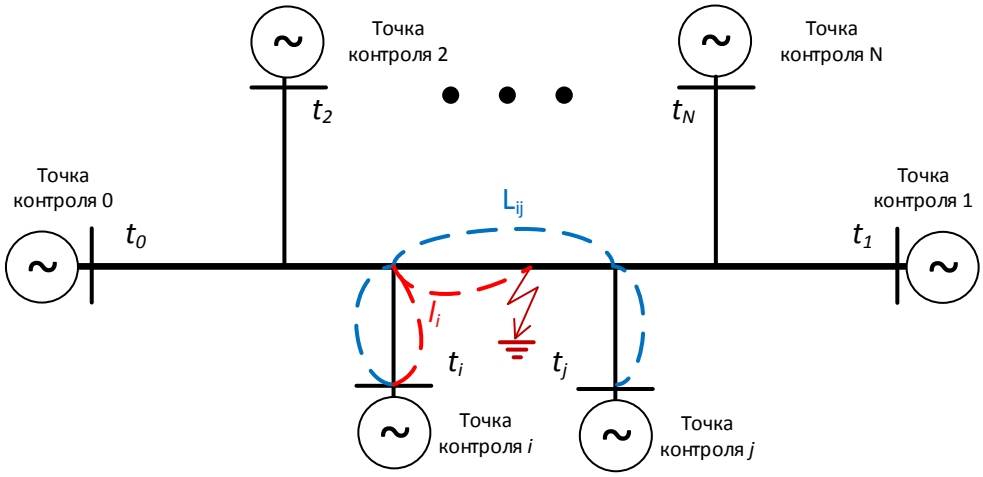


Рисунок 4.5 К определению расстояния до места повреждения

Как правило в проектной документации на ВЛ фиксируются расстояния до ответвлений от ПС (l_{0i}) и длина ответвлений (l_{1i}) (Рисунок 4.6), по которым расстояние между точками контроля определяется как

$$L_{ij} = l_{0j} - l_{0i} + l_{1i} + l_{1j}. \tag{4.6}$$

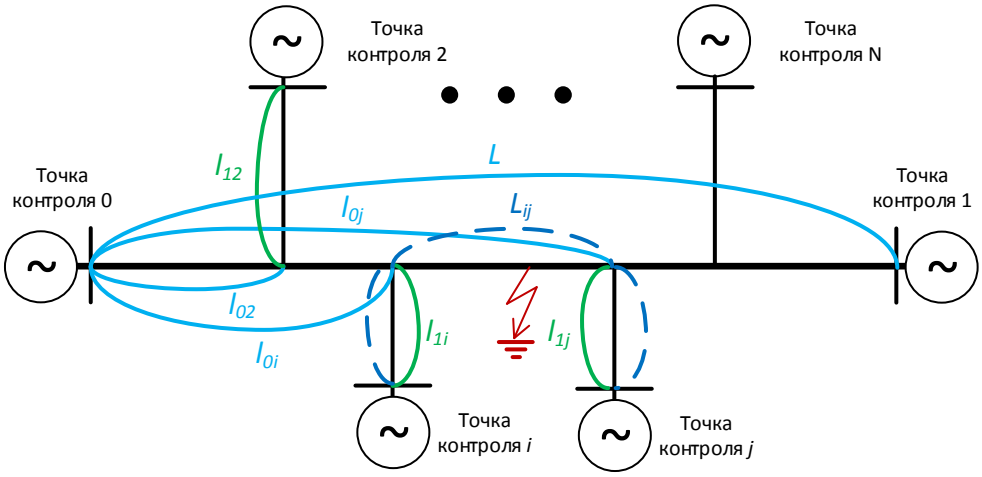


Рисунок 4.6 К определению минимального пробега

В случае установки устройства на линию без ответвлений расстояние до места повреждения определятся как

$$l = \frac{L - (t_0 - t_1)v}{2}, \tag{4.7}$$

где L – длина ВЛ, v – скорость распространения волны, t_0, t_1 – моменты превышения порога, зафиксированные на противоположных концах ВЛ.

4.5.2 Регистрация аварийных процессов

Предполагается, что функция регистрации аварийных процессов в МФУ является вспомогательной для проведения резервного ОМП с помощью внешних программ. Согласно [85] в качестве основного способа расчета ОМП для всех ВЛ 110 кВ и выше рекомендуется использовать программное обеспечения для ОМП по данным аварийных осциллограмм с помощью программ типа WinBres [14] и АРМ-СРЗА [16]. Стоит отметить, что частота дискретизации МФУ позволяет проводить ОМП по осциллограммам как методами по ПАР (автоматическое, с помощью внешних программ), так и волновыми односторонними и двухсторонними (ручное, выставление маркера появления фронта волны).

4.5.3 Расчет и усреднение ПКЭ трехфазной сети

Модуль цифровой обработки сигналов производит вычисление ПКЭ в соответствии с методами [71]. Методы измерений всех показателей качества, применяемые в программном модуле, соответствуют классу S характеристик процесса измерения (далее класс S). Стандарт [71] раскрывает общие положения по методам измерений без требований к конкретным алгоритмам вычисления. Соответствие СИ ПКЭ заявленному классу будет во многом зависеть от используемых алгоритмов.

МФУ измеряет показатели качества в электрических сетях систем электроснабжения переменного трехфазного тока частотой 50 Гц. Приведем состав измеряемых ПКЭ и отметим особенности алгоритмов вычисления:

- частота, f;
- среднеквадратическое значение фазных напряжений, U_a, U_b, U_c;
- длительность и глубина провала напряжения, Δt_n и δU_n;
- длительность и коэффициент временного перенапряжения, $\Delta t_{пер}$ и $K_{пер}$;
- длительность прерывания напряжения, $\Delta t_{прер}$;
- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, K_{2U};
- коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности, K_{0U}.

Частота сети f определяется по напряжению только в одном опорном канале. В качестве опорного канала используется напряжение фазы A. Также производится вычисление среднеквадратического значения фазных токов, I_a, I_b, I_c.

Для уменьшения верхней границы полосы пропускания входных сигналов $u_a(i)$, $u_b(i)$, $u_c(i)$ до значения, допустимого по [71], производится уменьшение частоты дискретизации, а также предварительная фильтрация для устранения эффекта наложения спектров (Рисунок 4.7). В опорном канале происходит выделение сигнала основной составляющей с помощью полосового фильтра с последующим определением периода основной составляющей (T_1). Расчет среднеквадратических значений U_a, U_b, U_c происходит по значениям в буфере одного периода. Быстрое преобразование Фурье осуществляется по значениям в буфере 10 периодов и результат преобразования $\bar{U}_A$, $\bar{U}_B$, $\bar{U}_C$ используется для вычисления коэффициентов несимметрии. Блок «Вычисление провалов, перенапряжений и прерываний» осуществляет расчет длительностей и параметров провалов, перенапряжений и прерываний. Результаты измерений среднеквадратических значений напряжений и коэффициентов несимметрии объединяются на 3-х, 10-и минутных, 2-х часовых интервалах в соответствии с [71] в соответствующем блоке. Аналогичным образом производится расчет параметров тока: среднеквадратических значений и коэффициентов несимметрии.

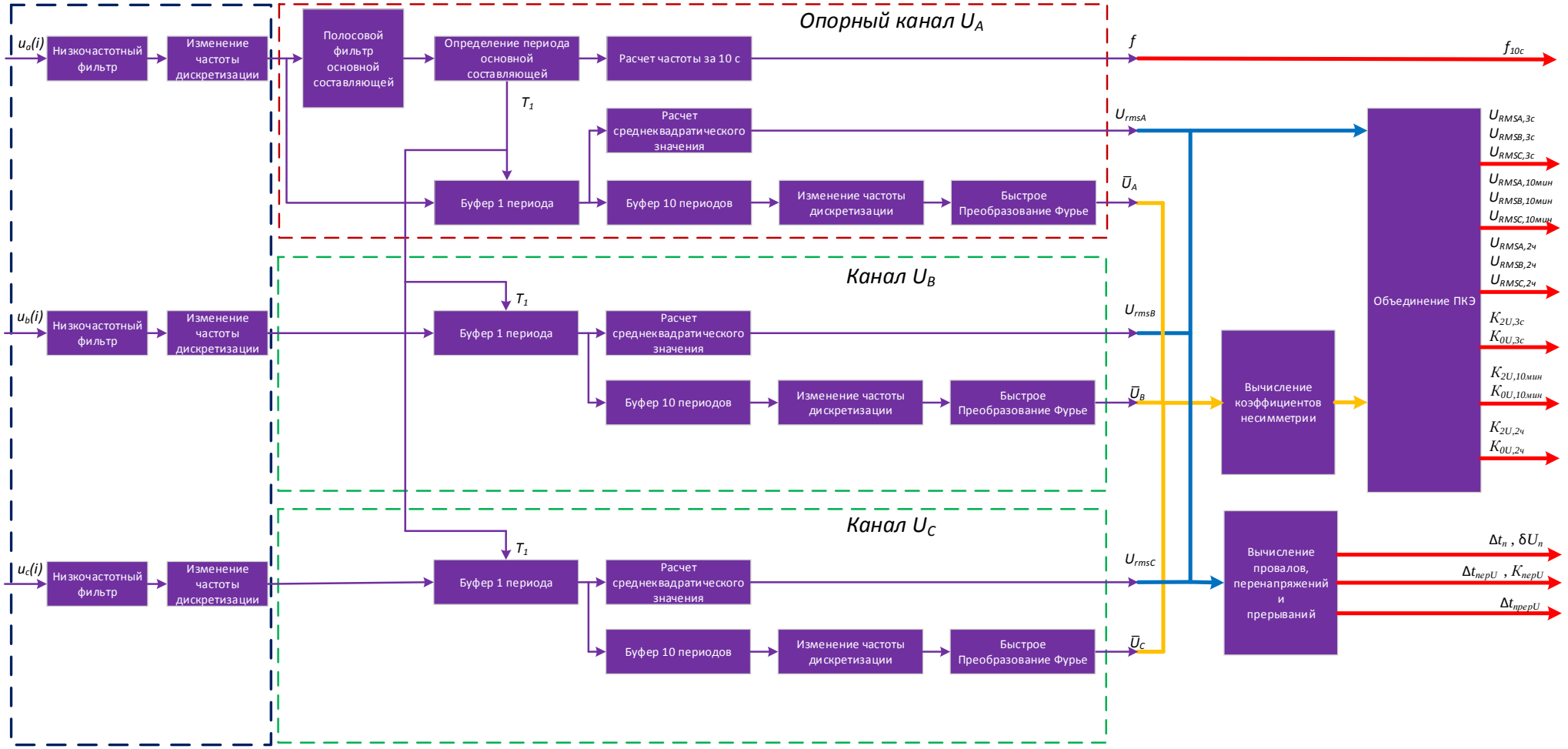


Рисунок 4.7 Структурная схема программного модуля измерения ПКЭ

Отметим особенности алгоритмов, применяемых в программном модуле измерения ПКЭ. Эти особенности выявлены при анализе процессов обработки информации в отдельных блоках программного модуля. Ширина спектра входного сигнала, применяемая в МФУ для целей ОМП, является избыточной для измерения ПКЭ. Ограничение ширины спектра за счет понижения частоты дискретизации позволит оптимизировать процесс вычисления. Однако в результате понижения частоты дискретизации может возникнуть эффект наложения спектров [43], который приводит к тому, что высокочастотные составляющие сигнала накладываются на низкочастотные, если в спектре исходного сигнала содержатся частоты, превышающие половину новой частоты дискретизации. Для устранения этого эффекта применяется цифровой фильтр нижних частот (НЧ) с частотой среза f_{cutoff}, не превышающей половины новой частоты дискретизации $f_{s,out}/2 > f_{cutoff}$. Для низкочастотной фильтрации целесообразно применять фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр) [43]. Возможность построение КИХ фильтра с линейной ФЧХ [43] является основной причиной использования его для целей изменения частоты дискретизации. Разностное уравнение КИХ-фильтра:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N} h_k \cdot x(n-k), \tag{4.8}$$

где $y(n)$ – выходной сигнал, N – порядок фильтра, h_k – коэффициенты фильтра, $x(n-k)$ – входной сигнал. Применение НЧ фильтра также увеличивает отношение сигнал/шум за счет подавление высокочастотных шумов в входном сигнале.

Граница полосы пропускания НЧ фильтра определяется максимальной частотой наивысшей гармонической составляющей в сигнале в соответствии с [71] для класса S: $f_{pass} \geq f_{1,max} \cdot N = 57{,}5 \cdot 40 = 2308$ Гц, где $f_{1,max} = 57{,}5$ Гц – максимальная частота основной составляющей, $N = 40$ – наивысший порядок гармоники. С небольшим запасом примем $f_{pass} = 2500$ Гц и коэффициент передачи $H_{fpass} = 1$ дБ, границу полосы задержания – на частоте $f_{stop} = 4000$ Гц для коэффициента передачи $H_{fstop} = -80$ дБ. Новая частота дискретизации должна быть не менее $f_{s,out} = f_{stop} \cdot 2 = 8$ кГц, согласно теореме Котельникова. Исходя из этого, коэффициент децимации $R = 1$ МГц / 8 кГц = 125. Непосредственный расчет коэффициентов фильтра h_k для следующих параметров $f_s = 1$ МГц, $f_{pass} = 2500$ Гц, $H_{fpass} = 1$ дБ, $f_{stop} = 4000$ Гц, $H_{fstop} = -80$ дБ проводился в программе fdatool из комплекса Matlab.

Полосовой фильтр выделяет сигнал основной составляющей для последующего измерения ее частоты. Полосовой фильтр построен на основе фильтра с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ – фильтр) [43]. Проведенные расчеты показали, что использование КИХ фильтра в качестве полосового фильтра с требуемыми параметрами нецелесообразно в связи с высоким порядком фильтра и как следствие внесением большой задержки в сигнал и повышением требований к быстродействию микропроцессорной системы.

Разностное уравнение, описывающее БИХ – фильтр, имеет следующий вид

$$y(n) = \sum_{i=0}^{P} b_i \cdot x(n-i) - \sum_{k=1}^{Q} a_k \cdot y(n-k), \tag{4.9}$$

где P – порядок входного сигнала, b_i - коэффициенты входного сигнала, Q – порядок обратной связи, a_k - коэффициенты обратной связи, $x(n)$ – входной сигнал, $y(n)$ – выходной сигнал. Согласно [71] область значений влияющей величины для частоты составляет 42,5 – 57,7 Гц. С небольшим запасом зафиксируем нижнюю границу частоты полосы пропускания f_{pass_lo} = 40 Гц, а верхнюю f_{pass_hi} = 60 Гц. Коэффициенты БИХ фильтра (b_i и a_k) также рассчитаны в программе fdatool для следующих параметров: f_{pass_lo} = 40 Гц, f_{stop_lo} = 35 Гц, f_{pass_hi} = 60 Гц, f_{stop_hi} = 65 Гц, H_{fstop} = – 80 дБ, H_{fpass} = 1 дБ, f_s = 8 кГц.

Определение периода (частоты) основной составляющей производится для интервалов 40 мс и 10 с по числу «положительных переходов через ноль» (переход сигнала из отрицательных значений в положительные) сигнала после полосового фильтра. Значение периода на интервале 40 мс является входным параметром для буферов периода. Значение периода (частоты) на интервале 10 с является измеряемым показателем качества в соответствии с [71].

Минимальный интервал измерений среднеквадратических значений токов и напряжений составляет один период основной составляющей. Значения сигналов аккумулируются в блоке «Буфер 1 периода». Среднеквадратическое значение напряжения (тока) на минимальном интервале измерений рассчитывается как

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n} U_i^2}{n}}, \tag{4.10}$$

где n – число отсчетов в интервале, U_i – мгновенные значения напряжения (тока) в интервале расчета. Число отсчетов в интервале может меняться в зависимость от текущей частоты основной составляющей.

В блоке «Объединение ПКЭ» проводится расчет среднеквадратических значений в интервалах 3 секунды, 10 минут и 2 часа. Например, объединение значений напряжения за 3 секунды производится как

$$U_{\text{RMS,3с}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{150} U_{RMS,i}^2}{150}}, \tag{4.11}$$

где $U_{RMS,3c}$ - действующее значение, объединенное на 3 секундах, $U_{RMS,i}$ - действующее значение, рассчитанное за i период основной составляющей. Строго говоря, объединение значений происходит не за 3 с, а за 150 интервалов основной составляющей, которое может

достигать 150·1/42,5 = 3,52 с. При этом объединение измерений за 10 мин и 2 часа, происходит строго по отметкам времени, допуская перекрывающие интервалы в соответствии с [71].

При измерении параметров несимметрии используется метод симметричных составляющих. Для несимметричной трехфазной системы напряжения нулевой, прямой и обратной последовательностей рассчитываются как

$$\begin{pmatrix} \overline{U}_0 \\ \overline{U}_1 \\ \overline{U}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \overline{U}_A \\ \overline{U}_B \\ \overline{U}_C \end{pmatrix}, \tag{4.12}$$

где $\bar{U}_0$, $\bar{U}_1$, $\bar{U}_2$ - комплексные значения напряжений нулевой, прямой и обратной последовательностей соответственно, $\bar{U}_A$, $\bar{U}_B$, $\bar{U}_C$ - комплексные значения фазных напряжений основной составляющей, $a = e^{j\cdot\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\cdot\frac{\sqrt{3}}{2}$ - комплексный множитель.

Для получения комплексных значений фазных напряжений применяется разложения сигнала в ряд Фурье. Преобразование производится по значениям в 10 периодах основной составляющей. В микропроцессорных системах, как правило, используется быстрое преобразование Фурье (БПФ). Особенностью БПФ является необходимость использования буфера с количеством отсчетов являющихся степенью числа 2. Поэтому перед применением БПФ используется процедура изменения частоты дискретизации, для того чтобы количество точек в 10 периодах основной составляющей было равно числу 2048 (ближайшая степень двойки большая, чем $N = 10\cdot f_s/f_{1min}$ = (10·8 кГц)/42,5 Гц = 1882).

Коэффициенты несимметрии напряжений (токов) по обратной последовательности рассчитывается как

$$K_{2U} = \frac{\left|\overline{U}_2\right|}{\left|\overline{U}_1\right|}\cdot 100\%. \tag{4.13}$$

Коэффициенты несимметрии напряжений (токов) по нулевой последовательности как

$$K_{0U} = \frac{\left|\overline{U}_0\right|}{\left|\overline{U}_1\right|}\cdot 100\%. \tag{4.14}$$

Провал напряжения характеризуется величиной напряжения δU_n и длительностью провала Δt_n. За величину δU_n принимается наименьшее из напряжений, измеренных во всех каналах во время провала.

Временное перенапряжение характеризуется коэффициентом $K_{пер}$ и длительностью временного перенапряжения $\Delta t_{пер}$. За величину временного перенапряжения $U_{пер,max}$ принимается наибольшее значение напряжения, измеренное во всех каналах во время этого перенапряжения. Коэффициент временного перенапряжения рассчитывается по формуле

$$K_{\text{перU}} = \frac{U_{пер,\max}}{U_{ном}}, \tag{4.15}$$

где $U_{пер,max}$ – величина временного перенапряжения, $U_{ном}$ – номинальное напряжение сети.

Прерывание напряжения характеризуется только длительностью $\Delta t_{прер}$. Для временных перенапряжений, провалов напряжения и прерываний осуществляется маркирование времени начала события. Перенапряжения, провалы и прерывания напряжения начинаются, когда значения напряжения в одном или более каналов превышает порог и оканчиваются, когда напряжение во всех каналах равно или ниже порогового значения в соответствии с [71].

4.5.4 Расчет и усреднение синхронизированных векторов трехфазной сети

Стандарт [67] вводит два типа устройств. Первые из них – устройства, предназначенные непосредственно для измерения векторов, именуемые PMU (Phasor Measurement Units), и вторые – PDC (Phasor Data Concentrator) – устройства, предназначенные для сбора информации о векторах от PMU и передачи их на верхний уровень информационной сети. Многофункциональное устройство выполняет только функции измерения векторов, то есть является PMU в терминах стандарта [67].

Векторным представлением входного сигнала *x(t)* является комплексное число

$$X = X_r + jX_i = (X_m/\sqrt{2})e^{j\varphi}, \tag{4.16}$$

где $X_m/\sqrt{2}$ – среднеквадратическое значение сигнала и φ – угол между основной составляющей сигнала и синусоидой номинальной частоты промышленной сети, синхронизированной с секундой всемирного координированного времени. Угол φ равен нулю, когда максимум основной составляющей сигнала *x(t)* совпадает с моментом смены секунды всемирного координированного времени. Сигнал *x(t)* при частоте отличной от номинальной можно записать в виде

$$x(t) = X_m cos(2\pi(f_0+\Delta f)t + \varphi_0) = X_m cos(2\pi f_0 t + (2\pi\Delta f t + \varphi_0)), \tag{4.17}$$

где f_0 – номинальная частота сети, Δf – отклонение частоты сети от номинальной, X_m, φ_0 – амплитуда и фаза составляющей номинальной частоты. При этом его векторное представление записывается как $X = (X_m/\sqrt{2})e^{j(2\pi\Delta f t+ \varphi 0)}$, следовательно, фаза векторного представления сигнала *x(t)* зависит от разности текущей частоты и номинальной $\Delta f = f - f_0$.

Помимо расчета векторов стандарт обязывает рассчитывать текущую частоту сети f как производную фазы по времени

$$f(t) = \frac{1}{2\pi}\frac{d\psi(t)}{dt}, \tag{4.18}$$

где $\Psi(t) = 2\pi(f_0+\Delta f)t + \varphi_0$, а также скорость изменения частоты сети *ROCOF* (Rate Of Change Of Frequency) как

$$ROCOF(t) = \frac{df(t)}{dt}. \quad (4.19)$$

Оценка погрешности метода (устройства) вычисления векторов производится по суммарному вектору ошибки *TVE* (Total Vector Error), который является разницей между точным значением вектора заданным тестирующим сигналом (устройством) X_{true} и значением, измеренным тестируемым методом (устройством) X_{meas}

$$TVE = \left| \frac{X_{true} - X_{meas}}{X_{true}} \right|. \quad (4.20)$$

Погрешность измерения частоты рассчитывается как $FE = |f_{true} - f_{meas}|$, погрешность измерения скорости изменения частоты как $RFE = |(df/dt)_{true} - (df/dt)_{meas}|$.

Устройство должно передавать или сохранять результат измерения вектора с частотой, кратной номинальной частоте сети. Обязательными частотами передачи являются 10, 25 и 50 раз в секунду для частоты сети 50 Гц. Частота передачи должна задаваться при настройке устройства.

Стандарт [67] вводит два класса процесса измерения векторов. Класс процесса измерения устанавливается разработчиком или задается пользователем, в случае поддержки обоих классов. Класс P (protection) предназначается для задач, где требуется быстрый отклик на изменение вектора и не требуется дополнительная фильтрация входного сигнала, например, для контроля переходных режимов энергосистемы. Класс M (measurement) используется, когда не требуется быстрый отклик и когда важна высокая точность измерений. Поэтому в классе M применяется дополнительная фильтрация. В итоге к классу P предъявляются менее строгие требования по погрешности и более строгие требования по общему времени задержки, а для класса M противоположные требования. МФУ поддерживает только класс P, потому что как было показано ранее, предполагается подключение устройства к обмоткам защиты.

Стандарт [67] не устанавливает метода расчета векторов. Согласно стандарту выбор метода оставлен за разработчиком устройства. Критерий выбора – соответствие стандарту погрешностей устройства (метода) для различных типов испытательных сигналов.

Среди известных способов оценки вектора заданной частоты из произвольного сигнала представляют интерес следующие:

- аппроксимация сигналом номинальной частоты;
- оконное преобразование Фурье.

Первый способ подразумевает аппроксимацию исходного сигнала наиболее подходящим сигналом, подчиняющимся гармоническому закону, с помощью метода наименьших квадратов.

В качестве варьируемых параметров задаваемого гармонического сигнала в методе наименьших квадратов выступают амплитуда и фаза, а частота постоянна и равна номинальной частоте промышленной сети. Амплитуда и фаза вектора равна амплитуде и фазе сигнала, который обладает минимальной суммой квадратов разности мгновенного значения с мгновенным значением исходного сигнала.

Во втором способе исходный сигнал предварительно умножается на весовые коэффициенты (оконную функцию), после этого производится дискретное преобразование Фурье по номинальной частоте. Расчет вектора для *i* отсчета производится по соотношению

$$X(i) = \frac{\sqrt{2}}{Gain} \sum_{k=-N/2}^{N/2} x_{i+k} \cdot W_k \cdot e^{-j(i+k)\Delta t \omega_0}, \qquad (4.21)$$

$$Gain = \sum_{k=-N/2}^{N/2} W_k,$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0$- круговая частота промышленной сети, N – порядок фильтра, $\Delta t = 1/f_s$, f_s – частота дискретизации, x_i – отсчет сигнала, W_k – коэффициенты фильтра (оконная функция).

Вычислительная сложность способа, основанного на методе наименьших квадратов, на порядок превосходит сложность способа, основанного на преобразовании Фурье. С учетом того что производится разделение вычислительных ресурсов микропроцессорной системы МФУ целесообразно использовать преобразование Фурье.

Использование фильтра создает групповую задержку сигнала

$$G_d = N/2 * \Delta t, \qquad (4.22)$$

которая учитывается при расчете угла вектора.

Для трехфазной системы частота и скорость изменения частоты рассчитываются по прямой последовательности (Рисунок 4.8). Метод расчета прямой последовательности аналогичен методу используемому в программном модуле измерения ПКЭ.

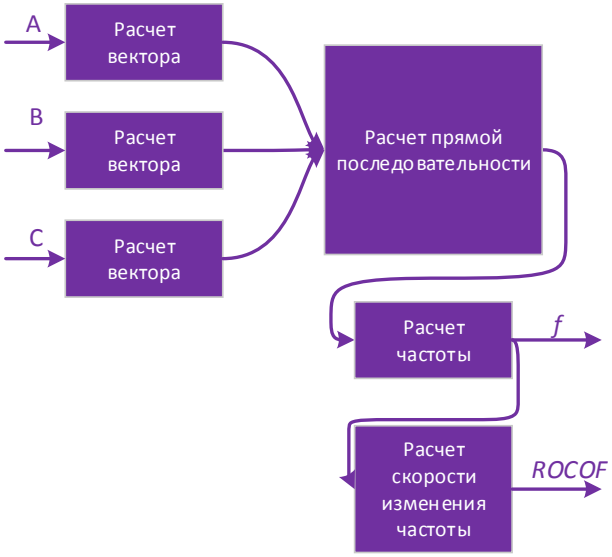


Рисунок 4.8 Структурная схема расчета частоты и скорости изменения частоты для трехфазной системы

Коэффициенты фильтра (sinc) рассчитываются как

$$W(k) = \frac{\sin(2\pi \cdot \frac{2 f_{cutoff}}{f_s} \cdot k)}{2\pi \cdot \frac{2 f_{cutoff}}{f_s} \cdot k} \cdot h(k), \tag{4.23}$$

где k = -N/2 – N/2, N – порядок фильтра, f_{cutoff} – частота среза, $h(k)$ – функция Хэмминга, f_s – частота дискретизации.

Коэффициенты окна Хэмминга [67] определяется как

$$h(k) = 0{,}53836 - 0{,}46164 \cdot \cos\left(\frac{2\pi k}{N-1}\right), \tag{4.24}$$

где N – количество отсчетов в окне.

Вторая часть стандарта [67] содержит информацию о протоколе передачи измеренных векторов. Программный модуль синхронизированных измерений отвечает только за расчет векторов. Полученные вектора передаются на интерфейсный преобразователь, одной из задач которого является реализация протокола [67].

4.5.5 Программное обеспечение интерфейсного преобразователя

По протоколам Modbus TCP и МЭК 61850-8-1 (MMS) должна быть доступна история успешных расчетов расстояния до места повреждения и измеренные показатели качества (Рисунок 4.9). Дополнительно применяется протокол Modbus RTU, дублирующий Modbus TCP,

поверх физического интерфейса RS-232 либо RS-485. Формат и структура данных для протоколов Modbus TCP и Modbus RTU идентичны.

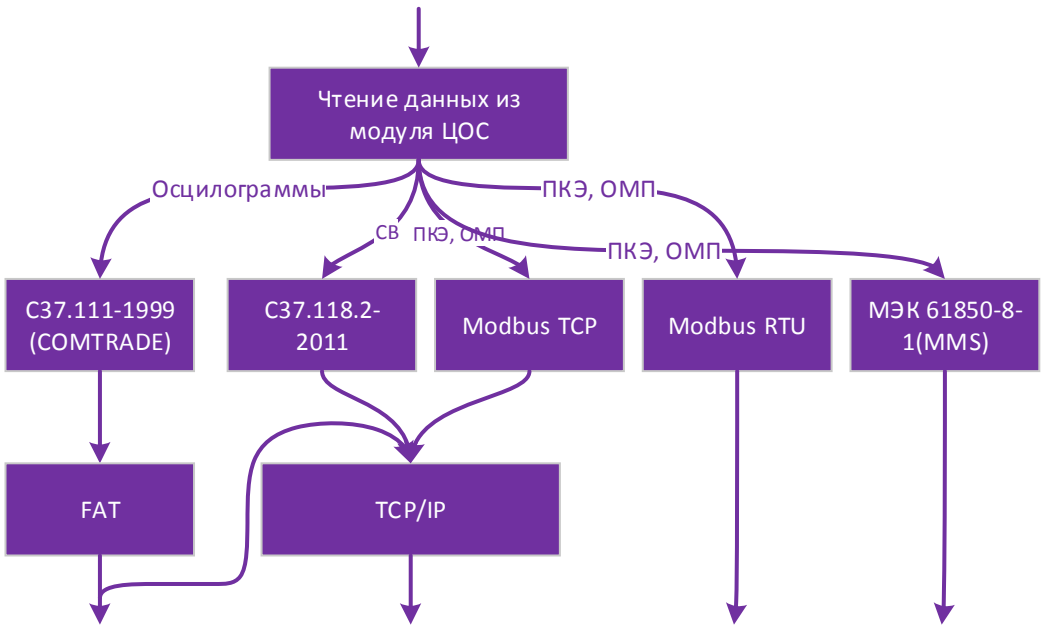


Рисунок 4.9 Структурная схема программного обеспечения интерфейсного преобразователя

Вывод рассчитанных векторов должен производиться согласно стандарту [67].

Обмен данными между устройствам на разных ПС желательно производить по протоколу TCP/IP. Информацию о метках времени начала переходного процесса и успешных вычислениях расстояния до места повреждения необходимо сохранять в журнале событий. Вычисление расстояния до места повреждения происходит после обмена информацией о времени начала переходного процесса с аналогичным устройством, находящимся на другом конце линии.

Записанные осциллограммы преобразуются в формат COMTRADE [90] и сохраняются на карте памяти с файловой системой fat. Доступ к сохраненным осциллограммам осуществляется по протоколу ftp через информационную сеть ПС.

4.6 Основные структурные и функциональные схемы МФУ

По результатам детализации технических требований и разработки аппаратно-программного обеспечения (§ 4.4, § 4.5) проведена опытно-конструкторской работа по созданию макета МФУ. Структурная схема макета (Рисунок 4.10) основана на схеме, предложенной в § 4.3 и содержит дополнительные элементы: модуль коммутации, объединяющий модули в единое устройство, внешнюю карту памяти и средство индикации.

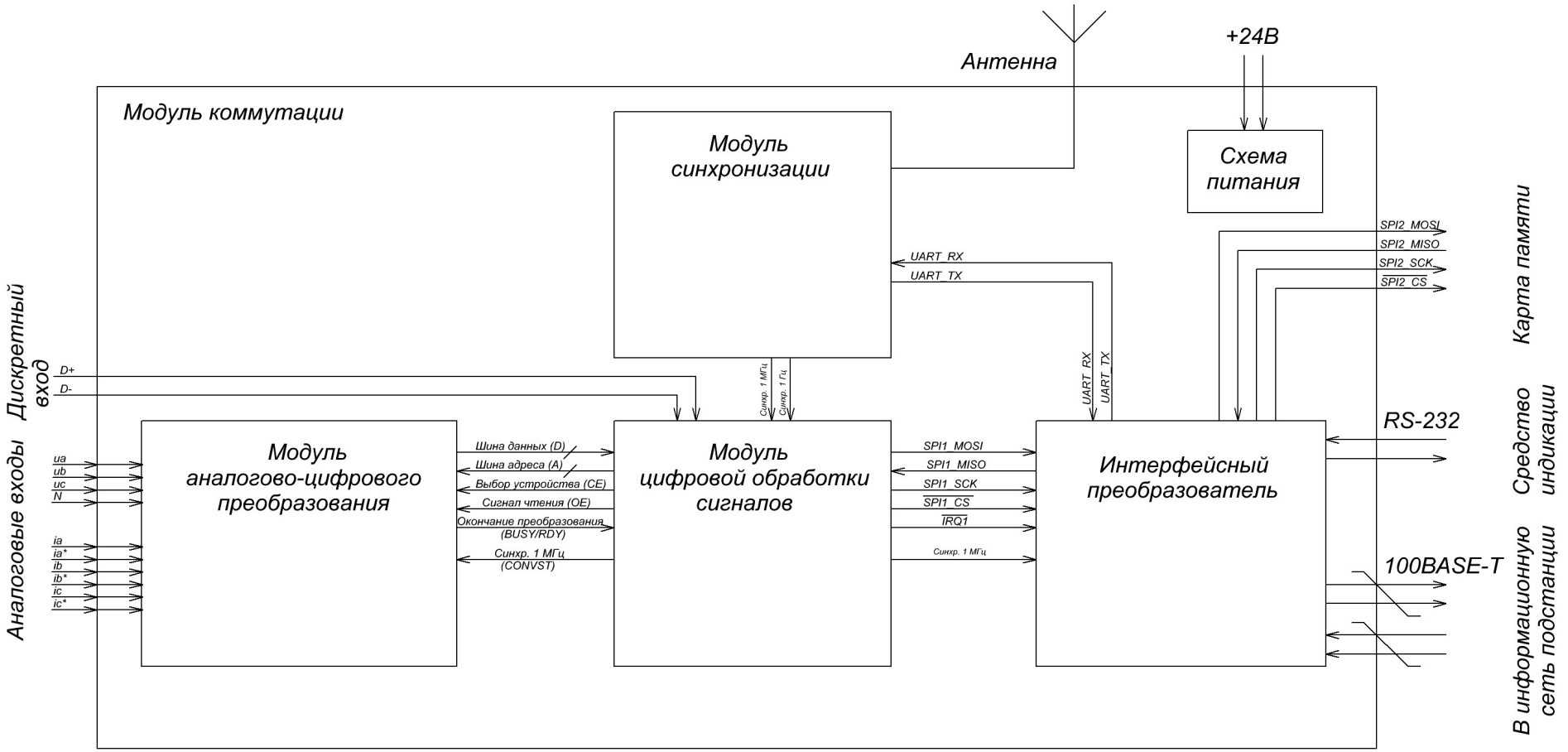


Рисунок 4.10 Структурная схема макета МФУ

Отметить особенности аппаратного и программного обеспечения макета МФУ.

Модуль АЦП. Функциональная схема модуля АЦП (Рисунок 4.11) содержит основные узлы, необходимые для понимания принципа работы всего модуля. В состав модуля входят 3 канала измерения напряжения (*A1*, *A2*, *A3*), 3 канала измерения тока (*A4*, *A5*, *A6*), логическая схема управления измерительными каналами (*DD1*, *DD2*), устройство гальванической развязки (*A8*) и схема питания (*A7*).

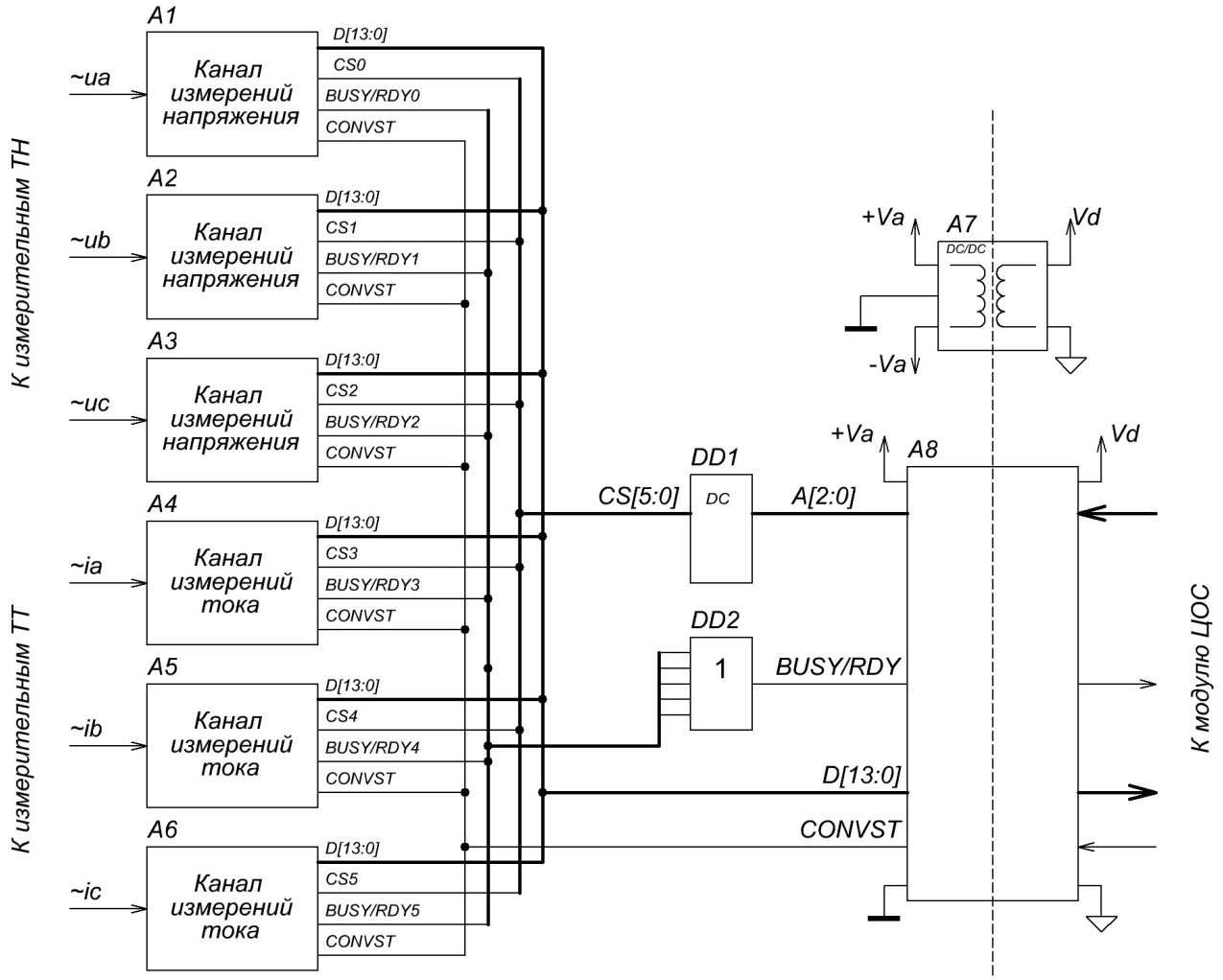


Рисунок 4.11 Функциональная схема модуля АЦП

Далее в тексте одновременно употребляются аббревиатура «АЦП» в двух смыслах, в первом как «модуль АЦП» и во втором как «интегральные схемы АЦП», входящие в состав каналов измерения.

Сигналом начала преобразования является сигнал *CONVST*, поступающий от модуля синхронизации, через модуль цифровой обработки сигналов (Рисунок 4.10). Сигнал *CONVST* синхронизирован с всемирным координированным временем и имеет частоту f_s = 1 МГц. После подачи сигнала *CONVST* все интегральные схемы АЦП, входящие в состав каналов измерения

(*A1 – A6*), одновременно производят выборку аналоговых сигналов. По завершении преобразования каждый измерительный канал независимо выставляет сигнал окончания преобразования (*BUSY/RDY0 – BUSY/RDY5*). Схема ИЛИ (*DD2*) объединяет данные сигналы в общий *BUSY/RDY*, который принимает состояние «0» только тогда, когда все шесть АЦП завершили преобразование.

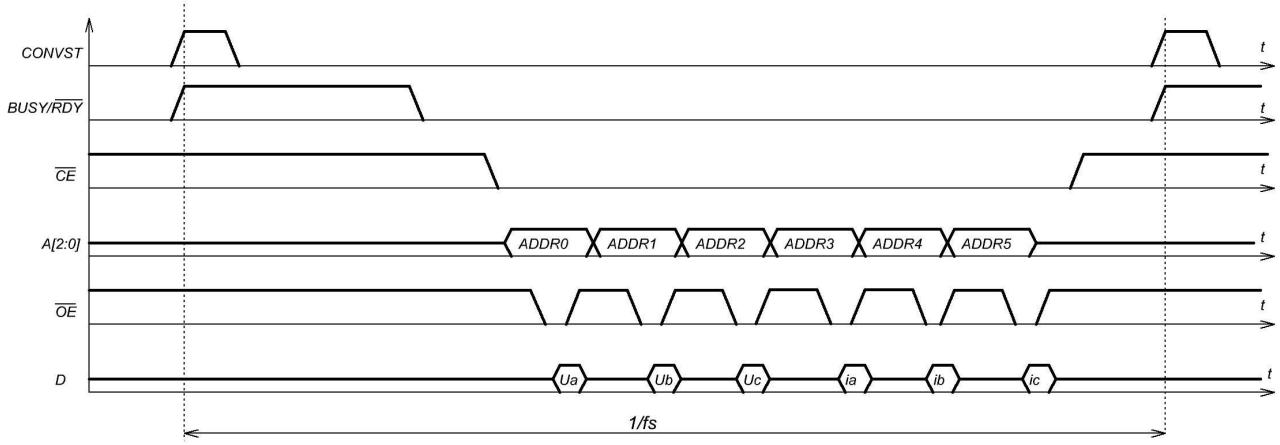


Рисунок 4.12 Временные диаграмма чтения данных из модуля АЦП

Чтение кодов из модуля АЦП происходит следующим образом (Рисунок 4.12): с помощью сигнала *CE* (*Chip Enable*) модуль ЦОС переводит весь модуль АЦП в режим чтения, выставляет номер канала на шине адреса *A*[2:0] и формирует строб чтения *OE* (*Output Enable*). Дешифратор *DD1* выбирает требуемый канал измерения по коду на шине адреса *A*[2:0], выбор канала определяется активным уровнем сигнала *CS* (*Chip Select*) соответствующей интегральной схемы АЦП. По переднему фронту сигнала *OE* происходит чтение результатов преобразования по шине данных *D*. Алгоритм чтения данных из модуля АЦП аналогичен «классической» последовательности чтения из запоминающего устройства с параллельным интерфейсом.

Устройство *A8* и источник питания *A7* обеспечивают гальваническое разделение входных аналоговых сигналов и выходных цифровых сигналов для обеспечения помехозащищенности и безопасности в соответствии с требованиями [91]. Пробивное напряжение гальванического барьера составляет 2,5 кВ.

Напряжение питания модуля АЦП V_d = +3,3 В вначале преобразуется в уровни + 7 В и – 7 В при помощи импульсных источников питания. Далее полученное напряжение понижается линейными стабилизаторами до $+V_a$ = + 5 В и $–V_a$ = – 5 В для питания аналоговой части интегральной схемы АЦП. Такое техническое решение позволяет добиться низкого уровня пульсации напряжения, что положительно сказывается на метрологических характеристиках устройства.

Отметим схемотехнические решения, использованные в измерительных каналах модуля АЦП (Рисунок 4.11 *A1 – A6*). Интегральная схема АЦП *ADS8422* [92] используется как в каналах измерения тока, так и в каналах измерения напряжений. Интегральная схема АЦП позволяет проводить преобразование двухполярного сигнала, что снимает необходимость в добавлении узла смещения входного напряжения, наличие которого может вносить дополнительную погрешность измерения. Интегральная схема АЦП выбрана с учетом обеспечения требований по разрядности (не менее 14 разрядов) и частоты дискретизации (не менее 1 миллиона выборок/с), а также наличия параллельного выходного интерфейса.

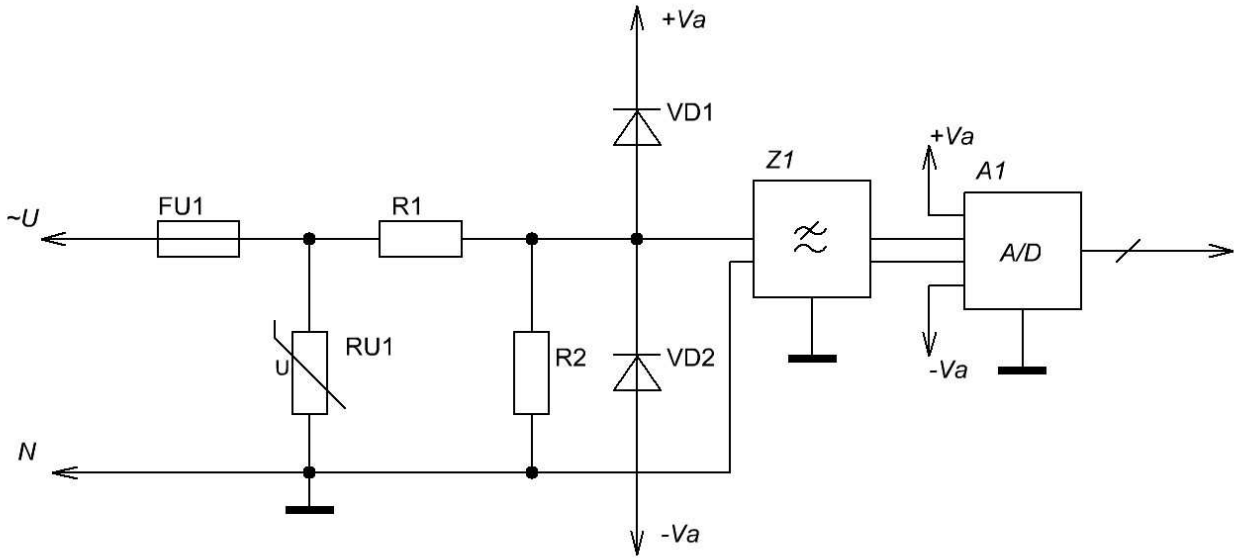


Рисунок 4.13 Функциональная схема канала измерений напряжения

Входные цепи каналов измерения напряжения (Рисунок 4.13) подключаются во вторичную цепь трансформаторов напряжения [59] с номинальным вторичным напряжением 100 В. Подключение производится непосредственно, без промежуточных трансформаторов. Плавкая вставка *FU1* и ограничитель перенапряжения *RU1* в канале измерения напряжения служат для защиты выходных цепей от длительных и кратковременных перенапряжений. При кратковременном перенапряжении *RU1* ограничивает уровень напряжения на входе резистивного делителя напряжения (*R1* и *R2*), при длительном – плавкая вставка *FU1* перегорает, вследствие длительного протекания тока через *RU1*.

Максимальное напряжение на входе устройства не должно превышать

$$U_{in\max} = \frac{2{,}0 \cdot 100 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 163\,\text{В}. \qquad (4.25)$$

В качестве ограничителя напряжения используется варистор *FNR-14K201* с максимальным рабочим напряжением по постоянному току 170 В. Рабочий ток предохранителя *FU1* должен составлять как минимум четверть максимального тока (I_{max} = 2,5 А) через варистор *RU1*, для обеспечения срабатывания *FU1*. В качестве предохранителя применяется *ВП2Б-1В* с номинальным рабочим током 0,63 А.

Делитель напряжения *R1* и *R2* обеспечивает ограничение максимального уровня входного напряжения до максимально допустимого уровня напряжения на входе интегральной схемы АЦП. Данный уровень для *ADS8422* равен напряжению внутреннего опорного источника V_{ref} = +4,096 В [92]. Верхнее плечо *R1* выполнено на прецизионном резисторе с допуском ±0,5 % и высокой температурной стабильностью. Сопротивление верхнего плеча составляет 1 МОм для соответствия требованиям [91] по потреблению измерительными цепями. Коэффициент деления K_u составляет

$$K_u = \frac{V_{ref}}{\frac{2{,}0 \cdot U_{ном} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}}} = \frac{4{,}096}{\frac{2{,}0 \cdot 100 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}}} = 0{,}02508. \quad (4.26)$$

Сопротивление нижнего плеча *R2* равно

$$R2 = \frac{K_u R1}{1 - K_u} = \frac{0{,}02508 \cdot 1 \cdot 10^6}{1 - 0{,}02508} = 25{,}7 кОм. \quad (4.27)$$

Ближайшее значение номинала из ряда E96 равно *R2* = 25,5 кОм (значение номинала округлено в меньшую сторону для охвата всего диапазона измерений).

Входные цепи каналов измерения тока (Рисунок 4.14) подключаются во вторичную цепь трансформаторов тока [60] с номинальным вторичным током 1 А и 5 А через промежуточный ТТ *TA1*. Промежуточный ТТ обеспечивает согласование уровней сигналов и гальваническую развязку между вторичными цепями измерительных трансформатора тока ПС. Промежуточный ТТ выбирается по следующим параметрам: полоса пропускания, ошибка по фазе и амплитуде, линейность, коэффициент трансформации. ТТ *T04AC-45A-85-K/0* полностью соответствует требованиям и обладает следующими характеристиками [93]: коэффициент трансформации K_m = 1/3000, амплитудная погрешность не более 0,15%, фазовая погрешность не менее 0,06 град, полоса пропускания до 100 кГц на уровне 3 дБ.

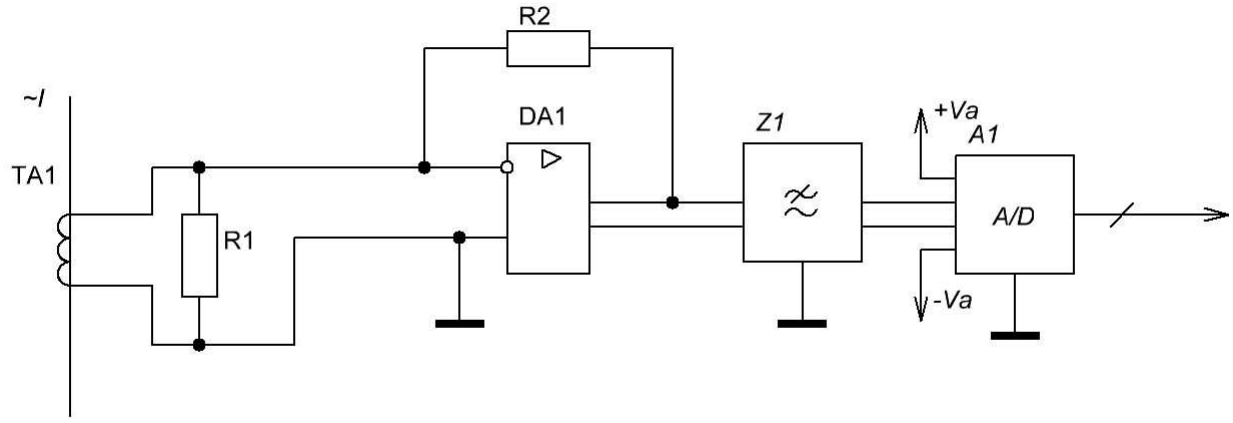


Рисунок 4.14 Функциональная схема канала измерений тока

Преобразователь ток/напряжения, выполненный на операционном усилителе *DA1* и резисторе *R2*, имеет коэффициент передачи $U_{вых} = - I_{вх}*R2$. Сопротивление резистора *R2* находится как

$$R2 = \frac{V_{ref}}{\frac{2{,}0 \cdot I_{ном} \cdot \sqrt{2}}{K_m}} = \frac{4{,}096}{\frac{2{,}0 \cdot 5 \cdot \sqrt{2}}{3000}} = 868 Ом. \qquad (0)$$

Ближайший номинал из ряда E96 равен *R2* = 866 Ом. Резистор *R1* служит для защиты *TA1* от перенапряжения на выходе ТТ при разрыве вторичной цепи.

Процесс дискретизации непрерывного сигнала может сопровождаться эффектом наложения (aliasing). Например, если необходимо произвести дискретизацию непрерывного сигнала содержащего основную составляющею (f_1 = 50 Гц) и если в сигнале содержатся составляющие с частотами $f_s - f_1$, $f_s + f_1$, $2 \cdot f_s - f_1$ и т.д., то данные составляющие появятся в цифровом сигнале на частоте f_1, внося при этом амплитудную и фазовую ошибки. Для предотвращения данного эффекта применяется фильтр нижних частот *Z1* (Рисунок 4.15) для каналов измерения тока и напряжения с частотой среза менее половины частоты дискретизации ($f_s/2$).

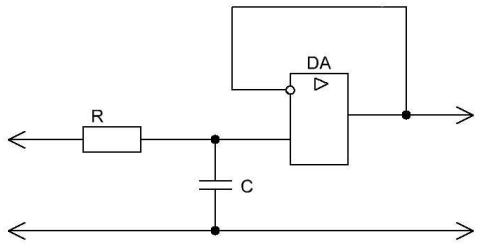


Рисунок 4.15 Функциональная схема НЧ фильтра

Передаточная функция фильтра равна

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}. \tag{4.28}$$

Граничная частота пропускания фильтра $\omega_{гр}$ определяется как

$$\left|H(j\omega_{гр})\right| = \frac{1}{\sqrt{2}}. \tag{4.29}$$

Из (4.29) и (4.28) следует, что граничная частота $\omega_{гр}$ фильтра равна

$$\omega_{гр} = \frac{1}{RC} = \frac{1}{\tau}. \tag{4.30}$$

Приняв сопротивление *R* равным 1 кОм, получим, что при частоте дискретизации (f_s) равной 1 МГц, емкость конденсатора *C* составит

$$C = \frac{1}{R \cdot 2\pi(f_s/2)} = \frac{1}{1 \cdot 10^3 \cdot 2\pi \cdot 500 \cdot 10^3} = 32 нФ. \tag{4.31}$$

Операционный усилитель *DA* в составе фильтра используется как повторитель сигнала и элемент согласования выходного сопротивления фильтра и входного сопротивления АЦП.

Модуль ЦОС. Модуль ЦОС представляет собой микропроцессорную систему (Рисунок 4.16), содержащую процессор цифровых сигналов (ПЦС), внешнее оперативно запоминающее устройство (ОЗУ) и постоянно запоминающее устройство (ПЗУ). Интегральная схема *DD1 TMS320C6455* [94] является 32-х разрядным ПЦС оптимизированным для вычислений данных в формате с фиксированной запятой. ПЦС обладает широким набором внутренних периферийных модулей, в том числе контроллером внешней памяти (*EMIF*), контроллером памяти DDR2, портами ввода/вывода общего назначения (*GPIO*), универсальными последовательными интерфейсами (*McBSP*) и контроллером прямого доступа к памяти (*EDMA*).

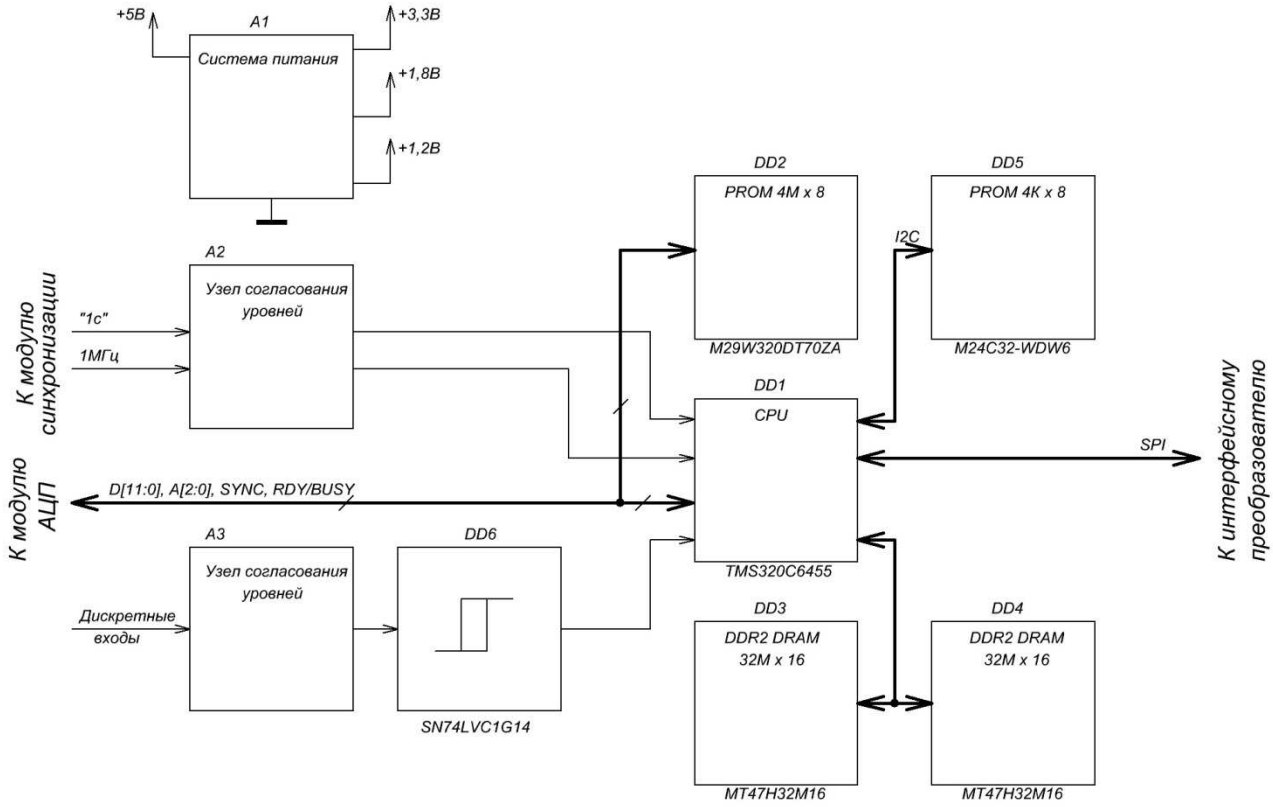


Рисунок 4.16 Структурная схема модуля цифровой обработки сигналов

Память программ модуля ЦОС располагается в энергонезависимой Flash памяти *DD2* (*M29W320DT70*) [95], объемом 32 Мбит с организацией 4М×8. Внешнее ОЗУ состоит из двух микросхем памяти типа DDR2 SDRAM *DD3* и *DD4* (*MT47H32M16*) [96], работающих в двух канальном режиме. Объем ОЗУ составляет 2х512 Мбит с организацией 32М×32. Интегральная схема *DD5* (*M24C32-WDW6*) [97] является памятью типа EEPROM объемом 32 Кбит с организацией 4К×8. Узел согласования *A2* производит преобразование электрических уровней сигналов «1с» и «1 МГц» поступающих от модуля синхронизации. Узел согласования *A3* и интегральная схема *DD6* преобразует электрические уровни сигнала дискретного входа пуска ОМП в уровни ЦПС *DD1*.

Система питания *A1*, состоящая из каскада импульсных преобразователей первого рода, преобразует напряжение питания +5В в ряд напряжений: +1,2В - для питания ядра ПЦС *DD1*, +1,8В - для питания внешнего ОЗУ (*DD3* и *DD4*), а также +3,3В - для питания выходных буферов *DD1* и всех остальных интегральных схем.

Модуль ЦОС производит обмен с модулем АЦП как с внешней асинхронной параллельной памятью. При этом используется периферийный модуль EMIFA и модуль EDMA для обеспечения непрерывного чтения данных и сохранения их в ОЗУ. Интерфейс связи состоит из 16-ти разрядной шины данных (*D*), 3-х разрядной шины адреса (*A*), сигнала выбора

модуля (*CE*), сигнала чтения данных (*OE*), сигнала окончания преобразования (*BUSY/RDY*) и сигнал запуска преобразования (*CONVST*). Запуск преобразования АЦП осуществляется синхроимпульсом частотой 1 МГц. Для связи модуля ЦОС с интерфейсным преобразователем используются периферийные модули ЦСП *McBSP* в режиме *SPI*.

Внешнее ОЗУ *DD3* и *DD4* используется для хранения массива оцифрованных данных и осциллограмм аварийных процессов. Для хранения различных констант и уставок используется ППЗУ *DD5* типа EEPROM.

Для создания временной базы используется таймеры-счетчики в режиме счетчика внешних импульсов, которые является периферийными модулями ПЦС. Внешними импульсами счетчика является синхронизующий сигнал частотой 1 МГц. Разрядность счетчиков составляет 32 бит, что позволяет сохранить максимальный код более 1 миллиона.

Модуль синхронизации. При разработке модуля синхронизации решено использовать системы на модуле (SoM) в связи с возможными сложностями при проектировании ВЧ систем. Выбор приемника производился по следующим критериям: возможность приема даты и времени UTC, наличие выхода импульса «1с», наличие встроенного генератора частоты 1 МГц, использующего в качестве опорного сигнал «1с».

Всем критериям удовлетворяет приемник *LEA-6T* [20], фирмы u-blox. Данный приемник разработан специально для решения задач синхронизации и обладает среднеквадратическим отклонением погрешности равной 30 нс. Встроенный программно-управляемый генератор может быть настроен на частоту 1 МГц.

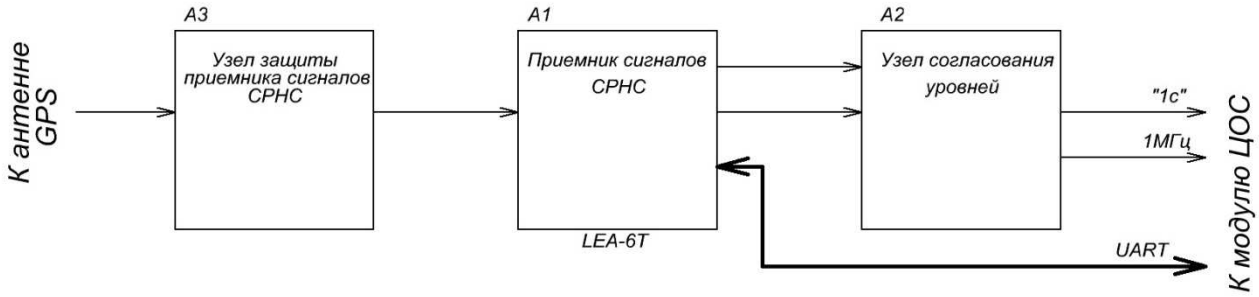


Рисунок 4.17 Структурная схема модуля синхронизации

Помимо приемника СРНС в модуле синхронизации (Рисунок 4.17) имеется узел защиты *A3* и узел согласования уровней *A2*. Узел *A3* предназначен для защиты приемника от перенапряжений, вызванных разрядами статического электричества. К приемнику *A1* подключается активная антенна, которая питается непосредственно по сигнальному кабелю. Поэтому в узле *A3* также имеется схема защиты приемника от короткого замыкания внешней

антенны. В узле согласования уровней *A2* применяются буферы сигналов для уменьшения влияния помех при передаче импульсов синхронизации на модуль АЦП.

Интерфейсный преобразователь. Аппаратная часть модуля (Рисунок 4.18) состоит из микроконтроллера *DD1 STM32F207VG* [98] и интегральных схем *DD2 MT45W8MW16BGX*, *DD3 MAX32321EEAE+*, *DD4 RTL8201BL*. В состав микроконтроллера *STM32F207VG* входит ядро центрального процессора (ARM Cortex-M3) и набор периферии, в том числе контроллеры интерфейсов UART, SPI, 100BASE-T. Интегральная схема *DD2* представляет собой ОЗУ типа PSRAM (псевдостатическое ОЗУ) объемом 128 Мбит. Для преобразования электрических уровней сигнала UART в уровни RS-232 используется интегральная схема *DD3*. Интегральная схема *DD4* реализует физический уровень (PHY) интерфейса 100BASE-T.

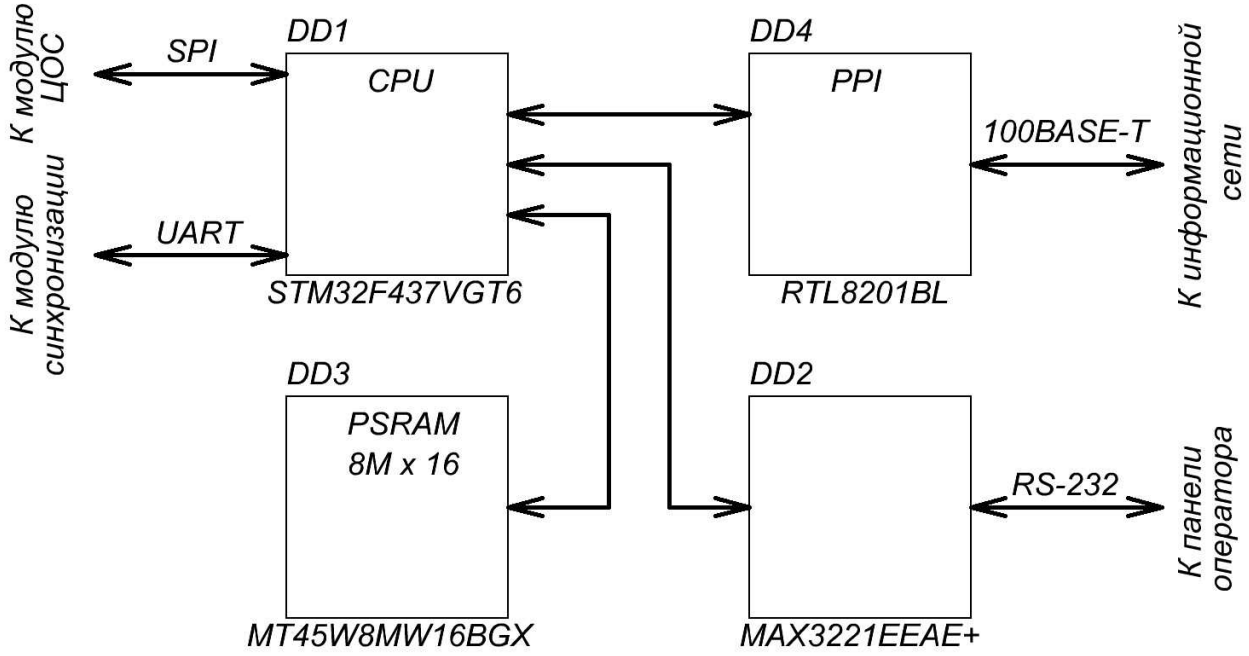


Рисунок 4.18 Структурная схема интерфейсного преобразователя

Программное обеспечение интерфейсного преобразователя работает под управлением операционной системы реального времени (ОСРВ) FreeRTOS [99]. Стек протоколов TCP/IP, протокол Modbus TCP и МЭК 61850-8-1 (MMS), обработчики сообщений протокола NMEA [100] и UBX [101], обработчики пакетов внутреннего протокола, а также подпрограмма записи осциллограмм на карту памяти являются процессами ОСРВ.

Результаты вычислений от модуля ЦОС передаются в интерфейсный преобразователь по последовательному синхронному интерфейсу SPI с использованием внутреннего протокола. Для запроса на обратную передачу данных используется сигнал *IRQ*, который выставляется интерфейсным преобразователем. Таким образом модуль ЦОС постоянно по мере готовности

измеренных данных передает информацию на интерфейсный преобразователь, а интерфейсный преобразователь обменивается с модулем ЦОС только по запросам, когда необходимо либо перезапустить модуль ЦОС, либо провести его настройку.

Для связи интерфейсного преобразователя с модулем синхронизации используется интерфейс UART и протоколы NMEA и UBX. Протокол UBX используется для настройки выходной частоты модуля синхронизации, а также для получения информации о его состоянии (обрыв антенны, короткое замыкание антенны, спутники не найдены и т.д.). Для корректной работы всего МФУ устанавливаются следующие параметры сигналов от модуля синхронизации: частота сигнала первого канала – 1 Гц, длительность импульса – 10 мкс, частота сигнала второго канала – 10 МГц, длительность импульса – 500 нс. При этом необходимо включить передачу времени, даты и координат устройства с интервалом в одну секунду по протоколу NMEA.

Для интеграции устройства в информационную сеть ПС используется протоколы TCP/IP, FTP (в составе TCP/IP), Modbus TCP, МЭК 61850-8-1(MMS). Протокол Modbus TCP является основным протоколом вывода информации о ПКЭ и расстояния до места повреждения. Информация о ПКЭ в устройстве не сохраняется, ведение истории изменений ПКЭ возможна при помощи средств информационной сети ПС. Таблица выходных данных протоколов Modbus RTU и Modbus TCP совпадают. Обмен метками времени между аналогичными устройствами производится по протоколу TCP/IP.

Карта памяти microSD подключается по интерфейсу SPI и имеет файловую систему FAT. Осциллограммы сохраняются на карте памяти microSD в формате COMTRADE [90]. Также на карте памяти сохраняются системный журнал событий (наличие спутников, неисправность аппаратного обеспечения) и журнал событий ОМП.

Коммутационная плата. Коммутационная плата (Рисунок 4.19) выполняет следующие функции:

- обеспечение межмодульных логических связей;
- обеспечение питанием модулей;
- механическое соединение модулей.

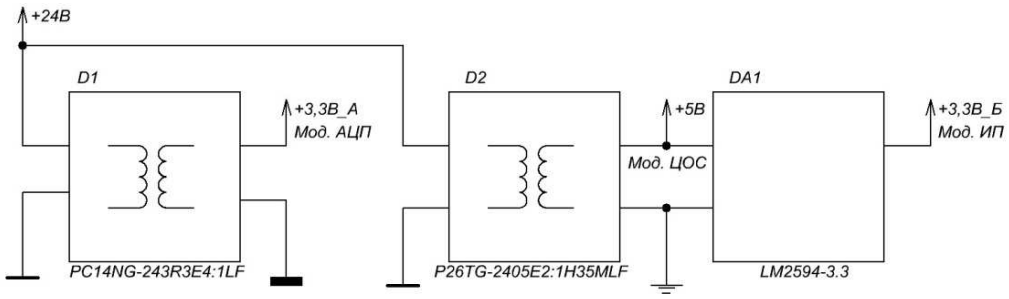


Рисунок 4.19 Упрощенная структурная схема коммутационной платы

Напряжение питания макета МФУ составляет =24В. Импульсный источник питания D1 преобразует входное напряжение +24В в напряжение +3,3В, необходимые для питания модуля АЦП. Преобразователь D2 формирует напряжение +5В для питания модуля ЦОС и модуля синхронизации. Выходы источников D1 и D2 гальванически разделены. Таким образом, модуль АЦП гальванически разделен как от общего источника питания всего устройства, так и от остальной цифровой части устройства (модуль ЦОС и интерфейсный преобразователь) для обеспечения безопасности и помехозащищенности. Источник питания на микросхеме DA1 представляет собой импульсный регулятор первого рода и преобразует напряжение +5В с выхода D2 в напряжение +3,3В, необходимое для питания платы интерфейсного преобразователя.

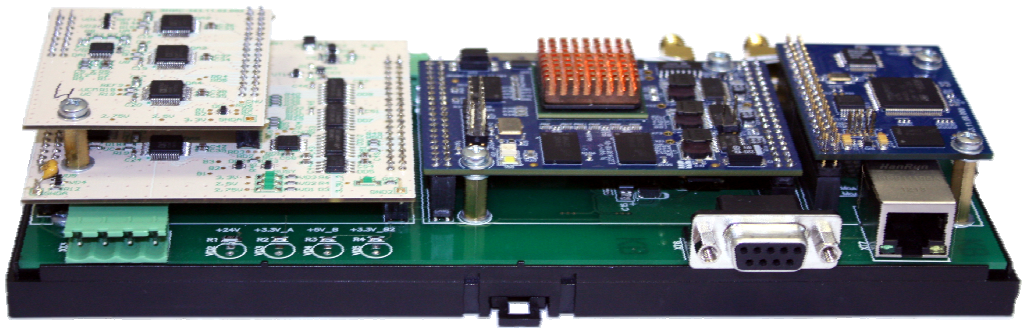


Рисунок 4.20 Макет МФУ

Конструктивно макет выполнен в пластиковом корпусе (Рисунок 4.21) с креплением на DIN рейку.

Рисунок 4.21 Внешний вид макета МФУ

По всем структурным и функциональным схемам разработаны принципиальные схемы и конструкции печатных плат, которые вошли в эскизный проект конструкторской документации МФУ. Макет МФУ и его программное обеспечения защищены патентами [52], [53], [54], [102], [103], [104].

4.7 Программа и методика лабораторных испытаний МФУ. Испытания МФУ

Цель проведения испытаний и экспериментальных исследований заключается в проверке соответствия технических характеристик макета МФУ требованиям, заявленным при разработке, а также в выявлении недостатков аппаратного и программного обеспечения.

Нормативные документы [67] и [105] содержат исходные посылки для программы и методики лабораторных испытаний устройства как СИ ПКЭ и измерителя синхронизированных векторов. Стандарты включают в себя цель испытаний, методы испытаний, виды испытательных сигналов и ожидаемый результат.

Для устройств ОМП не существует стандартной программы и методики испытаний вследствие сильного различия принципов их работы. Поэтому программа и методика испытаний устройств ОМП определяется разработчиками самостоятельно.

Целью лабораторных испытаний устройства как СИ ПКЭ является предварительное определение класса характеристик процесса измерения до передачи устройства в организацию, аккредитованную на проведение испытаний с целью утверждения типа СИ.

Лабораторная установка для испытаний устройства как СИ ПКЭ (Рисунок 4.22) состоит из эталонного калибратора–генератора переменного тока «Ресурс–К2М» [106] и персонального компьютера.

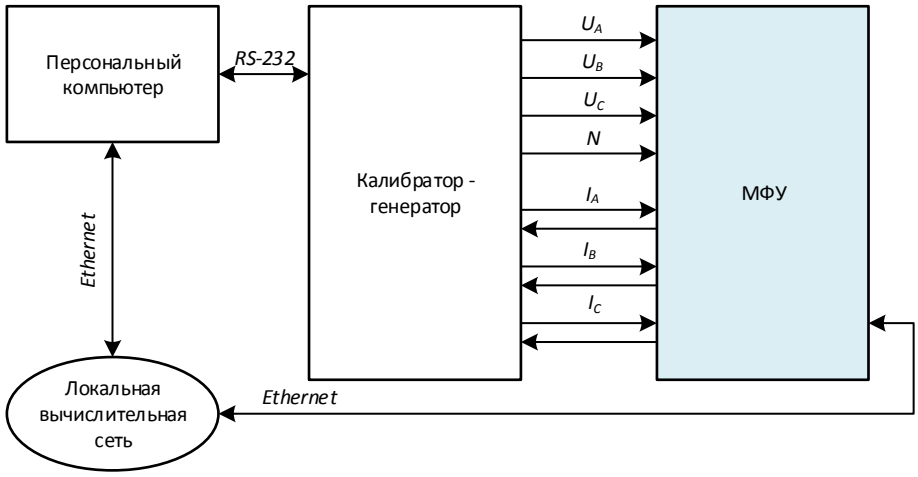


Рисунок 4.22 Лабораторная установка для испытания СИ ПКЭ

На измерительные входы МФУ подаются напряжения и токи от калибратора–генератора. Далее с персонального компьютера задаются параметры напряжений и токов (параметры испытательных сигналов). С помощью персонального компьютера производится считывание результатов измерений МФУ через локальную вычислительную сеть и последующее сравнение с параметрами испытательных сигналов. Параметры испытательных сигналов и результаты измерений приведены в протоколе испытаний (Приложение 4).

Предварительные лабораторные испытания проводились при нормальных условиях для показателей усредненных за 3 секунды в соответствии со стандартом [71]. Результаты испытаний показали (Приложение 4), что метрологические характеристики макета МФУ как СИ ПКЭ соответствуют классу S по [71].

Лабораторная установка для испытания МФУ как измерителя синхронизированных векторов (Рисунок 4.23) состоит из двух генераторов сигналов произвольной формы (LeCroy ArbStudio 1104), устройства синхронизации (приемник сигналов СРНС – Trimble Thunderbolt E) и персонального компьютера. Максимальное напряжение на выходе генератора составляет 6 В, поэтому генератор подключается к измерительным входам макета МФУ в обход делителей напряжения и промежуточных трансформаторов тока, то есть напрямую к модулю АЦП. Испытательные сигналы с параметрами из [67] сгенерированы в программном комплексе Matlab и сохранены в формате CSV (Comma Separated Value – значения разделенные запятой). Испытательные сигналы загружаются в генераторы сигналов произвольной формы для

циклического воспроизведения. Генераторы синхронизированы между собой и с всемирным координированным временем с помощью приемника сигналов СРНС. Сравнение результатов измерений происходит на персональном компьютере.

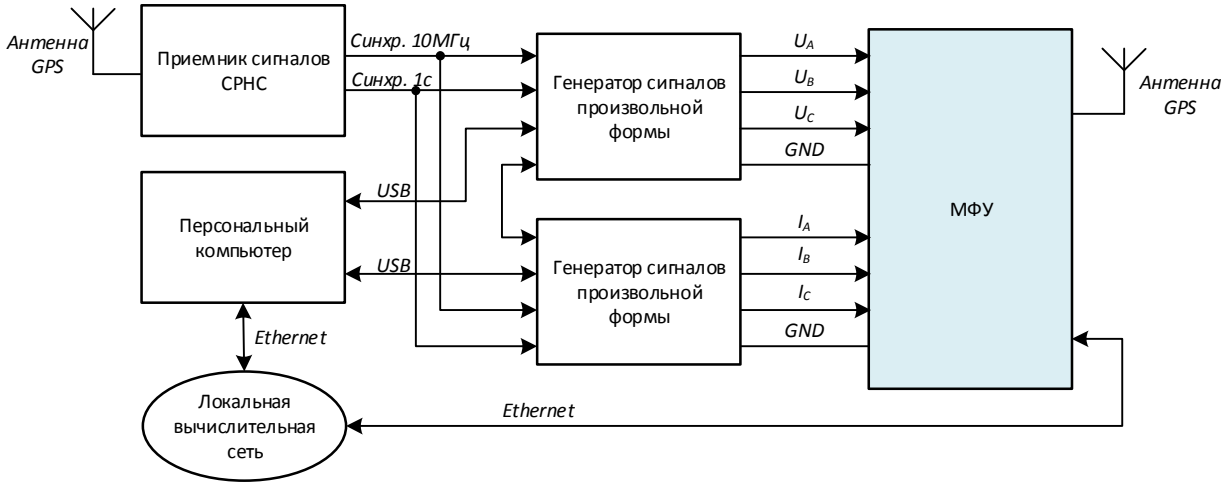


Рисунок 4.23 Лабораторная установка для испытания измерителя синхронизированных векторов

Предварительные лабораторные испытания проводились при нормальных условиях согласно стандарту [67]. Результаты лабораторных испытаний (Приложение 5) показали соответствие макета МФУ классу Р измерений синхронизированных векторов по [67].

Методика испытаний ОМП заключается в воспроизведении осциллограмм повреждений с различными параметрами на генераторах сигналов произвольной формы (LeCroy ArbStudio 1104). Сигналы с концов ВЛ при различных параметрах повреждений моделируются в программе ATP/EMTP, преобразуются в формат CSV и загружаются в генератор. Предаварийный процесс длительностью 100 мс циклически воспроизводится на генераторе. После подачи специальной команды в произвольный момент времени начинается воспроизведение аварийного процесса длительностью 100 мс. Через некоторое время (среднее время срабатывания защит 40 мс) после начала воспроизведения аварийного процесса генератор через промежуточные реле подает сигнал пуска ОМП, имитируя сигнал от РЗ. Далее начинается циклическое воспроизведение сигнала послеаварийного процесса длительностью 100 мс.

Ввиду отсутствия необходимого количества оборудования испытания разделены на два этапа. На первом производится оценка погрешности определения времени появления фронта волны с помощью лабораторной установки № 1 (Рисунок 4.24), на втором – испытание программы обмена метками времени с помощью лабораторной установки № 2 (Рисунок 4.25). Первый этап содержит испытание каждого МФУ в отдельности по напряжениям и токами,

второй – двух МФУ одновременно, но с использованием только токовых сигналов или только сигналов напряжения. Генераторы подключаются напрямую к модулю АЦП макета МФУ. Генераторы синхронизированы между собой и с всемирным координированным временем с помощью приемника сигналов СРНС.

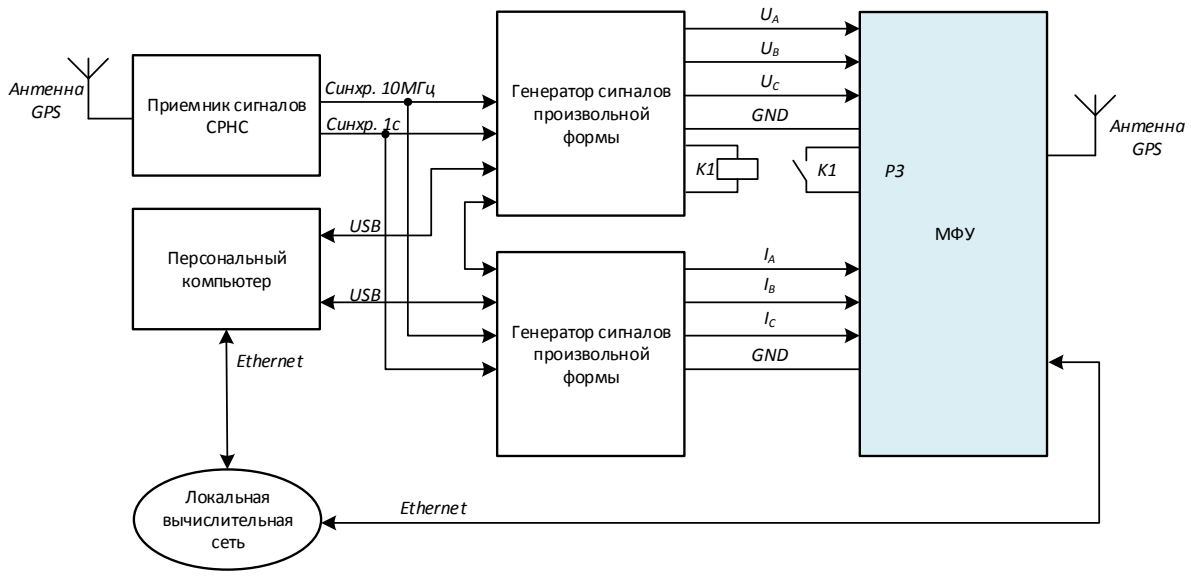


Рисунок 4.24 Лабораторная установка для испытания ОМП № 1

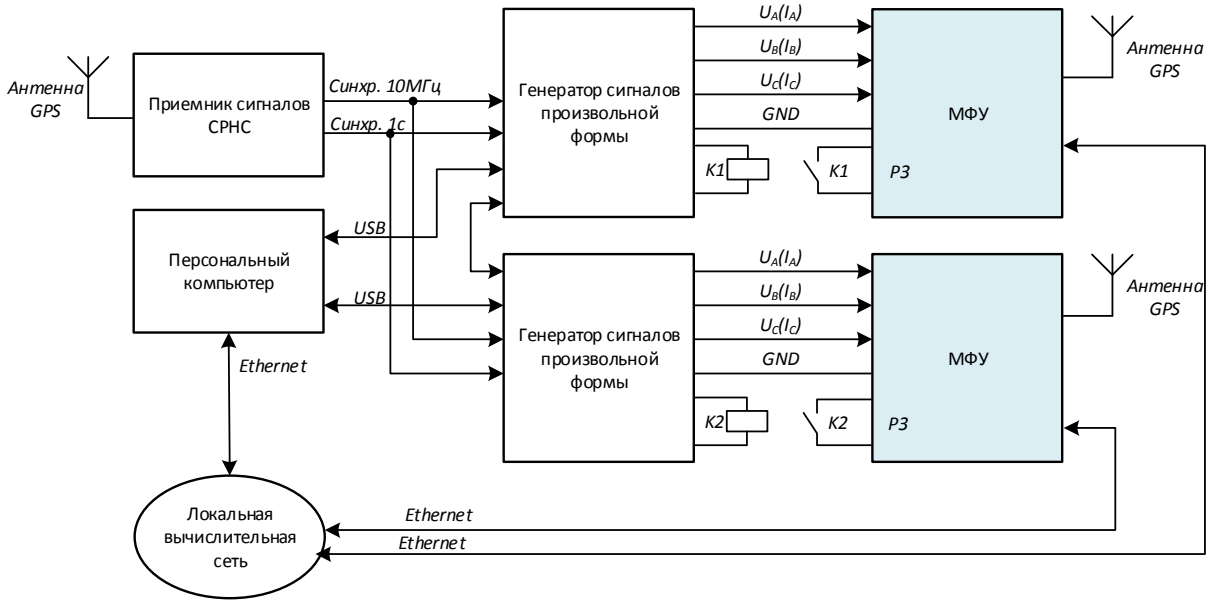


Рисунок 4.25 Лабораторная установка для испытания ОМП № 2

Испытательные сигналы смоделированы для ВЛ 1 (Глава 2) с различными параметрами повреждений (Приложение 6 Таблица П6.1). Настройки способа ОМП (матрицы $\boldsymbol{T_u}$, $\boldsymbol{T_i}$, $\boldsymbol{Z}$, размер окна расчета и порог коэффициента эксцесса) аналогичны тем, что использовались в Главе 3 для оценки точности способа ОМП.

Лабораторные испытания на установке №1 (Таблица П6.1) показали, что суммарная погрешность определения времени появления волны не превышает 2 мкс, что обеспечивает абсолютную погрешность ±600 м при различных параметрах повреждений. Лабораторные испытания на установке №2 (Таблица П6.2) подтвердили работоспособность программного обеспечения, выполняющего обмен метками времени, и также показали, что погрешность при работе по сигналам тока погрешность не более ±300 м при различных параметрах повреждений.

Разработанный эскизный вариант программы и методики испытаний является основой для заводской программы и методики испытаний, которая также содержит квалификационные испытания на электромагнитную совместимость, теплоустойчивость, хладоустройчивость, виброустойчивость и влагоустойчивость.

4.8 Опытно-промышленная эксплуатация МФУ на объекте ЕНЭС

После проведения лабораторных испытаний была организована опытно-промышленная эксплуатация МФУ на объекте ЕНЭС. Определение ВЛ для установки макета МФУ проводилось совместно с МЭС Центра – филиала ОАО «ФСК ЕЭС». В результате обсуждения проекта МЭС Центра определило список из 13 ВЛ, для возможной установки макетов. После проведения анализа списка из всего перечня ВЛ для опытной эксплуатации были выбрана ВЛ 220 кВ «Тамбовская 500 – Давыдовская 1 и 2».

Выбор осуществлялся по следующим критериям:

- наличие высокоскоростного доступа к сети Интернет на обеих ПС;
- возможность подключения дополнительной нагрузки во вторичные цепи измерительных ТТ и ТН без влияния на работу находящего в эксплуатации оборудования;
- наличие пространства для размещения опытного образца в общеподстанционном пункте управления (ОПУ).

Предпроектное обследование ВЛ 220 кВ «Тамбовская 500 – Давыдовская 1 и 2» Верхне-Донского ПМЭС проводилось в сентябре 2011 года. На ПС «Тамбовская 500» и на ПС «Давыдовская» были определены места для монтажа устройства внутри панелей ОПУ, определены места для монтажа антенн приема сигналов СРНС, определены пути прокладки проводов и кабелей, определены места их прохода через стены, как на территорию ОРУ, так и в помещения с коммуникационным оборудованием ПС. Монтаж устройства и антенны приема сигналов СРНС, а также прокладка всех необходимых кабелей и проводов возможна в существующих кабельных каналах без нарушения процесса эксплуатации действующего оборудования ПС.

Проект привязки (комплект КД) МФУ на ПС «Тамбовская 500» и ПС «Давыдовская» разработан ОАО «Тулаэнергосетьпроект» по эскизному варианту схемы подключения.

Макеты МФУ были введены в опытную эксплуатацию на ВЛ 220кВ Тамбовская – Давыдовская – 1 в июле 2012 г.

В исследовательских целях макет МФУ был настроен на фиксацию как внутренних, так и внешних КЗ и переключений. На основании фиксации срабатывания образцов устройства при различных переходных процессах, вызванных КЗ и переключениями в электрической сети 110-500 кВ, примыкающей к ВЛ 220 кВ Тамбовская-Давыдовская 1, происходившими в 2012 году, а также сопоставление этих результатов с данными журналов учета срабатывания устройств релейных защит и автоматики, оперативных журналов ПС Тамбовская-500, Давыдовская и ЦУС Верхне - Донского ПМЭС установлено следующее:

1. Срабатывание образцов в летний период происходило практически ежедневно, что свидетельствует о высокой чувствительности устройства;

2. КЗ на защищаемой ВЛ 220 кВ не были зафиксированы в период наблюдения из-за их отсутствия;

3. Зафиксированы переходные процессы при отключении ВЛ 220 кВ Тамбовская - Давыдовская 1 в ремонт в 8 часов 59 минут 28 мая и вводе в работу в 17 часов 5 минут 1 июня. Осциллограммы тока четко характеризуют последовательность этапов коммутации выключателей по концам ВЛ, в том числе разновременность переключения их фаз;

4. Отмечен случай отключения шунтирующего реактора 500 кВ, сопровождающийся броском тока и напряжений во всех трех фазах ВЛ;

5. Зона действия устройства как регистратора охватывает КЗ, имевшие место на ВЛ 500 кВ, примыкающих к ПС Тамбовская-500 (причем, на ВЛ Тамбовская-Рязанская ГРЭС несколько раз), а также КЗ в сети 110-220 кВ ПС Тамбовская-500 (например, ВЛ 110 кВ Придонская-Павловская1, Мичуринская-Хмелевская1, Мичуринская-Никольская3, Мичуринская-Первомайская2, Котовская-Ржаксинская, Липецкая-Металлургическая, Котовская-Сампурская);

6. Зафиксированы переходные процессы в токах и напряжениях при отключениях и включениях выключателей 500 кВ ПС Тамбовская-500 (например, Тамбовская-Пенза);

7. Устройство не реагировало на удаленные КЗ на ВЛ, отходящих от ПС 220-500 кВ Липецкая, Придонская, Бобров, Правобережная, Северная, Южная, Кировская и др. и включения выключателей на ВЛ.

Таким образом, макеты устройства обладают чувствительностью, необходимой для регистрации процессов в защищаемой ВЛ ЕНЭС при коротких замыканиях и переключениях.

В июне 2015 года опытные образцы МФУ введены в опытно-промышленную эксплуатацию на ПС Парская и ПС Сасово для контроля ВЛ 220 кВ Парская – Сасово МЭС Центра. На момент подготовки диссертации объемных и значимых результатов эксплуатации получено не было кроме КЗ 3 сентября 2015 года, упомянутого ранее в § 3.2.8.

4.9 Внедрение МФУ в серийное производство

После успешного завершения работ по разработке, испытанию и исследованию работы устройства принято решение об организации серийного производства устройства. Заводом изготовителем устройства является ОАО «ИРЗ» (Ижевский радиозавод), выбранный по согласованию с ОАО «ФСК ЕЭС». Опытный образец МФУ получил название «ЭНИС».

Заводу изготовителю передан полный комплект конструкторской документации на устройство. По результатам изучения документации заводом совместно с ОАО «ЭНИН» было принято решение о необходимости доработки документации для обеспечения возможности изготовления устройства с учетом технологических возможностей завода.

Под руководством автора осуществлялась доработка конструкторской документации под требования завода. В частности, были внесены изменения в конструкцию печатных плат для производства существующим оборудованием завода, произведена корректировка перечня элементов для снижения себестоимости устройства, проведена доработка сопроводительной документации.

После проведения указанных выше работ изготовлены опытные образцы устройства (Рисунок 4.26, Рисунок 4.27) (Приложение 1).

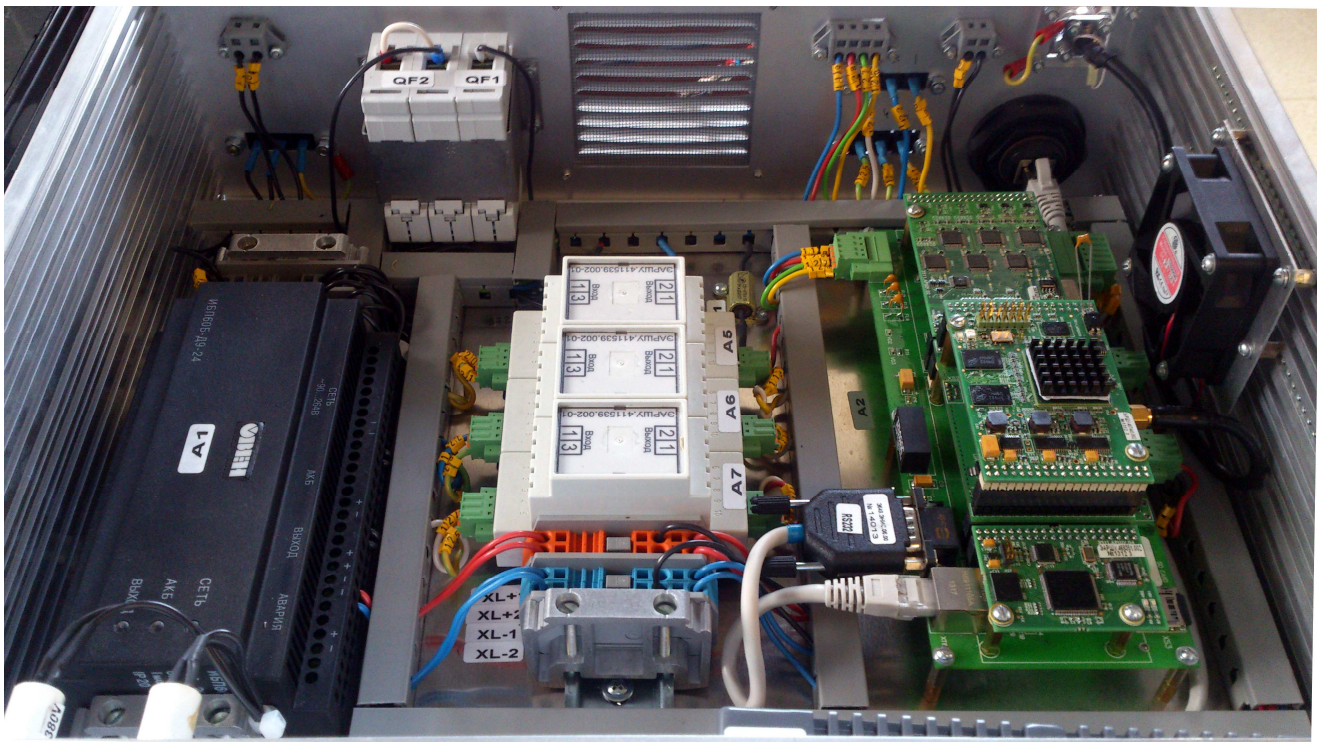


Рисунок 4.26 Опытный образец МФУ

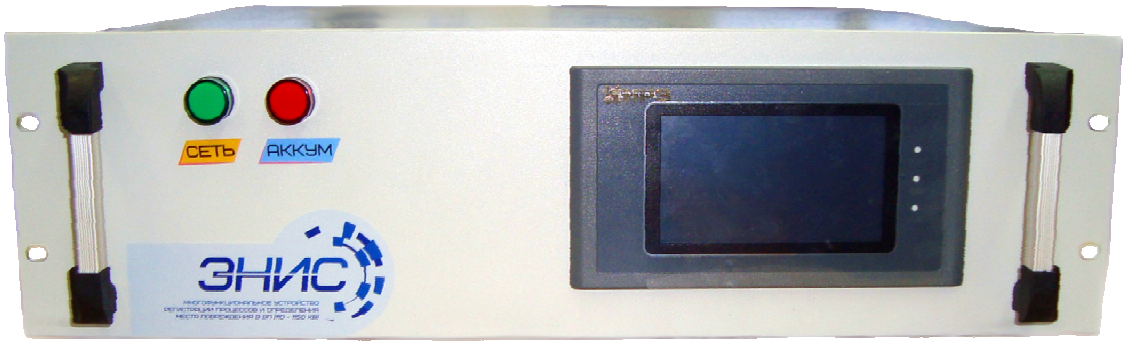


Рисунок 4.27 Внешний вид опытного образца

Стоит отметить, что на данном этапе работа по внедрению ЭНИС в серийное производство не заканчивается. Необходимым условием для успешной реализации устройства являются сертификация на соответствии стандартам по электромагнитной совместимости, а также аттестация по стандартам ОАО «ФСК ЕЭС» с последующим внесением в перечень оборудования допущенного к применению на объектах ОАО «ФСК ЕЭС».

4.10 Выводы

1. Поставлена задача разработки МФУ с функцией ОМП на основе волнового метода двухсторонних измерений с применением предложенных способов повышения его эффективности.
2. Определен перечень функций МФУ, которые можно реализовать в структуре единой аппаратно-программной платформы. К этим функциям относятся: измерение ПКЭ, измерение синхронизированных векторов, ЦРАП.
3. Разработана структурная схема аппаратного обеспечения, позволяющая реализовать все функции устройства на одной платформе. Сформулированы технические требования к выполняемым функциям. Для каждого функционального блока проведен анализ возможных вариантов его реализации. Рассмотрены особенности конкретных реализаций. Проведен анализ основных расчетных соотношений положенных в основу алгоритмов работы основных функциональных блоков.
4. Разработано аппаратно-программное обеспечение МФУ. Разработана конструкторская документация на МФУ. Изготовлены макеты МФУ. Проведена опытно-промышленная эксплуатация макетов МФУ на ВЛ 220 кВ ЕНЭС.
5. Разработана методика испытания и проведены лабораторные испытания на соответствие требованиям. Лабораторные испытания МФУ показали, что:
   - метрологические характеристики устройства как средство измерения ПКЭ соответствуют классу S по ГОСТ Р 51317.4.30–2008;
   - метрологические характеристики устройства как средство измерения синхронизированных векторов соответствуют классу P по IEEE Std C37.118–2011;
   - погрешность функции ОМП для различных видов повреждений не превышает ±600 м.
6. Конструкторская документация передана на завод для серийного производства. Выпущена опытная партия устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен и исследован способ повышения эффективности волнового ОМП ВЛ 110 – 220 кВ, отличающийся использованием метода волновых каналов, учитывающего геометрию расположения проводов ВЛ, их удаленность от поверхности земли и значения удельного сопротивления земли, с последующим вычислением аварийных составляющих напряжения падающей волны, что позволит снизить влияние степени искажения формы распространяющейся от места повреждения электромагнитной волны.
2. Предложен и исследован способ определения фронта волны для волнового ОМП ВЛ 110 – 220 кВ, отличающийся применением статистических методов для анализа сигналов и помех предшествующего режима во временной области.
3. Эффективность предложенного способа ОМП подтверждена результатами имитационного моделирования процессов в электрической сети 110 – 220 кВ при различных видах КЗ, мгновенных значениях напряжения в момент КЗ, переходных сопротивлениях в месте КЗ и изменениях нагрузки.
4. Разработано аппаратно-программное обеспечение, эскизная конструкторская документация и макеты устройства ОМП, позволяющие в структуре одного устройства реализовывать функции ОМП, измерения показателей качества электроэнергии и синхронизированных векторных значений, а также регистрацию аварийных процессов. Квалификационные лабораторные испытания макетов устройства ОМП подтвердили соответствие устройства заявленным характеристикам. По результатам получены 2 патента на изобретение, 2 патента на полезную модель, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и акт о внедрении результатов работы.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ATP	Alternative Transients Program
ATPDraw	Препроцессор для ATP
EMTP	ElectroMagnetic Transient Program
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Институт инженеров электротехники и электроники)
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
АРМ	Автоматизированное Рабочее Место
АСКУЭ	Автоматизированная Система Контроля и Учета Энергоресурсов
АСУ ТП	Автоматическая Система Управления Технологическим Процессом
АЦП	Аналого-Цифровой Преобразователь
БПФ	Быстрое Преобразование Фурье
ВЛ	Воздушная Линия
ВП	Вейвлет-Преобразование
ЕНЭС	Единая национальная электрическая сеть
КЗ	Короткое Замыкание
КЛ	Кабельная Линия
ЛЭП	Линия Электропередачи
МФУ	МногоФункциональное Устройство
МЭК	Международная Электротехническая Комиссия
ОМП	Определение Места Повреждения
ОПУ	Общеподстанционный Пункт Управления
ПКЭ	Показатели Качества Электрической энергии
ПС	Подстанция

ПФ	Преобразование Фурье
СВИ	Синхронизированный Векторный Измеритель
СИ ПКЭ	Средство Измерения Показателей Качества Электрической энергии
СРНС	Спутниковая Радио Навигационная Система
ТН	Трансформатор Напряжения
ТТ	Трансформатор Тока
УСВИ	Устройство Синхронизированных Векторных Измерений
ЦПС	Цифровая Подстанция
ЦРАП	Цифровой Регистратор Аварийных Процессов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шалыт, Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. / Г.М. Шалыт. – М.: Энергоиздат, 1982. 312 с.
2. Аржанников, Е.А. Определение места короткого замыкания на высоковольтных линиях электропередачи / Е.А. Аржанников, В.Ю. Лукоянов, М.Ш. Мисриханов / Под ред. В.А. Шуина. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 272 с.
3. IEEE Std C37.114–2004 IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines. New York, IEEE, 2004.
4. Swagata Das, Surya Santoso, Anish Gaikwad, Mahendra Patel Impedance-Based Fault Location in Transmission Networks: Theory and Application. IEEE Access, Volume 2, New York, 2009.
5. M. M. Saha, J. Izykowski, E. Rosolowski Fault Location in Power Networks 1st ed. New York, USA: Springer-Verlag, 2010.
6. A. M. Elhaffar Power Transmission Line Fault Location Based on Current Travelling Waves, Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology, Helsinki, 2008.
7. Арцишевский, Я.Л. Метод повышения точности определения мест повреждения элементов электрической сети путем уточнения ее параметров / Я. Л. Арцишевский, Арслан Жамсран // Вестник Московского энергетического института. 2007. № 1. С. 64-71.
8. Многофункциональное устройство Qualitrol IDM+ VI [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.qualitrolcorp.com/Products/IDM+_Multifunction_power_system_monitor_(with_options_for_power_quality,_PMU_and_TWS_fault_location)
9. Устройство определения места повреждения Qualitrol TWS FL-1 and FL-8 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.qualitrolcorp.com/Products/TWS_FL-8_and_TWS_FL-1_Traveling_wave_fault_locators/
10. Устройство определения места повреждения Qualitrol TWS MK VI [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.qualitrolcorp.com/Products/TWS_MkVI_Traveling_wave_fault_locator
11. Устройство определения места повреждения ISA TFS 2100 [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.isatest.com/index.php?page=tfs-2100
12. Многофункциональное устройство Reason RPV-310 [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.reason.com.br/pt/produtos/registradores-digitais/rpv310
13. Микропроцессорное устройство определения места повреждения Бреслер-0107.090 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.bresler.ru/library/bresler_0107_090_docs

14. Программный комплекс WinBres [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.bresler.ru/products/software/WinBres
15. Высокоточный РАС и ОМП HPR-7000 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.htabd.com/Upload/WebEditor/2011_03/31112609772.pdf
16. Комплекс программ для расчетов электрических величин при повреждениях сети и уставок релейной защиты АРМ СРЗА [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.pk-briz.ru/
17. Микропроцессорный терминал Сирус-2-ОМП [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.rza.ru/download_katalog/2013_katalog_terminaly_rza_prosmotr.pdf
18. Куликов А.Л., Мисриханов М.Ш., Петрухин А.А. Определение мест повреждений ЛЭП методами активного зондирования: монограф. / А.Л. Куликов, М.Ш. Мисриханов, А.А. Петрухин/ Под ред. В.А. Шуина. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 162 с.
19. Навигационный приемник МНП-М7 [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.irz.ru/products/12/262.htm
20. Навигационный приемник LEA-6T [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.u-blox.com/en/gps-modules/u-blox-6-timing-module/lea-6t.html
21. M.A. Thurein, I.P. Martin Global Positioning System Application at the Bonneville Power Administration Street. IEEE Technical Applications Conference and Workshops, 1995
22. Зевеке, Г.В. Основы теории цепей. / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил и др. – М.: Энергия, 1975. 752 с.
23. Костенко, М.В. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. / М.В. Костенко, Л.С. Перельман, Ю.П. Шкарин. – М.: Энергия, 1973. 272 с.
24. J.R. Carson Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return Bell System Technical Journal, 1926, 5, pp. 539-54
25. H. W. Dommel Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) Theory Book. Bonneville Power Administration, Portland, Oregon. 1995.
26. A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen, A. Castanheira The Complex Ground Return Plane, A Simplified Model for Homogenous and Multi-layer Earth Return IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100, pp. 3686-93
27. H.W. Dommel Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1969
28. László Prikler, Hans Kristian Høidalen ATPDraw. Users Manual. Bonneville Power Administration, Portland, Oregon, 2009.

29. L. Bergeron Water Hammer in Hydraulics and Wave Surges in Electricity ASME Committee, Wiley, New York, 1961
30. T. Noda Development of A Transmission-line Model Considering the Skin and Corona Effects for Power Systems Transient Analysis, Ph.D. thesis, Doshisha University, Kyoto, Japan, December, 1996
31. A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen, A. Castanheira The Complex Ground Return Plane, A Simplified Model for Homogenous and Multi-layer Earth Return IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100, pp.3686-93
32. J.R. Marti Accurate modeling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(1), pp. 147-157
33. Справочник по проектированию электрических сетей. Под ред. Д.Л. Файбисовича. М.: ЭНАС, 2009. 392 с.
34. Лачугин, В.Ф. Анализ переходных процессов в линиях сверхвысокого напряжения для целей построения релейной волновой защиты: дис. … канд. техн. наук: 05.14.02/ Лачугин Владимир Федорович. – М., 1980. – 269 с.
35. Караев, Р. И. Переходные процессы в линиях большой протяженности [Текст] / Р.И. Караев. - М. : Энергия, 1978. - 191 с. : ил. ; 20 см. - Список лит.: с. 186-190. - 4000 экз.
36. Clarke, E. Circuit analysis of AC systems, symmetrical and related components General Electric Co., Schenectady, NY, 1950
37. A. Elhaffar, M. Lehtonen Multi-end Traveling Wave Fault Location Based on Current Travelling Waves // 16th Power Systems Computation Conference (16th PSCC). Glasgow, Scotland. 2008.
38. M. A. Redfern, S. C. Terry, F. V. P. Robinson, Z. Q. Bo A Laboratory Investigation into the use of MV Current Transformers for Transient Based Protection // International Conference on Power Systems Transients (IPST 2003). New Orleans, USA, 2003.
39. F.V. Lopes, D. Fernandes Jr., W.L.A. Neves Fault Location on Transmission Lines Based on Travelling Waves, IPST2011 Delft, June 14-17, 2011.
40. R.H. Park Two-Reaction Theory of Synchronous Machines Generalized Method of Analysis – Part I, Winter Convention of the A.I.E.E., pp. 716-730, New York, January 28 – February 1, 1929.
41. Релейная защита электроэнергетических систем / Федосеев А.М., Федосеев М.А. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с., ил.
42. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7. – Новосибирск: Сиб. Унив. Изд-во, 2011. – 464 с., ил.

43. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов. / Р. Лайонс. – М.: Бином, 2011. – 656 с.
44. Яковлев А.Н. Основы вейвлет-преобразования сигналов. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2003. 80 с.
45. M. da Silva, M. Oleskovicz, D.V. Coury A Fault Locator for Three-Terminal Lines Based on Wavelet Transform Applied to Synchronized Current and Voltage Signals // IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America. Caracas, Venezuela. 2006.
46. V. Malathi, N.S. Marimuthu Wavelet Transform and Support Vector Machine Approach for Fault Location in Power Transmission Line. World Academy of Science, Engineering and Technology, 39, 2010.
47. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Высшая школа, 2010. 480 с.
48. Lachugin V.F., Panfilov D.I., Smirnov A.N., Obraztsov S.A., Ryvkin A.A., Shimina, A.O. A Multifunctional Device for Recording the Monitoring of Electric Power Quality and for Fault Finding on Electric Transmission Lines // Power technology and engineering. 2014. v. 47. № 5. p. 386-392.
49. Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Смирнов А.Н., Образцов С.А., Сидорук С.В. Многофункциональное устройство регистрации процессов и определения места повреждения в ВЛ // Энерго-инфо. 2013. №5. С. 70 – 74.
50. Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Смирнов А.Н., Образцов С.А., Рывкин А.А., Шимина А.О. Многофункциональное устройство регистрации процессов, контроля качества электроэнергии и определения места повреждения на линиях электропередачи // Электрические станции. 2013. №8. С. 29 – 36.
51. Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Смирнов А.Н. Реализация волнового метода определения места повреждения на линиях электропередачи с использованием статистических методов анализа данных // Известия РАН. Энергетик. 2013 №6. С. 137 – 146.
52. Пат.2472169 Российская Федерация, МПК G01R31/08. Способ определения расстояния до места повреждения на линии электропередачи/ Лачугин Владимир Федорович (RU), Панфилов Дмитрий Иванович (RU), Сидорук Сергей Владимирович (RU), Краснышов Сергей Викторович (RU), Манжелий Михаил Иванович (RU), Денисов Дмитрий Вячеславович (RU), Образцов Сергей Александрович (RU), Смирнов Александр Николаевич (RU), патентообладатели - ОАО "ФСК ЕЭС" (RU), ОАО "ЭНИН" (RU) — № 2011121762, заявл. 31.05.2011; опубл. 10.01.2013. Бюлл.№1.
53. Пат.2475768 Российская Федерация, МПК G01R31/08. Способ определения расстояния до места повреждения на линии электропередачи/ Панфилов Дмитрий Иванович (RU),

Арутюнов Сергей Альпиньевич (RU), Горюшин Юрий Александрович (RU), Образцов Сергей Александрович (RU), Смирнов Александр Николаевич (RU), Лачугин Владимир Федорович (RU), Сидорук Сергей Владимирович (RU), Краснышов Сергей Викторович (RU), Манжелий Михаил Иванович (RU), Денисов Дмитрий Вячеславович (RU), патентообладатели - ОАО "ФСК ЕЭС" (RU), ОАО "ЭНИН" (RU) — № 2011142836, заявл. 24.10.2011; опубл. 20.02.2013 Бюлл.№5

54. Пат.113016, Российская Федерация, МПК G01R31/08. Устройство для определения места повреждения на линии электропередачи/ Арутюнов Сергей Альпиньевич (RU), Горюшин Юрий Александрович (RU), Сидорук Сергей Владимирович (RU), Смирнов Александр Николаевич (RU), Лачугин Владимир Федорович (RU), Образцов Сергей Александрович (RU), Панфилов Дмитрий Иванович (RU), патентообладатели - ОАО "ФСК ЕЭС" (RU), ОАО "ЭНИН" (RU) — № 2011142837, заявл. 24.10.2011; опубл. 27.01.2012.
55. D. A. Douglass Current Transformer Accuracy With Asymmetric and High Frequency Fault Current IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. 100, Issue 3, March 1981, pp. 1006-1012
56. S. Marx, B. K. Johnson, A. Guzman, V. Skendzic, M. V. Mynam Travelling Wave Fault Location in Protective Relays: Design, Testing and Results
57. Ярославский В.Н., Боярин Н.А., Алексеев А.А. и др. Метод измерений частотных свойств трансформаторов напряжения, используемых для контроля ПКЭ // Метрологическое обеспечение электрических измерений в электроэнергетике. М.: ВНИИМС, 2000.
58. M. Kezunovic, L. Kojovic, V. Skendzic, C.W. Fromen, D. Sevcik, S. L. Nilsson Digital Models of Coupling Capacitor Voltage Transformers for Protective Relay Studies IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 7, Issue 4 October 1992, pp. 1927 – 1935
59. ГОСТ 1983–2001 Трансформаторы напряжения. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2001. – 31 с.
60. ГОСТ 7746–2001 Трансформаторы тока. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2001. – 30 с.
61. Краснышов С.В., Манжелий М.И., Лачугин В.Ф. и др. Опыт применения регистраторов синхронизированных измерений токов и напряжений на ВЛ 110 кВ. // Электрические станции, № 9, 2010.
62. Цифровой регистратор аварийных процессов Qualitrol BEN 6000 VI [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.qualitrolcorp.com/Products/BEN_6000_Digital_fault_recorder_(with_options_for_power_quality_and_PMU)

63. ЭНИП-3 - многофункциональный измерительный преобразователь VI [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.enip2.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=82%3A-3-&catid=28&lang=ru
64. Цифровой регистратор аварийных процессов ПАРМА РП4.11 VI [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.parma.spb.ru/catalog/equipment/register/parma_rp411
65. Многофункциональное устройство Siemens SIMEAS-R [Электронный ресурс] – Режим доступа: w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/power-quality-measurements/recorder-measurement-unit/pages/simeas-r-pmu.aspx
66. Измерительный преобразователь МИП-02 [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.rtsoft.ru/catalog/plk/mer/detail/316/
67. IEEE Std C37.118–2011 IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems. New York, IEEE, 2011.
68. IEEE Std C37.118–2005 IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems. New York, IEEE, 2005.
69. IRIG STANDARD 200-04. New Mexico, RCC, 2004.
70. Многофункциональный трехфазный счетчик электроэнергии КИПП-2М [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.ctsspb.ru/1/page5.html?c_dept_id=6&c_good_id=15
71. ГОСТ Р 51317.4.30–2008 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. – М.: Стандартинформ, 2009. – 54 с.
72. IEC 61850-8-1 Communication networks and systems in substations – Part 8-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3. Geneva, IEC, 2004.
73. ГОСТ Р МЭК 60870-5-104–2004 Устройства и системы телемеханики Часть 5 Протоколы передачи Раздел 104. Доступ к сетям для ГОСТ Р МЭК 870-5-101 с использованием стандартных транспортных профилей. – М.: Стандартинформ, 2004. – 70 с.
74. IEEE Std 1815-2010 IEEE Standard for Electric Power Systems Communications -- Distributed Network Protocol (DNP3). New York, IEEE, 2010.
75. MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION v 1.1. 2012.
76. Танненбаум, Э. Компьютерные сети / Э. Таненнбаум. – СПб.: Питер, 2007. – 992 с.
77. Аюев, Б.И. О системе мониторинга переходных режимов / Б.И. Аюев // Энергорынок. № 2, 2006.

78. ГОСТ Р 54149–2010 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2012. – 16 с.
79. Основы современной энергетики: Курс лекций для менеджеров энергетических компаний. В двух частях / Под общей редакцией чл.-корр. РАН Е.В. Аметистова. – Часть 2. Современная электроэнергетика / Под ред. Профессоров А.П. Бурмана и В.А. Строева. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 454 с., ил.
80. IEC 61850-9-2 Communication networks and systems in substations – Part 9-2: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled values over ISO/IEC 8802-3. Geneva, IEC, 2004.
81. Цифровой ТТ [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.profotech.ru/products/206/
82. Устройство сопряжения с шиной (Merging Unit) Reason MU320 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.alstom.com/grid/products-and-services/Substation-automation-system/measurement-merging-gps/reason-mu320-integrated-analogue-and-digital-merging-unit/
83. ГОСТ Р 51317.4.7–2008 Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. – М.: Стандартинформ, 2009. – 34 с.
84. ГОСТ Р 51317.4.15–2008 Фликерметр. Технические требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2009. – 15 с.
85. СТО 56947007-29.240.55.159-2013 Типовая инструкция по организации работ для определения мест повреждений воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше ОАО «ФСК ЕЭС», 2013
86. IEEE Std 1588–2008 Precision Time Protocol. New York, IEEE, 2008.
87. ГОСТ Р 8.655–2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений показателей качества электрической энергии. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2009. – 22 с.
88. IEEE Std 1003.1–2013 Standard for Information TechnologyPortable Operating System Interface (POSIX(R)) Base Specifications, Issue 7. New York, IEEE, 2013.
89. Макконнелл, С. Совершенный код. Мастер-класс. / С. Макконнелл. – М.: Русская Редакция, 2012. – 896 с.
90. IEEE Std C37.111-1999 - Measuring relays and protection equipment Part 24: Common format for transient data exchange (COMTRADE) for power systems. New York, IEEE, 1999.

91. ГОСТ 22261–94 Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия. – М.: Стандаринформ, 2007. – 35 с.
92. Аналого-цифровой преобразователь ADS8422 [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.ti.com/lit/ds/slas512b/slas512b.pdf
93. Трансформатор тока Т04АС-45А-85-К/0 [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.eltranstech.ru/t04.php
94. Цифровой сигнальный процессов TMS320C6455 [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320c6455.pdf
95. Постоянное запоминающее устройство тип Flash M29W320DT70 [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.micron.com/parts/nor-flash/parallel-nor-flash/m29w320dt70n3e
96. Оперативное запоминающее устройство MT47H32M16 [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.micron.com/parts/dram/ddr2-sdram/mt47h32m16nf-25e-aat
97. Постоянное запоминающее устройство типа EEPROM M24C32-WDW6 [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.st.com/web/catalog/mmc/FM76/CL1276/SC112/PF145367
98. Микроконтроллер STM32F207VG [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00237391.pdf
99. Операционная система FreeRTOS [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.freertos.org/
100. National Marine Electronics Association NMEA 0183. New Bern, NMEA, 2001.
101. Протокол Ubx [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/u-blox6_ReceiverDescriptionProtocolSpec_(GPS.G6-SW-10018).pdf
102. Пат.128341, Российская Федерация, МПК G01R31/00. Многофункциональное устройство регистрации процессов на линии электропередачи/ Панфилов Дмитрий Иванович (RU), Лачугин Владимир Федорович (RU), Смирнов Александр Николаевич (RU), Образцов Сергей Александрович (RU), Ахметов Игорь Маратович(RU), Рывкин Артем Александрович (RU), Шимина Анастасия Олеговна (RU), Артемьев Игорь Феликсович (RU), Арутюнов Сергей Альпиньевич (RU), Горюшин Юрий Александрович (RU), патентообладатели - ОАО "ФСК ЕЭС" (RU), ОАО "ЭНИН" (RU) — № 2013105234, заявл. 08.02.2013; опубл. 20.05.2013.
103. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013612374, Программное обеспечение сервера и автоматизированного рабочего места ЭНИС (ПО ЭНИС-АРМ)/ Артемьев Игорь Феликсович (RU), Смирнов Александр Николаевич (RU), Панфилов Дмитрий Иванович (RU), Лачугин Владимир Федорович (RU), патентообладатели - ОАО

"ФСК ЕЭС" (RU), ОАО "ЭНИН" (RU) — № 2013612374, заявл. 26.02.2013; опубл. 20.06.2013.

104. Свидетельство программы для ЭВМ №2013612409, Встроенное метрологическое программное обеспечение ЭНИС (ПО ЭНИС-метр) / Смирнов Александр Николаевич (RU), Образцов Сергей Александрович (RU), Артемьев Игорь Феликсович (RU), Рывкин Артем Александрович (RU), Шимина Анастасия Олеговна (RU), Панфилов Дмитрий Иванович (RU), Лачугин Владимир Федорович (RU), патентообладатели - ОАО "ФСК ЕЭС" (RU), ОАО "ЭНИН" (RU) — № 2012661760, заявл. 29.12.2013; опубл. 20.06.2013.
105. ГОСТ Р 8.689–2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений показателей качества электрической энергии. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2010. – 19 с.
106. Калибратор переменного тока Ресурс К2М [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.entp.ru/catalog/obraz/1
107. V. F. Lachugin, D. I. Panfilov, A. N. Smirnov Travelling Wave Fault Location in Power Transmission Lines Using Statistic Data Analysis Methods / V. F. Lachugin, D. I. Panfilov, A. N. Smirnov // Thermal Engineering. – 2014. - v. 61. - № 13, pp. 985–991.
108. Попов И.Н., Лачугин В.Ф., Соколова Г.В. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов / И.Н. Попов, В.Ф. Лачугин, Г.В. Соколова – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.: ил.
109. Токарев С.Ю. Фазо-модальное преобразование многопроводных линий // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 2. – С. 25–30.
110. Tokarev S.Y. Optimization of the multiconductor transmission lines calculation // Proceedings of ICCTPEA-2014, Saint-Petersburg, Russia, June 30 – July 04, 2014, p 192.
111. Токарев С.Ю. Волновое определение места повреждения // Релейщик. - 2014. - №3. С. 26-31.
112. Токарев С.Ю. Аппроксимация фазо-модального преобразования многопроводных линий в задаче волнового определения места повреждения // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сборник докладов 5-й международной научно-технической конференции. Сочи. 1-5 июня 2015.
113. Попов И.Н., Соколова Г.В., Махнев В.И. Импульсная направленная защита электрических сетей от замыкания на землю типа ИЗС // Электрические станции, 1978, №4.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Акт о внедрении результатов диссертационной работы

ИРЗ
Т Э К

Общество с ограниченной ответственностью "ИРЗ ТЭК"
ул. Базисная, д.19, Ижевск, Удмуртская Республика, 426034
р/с 40702810868020102563
ОТДЕЛЕНИЕ № 8618 СБЕРБАНКА РОССИИ, г. ИЖЕВСК
к/с 30101810400000000601, БИК 049401601
тел: (3412) 65-83-06
факс: (3412) 65-83-06 internet: www.irz.ru
ОКПО 74037544 ИНН 1833033690
ОГРН 1041803717988 КПП 184001001

_____ № _____
на № _____ от _____

Для предоставления в
диссертационный совет
Д212.157.03
ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»

«Утверждаю»
Директор
_____ Шихиев Р.И.
10 июня 2015 г

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Смирнова Александра Николаевич

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме: «Волновой метод двухсторонних измерений для определения места повреждения воздушной линии электропередачи 110 – 220 кВ», выполненной Смирновым Александром Николаевичем, используются в ООО «ИРЗ ТЭК» при разработке опытного образца многофункционального устройства определения места повреждения «ЭНИС». Применение устройства «ЭНИС» в организациях, эксплуатирующих воздушные линии электропередачи напряжением 110 кВ – 220 кВ, позволяет сократить время на поиск и устранение повреждений на ЛЭП.

Главный конструктор
ООО «ИРЗ ТЭК» Феофилактов С.В.

ДЛЯ ДОКУМЕНТОВ
«ИРЗ ТЭК»
ИНН 1833033690

Система менеджмента качества предприятия сертифицирована
на соответствие требованиям ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 18001, IRIS

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Программа расчета T_u, $\gamma_м$, $Z_{в,м}$ на языке Matlab

```
%Функция для расчета матриц удельных проводимостей Y,
%удельных сопротивлений Z, модальных преобразований Tu,
%модальных коэффициентов распространения gamma и
%модальных волновых сопротивлений Z в зависимости от частоты
%Аргументы функции:
%path - путь к файлу с параметрами расположения проводов
%init_freq - начальная частота
%decade - количество декад
%points_per_decade - количество точек на декаду
%Пример:  [f, Tu, Tu_inv, Ti, Ti_inv, Zwm] = ...
%modal_decomposition('PTL_220kV_2.mat', 1e2, 4, 100);

function [f, Tu_mean, Tu_inv_mean, Ti_mean, Ti_inv_mean, Zwm_mean] = ...
   modal_decomposition(path, init_freq, decade, points_per_decade)
%%
%инициализация переменных
LDATA = power_lineparam(path);

num_of_wire = length(LDATA.R);

f = zeros(1, decade*points_per_decade);
Tu_mean = zeros(num_of_wire,num_of_wire);

Tu_f = zeros(num_of_wire^2, decade*points_per_decade);
gamma_f = zeros(num_of_wire, decade*points_per_decade);
Zwm_f = zeros(num_of_wire, decade*points_per_decade);
%%
%при использовании Multiprecision Computing Toolbox
%mp.Digits(30);
%расчет
for i = 1:decade
   for j = 1:points_per_decade
      freq = init_freq*(10^(i - 1)) + (j - 1) * ...
         (init_freq*(10^i - 10^(i-1))/points_per_decade);
      f(1, points_per_decade*(i - 1) + j) = freq;
      save(path, 'freq', '-append')
      %расчет матриц удельных ...проводимостей и сопротивлений
      LDATA = power_lineparam(path);

      Z = LDATA.R + 1i*(2*pi*freq)*LDATA.L;
      Y = 1i*(2*pi*freq)*LDATA.C;
      %расчет матриц преобразования и распространения
      %при использовании Multiprecision Computing Toolbox
      %[Tu, gamma] = eig(mp(Z*Y));
      [Tu, gamma] = eig(Z*Y);
      gamma = sqrt(gamma);
      Zw = inv(Y)*sqrtm(Y*Z);
      Zwm = (inv(Tu)*Zw)*inv(Tu');

      %нормализация Tu по первой строке
      for k = 1:num_of_wire
         Tu(:,k) = Tu(:,k)/Tu(1,k);
      end

      %сохранение Tu, gamma, Zwm для текущей частоты
```

```
      for n = 1:num_of_wire
        for m = 1:num_of_wire
          Tu_f(num_of_wire*(n-1)+m, points_per_decade*(i - 1) + j) ...
            = Tu(n,m);
          if n == m
            gamma_f(n,points_per_decade*(i - 1) + j) = gamma(n,n);
            Zwm_f(n,points_per_decade*(i - 1) + j) = Zwm(n,n);
          end
        end
      end

   end
end
%%
%усреднение Tu, Zwm
for n = 1:num_of_wire
  for m = 1:num_of_wire
      Tu_mean(n, m) = mean(Tu_f(num_of_wire*(n-1)+m, :));
      if n == m
        Zwm_mean(n,n) = mean(Zwm_f(n,:));
      end
  end
end

Tu_inv_mean = inv(Tu_mean);

for k = 1:num_of_wire
   Tu_inv_mean(k,:) = Tu_inv_mean(k,:)/Tu_inv_mean(k,1);
end

Ti_mean = Tu_inv_mean';
Ti_inv_mean = Tu_mean';
%%
%график зависимости элементов матрицы преобразования от частоты
%действительная часть
figure(1);
for n = 1:num_of_wire
  for m = 1:num_of_wire
      subplot(num_of_wire,num_of_wire,num_of_wire*(n-1)+m);
      semilogx (f, real(Tu_f(num_of_wire*(n-1)+m,:)), 'LineWidth', 2);
      title(strcat('\itRe(Tu_{', num2str(n),',',num2str(m),'})'));
      xlabel('\itf, Гц');
      xlim([init_freq init_freq*10^decade]);
      grid on;
  end
end
%%
%график зависимости элементов матрицы преобразования от частоты
%мнимая часть
figure(2);
for n = 1:num_of_wire
  for m = 1:num_of_wire
      subplot(num_of_wire,num_of_wire,num_of_wire*(n-1)+m);
      semilogx (f, imag(Tu_f(num_of_wire*(n-1)+m,:)), 'LineWidth', 2);
      title(strcat('\itIm(Tu_{', num2str(n),',',num2str(m),'})'));
      xlabel('\itf, Гц');
      xlim([init_freq init_freq*10^decade]);
      grid on;
  end
end
%%
```

```
%график зависимости коэффициента затухания от частоты
figure(3);
for n = 1:num_of_wire
semilogx (f, real(gamma_f(n,:)), 'Color', ...
   [0 1 - n/num_of_wire n/num_of_wire], 'LineWidth', 2);
hold on;
end

grid on; ylabel('\it\alpha, 1/км'); xlabel('\itf, Гц');
legend('\alpha_1', '\alpha_2', '\alpha_3', ...
   '\alpha_4', '\alpha_5','\alpha_6', '\alpha_0',1);
xlim([init_freq init_freq*10^decade]);
%%
%график зависимости коэффициента фазы от частоты
figure(4);
for n = 1:num_of_wire
semilogx (f, imag(gamma_f(n,:)), 'Color', ....
   [0 1 - n/num_of_wire n/num_of_wire], 'LineWidth', 2);
hold on;
end

grid on; ylabel('\it\beta, 1/км'); xlabel('\itf, Гц');
legend('\beta_1', '\beta_2', '\beta_3', ...
   '\beta_4', '\beta_5','\beta_6', '\beta_0',1);
xlim([init_freq init_freq*10^decade]);
%%
%график зависимость волнового сопротивления от частоты
%действительная часть
figure(5);
for n = 1:num_of_wire
semilogx (f, real(Zwm_f(n,:)), 'Color', ...
   [0 1 - n/num_of_wire n/num_of_wire], 'LineWidth', 2);
hold on;
end

grid on; ylabel('\itRe(Z_в), Ом'); xlabel('\itf, Гц');
legend('\itRe(Z_{в1})', '\itRe(Z_{в2})', '\itRe(Z_{в3})', ...
  '\itRe(Z_{в4})', '\itRe(Z_{в5})', '\itRe(Z_{в6})' , '\itRe(Z_{в0})', 0);
xlim([init_freq init_freq*10^decade]);
%%
%график зависимость волнового сопротивления от частоты
%мнимая часть
figure(6);
for n = 1:num_of_wire
semilogx (f, imag(Zwm_f(n,:)), 'Color', ...
   [0 1 - n/num_of_wire n/num_of_wire], 'LineWidth', 2);
hold on;
end

grid on; ylabel('\itIm(Z_в), Ом'); xlabel('\itf, Гц');
legend('\itIm(Z_{в1})', '\itIm(Z_{в2})', '\itIm(Z_{в3})', ...
  '\itIm(Z_{в4})', '\itIm(Z_{в5})', '\itIm(Z_{в6})' , '\itIm(Z_{в0})', 0);
xlim([init_freq init_freq*10^decade]);
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Программа расчета частотной характеристики волновых каналов ВЛ *H*(ω,*l*) на языке Matlab

```
%Скрипт для расчета импульсной и
%частотной характеристики участка ЛЭП длиной l

l_max = 90;%конечная длина пробега, км
l_min = 0;%начальная длина пробега, км
dl = 5;%приращение длины пробега, км

time = 0.02;%интервал расчета, с
t0 = 0.01;%момент повреждения, с

fs = 1e5;%частота дискретизации, Гц
dt = 1/fs;%шаг во временной области, с
N = time*fs;%количество точек во временной области
df = fs/N;%шаг в частотной области, Гц
t = (0:(N-1))*dt;%вектор значений времени, с
f = (0:(N-1))*df;%вектор значений частот, Гц

%расчет матриц Tu и gamma
%инициализация переменных
path = 'PTL_220kV_1.mat';
LDATA = power_lineparam(path);

num_of_wire = length(LDATA.R);%количество проводов в ВЛ
%инициализация матрицы gamma (строки - элементы, столбцы - частоты)
gamma_f = zeros(num_of_wire, N/2);

%%
%при использовании Multiprecision Computing Toolbox
%mp.Digits(30);

for i = 2:N/2
   freq = f(1,i);
   save(path, 'freq', '-append');
   %расчет матриц удельных проводимостей и сопротивлений
   LDATA = power_lineparam(path);

   Z = LDATA.R + 1i*(2*pi*freq)*LDATA.L;
   Y = 1i*(2*pi*freq)*LDATA.C;
   %A = mp(Z)*mp(Y);
   A = Z * Y;
   [Tu, gamma] = eig(A);%расчет матриц преобразования и распространения
   gamma = sqrt(gamma);

   %сохранение Tu, gamma для текущей частоты
   for n = 1:num_of_wire
      gamma_f(n,i) = gamma(n,n);
   end
end

%%
%задание функции Дирака
u_abc_fault = zeros(3, N);
```

```
u_abc_fault(1, N/2) = 1;
u_abc_fault(2, N/2) = 1;
u_abc_fault(3, N/2) = 1;

%преобразование сигнала в частотную область
U_abc_fault(1,:) = fft(u_abc_fault(1,:), N);
U_abc_fault(2,:) = fft(u_abc_fault(2,:), N);
U_abc_fault(3,:) = fft(u_abc_fault(3,:), N);
%%
%построение графиков импульсной характеристики
figure(1);
subplot(311);
hold on; grid on;
title('\itПервый волновой канал');
ylabel('\itU_{пад1}'); xlabel('\itt, c');
xlim([0.0098 0.0108]);

subplot(312);
hold on; grid on;
title('\itВторой волновой канал');
ylabel('\itU_{пад2}'); xlabel('\itt, c');
xlim([0.0098 0.0108]);

subplot(313);
hold on; grid on;
title('\itНулевой волновой канал');
ylabel('\itU_{пад0}'); xlabel('\itt, c');
xlim([0.0098 0.0108]);

U_mod_tw = zeros(3, N);

U_mod_tw_0 = zeros((l_max-l_min)/dl, N);
U_mod_tw_1 = zeros((l_max-l_min)/dl, N);
U_mod_tw_2 = zeros((l_max-l_min)/dl, N);

for l = l_min:dl:l_max
   for k = 1:N/2

      %первый волновой канал
      U_mod_tw(1,k) = exp(-gamma_f(1,k)*l)*U_abc_fault(1,k);
      %комплексно-сопряженное симметричное отображение
      U_mod_tw(1,N-k+1) = conj(U_mod_tw(1,k));

      %второй волновой канал
      U_mod_tw(2,k) = exp(-gamma_f(2,k)*l)*U_abc_fault(2,k);
      %комплексно-сопряженное симметричное отображение
      U_mod_tw(2,N-k+1) = conj(U_mod_tw(2,k));

      %нулевой волновой канал
      U_mod_tw(3,k) = exp(-gamma_f(3,k)*l)*U_abc_fault(3,k);
      %комплексно-сопряженное симметричное отображение
      U_mod_tw(3,N-k+1) = conj(U_mod_tw(3,k));
   end

   %переход во временную область
   u_mod_tw(1,:) = ifft(U_mod_tw(1,:),N,'symmetric');
   u_mod_tw(2,:) = ifft(U_mod_tw(2,:),N,'symmetric');
   u_mod_tw(3,:) = ifft(U_mod_tw(3,:),N,'symmetric');
```

```
    max_elem = max(max(abs(u_mod_tw')));
    u_mod_tw = u_mod_tw./max_elem;

    %построение графика импульсной характеристики
    figure(1);
    subplot(311);
    plot(t, u_mod_tw(1,:), 'Color', [l/l_max 1 - l/l_max 1 - l/l_max],...
        'LineWidth', 2);
    subplot(312);
    plot(t, u_mod_tw(2,:), 'Color', [l/l_max 1 - l/l_max 1 - l/l_max],...
        'LineWidth', 2);
    subplot(313);
    plot(t, u_mod_tw(3,:), 'Color', [l/l_max 1 - l/l_max 1 - l/l_max],...
        'LineWidth', 2);

    U_mod_tw_1(l/dl + 1,:) =  U_mod_tw(1,:);
    U_mod_tw_2(l/dl + 1,:) =  U_mod_tw(2,:);
    U_mod_tw_0(l/dl + 1,:) =  U_mod_tw(3,:);
end

%добавление легенды
subplot(311);
legend('\it0 км', '\it20 км', '\it40 км', '\it60 км', '\it80 км',...
    '\it100 км', '\it120 км',1);
subplot(312);
legend('\it0 км', '\it20 км', '\it40 км', '\it60 км', '\it80 км',...
    '\it100 км', '\it120 км',1);
subplot(313);
legend('\it0 км', '\it20 км', '\it40 км', '\it60 км', '\it80 км',...
    '\it100 км', '\it120 км',1);

%%
%построение частотной харатеристики участка линии
h2 = figure(2);
a2 = axes;
U_mod_tw_0 = abs(U_mod_tw_0);
[x, y] = meshgrid(l_min:dl:l_max, f(1, 1:N/2));
mesh(x, y, 10*log((U_mod_tw_0(:, 1:N/2)')));

title('\itНулевой волновой канал');
zlabel('\it|H_0|, dB'); ylabel('\itf, Гц'); xlabel('\itl, км');
ylim([0 500e3]); zlim([-240 1]);
view(120, 30);
set(a2,'YScale','log')

h3 = figure(3);
a3 = axes;
U_mod_tw_1 = abs(U_mod_tw_1);
[x, y] = meshgrid(l_min:dl:l_max, f(1, 1:N/2));
mesh(x, y, (U_mod_tw_1(:, 1:N/2)'));

title('\itПервый волновой канал');
zlabel('\it|H_1|'); ylabel('\itf, Гц'); xlabel('\itl, км');
ylim([0 500e3]); zlim([-10 1]);
view(120, 30);
set(a3,'YScale','log')

h4 = figure(4);
a4 = axes;
```

```
U_mod_tw_2 = abs(U_mod_tw_2);
[x, y] = meshgrid(l_min:dl:l_max, f(1, 1:N/2));
mesh(x, y, (U_mod_tw_2(:, 1:N/2)'));

title('\itВторой волновой канал');
zlabel('\it|H_2|'); ylabel('\itf, Гц'); xlabel('\itl, км');
ylim([0 500e3]); zlim([-10 1]);
view(120, 30);
set(a4,'YScale','log')
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Погрешности испытаний устройства на СИ ПКЭ

Таблица П4.1 Погрешности испытаний МФУ на СИ ПКЭ при нормальных условиях

Наименование ПКЭ и погрешность в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.30 - 2008	Испытательный сигнал			Измеренное значение			Абсолютная (Δ) / Относительная погрешности (δ), %		
	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
1. Среднеквадратическое значение напряжения U, В U_H = 57,735 В (номинальное фазное напряжение) $\delta(U)$ = ± 0,5% ΔU = ± 0,5% · U_H = 57,735 · 0,005 = ± 0,29 В	57,735	57,735	57,735	57.730	57.73	57.73	Δ = 0,005 δ = 0,009	Δ = 0,005 δ = 0,009	Δ = 0,005 δ = 0,009
	52,063	52,730	52,305	52.06	52.73	52.31	Δ = 0.003 δ = 0,005	Δ = 0,000 δ = 0,000	Δ = 0,005 δ = 0,009
	64,250	63,632	64,448	64.25	63.63	64.46	Δ = 0,000 δ = 0,000	Δ = 0,002 δ = 0,004	Δ = 0,012 δ = 0,021
	62,485	55,489	57,847	62.49	55.49	57.86	Δ = 0,005 δ = 0,009	Δ = 0,001 δ = 0,002	Δ = 0,013 δ = 0,023
	55,211	59,509	61,330	55.22	59.51	61.35	Δ = 0,009 δ = 0,016	Δ = 0,001 δ = 0,002	Δ = 0,020 δ = 0,035
	58,589	61,022	56,534	58.60	61.03	56.55	Δ = 0,012 δ = 0,021	Δ = 0,008 δ = 0,014	Δ = 0,016 δ = 0,028
	69,282	69,282	69,282	69.29	69.29	69.30	Δ = 0,008 δ = 0,014	Δ = 0,008 δ = 0,014	Δ = 0,009 δ = 0,016
	46,188	46,188	46,188	46.21	46.20	46.20	Δ = 0,022 δ = 0,038	Δ = 0,012 δ = 0,021	Δ = 0,012 δ = 0,021
2. Частота f, Гц f_H = 49,997 Гц Δf = ±0,05 Гц	49,997			49,99			Δ = 0,007		
	55,000			54,99			Δ = 0,010		
	45,008			45,00			Δ = 0,008		
	48,994			48,99			Δ = 0,004		
	49,793			49,79			Δ = 0,003		
	50,188			50,18			Δ = 0,008		
	49,591			49,59			Δ = 0,001		

	50,395			50,39			Δ = 0,005		
3. Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U}, %	0,000			0,01			Δ = 0,010		
	0,000			0,01			Δ = 0,010		
	0,000			0,01			Δ = 0,010		
	3,087			3,17			Δ = 0,083		
	2,666			2,59			Δ = 0,076		
Δ(K_{2U}) = ±0,15%	17,265			17,16			Δ = 0,105		
	0,000			0,01			Δ = 0,010		
	0,000			0,01			Δ = 0,010		
4. Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U}, %	0,000			0,01			Δ = 0,010		
	0,000			0,01			Δ = 0,010		
	0,000			0,01			Δ = 0,010		
	3,028			3,15			Δ = 0,122		
	7,699			7,75			Δ = 0,081		
Δ(K_{2U}) = ±0,15	14,893			14,90			Δ = 0,051		
	0,000			0,01			Δ = 0,010		
	0,000			0,01			Δ = 0,010		
5. Длительность провала и прерывания напряжения Δ$t_п$, с/ количество провалов	10/3	10/3	10/3	10/3	10/3	10/3	0/0	0/0	0/0
	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5	2/5	0/0	0/0	0/0
	30/1	30/1	30/1	30/1	30/1	30/1	0/0	0/0	0/0
Δ(Δ$t_п$) = ±0,04с	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	0/0	0/0	0/0
	0,1/5	0,1/5	0,1/5	0,1/5	0,1/5	0,1/5	0/0	0/0	0/0
6. Глубина провала напряжения δ $U_п$, %	11	11	11	11,14	11,13	11,12	Δ = 0,14 δ = 0,24	Δ = 0,13 δ = 0,23	Δ = 0,12 δ = 0,21
	99	99	99	98.51	98.50	98.52	Δ = 0,49 δ = 0,85	Δ = 0,50 δ = 0,87	Δ = 0,48 δ = 0,83
δ(δ$U_п$) = ±1%	30	30	30	30,10	30,10	30,10	Δ = 0,10 δ = 0,20	Δ = 0,10 δ = 0,20	Δ = 0,10 δ = 0,20
Δ($U_п$) = ± 1% · $U_п$ = 57,735 ·0,01 = 0,57735В	50	50	50	50,06	50,03	50,10	Δ = 0,06 δ = 0,10	Δ = 0,03 δ = 0,05	Δ = 0,10 δ = 0,17
	90	90	90	90,06	90,10	90,11	Δ = 0,06 δ = 0,10	Δ = 0,10 δ = 0,20	Δ = 0,11 δ = 0,19
7. Длительность временного перенапряжения Δ$t_в$, с / количество временных перенапряжений	30/1	30/1	30/1	30/1	30/1	30/1	0/0	0/0	0/0
	10/3	10/3	10/3	10/3	10/3	10/3	0/0	0/0	0/0
	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	0/0	0/0	0/0
	0,1/10	0,1/10	0,1/10	0,1/10	0,1/10	0,1/10	0/0	0/0	0/0
Δ(Δ$t_в$) =±0,04с	3/5	3/5	3/5	3/5	3/5	3/5	0/0	0/0	0/0
8. Коэффициент временного перенапряжения $K_{перU}$, отн.ед.	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	0	0	0

(величина временного перенапряжения δ $U_{перU}$, %)	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	0	0	0
	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	0	0	0
$\Delta(1\text{-}K_{\text{пер}U}) = \pm 1\ \% \cdot U_н = 57{,}735 \cdot 0{,}01 = 0{,}57735$ В	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	0	0	0
	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	0	0	0

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Погрешности испытаний устройства на СВИ

Таблица П5.1 Испытания МФУ на СВИ при нормальных условиях (статические испытания)

Влияющая величина	Начальные условия	Диапазон изменения	Максимальный вектор ошибки (TVE), %	Максимальный измеренный вектор ошибки (TVE_{real}), %
Изменение частоты	50,0 Гц	± 2,0 Гц	1,0	0,56
Изменение напряжения	$100/\sqrt{3}$ В	$0{,}8\cdot(100/\sqrt{3})$ В – $1{,}2\cdot(100/\sqrt{3})$ В	1,0	0,4
Изменение тока	1,0 А	$0{,}2\cdot 1{,}0$ А – $2{,}0\cdot 1{,}0$ А	1,0	0,71
Фаза	Любой фиксированный или медленно изменяющийся угол	$\pm\pi$	1,0	0,64
Гармонические искажения	Суммарный коэффициент гармонических составляющих <0,2%	1%, для каждой гармоники до 50й	1,0	0,55

Таблица П5.2 Испытания МФУ на СВИ при нормальных условиях (динамические испытания)

Влияющая величина	Начальные условия	Диапазон изменения	Максимальная погрешность частоты (FE), Гц	Максимальная погрешность скорости изменения частоты (RFE), Гц/с	Измеренная максимальная погрешность частоты (FE), Гц	Измеренная максимальная погрешность скорости изменения частоты (RFE), Гц/с
Изменение частоты	50,0 Гц	± 2,0 Гц	0,005	0,01	0,0043	0,008
Гармонические искажения	Суммарный коэффициент гармонических составляющих <0,2%	± 2,0	0,005	0,01	0,0047	0,008

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Погрешности испытаний устройства на ОМП

Таблица П6.1 Испытание функции определения времени появления фронта волны

Параметры испытательного сигнала	Заданное относительное время $t_{зад}$, с	Измеренное устройством № 1 относительное время $t_{изм}$, с	Абсолютная погрешность устройства № 1 Δ, с	Заданное относительное время $t_{зад}$, с	Измеренное устройством № 2 относительное время $t_{изм}$, с	Абсолютная погрешность устройства № 2 Δ, с	Суммарная абсолютная погрешность Δ_{Σ}, с
1. $L_{ВЛ}$ = 90 км $l_{повр}$ = 10 км *AG* R_n = 100 Ом α = 30° *ОСШ* = 120 дБ	0,101917	0,101917	0,0	0,102148	0,102152	0,000004	0,000004
2. $L_{ВЛ}$ = 90 км $l_{повр}$ = 10 км *AB* R_n = 0,5 Ом α = 30° *ОСШ* = 120 дБ	0,100251	0,100252	0,000001	0,100483	0,100485	0,000002	0,000001
3. $L_{ВЛ}$ = 90 км $l_{повр}$ = 45 км *AG* R_n = 100 Ом α = 30° *ОСШ* = 120 дБ	0,101917	0,101917	0,0	0,102148	0,102148	0,000000	0,0
4. $L_{ВЛ}$ = 90 км $l_{повр}$ = 10 км *AG* R_n = 100 Ом α = 30° *ОСШ* = 60 дБ	0,101917	0,101918	0,000001	0,102148	0,102150	0,000002	0,000001
$L_{ВЛ}$ – длина ВЛ, $l_{повр}$ – расстояние до места повреждения, *AG* – замыкание фазы А на землю, *AB* – замыкание фаз А и В, R_n – переходное сопротивление в месте повреждения, α – угол напряжения, при возникновения повреждения, *ОСШ* – отношение сигнал шум.							

Таблица П6.2 Испытание МФУ на ОМП (по токовым сигналам)

Параметры испытательного сигнала	Измеренное расстояние до места повреждения, $l_{изм}$, км	Абсолютная погрешность измерений Δ, м	Относительная погрешность δ, %
1. $L_{ВЛ}$ = 90 км $l_{повр}$ = 20 км *AG* $R_п$ = 100 Ом α = 30, *ОСШ* = 120 дБ	20,30	300	0,33
2. $L_{ВЛ}$ = 90 км $l_{повр}$ = 20 км *AB* $R_п$ = 5 Ом α = 30°, *ОСШ* = 120 дБ	20,45	300	0,33
3. $L_{ВЛ}$ = 90 км $l_{повр}$ = 20 км *AG* $R_п$ = 1 кОм α = 30°, *ОСШ* = 120 дБ	20,30	300	0,33
4. $L_{ВЛ}$ = 90 км $l_{повр}$ = 50 км *AG* $R_п$ = 5 Ом α = 30°, *ОСШ* = 120 дБ	49,85	150	0,16
5. $L_{ВЛ}$ = 200 км $l_{повр}$ = 180 км *AG* $R_п$ = 5 Ом α = 30°, *ОСШ* = 120 дБ	180,30	300	0,15
$L_{ВЛ}$ – длина ВЛ, $l_{повр}$ – расстояние до места повреждения, *AG* – замыкание фазы А на землю, *AB* – замыкание фаз А и В, $R_п$ – переходное сопротивление в месте повреждения, α – угол напряжения, при возникновения повреждения, *ОСШ* – отношение сигнал шум.			