

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

*На правах рукописи*

ЛАЧУГИН ВЛАДИМИР ФЕДОРОВИЧ



**Релейная защита объектов электроэнергетических систем,  
основанная  
на использовании волновых методов**

Специальность 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические  
системы»

Диссертация  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Москва 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	8
<b>Глава 1. Принципы построения защиты линий электропередачи сверхвысокого напряжения от всех видов коротких замыканий</b> .....	17
1.1. Анализ исследований и разработок устройств защиты ВЛ СВН, использующих переходные процессы при повреждениях.....	17
1.2. Общая характеристика переходных процессов на ВЛ СВН и методы анализа формируемых сигналов при КЗ .....	28
1.3. Особенности формирования волновых переходных токов и напряжений в месте повреждения.....	34
1.3.1. Короткое замыкание на землю крайней фазы <i>A</i> .....	35
1.3.2. Короткое замыкание на землю средней фазы <i>B</i> .....	37
1.3.3. Короткое замыкание между крайними фазами <i>A</i> и <i>C</i> .....	37
1.3.4. Короткое замыкание между крайней <i>A</i> и средней <i>B</i> фазами.....	38
1.3.5. Другие виды КЗ .....	39
1.3.5.1. Короткое замыкание на землю крайних фаз <i>A</i> и <i>C</i> .....	39
1.3.5.2. Короткое замыкание на землю крайней <i>A</i> и средней <i>B</i> фазы.....	40
1.3.5.3.Трехфазное КЗ .....	41
1.4. Измерительные органы защиты.....	43
1.4.1. Характер распространения волн по ВЛ .....	43
1.4.2. Выделение контролируемых составляющих.....	47
1.4.3. Принципы построения измерительных органов с контролем направления распространения волн .....	49
1.4.4. Методы и результаты расчета переходных процессов в цепях органов направления мощности .....	52
1.4.5. Избирательные органы поврежденных фаз ВЛ .....	87
1.4.6. Измерительные органы защиты при включении ВЛ.....	88
1.5. Испытания волновой защиты на электродинамической модели .....	91
1.5.1. Особенности выполнения образца волновой защиты .....	91

1.5.2. Схема и параметры электродинамической модели .....	100
1.5.3. Испытания образца защиты .....	102
1.5.4. Испытания образцов защиты, установленных по концам ВЛ.....	109
1.6. Выводы.....	134
<b>Глава 2. Анализ влияния грозовых возмущений на надежность функционирования устройств защиты ВЛ СВН.....</b>	<b>137</b>
2.1. Влияние ударов молнии, не вызывающих коротких замыканий, на работу защит ВЛ СВН, реагирующих на токи и напряжения промышленной частоты .....	137
2.1.1. Метод расчета свободных составляющих .....	137
2.1.2. Определение места удара молнии, при котором наблюдаются максимальные значения свободных составляющих в месте установки защиты .....	142
2.1.3. Распределение амплитуд периодических свободных составляющих вдоль ВЛ.....	145
2.1.4. Оценка воздействия грозовых возмущений на работу направленных фильтровых и дифференциально-фазных защит ВЛ СВН .....	147
2.2. Распознавание ударов молнии, не вызывающих короткого замыкания, на ППТ 1500 кВ .....	154
2.2.1. Методы расчета переходных процессов.....	154
2.2.2. Анализ результатов расчетов.....	159
2.3. Пусковой орган для ППТ 1500 кВ.....	161
2.3.1. Функциональная схема пускового органа .....	161
2.3.2. Особенности расчета переходных процессов, воздействующих на пусковой орган, при исследовании его функционирования на ВЛ СВН переменного тока.....	184
2.4. Выводы.....	188
<b>Глава 3. Определение места повреждения на воздушных линиях на основе волнового метода двусторонних синхронизированных измерений с использованием спутниковой связи.....</b>	<b>190</b>

3.1. Особенности волновых методов и устройств определения места повреждения на ВЛ .....	190
3.2. Предпосылки создания устройства ОМП волновым методом двусторонних измерений на основе регистрации синхронизированных измерений.....	193
3.3. Разработка способа построения ОМП волновым методом двусторонних измерений на ВЛ 110-220 кВ .....	199
3.4. Структура и основные параметры устройства.....	210
3.5. Анализ экспериментальных данных .....	217
3.6. Выводы.....	232
<b>Глава 4. Принципы выполнения защит распределительных сетей 6-35 кВ от однофазных замыканий на землю с использованием переходных процессов.....</b>	<b>234</b>
4.1. Анализ проблемы защиты электрических сетей 6 – 35 кВ от однофазных замыканий на землю .....	234
4.2. Переходные процессы при однофазных замыканиях на землю и формирование сигналов для целей защиты.....	242
4.3. Защиты от ОЗЗ, основанные на использовании электрических величин переходного процесса .....	250
4.3.1. Классификация устройств защиты от ОЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса.....	250
4.3.2. Токовые защиты относительного замера, основанные на сравнении значений переходных токов в присоединениях защищаемого объекта .....	251
4.3.3. Направленные устройства защиты от ОЗЗ, основанные на использовании электрических величин переходного процесса.....	252
4.3.4. Индивидуальное устройство направленной волновой защиты ИЗС .....	258
4.3.5. Индивидуальное микроэлектронное устройство направленной волновой защиты УЗС .....	265
4.4. Экспериментальные исследования импульсной защиты от замыканий на землю .....	268



4.5. Индивидуальное микропроцессорное устройство направленной волновой защиты ИЗН .....	274
4.6. Комбинированное устройство защиты от ОЗЗ, основанное на использовании электрических величин переходного и установившегося режимов ОЗЗ .....	282
4.7. Направленная защита от замыканий на землю .....	285
4.8. Выводы .....	289
<b>Глава 5. Селективная защита от однофазных замыканий на землю в обмотках статора гидрогенератора, действующая на основе волновых методов .....</b>	<b>291</b>
5.1. Особенности переходного процесса при однофазных замыканиях на землю в обмотках статора гидрогенератора укрупненных блоков ГЭС .....	291
5.2. Технические требования и структурная схема защиты .....	293
5.3. Результаты экспериментальных исследований .....	298
5.3.1. Опыты однофазных замыканий на землю .....	299
5.3.2. Опыты неполнофазных коммутаций .....	301
5.4. Повышение эффективности функционирования ИЗГ при ОЗЗ в обмотках статора гидрогенератора, работающего в блоке с повышающим трансформатором .....	304
5.4.1. Исходные условия и параметры .....	304
5.4.2. Расчеты переходных процессов в схеме блока гидрогенератор–трансформатор при ОЗЗ в обмотках статора гидрогенератора .....	310
5.4.3. Модернизированная схема ИЗГ, повышающая селективность работы защиты при ОЗЗ в обмотках статора гидрогенератора, работающего в блоке с трансформатором .....	314
5.5. Выводы .....	316
<b>Глава 6. Опыт эксплуатации устройств релейной защиты, использующих волновые методы .....</b>	<b>318</b>
6.1. Опыт эксплуатации волновой быстродействующей высокочастотной направленной релейной защиты ВЛ СВН .....	318

6.1.1. Анализ эксплуатации волновой быстродействующей высокочастотной направленной релейной защиты ВЛ СВН .....	318
6.1.2. Корректировка схемы волновой защиты по результатам опыта ее эксплуатации .....	325
6.1.3. Функционирование защиты в цикле ОАПВ .....	328
6.2. Опыт эксплуатации пускового органа на ВЛ СВН .....	332
6.3. Опыт применения волнового метода определения места повреждения на ВЛ 110 и 220 кВ .....	335
6.4. Результаты опытной эксплуатации селективной защиты от ОЗЗ в сети 6-35 кВ .....	338
6.5. Выводы .....	345
<b>Заключение</b> .....	347
<b>Список литературы</b> .....	351
<b>Приложения</b> .....	373
Приложение 1. Программа испытаний на электродинамической модели ВНИИЭ основных измерительных органов волновой направленной высокочастотной защиты .....	373
Приложение 2. Расчёт схемы испытаний и выбор оборудования электродинамической модели .....	380
Приложение 3. Акт по результатам испытаний на электродинамической модели опытного образца волновой защиты ЛЭП .....	399
Приложение 4. Описание алгоритмов модифицированного пакета программ .....	403
Приложение 5. Акт ввода в опытную эксплуатацию многофункционального измерительного устройства для регистрации переходных процессов определения места повреждения (ЭНИС) .....	414
Приложение 6. Акт монтажа опытных образцов многофункционального устройства регистрации процессов в ВЛ ЕНЭС и определения места повреждения .....	416

Приложение 7. Акт испытаний устройства защиты от однофазных замыканий на землю типа УЗС-01, разработанного на предприятии "Энергосоюз" совместно с ЭНИИ им. Кржижановского .....	418
Приложение 8. Технические данные устройства ИЗГ .....	420
Приложение 9. Расчет токов и напряжений для ОНМ ИЗГ в расчетном случае ОЗЗ на выводах гидрогенератора, работающего в блоке с повышающим трансформатором .....	423
Приложение 10. Испытания ИЗГ на Нижнекамской ГЭС .....	428
Приложение 11. Акт о включении в промышленную эксплуатацию волновой релейной защиты ВЛ 500 кВ Киндери-Заинская ГРЭС .....	435
Приложение 12. Акт о включении в опытную эксплуатацию органа селекции грозových возмущений на ВЛ по признаку сопоставления длительностей и пауз напряжения переходного процесса .....	437

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** С развитием электроэнергетических систем (ЭЭС) связано постоянное совершенствование релейной защиты (РЗ), являющейся важным звеном, обеспечивающим надежность и бесперебойность электроснабжения потребителей. Принципы выполнения РЗ различных электроэнергетических объектов (ЭЭО) преимущественно строятся на основе контроля токов и напряжений промышленной частоты. Проблемы, связанные с повышением сложности электрических сетей, увеличением протяженности воздушных линий (ВЛ) электропередачи и передаваемых мощностей, применением сверхвысоких напряжений (СВН), предъявляют более высокие требования к эффективности функционирования РЗ. Резкие изменения режимов работы современных ЭЭС ведут к увеличению диапазона колебаний электрических величин, в пределах которого должна быть обеспечены селективность, быстродействие и устойчивость функционирования релейной защиты. При этом уровни минимальных токов и напряжений требуют выполнения измерительных органов защиты с повышенной чувствительностью. Обеспечение необходимых запасов динамической устойчивости ЭЭС требует повышения быстродействия РЗ. Реализация указанных требований при выполнении защиты ВЛ сверхвысокого напряжения (СВН) от всех видов коротких замыканий (КЗ) на основе контроля электрических величин промышленной частоты сталкивается с существенными трудностями. Например, обеспечение высокой чувствительности затруднено по условиям отстройки от различного рода небалансов нормального режима, а также от длительно затухающих переходных процессов с широким спектром частот. При этом фильтрация высокочастотных составляющих связана с ограничением быстродействия.

Усложнение условий функционирования особенно проявилось при создании РЗ ВЛ СВН. Так, применение на этих линиях электропередачи (ЛЭП) СВН продольной емкостной компенсации изменяет характер входного

реактивного сопротивления, обуславливая возникновение фазовых искажений сигналов измерительных органов защиты, реагирующих на электрические величины промышленной частоты. Существенные трудности возникают и при выполнении селективных защит от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в электрических сетях среднего напряжения 6-35 кВ и на гидрогенераторах укрупненных блоков гидроэлектростанций с нейтралью, заземленной через дугогасящие реакторы, поскольку ток промышленной частоты при ОЗЗ в этом случае не может быть использован в качестве надежного источника информации.

Изложенные проблемы определили необходимость создания защит, обладающих повышенным быстродействием и чувствительностью, в частности защит, реагирующих на токи и напряжения волновой стадии электромагнитных переходных процессов. Сложность решения данной задачи связана с тем, что коммутации (включение и отключение) электрооборудования и грозовые возмущения, в том числе не приводящие к повреждениям, также являются причиной возникновения переходных процессов в ЭЭС.

Тесно связанными по принципам функционирования с релейной защитой являются способы и устройства определения места повреждения (ОМП) на ВЛ. Основная проблема реализации ОМП волновым методом двухсторонних измерений заключается в обеспечении синхронизации измерений по концам ВЛ. С использованием спутниковых систем навигации в качестве источника синхронизации измерений обеспечение требуемой точности ОМП волновыми методами связано с выделением из измеренных токов и напряжений ВЛ волновых составляющих, распространяющихся от места повреждения, и определением времени прихода их фронта в точки контроля.

Работы по созданию и исследованию устройств, реагирующих на переходные процессы, в основу которых были положены волновые методы (методы бегущей волны), инициировались в Энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского (ЭНИИ) в 1950-х годах под руководством к.т.н., с.н.с. И.Н. Попова. Огромный вклад в разработку указанного типа устройств, реагирующих на соотношение полярностей токов и напряжений в начальной стадии

переходного процесса при однофазных замыканиях на землю в ЛЭП 6-35 кВ и в обмотках статора гидрогенераторов укрупненных блоков, а затем и при создании быстродействующих защит воздушных линий (ВЛ) СВН внесла инженер Г.В. Соколова. Существенный вклад на разных этапах разработки быстродействующих защит ВЛ СВН внесли к.т.н. О.З. Керимов, к.т.н. А.Д. Зейналов (АзНИИЭ), д.т.н. Д.Р. Любарский, к.т.н. В.И. Козлов и В.Л. Карцев (Институт Энергосетьпроект).

Следует отметить, что независимо от ЭНИН в Ивановском энергетическом институте (ныне Ивановском государственном энергетическом университете) под руководством к.т.н., доцента О.В. Лебедева и д.т.н., профессора В.А. Шуина успешно велись разработки защит от однофазных замыканий на землю, реагирующих на переходные процессы в электрических сетях 6-35 кВ. Большое внимание разработке методов построения волновых защит, основанных на контроле падающих волн от места КЗ на протяженных ВЛ СВН, уделялось в СибНИИЭ (к.т.н. Ю.Ф. Королюк, к.т.н. Л.М. Цыганков, В.Г. Богрунов и к.т.н. Л.Х. Райзвих). Серьезная работа по исследованию технических средств определения мест повреждения волновыми методами ведется в ООО «НПП «Бреслер» под руководством к.т.н. В.Н. Козлова и в Нижегородском государственном техническом университете под руководством д.т.н. А.Л. Куликова.

**Целью диссертационной работы** является разработка на основе переходных процессов, возникающих при электрических повреждениях в ЭЭС (КЗ и ОЗЗ) принципов выполнения РЗ различных объектов электроэнергетических систем. Созданные на данной основе устройства РЗ должны обладать существенными преимуществами по быстродействию и чувствительности по сравнению с традиционными устройствами, реагирующими на электрические величины промышленной частоты.

**Основные задачи исследования.** Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

1. Разработка принципов построения, алгоритмов функционирования и внедрение быстродействующей высокочувствительной направленной защиты ВЛ СВН (500-1150 кВ) от всех видов КЗ.

2. Исследование влияния грозовых возмущений на эффективность функционирования защиты ВЛ СВН на основе волновых методов.

3. Разработка и внедрение способа ОМП на ВЛ ВН и СВН на основе волнового метода двусторонних синхронизированных измерений с использованием спутниковой связи.

4. Разработка принципов выполнения, алгоритмов функционирования и внедрение защиты от ОЗЗ распределительных сетей среднего напряжения 6-35 кВ, обеспечивающей селективность и устойчивость функционирования независимо от режима заземления нейтрали.

5. Разработка и внедрение усовершенствованного алгоритма селективной защиты от ОЗЗ гидрогенераторов укрупненных блоков, обеспечивающего селективность работы защиты при ОЗЗ в обмотках статора гидрогенератора, работающего в блоке с трансформатором.

6. Разработка рекомендаций по повышению эффективности указанных устройств на основе анализа их опыта эксплуатации.

**Методы научных исследований.** Решение поставленных задач базировалось на использовании методов теории электрических цепей и электромагнитных переходных процессов в электрических сетях, включающей теорию волновых процессов в цепях с распределенными параметрами, методов математического и физического моделирования ЭЭО, методов экспериментальных исследований и обработки данных эксплуатации разработанных устройств РЗ.

#### **Научная новизна работы.**

1. Разработаны принципы построения направленной высокочастотной защиты ВЛ СВН от всех видов КЗ, основанной на использовании волновых методов.

2. Исследовано влияние и разработан метод оценки воздействий грозовых возмущений на функционирование РЗ ВЛ.

3. Разработаны способ и устройство определения места повреждения на линиях электропередачи ВН и СВН на основе волнового метода двусторонних синхронизированных измерений.

4. Разработаны принципы построения защиты распределительных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ, основанной на использовании электрических величин переходных процессов, обеспечивающей селективность и высокую устойчивость функционирования при любом режиме заземления нейтрали.

5. Разработан алгоритм селективной защиты гидрогенераторов укрупненных блоков от ОЗЗ в обмотках статора, обеспечивающий селективность работы защиты при ОЗЗ в обмотках статора гидрогенератора, работающего в блоке с трансформатором.

6. На основе анализа опыта эксплуатации внедренных устройств разработаны рекомендации по повышению эффективности функционирования устройств РЗ, действующих с использованием электрических величин электромагнитных переходных процессов.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов работы** подтверждается данными многочисленных испытаний разработанных методов и устройств защиты на электродинамических и цифровых моделях элементов энергосистем, а также результатами опыта эксплуатации внедренных устройств в электрических сетях и на электростанциях.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертационная работа соответствует паспорту специальности: *в части формулы специальности* – «Научная специальность, объединяющая исследования по связям и закономерностям при планировании развития, проектировании и эксплуатации электрических станций, электроэнергетических систем, электрических сетей ...». В рамках специальности проводятся исследования по развитию и совершенствованию теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения ... надежного производства электроэнергии, ее



транспортировки ... .»; в части области исследования – пункту 9: «Разработка методов анализа и синтеза ... релейной защиты в электроэнергетике»; пункту 5: «Разработка методов диагностики электрооборудования электроустановок» и пункту 6: «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике».

**Практическая значимость работы.** Практической значимостью обладают следующие полученные в работе результаты:

– комплекс математических моделей, критериев, принципов построения и алгоритмов функционирования устройств РЗ ЛЭП, распределительных сетей и гидрогенераторов на основе волновых методов, обеспечивающий повышение эффективности функционирования РЗ указанных объектов электроэнергетических систем по сравнению с устройствами, основанными на использовании электрических величин промышленной частоты;

– алгоритм и структурная схема защиты ВЛ 500 – 1150 кВ на основе волновых методов с контролем поврежденных фаз ВЛ, позволяющая обеспечить распознавание поврежденных фаз с помощью органов направления мощности и избирателя поврежденных фаз ВЛ, с быстродействием в пределах нескольких миллисекунд;

– принцип отстройки защиты ВЛ СВН от воздействий грозовых разрядов, не проводящих к повреждениям;

– комбинированное устройство ОМП ВЛ 220-750 кВ, сочетающее функции мониторинга установившихся и переходных процессов в электрической сети с волновым методом определения места повреждения;

– устройство защиты распределительных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ при любом режиме заземления нейтрали, основанной на использовании волновых методов и электрических величин промышленной частоты;

– алгоритм селективной защиты гидрогенераторов укрупненных блоков от ОЗЗ в обмотке статора, эффективно действующий при любом числе генераторов блока;

– обоснование оптимального диапазона рабочих частот и методика расчета параметров срабатывания измерительных органов разработанных устройств защиты, основанных на использовании волновых методов;

– комплекс мероприятий, обеспечивающий повышение эффективности функционирования устройств РЗ, основанных на использовании электрических величин переходных процессов.

**Использование результатов работы.** Результаты выполненных исследований и разработок использованы в научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработках, внедренных на различных объектах электроэнергетических систем:

– микроэлектронные устройства направленной высокочастотной защиты ВЛ СВН от всех видов КЗ, реагирующей на токи и напряжения переходных процессов, выполненные по договорам с Минэнерго СССР и ПЭО Татэнерго, внедрены в опытно-промышленную эксплуатацию на ВЛ 500 кВ Киндери – Заинская ГРЭС в 1987–1997 годах;

– комбинированные устройства, сочетающие функции мониторинга установившихся и переходных процессов в электрической сети с волновым методом ОМП на ВЛ ВН и СВН с помощью двухсторонних измерений, прошли испытания на ВЛ 110 кВ Пугачи – Акбулак «Оренбургэнерго» в 2009 году, на ВЛ 220 кВ Тамбовская 500 – Давыдовская 1 – с 2012 года; в 2015 году выполнено включение этих устройств на ВЛ 220 кВ Сасово - Парская МЭС Центра ОАО «ФСК ЕЭС»;

– микроэлектронные устройства защиты распределительных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ, основанные на использовании волновых методов, изготовлены на Рижском опытном заводе ПО «Союзэнергоавтоматика» и успешно эксплуатируются на кабельных линиях 35 кВ Невинномысская ГРЭС – ПО «Азот» с 1992 года; 20 устройств, изготовленных на предприятии «Энергосоюз» (г. Казань), после проведения опытно-промышленных испытаний включены в 1996 – 2000 годах в эксплуатацию на ВЛ 35 кВ ПС Солнечногорская (Мосэнерго), на секции шин 6 кВ Казанской ТЭЦ 1, а также в распределительном устройстве 10 кВ Химического комбината ОАО «Славнефть» (г. Ярославль);

– микропроцессорные устройства защиты распределительных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ при любом режиме заземления нейтрали на основе волновых процессов, разработанные совместно с ООО «ИЦ «Бреслер», установлены в промышленную эксплуатацию на ряде ЛЭП 10 кВ ПС Ханты-Мансийская ОАО «Тюменьэнерго» в 2010 и в 2012 годах,

- микропроцессорные устройства защиты распределительных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ при любом режиме заземления нейтрали, основанной на использовании волновых методов и электрических величин промышленной частоты, установлены в промышленную эксплуатацию на ряде ЛЭП 6 кВ ПС Олимпийская (г. Волгоград) в ОАО «МРСК Юга» в 2013 году.

– микроэлектронные устройства селективной защиты гидрогенераторов укрупненных блоков от ОЗЗ, изготовленные на Рижском опытном заводе ПО «Союзэнергоавтоматика», эксплуатируются на шестнадцати гидрогенераторах Нижнекамской ГРЭС с 1986 года и модернизированы в 1993 – 1997 годах.

#### **На защиту выносятся:**

1. Принципы и алгоритмы построения направленной высокочастотной защиты ВЛ СВН от всех видов КЗ, реагирующей на токи и напряжения волновых переходных процессов в ЛЭП.

2. Методика оценки и результаты исследований воздействия грозовых возмущений на устойчивость функционирования устройств РЗ ВЛ СВН.

3. Способ и устройство ОМП на ВЛ ВН и СВН на основе волнового метода двусторонних синхронизированных измерений.

4. Принципы построения и алгоритмы защиты распределительных сетей 6-35 кВ от ОЗЗ при любом режиме заземления нейтрали, основанной на использовании электрических величин переходных процессов.

5. Алгоритм селективной защиты гидрогенераторов укрупненных блоков от ОЗЗ в обмотке статора.

6. Методы оценки эффективности функционирования защиты, реагирующей на токи напряжения переходных процессов, на математической и динамической моделях, а также в процессе эксплуатации и результаты оценки.

7. Рекомендации по повышению эффективности устройств РЗ, основанных на использовании переходных процессов.

**Личный вклад автора.** В диссертации обобщены результаты исследований и разработок, выполненных в 1981-2015 годах с участием и под руководством автора. Личный вклад заключается в постановке целей и задач исследований, теоретическом и методическом обосновании путей их решения, обработки, обобщения и интерпретации результатов организации и проведения опытно-промышленной апробации разработанных алгоритмов и устройств. Внедрение полученных результатов, их анализ и выдача рекомендаций проводилось при непосредственном участии автора диссертации.

**Апробация результатов работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на более чем 50 отечественных и международных научно-технических семинарах, симпозиумах, конференциях и совещаниях, в т.ч. на заседаниях Ученого совета ОАО «ЭНИН».

Устройства, разработанные автором по теме диссертации, экспонировались на ВДНХ (ВВЦ), отмечены дипломами и медалями.

**Опубликованные работы.** Основные результаты диссертации опубликованы в двух монографиях, 71 печатной работе, включающих 22 публикации в рецензируемых научных изданиях («Электричество», «Известия РАН. Энергетика», «Электрические станции», «Энергетик», «Электро. Электротехника. Электроэнергетика. Электротехническая промышленность», «Известия вузов. Электромеханика», «Power technology and engineering», «Thermal engineering») и 24 патента на изобретения, на полезные модели и на свидетельства на программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 209 наименований и 12 приложений. Общий объем диссертации составляет 437 страниц, из них основной текст – 372 страницы, приложения – 65 страниц.

# **ГЛАВА 1. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ОТ ВСЕХ ВИДОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ**

## **1.1. Анализ исследований и разработок устройств защиты ВЛ СВН, использующих переходные процессы при повреждениях**

Развитие электроэнергетических систем и связанное с этим сооружение протяженных и мощных электропередач ВН и СВН связано с увеличением диапазона изменений электрических величин промышленной частоты при КЗ в различных режимах, емкостным характером входных сопротивлений обратной и нулевой последовательности ЛЭП при длине ее свыше 700-900 км, резонансными явлениями при длине линии, близкой к четверти длины волны промышленной частоты, и более длительным затуханием переходных процессов. Все это обусловило повышение требований к релейной защите (по селективности, чувствительности, быстродействию и надежности функционирования) при всех видах КЗ и режимах, не связанных с КЗ. Такие условия, приводящие к снижению уровней контролируемых величин и их фазовым искажениям, а при резонансе - и к отсутствию составляющих определенных последовательностей, ухудшают функционирование направленных, дистанционных и токовых защит, реагирующих на величины промышленной частоты [1,2].

С учетом указанных условий были проведены исследования и разработки более совершенных защит ЛЭП СВН, основанных на контроле электрических величин промышленной частоты [2, 3]. Вместе с тем анализ действия этих защит указывает на определенные ограничения в их применении, связанные со сложностью реализации указанных выше условий функционирования. Так, чувствительность направленных защит с ВЧ блокировкой ограничивается применением компенсации емкостных токов линии в цепях измерительных органов и может оказаться недостаточной на линиях протяженностью более 600 - 700 км. С целью удовлетворения требований по чувствительности рассмотрен

ряд мероприятий, например, применение разрешающих высокочастотных (ВЧ) сигналов вместо блокирующих, что не требует согласования параметров срабатывания на отключение и блокировку и компенсации емкостных токов. Однако для предотвращения излишних срабатываний под влиянием емкостных токов при КЗ на параллельной линии в этом случае должна предусматриваться токовая блокировка, основанная на сравнении токов обратной последовательности параллельных линий. Необходимая чувствительность направленных защит по напряжению может быть получена смещением замера напряжения в защищаемую зону, что, однако, ухудшает отстройку защиты при качаниях. Кроме того, фиксация однофазных КЗ в условиях резонанса токов нулевой последовательности требует дополнительных органов нулевой последовательности.

Выделение величин промышленной частоты при КЗ на мощных и протяженных передачах в условиях длительно затухающих переходных процессов предъявляет повышенные требования к чувствительности и быстродействию защит. При этом для фильтровых защит наибольший относительный уровень помех при переходном процессе имеет место в условиях симметричных возмущений или коммутации последней фазы, когда при наличии свободных составляющих отсутствуют вынужденные составляющие обратной и нулевой последовательности. Низшие частоты свободных составляющих могут достигать 70-100 Гц, т.е. быть весьма близкими к промышленной частоте, с чем и связаны трудности отстройки измерительных органов от таких помех. Для улучшения отстройки от свободных составляющих предусматривается применение трехфазных схем сравнения в органе направления мощности, переход к использованию только разрешающих ВЧ (или радио) сигналов, повышение добротности фильтров и точности компенсации емкостных токов, включая их свободные составляющие. Но применение частотных фильтров с более узкой полосой пропускания определяет замедление срабатывания защиты. Уменьшение эффекта замедления в известных пределах может быть получено в более сложных схемах фильтра - с двумя нулями передаточной функции [2]. Однако, несмотря на

указанные мероприятия, быстродействие защиты, реагирующей на величины промышленной частоты, ограничивается временем срабатывания порядка 20 мс [3].

Удовлетворение повышенных требований к защитах достигается при контроле более полной информации о повреждении, которая может быть выделена при использовании волновой стадии переходного процесса при КЗ. Исследования, проведенные ЭНИН им. Кржижановского, показали принципиальную возможность контроля переходных процессов для целей построения релейной защиты линий электропередачи СВН от всех видов КЗ, удовлетворяющей современным требованиям [4]. В основе принципа находится положение о том, что направление распространения волн переходного процесса в различных точках системы в начальный момент его возникновения характеризует расположение места повреждения на ЛЭП и не зависит от характеристик электрической цепи. Получаемая при этом с ЛЭП информация в меньшей степени зависит от схемы, протяженности и режима работы передачи в отличие от величин промышленной частоты. Обеспечение селективности защиты, особенно в замкнутых сетях с одним или несколькими источниками питания, определяет необходимость контроля измерительными органами направления распространения волн при КЗ, характеризуемого знаком мгновенной мощности в соответствии с направлением вектора потока энергии. Сопоставление зафиксированной органами направления информации по концам защищаемой линии путем передачи ВЧ сигналов позволяет осуществить селективный выбор поврежденной линии.

Созданный ЭНИН и АзНИИЭ образец волновой защиты в 1980 году был установлен в опытную эксплуатацию на ВЛ 500 кВ Мосэнерго. В соответствии с изложенными общими принципами ЭНИН, Энергосетьпроект и АзНИИЭ разработали опытный образец отечественной волновой защиты ВЛ СВН, обладающей повышенным быстродействием и независимостью функционирования от режимов работы системы [5]. Исследования и разработки защит ВЛ СВН, реагирующих на переходный процесс, проводились в 1970 - 1980

годах в СибНИИЭ [6 - 10]. Действие органов направления мощности этой защиты, выполненных на основе сравнения знаков мгновенных значений напряжений и токов в координатах  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $0$ , исследовались на математической и физической моделях.

В связи с актуальностью совершенствования принципов релейной защиты ЛЭП СВН волновые защиты также исследуются и за рубежом. Удовлетворение повышенных требований к защитах достигается с помощью контроля более полной информации о повреждении за счет использования волновой стадии переходного процесса при КЗ. Разработки быстродействующей волновой защиты ВЛ ВН и СВН велись с 1970-х годов в Японии, Швеции, Канаде, США, Великобритании и других странах.

В Японии [11] разработано дифференциальное реле, названное «реле D'Alembert», контролирующее величину  $\xi(t)$ , соответствующую разности токов бегущих волн данного и противоположного конца ЛЭП, информация о которой передается по каналу связи. При превышении  $\xi(t)$  порогового значения выявляется КЗ на защищаемой ЛЭП. Приведены результаты анализа переходных процессов на модели энергосистемы и при лабораторных испытаниях. На этом же принципе основано действие устройства цифровой защиты ВЛ [12] с ВЧ связью, в котором вычисляется

$$\xi(t) = \left\{ \frac{1}{z_B} u_k(t) - i_k(t) \right\} - \left\{ \frac{1}{z_B} u_m(t - \tau) + i_m(t - \tau) \right\}. \quad (1.1)$$

В уравнении (1.1) учитывается взаимосвязь мгновенных значений токов  $i$  и напряжений  $u$  по концам  $k$  и  $m$  ВЛ с волновым сопротивлением  $z_B$ . В нормальном режиме и при внешних КЗ  $\xi(t) = 0$ , а при КЗ в зоне  $\xi(t) \neq 0$ . Сигналы от трансформаторов тока (ТТ) и трансформаторов напряжения (ТН) преобразуются в цифровую форму и поступают в микропроцессор вместе с данными, передаваемыми по ВЧ каналу с противоположного конца ВЛ.

Шведской фирмой ASEA [13, 14] разработана направленная волновая защита RALDA (рис.1.1), реагирующая на соотношение знаков фазных аварийных составляющих токов  $\Delta i$  и напряжений  $\Delta u$  волнового переходного процесса. По



направлению распространения волн защита определяет расположение места повреждения, а по уровню тока выбирает поврежденную фазу. Для выделения аварийных составляющих  $\Delta i$  и  $\Delta u$  ток и напряжение предаварийного режима подавляются частотными фильтрами. Быстродействие защиты составляет 4 - 6 мс, включая замедление на 2 мс в ВЧ каналах ВЛ.

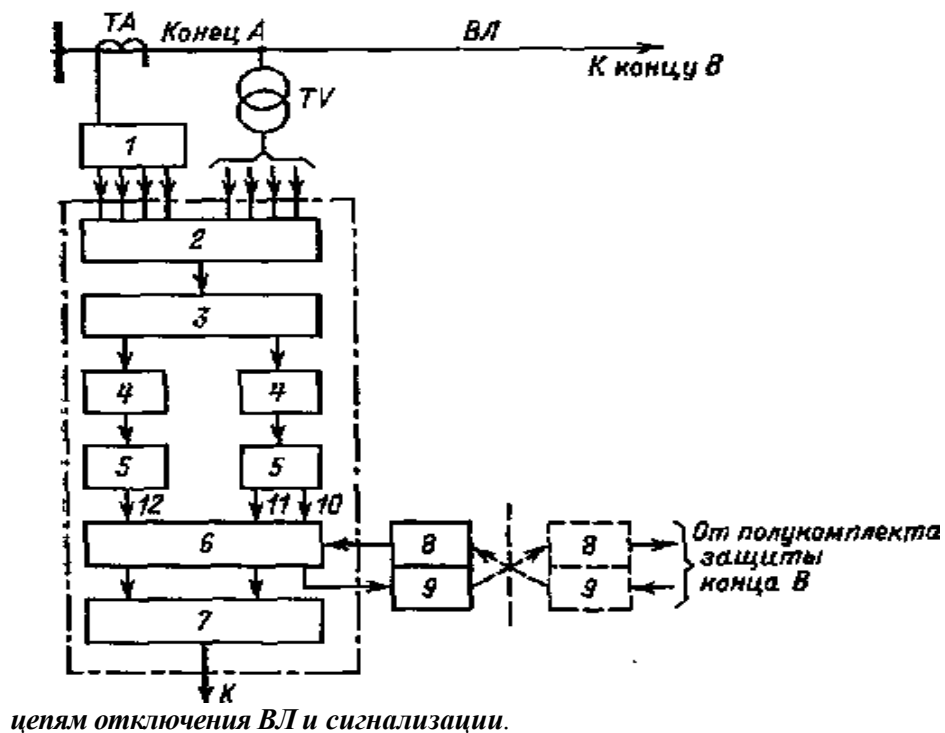


Рис. 1.1. Структурная схема полуконспекта волновой направленной защиты ВЛ фирмы ASEA типа RALDA: 1 — резисторная схема; 2—аналоговое согласующее устройство; 3 — устройство подавления составляющих промышленной частоты; 4—усилители; 5 —орган направления; 6 - логическая часть; 7 —выходное устройство; 8 — ВЧ приемник; 9— ВЧ передатчик; 10 — цепь блокировки; 11— цепь отключения; 12 — цепь отключения без контроля ВЧ сигналов

Предусмотрено два функциональных блока, обеспечивающих два вида направленной защиты - независимую защиту (для обнаружения КЗ в течение 2 - 3 мс в пределах определенной зоны, меньшей длины ЛЭП) и зависимую - с ВЧ блокировкой. В блоке независимой защиты свободные составляющие ограничиваются частотными фильтрами, что позволяет фиксировать защищаемую зону по мгновенным значениям токов и напряжений, в основном, промышленной частоты [14]. В блоке с ВЧ блокировкой контролируется широкий спектр частот в диапазоне до единиц килогерц. Отключающие и блокирующие сигналы защиты

поступают в логическую часть схемы, которая при многофазных КЗ в защищаемой зоне действует на трехфазное отключение, а при однофазных КЗ — на отключение поврежденной фазы. Защита содержит специальный орган защиты при включении линии (рис. 1.2), который контролирует величину приращения тока  $\Delta i$  и сниженный уровень напряжения в течение заданного времени (9 мс) после включения ЛЭП.

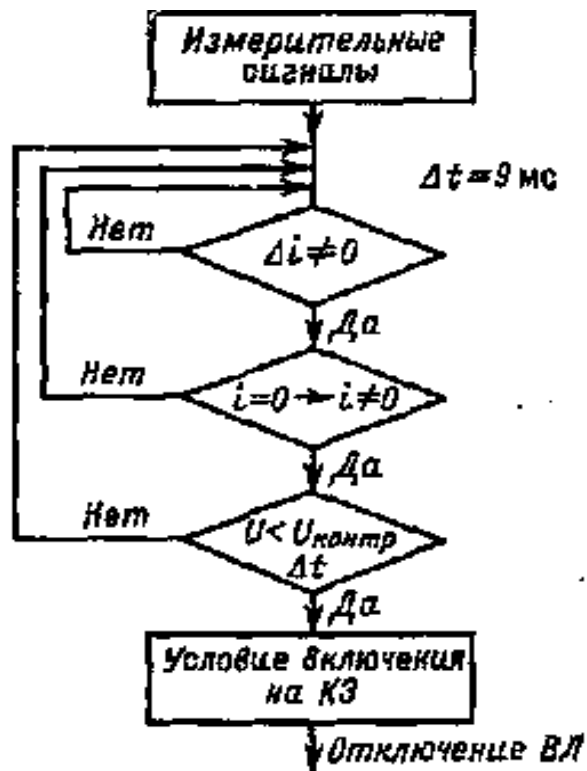


Рис. 1.2. Алгоритм функционирования блока защиты RALDA при включении ЛЭП на КЗ

Следует отметить, что контроль минимального напряжения при КЗ рекомендуется фирмой при наличии в выключателях ВЛ резисторов, вводимых при включении на заданное время, с сопротивлением, соизмеримым с волновым сопротивлением ВЛ. При отсутствии резисторов и низком значении сопротивления энергосистемы, примыкающей к защищаемой ВЛ, контроль напряжения при включении на КЗ может оказаться неэффективным.

В связи с высоким быстродействием RALDA в ее органах направления мощности (ОНМ) требуется тщательная настройка параметров срабатывания для

предотвращения неселективного срабатывания защиты из-за колебания знаков тока и напряжения на неповрежденных фазах в начальной стадии переходного процесса [4, 5]. Разработчики защиты считают, что RALDA не будет срабатывать при грозовых возмущениях, не связанных с КЗ, вследствие существенного различия частотных спектров переходных токов и напряжений грозового разряда и КЗ, и на этом основании не предусмотрели орган для отстройки защиты грозовых возмущений, не приводящих к КЗ. При этом процесс формирования низкочастотных составляющих тока и напряжения на протяженных электропередачах СВН в условиях грозовых возмущений ими не исследовался.

Защита RALDA была установлена в 1976 году в Бонневильской энергосистеме (США) на ВЛ 525 кВ с устройством продольной емкостной компенсации. Измерительная цепь напряжения защиты подключалась к вторичной обмотке емкостных преобразователей напряжения, а измерительная цепь тока - к трансформаторам тока с коэффициентом трансформации  $K_I = 3000/5$ . Параметры срабатывания ОНМ по току устанавливались в диапазоне от 0,2 до 5,1 от номинального тока ТТ, а по напряжению - от 0,05 до 1,05 от номинального напряжения [14]. При искусственных однофазных КЗ на землю в сети 500 кВ защита RALDA 4 раза действовала на отключение КЗ в зоне защиты, 3 раза блокировалась при КЗ вне зоны и 1 раз ложно сработала при коммутациях. Из 228 действий защиты в период эксплуатации в трех случаях отмечены ее неправильные срабатывания. В одном случае - вследствие неисправности блока отключения защиты, в двух других - из-за «внутреннего перекрытия неустойчивой перемежающейся дугой» [14], по-видимому, при грозовых разрядах.

В Канаде и США совместно разработано быстродействующее реле [15], реагирующее на токи и напряжения волн переходного процесса ВЛ. Реле контролирует совокупность сигналов тока  $i(t)$  и напряжения  $u(t)$ , формирующей в месте установки защиты напряжение  $u_{\text{пад}}(t)$  падающей волны и производную этих тока и напряжения в соответствии с выражениями

$$2u_{\text{пад}}(t) = u(t) + z_{\text{в}}i(t) = -U\sqrt{2} \sin[\omega(t + \tau) + \varphi];$$

$$\frac{du(t)}{dt} + z_{\text{в}} \frac{di(t)}{dt} = -\omega U\sqrt{2} \cos[\omega(t + \tau) + \varphi], \quad (1.2)$$

где  $\tau$  — время пробега волны от места повреждения до места установки защиты;  
 $\varphi$  — фаза напряжения ВЛ, предшествующая повреждению.

Сумма квадратов выражений (1.2), равная  $2U^2$  и называемая дискриминантом  $D$ , не зависит от фазы напряжения ЛЭП в момент КЗ. Метод позволяет обеспечить селективность действия защиты с помощью передачи разрешающих сигналов по ВЧ каналам, так как на поврежденной ЛЭП (рис. 1.3 а и б)  $D=2U^2$  из-за совпадения  $u(t)$  и  $z_{\text{в}}i(t)$  по амплитуде и знаку в интервале времени фиксации сигнала, а при внешних КЗ на одном из концов ЛЭП дискриминант равен нулю (рис. 1.3 в).

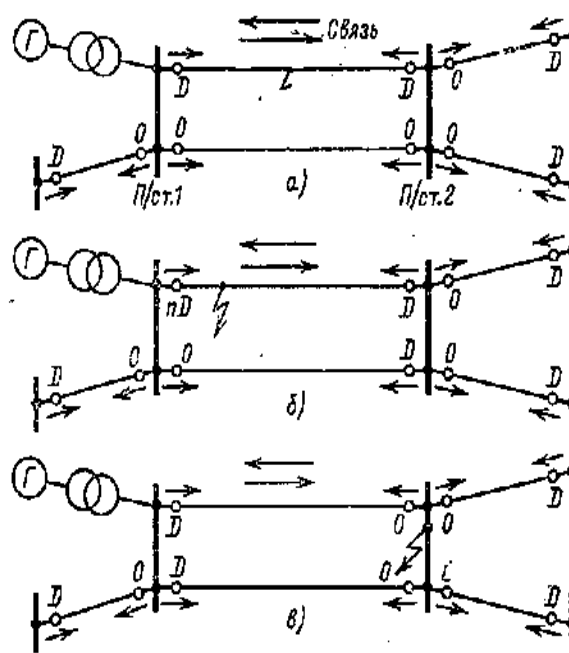


Рис. 1.3. Распределение величин дискриминантов бегущей волны в системе:  
 а — КЗ в защищаемой зоне ( $D \neq 0$  по концам линии); б — КЗ вблизи одного из концов линии ( $D$  возрастает существенно быстрее, чем при удаленных КЗ); в — КЗ вне защищаемой зоны (на одном из концов линии  $D=0$ )

При моделировании работы реле зафиксированы его неселективные срабатывания на ВЛ длиной меньше 15 км [15], связанные с влиянием отраженных волн от концов линии, смежной с поврежденной, при принятом

времени контроля 100 мкс, соответствующем двойному пробегу волны по смежной линии, что не было учтено разработчиками реле.

В Великобритании предложена быстродействующая волновая фильтровая направленная защита с ВЧ блокировкой [16] для ЛЭП СВН. Для селективного определения КЗ контролируется последовательность сигналов  $s_1 = 2u_{\text{пад}} \left( t - \frac{x}{v} \right)$  и  $s_2 = 2u_{\text{пад}} \left( t - \frac{x}{v} \right) \frac{z_{B.ЭК} - z_B}{z_{B.ЭК} + z_B}$ . Здесь  $u_{\text{пад}}$  — напряжение падающей волны,  $x$  — расстояние от места повреждения до точки контроля,  $v$  — скорость распространения волны,  $z_B$  и  $z_{B.ЭК}$  — волновое сопротивление ЛЭП и эквивалентное сопротивление примыкающей энергосистемы. Детектор последовательности сигналов сравнивает сигнал при КЗ с предшествующим за период промышленной частоты сигналом и тем самым выделяет аварийную составляющую. Указывается, что защита отстроена от качаний. При КЗ в момент перехода фазного напряжения через нулевое значение и при переходных сопротивлениях в месте КЗ, превышающих 100 Ом, защитой не охватывается 15 % противоположного конца длины ЛЭП.

Фирма Brown Boveri (Швейцария) также обратилась к использованию бегущих волн для осуществления быстродействующей релейной защиты с ВЧ связью [17]. Принцип действия защиты состоит в контроле суммы аварийных составляющих тока  $\Delta i$  и напряжения  $\Delta u$  переходного процесса в системе координат  $\Delta u$  и  $R\Delta i$  ( $R$  — коэффициент пропорциональности). Быстродействие защиты без учета задержки прохождения сигнала в канале связи составляет 6 мс.

Таким образом, повышение быстродействия устройств РЗ ВЛ, использующих волновые методы (методы бегущих волн) позволяет существенно повысить быстродействие отключения повреждений в электропередачах и, следовательно, повысить устойчивость работы энергосистем. Тем самым подтверждается высокая эффективность разработки и применения таких устройств [18]. Приведенные результаты исследований и разработок, направленные на совершенствование устройств релейной защиты ЛЭП СВН, характеризуют

принципиально новые технические решения [4 - 17], основанные на контроле информации о параметрах переходного процесса при повреждениях. Способы обеспечения селективности защит предусматривают контроль направления распространения преломленных (СССР, Швеция, Швейцария) и падающих волн (СССР, Канада и США), а также очередности их прихода (СССР, Великобритания). По принципам построения волновые направленные защиты ВЛ СВН переменного тока различаются

способами формирования аварийных составляющих;

выбором системы координат для контроля электрических величин переходного процесса;

видами контроля сигналов переходного процесса при КЗ, определяющих селективность действия защиты с учетом необходимости использования каналов связи;

способами предотвращения срабатывания волновых защит при грозовых возмущениях, не связанных с КЗ;

способами выбора поврежденной фазы;

реализацией защиты при включении линии.

Принципы направленной волновой защиты получили распространение и в защитах ЛЭП ВН и СВН постоянного тока (ПТ) от всех видов коротких замыканий. Для передачи постоянного тока Экибастуз–Центр на кафедре релейной защиты и автоматики МЭИ была разработана защита, алгоритм которой построен на анализе скорости снижения напряжения в ЛЭП ПТ, оценке знака волны напряжения канала «провод–земля» и знака волны напряжения канала «провод–провод», сравнении скорости спада напряжения в начале ЛЭП и скорости нарастания выпрямленного тока ЛЭП при повреждениях на ЛЭП и на преобразовательных подстанциях. Для воздушно-кабельных ЛЭП ПТ предложены технические решения [19, 20], направленные на дальнейшее развитие волновых методов в релейной защите ВЛ СВН.

Следует обратить внимание, что последние годы характеризуются активным внедрением в практику релейной защиты и автоматики

микропроцессоров, способных регистрировать и обрабатывать переходный процесс с интервалом дискретизации порядка единиц или десятков микросекунд. При этом на первый план выходит алгоритмическое обеспечение функционирования микропроцессорных устройств с помощью современных математических методов обработки сигналов тока и напряжения, в частности [21-33] вейвлет - преобразования. Применение вейвлет - преобразования позволяет исследовать указанные сигналы одновременно по времени и по частоте, с автоматическим регулированием окна анализа сигналов в зависимости от частоты, что является оптимальным для защит, использующих волновые методы.

Для направленных волновых защит важнейшим параметром является знак, характеризующий полярность бегущей волны. Оценивая амплитуду и знак модуля максимума вейвлет - преобразования сигналов напряжения и тока ЛЭП, можно сделать вывод о наличии и виде КЗ [28]. Алгоритм оценки составляющих тока и напряжения выполняется за 1 мс [29], что привело к созданию сверхбыстродействующих устройств релейной защиты со скоростью срабатывания 5 мс [30]. Использование комбинации вейвлет - преобразования и нечеткой логики [31], а также вейвлет - преобразования и нейронных сетей [32] позволяет определять виды КЗ в кольцевых сетях, сетях с параллельными линиями с взаимной индуктивностью и устройствами FACTS. С помощью вейвлет - преобразования решается проблема селективности направленной релейной защиты в сетях с устройствами продольной компенсации [33].

Вейвлет - преобразование используется также для выделения частотных составляющих при формировании переходных характеристик при распознавании поврежденной ЛЭП и определения вида КЗ за счет анализа спектральной энергии в соответствующем частотном диапазоне. Чувствительность устройств защиты реализованных на основе этих принципов оказывается практически не зависящей от величины сопротивления в месте КЗ, грозовых возмущений, вида КЗ, токов нагрузки и способов управления энергосистемы, а также характеристик трансформаторов тока и напряжения [34]. Предлагается использовать и другие

способы обработки и распознавания сигнала, в частности морфологический градиент [35], S-преобразования [36], метод фильтрации Прони [37], преобразование Гильберта - Хуанга [38].

Большинство публикаций последних лет по использованию волновых принципов при создании устройств релейной защиты ВЛ ВН и СВН несомненно принадлежит китайским исследователям [30,34-43 и др.]. На примере этих публикаций можно судить о последних тенденциях в развитии волновых защит:

использование современных методов цифровой обработки сигналов;

применение технологий искусственного интеллекта;

создание сверхбыстродействующих защит с временем срабатывания 5 мс, в том числе без использования каналов связи;

разработка гибридных устройств, защищающих одновременно ЛЭП ПТ, преобразовательные блоки и ЛЭП переменного тока.

Следует отметить, однако, что в подавляющей части указанных публикаций отсутствуют конкретные результаты практической реализации выполненных разработок.

## **1.2. Общая характеристика переходных процессов на ВЛ СВН и методы анализа формируемых сигналов при КЗ**

Выбор решений при построении релейной защиты ВЛ СВН от всех видов КЗ, использующей волновые методы, осуществляется в соответствии с анализом первичных и вторичных процессов и решением ряда задач, связанных с реализацией основных функций защиты [1]:

эффективности срабатывания при внутренних КЗ;

эффективности несрабатывания при внешних КЗ;

эффективности несрабатывания в режимах, не связанных с КЗ.

К эффективности срабатывания при внутренних КЗ необходимо отнести обеспечение защитой следующих требований:

охват всей длины защищаемого участка линии;



необходимое быстродействие (с учетом времени отключения выключателя) с целью обеспечения устойчивости работы энергосистемы;

достаточная чувствительность при всех видах КЗ на защищаемом участке;

независимость действия защиты от режимов работы и изменения схемы энергосистемы.

Обеспечение эффективности срабатывания при внутренних и несрабатывания при внешних КЗ защиты, рассматриваемой в качестве основной, требует исследования переходных процессов в условиях КЗ и выявления таких его параметров и качественных характеристик, которые бы по одним признакам четко характеризовали внешние КЗ, а по другим — внутренние КЗ.

С целью обеспечения эффективности несрабатывания в режимах без КЗ защита должна быть отстроена от

нормальных установившихся режимов работы ЛЭП, включая токи и напряжения гармонических составляющих;

синхронных качаний и асинхронного режима;

действия коммутационной аппаратуры, в частности выключателей и разъединителей;

грозовых явлений, не приводящих к повреждению ЛЭП.

Для решения поставленных задач необходимо выявление характерных особенностей изменения контролируемых величин при переходном процессе в точках контроля (местах установки защиты) с учетом изменения расстояния до места появления возмущения и изменения электрической схемы сети. Эти особенности могут быть определены путем анализа результатов математического и физического моделирования, экспериментальных исследований и опыта эксплуатации. Математическое моделирование переходных процессов обладает широкими возможностями для исследования переходных процессов в электрической сети с ВЛ с учетом варьирования ее параметров и решения вопросов, связанных с выбором оптимальных систем токов и напряжений, на которые должна реагировать защита, контролирующая переходные процессы при КЗ и удовлетворяющая поставленным требованиям. Эти системы должны

характеризоваться наиболее общими признаками по спектральному составу, а следовательно, и по соотношениям знаков контролируемых сигналов и их амплитуд. При использовании метода наложения предшествующего режима на дополнительный, отражающий формирование аварийных составляющих, рассматриваются телеграфные уравнения  $n$ -проводной линии [44] (при допущении линейности характеристик элементов ВЛ и энергосистемы)

$$\begin{cases} -\frac{dU}{dx} = Z \times I ; \\ -\frac{dI}{dx} = Y \times U , \end{cases} \quad (1.3)$$

где  $Z$ ,  $Y$ ,  $I$ ,  $U$  — соответственно матрицы удельных сопротивлений, проводимостей и напряжения и тока дополнительного режима.

Для решения уравнений (1.3) в [4] применен метод разложения фазных величин тока и напряжения на независимые составляющие «фаза — фаза» и «фаза — земля» в симметричной трехфазной ЛЭП без различия коэффициентов распространения в междуфазных каналах. Для ЛЭП СВН этот метод без существенных погрешностей может быть применен только для анализа пробега волнами расстояний порядка десятков километров [44], поскольку трехфазные ВЛ СВН, имеющие шаг транспозиции, достигающий 200 - 300 км [45, 46], обладают существенной несимметрией фазных и междуфазных параметров в диапазоне частот, включающем сотни и тысячи герц.

Для нахождения независимых систем составляющих в [44] осуществляется диагонализация матрицы собственных и взаимных сопротивлений (проводимостей) элементов трехфазной электрической системы вида

$$Z_{\phi} = \begin{vmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{AB} & Z_{BB} & Z_{BC} \\ Z_{AC} & Z_{BC} & Z_{CC} \end{vmatrix}; \quad Y_{\phi} = \begin{vmatrix} Y_{AA} & Y_{AB} & Y_{AC} \\ Y_{AB} & Y_{BB} & Y_{BC} \\ Y_{AC} & Y_{BC} & Y_{CC} \end{vmatrix} \quad (1.4)$$

В  $n$ -проводной линии (с учетом проводящих тросов) независимые системы составляющих тока и напряжения также формируются после диагонализации квадратных матриц фазных сопротивлений, проводимостей и коэффициентов распространения, что приводит к выражениям вида [44]

$$Z_B = \begin{vmatrix} Z_{(1)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Z_{(2)} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & Z_{(n)} \end{vmatrix}; \quad Y_B = \begin{vmatrix} Y_{(1)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Y_{(2)} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & Y_{(n)} \end{vmatrix}; \quad (1.5)$$

$$\gamma_B = \begin{vmatrix} \gamma_{(1)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \gamma_{(2)} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \gamma_{(n)} \end{vmatrix}, \quad (1.6)$$

где  $Z_B$  и  $Y_B$  - матрицы модальных волновых сопротивлений и проводимостей  $n$ -проводной системы;  $\gamma$  - матрица модальных коэффициентов распространения этой же системы.

Выражения (1.5) и (1.6) получены в [44] в соответствии с теорией, согласно которой формирование и распространение возмущений в  $n$ -проводной линии при рассмотрении всех элементов систем как линейных представляются совокупностью  $n$ -составляющих волн. Каждая волна характеризуется для данной частоты своим коэффициентом распространения независимо от возбуждения волн в других волновых каналах, причем каждому волновому каналу отвечает своя система токов, напряжений и волновых сопротивлений. Этот признак особенно важен при выяснения вопроса о максимальной длительности первоначальных соотношений знаков мгновенных значений тока и напряжения в точке контроля волновой защиты, формирование которых в волновых каналах в отличие от фаз линии в меньшей степени зависит от изменения полярности сигнала в фазах, происходящего под влиянием потерь в земле и проводах, что позволит оценить влияние отдельных частот переходного процесса на характер формирования информационных сигналов для измерительных органов защиты.

Диагонализация квадратной матрицы фазных коэффициентов распространения для конкретной частоты  $\omega$  дает возможность определить

квадратную матрицу  $\delta$  собственных векторов, представляющую собой матрицу отношений токов волновых каналов в проводах, и диагональную матрицу  $\gamma = \alpha + j\beta$  собственных значений, являющуюся матрицей относительных коэффициентов распространения волновых составляющих. При нормировке матрицы  $\delta$  относительно  $i$ -й строки, соответствующей волновым токам в  $i$ -й фазе (тресе), матрица  $\delta^{-1}$  является интерпретацией квадратной матрицы распределения токов определенной частоты по волновым каналам в линии при КЗ  $i$ -й фазы (троса) на землю. Напряжение в  $k$ -м проводе для  $s$ -й системы определяется из выражения

$$u_{k(s)} = i_{k(s)} Z_{Bk(s)}, \quad (1.7)$$

а волновые сопротивления  $k$ -го провода для  $s$ -го волнового канала - из выражения

$$z_{Bk(s)} = 60 \sqrt{\gamma_{(s)}} \sum_{i=1}^n N_{ki} \delta_{ik(s)} \quad (k=1,2,\dots,n), \quad (1.8)$$

где  $N_{ki} = \ln \frac{r'_{ki}}{r_{ki}}$ ;  $r'_{ki}$  - расстояние между  $k$ -проводом и изображением  $i$ -го провода в поверхности земли;  $r_{ki}$  - расстояние между  $k$ -м и  $i$ -м проводами [44].

Для определения в точке контроля напряжения и тока в функции времени составляются соответствующие выражения [44] для обратного преобразования Фурье с учетом эквивалентной ЭДС в месте КЗ. Аварийная ЭДС дополнительного режима может быть смоделирована кривой синусоидального вида с частотой  $\omega_{НОМ}$ , начальной фазой  $\psi_{НОМ}$  и амплитудой, определяемыми напряжением в момент пробоя

$$E = E_m \sin(\omega_{НОМ} t + \psi_{НОМ}).$$

Расчетное выражение для определения напряжения волны, распространяющейся по линии к точке контроля с учетом [44] примет вид (при  $E_m = 1$ )

$$u_{(s)}(t, x) = e^{-\alpha_{(s)} \omega_{НОМ} x} \times \sqrt{[\sin \beta_{(s)}(\omega_{НОМ}) x \cos \psi_{НОМ} - \cos \beta_{(s)}(\omega_{НОМ}) x \sin \psi_{НОМ}]^2 +}$$

$$\begin{aligned}
& + \left[ \sin \beta_{(s)}(\omega_{НОМ})x \sin \psi_{НОМ} + \cos \beta_{(s)}(\omega_{НОМ})x \cos \psi_{НОМ} \right]^2 \times \\
& \times \sin \left( \omega_{НОМ} t + \operatorname{arctg} \frac{\sin \beta_{(s)}(\omega_{НОМ})x \sin \psi_{НОМ} + \cos \beta_{(s)}(\omega_{НОМ})x \cos \psi_{НОМ}}{\sin \beta_{(s)}(\omega_{НОМ})x \cos \psi_{НОМ} - \cos \beta_{(s)}(\omega_{НОМ})x \sin \psi_{НОМ}} \right) + \\
& + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \omega \left\{ \frac{e^{-\alpha_{(s)}(\omega)x} \left[ \omega_{НОМ} \sin \beta_{(s)}(\omega)x \sin \psi_{НОМ} + \omega \cos \beta_{(s)}(\omega)x \cos \psi_{НОМ} \right]}{\omega^2 - \omega_{НОМ}^2} - \right. \\
& \left. - \frac{e^{-\alpha_{(s)}(\omega_{НОМ})x} \left[ \omega \sin \beta_{(s)}(\omega_{НОМ})x \sin \psi_{НОМ} + \omega \cos \beta_{(s)}(\omega_{НОМ})x \cos \psi_{НОМ} \right]}{\omega^2 - \omega_{НОМ}^2} \right\} \times \\
& \times \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega = e^{-\alpha_{(s)}(\omega_{НОМ})x} \cos \left[ \omega_{НОМ} t + \psi_{НОМ} - \beta_{(s)}(\omega_{НОМ})x \right] + \\
& + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\omega^2}{\omega^2 - \omega_{НОМ}^2} \left\{ \sqrt{1 - \left( 1 - \frac{\omega_{НОМ}^2}{\omega^2} \right) \sin^2 \psi_{НОМ}} e^{-\alpha_{(s)}(\omega)x} \times \right. \\
& \times \sin \left[ \beta_{(s)}(\omega)x + \operatorname{arctg} \left( \frac{\omega}{\omega_{НОМ}} \operatorname{ctg} \psi_{НОМ} \right) \right] - \\
& \left. - e^{-\alpha_{(s)}(\omega_{НОМ})x} \cos \left[ -\beta_{(s)}(\omega_{НОМ})x + \psi_{НОМ} \right] \right\} \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega. \tag{1.9}
\end{aligned}$$

При наиболее вероятном возникновении замыкания вблизи максимума рабочего напряжения аварийную ЭДС в первом приближении можно смоделировать постоянной величиной ( $E=1$ ) при малом (в пределах десятков и сотен микросекунд) изменении мгновенного значения фазного напряжения  $u_{\phi}$  линии по ее длине. В этом случае (1.9) преобразуется к более простому виду

$$\begin{aligned}
u_{(s)}(t, x) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \operatorname{Re} \left[ e^{-\gamma_{(s)}(j\omega)x} \right] \frac{\sin t\omega}{\omega} d\omega = \\
&= \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-\alpha_{(s)}(\omega)x} \cos \beta_{(s)}(\omega)x \frac{\sin t\omega}{\omega} d\omega. \tag{1.10}
\end{aligned}$$

Токи волновых каналов  $i_{(s)}(t, x)$  вычисляются после подстановки в выражения (1.9) и (1.10) множителя  $\frac{1}{z_B(j\omega)}$ .

### 1.3. Особенности формирования волновых переходных токов и напряжений в месте повреждения

С целью определения вида и числа волновых каналов, на основе которых должны быть сформированы входные сигналы измерительных органов защиты, необходимо проанализировать характер формирования токов и напряжений по волновым каналам в момент возникновения КЗ на этих линиях. Из всего класса линий СВН наименьшим числом волновых каналов обладает одноцепная трехфазная ВЛ 500 кВ. На такой ВЛ фазные величины преобразуются в систему фаза средняя - две фазы крайние (1-й волновой канал), фаза - фаза крайняя (2-й волновой канал) и фаза - земля (нулевой волновой канал), а матрицы отношений токов  $\delta$  и напряжений  $\lambda$  соответственно имеют вид [44]

$$\delta = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \delta_{B(1)} & 0 & \delta_{B(0)} \\ 1 & -1 & 1 \end{vmatrix}; \quad \lambda = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \lambda_{B(1)} & 0 & \lambda_{B(0)} \\ 1 & -1 & 1 \end{vmatrix}, \quad (1.11)$$

где столбцы характеризуют соответственно первый, второй и нулевой волновые каналы, а строки — фазы.

Как следует из (1.11), независимо от частоты в крайних фазах токи  $i_{(s)}$  (напряжения  $u_{(s)}$ ) для первого и для нулевого волновых каналов одинаковы по величине и знаку ( $i_{C(1)} = i_{A(1)}$ ,  $i_{C(0)} = i_{A(0)}$  и  $u_{C(1)} = u_{A(1)}$ ,  $u_{C(0)} = u_{A(0)}$ ), для второго канала — равны по величине, но отличаются по знаку ( $i_{C(2)} = -i_{A(2)}$ ,  $u_{C(2)} = -u_{A(2)}$ ), а в средней фазе  $i_{(s)}$  и  $u_{(s)}$  во втором канале вообще отсутствуют ( $i_{B(2)} = 0$ ,  $u_{B(2)} = 0$ ), что является следствием симметрии ВЛ 500 кВ относительно средней фазы. Коэффициенты  $\delta_{B(1)}$  и  $\delta_{B(0)}$  являются функциями частоты. За среднее значение принято [44]  $\delta_{B(1)} = -1,9$  и  $\delta_{B(0)} = 0,98$ .

С учетом выражений (1.7), (1.8) и (1.11) определяется распределение аварийных составляющих токов и напряжений по волновым каналам ВЛ 500 кВ вблизи места КЗ для всех видов КЗ при усредненных значениях волновых

сопротивлений ВЛ 500 кВ, равных 243 Ом для  $z_{A(1)}$  и  $z_{C(1)}$ , 256 Ом для  $z_{B(1)}$ , 288 Ом для  $z_{(2)}$ , 404 Ом для  $z_{A(0)}$  и  $z_{C(0)}$  и 437 Ом для  $z_{B(0)}$ .

### 1.3.1. Короткое замыкание на землю крайней фазы А

Вследствие симметрии фазы ЛЭП относительно точки КЗ граничные условия вблизи ее задаются следующим образом:

токи в неповрежденных фазах  $B$  и  $C$  равны нулю ( $i_B = i_C = 0$ ),  $u_A = E_\phi$  (где  $E_\phi$  - напряжение фазы А, предшествующее КЗ).

Связь между  $i_{k(s)}$  и  $u_{k(s)}$  запишется для крайней фазы А (первый провод)

$$u_A = u_{A(1)} + u_{A(2)} + u_{A(0)} = i_{A(1)} z_{A(1)} + i_{A(2)} z_{A(2)} + i_{A(0)} z_{A(0)} = E_\phi ; \quad (1.12)$$

для фазы  $B$  (2-й провод)

$$i_B = \delta_{B(1)} i_{A(1)} + \delta_{B(0)} i_{A(0)} = 0; \quad (1.13)$$

для фазы  $C$  (3-й провод)

$$i_C = i_{A(1)} - i_{A(2)} + i_{A(0)}. \quad (1.14)$$

В результате решения системы уравнений (1.12) – (1.14)

$$i_{A(0)} = \frac{E_\phi}{z_{A(0)} + z_{A(2)} - \frac{\delta_{B(0)}}{\delta_{B(1)}} [z_{A(1)} + z_{A(2)}]} ; \quad (1.15)$$

$$i_{A(1)} = i_{C(1)} = \frac{E_\phi}{z_{A(1)} + z_{A(2)} - \frac{\delta_{B(1)}}{\delta_{B(0)}} [z_{A(0)} + z_{A(2)}]} ; \quad (1.16)$$

$$u_{A(0)} = i_{A(0)} z_{A(0)} = \frac{E_\phi z_{A(0)}}{z_{A(0)} + z_{A(2)} - \frac{\delta_{B(0)}}{\delta_{B(1)}} [z_{A(1)} + z_{A(2)}]} . \quad (1.17)$$

Отсюда

$$u_{A(1)} = u_{C(1)} = i_{A(1)} z_{A(1)} = \frac{E_{\phi} z_{A(1)}}{z_{A(1)} + z_{A(2)} - \frac{\delta_{B(1)}}{\delta_{B(0)}} [z_{A(0)} + z_{A(2)}]} . \quad (1.18)$$

Поскольку практически  $\frac{\delta_{B(0)}}{\delta_{B(1)}} = 0,5$ , то

$$i_{A(1)} = i_{C(1)} = \frac{E_{\phi}}{z_{A(1)} + 3z_{A(2)} + 2z_{A(0)}} ; \quad (1.19)$$

$$i_{A(0)} = i_{C(0)} = \frac{E_{\phi}}{z_{A(0)} + 0,5z_{A(1)} + 1,5z_{A(2)}} ; \quad (1.20)$$

$$u_{A(0)} = u_{C(0)} = \frac{E_{\phi} z_{A(0)}}{z_{A(0)} + 0,5z_{A(1)} + 1,5z_{A(2)}} ; \quad (1.21)$$

$$u_{A(1)} = u_{C(1)} = \frac{E_{\phi} z_{A(1)}}{z_{A(1)} + 3z_{A(2)} + 2z_{A(0)}} . \quad (1.22)$$

Из (1.14), (1.19) и (1.20) получим

$$i_{A(2)} = -i_{C(2)} = \frac{3}{2} \frac{E_{\phi}}{z_{A(0)} + 0,5z_{A(1)} + 1,5z_{A(2)}} . \quad (1.23)$$

Тогда

$$u_{A(2)} = -u_{C(2)} = i_{A(2)} z_{A(2)} = \frac{3}{2} \frac{E_{\phi} z_{A(2)}}{z_{A(0)} + 0,5z_{A(1)} + 1,5z_{A(2)}} ; \quad (1.24)$$

$$i_{B(0)} = \delta_{B(0)} i_{A(0)} = 0,98 \frac{E_{\phi}}{z_{A(0)} + 0,5z_{A(1)} + 1,5z_{A(2)}} ; \quad (1.25)$$

$$u_{B(0)} = i_{B(0)} z_{B(0)} = 0,98 \frac{E_{\phi} z_{B(0)}}{z_{A(0)} + 0,5z_{A(1)} + 1,5z_{A(2)}} ; \quad (1.26)$$

$$i_{B(1)} = \delta_{B(1)} i_{A(1)} = -1,9 \frac{E_{\phi}}{z_{A(1)} + 3z_{A(2)} + 2z_{A(0)}} ; \quad (1.27)$$



$$u_{B(1)} = i_{B(1)} z_{B(1)} = -1,9 \frac{E_{\phi} z_{B(1)}}{z_{A(1)} + 3z_{A(2)} + 2z_{A(0)}}. \quad (1.28)$$

### 1.3.2. Короткое замыкание на землю средней фазы В

Граничные условия:

$$i_A = i_C = 0; \quad u_B = E_{\phi}. \quad (1.29)$$

Система уравнений относительно  $i_{A(1)}$ ,  $i_{A(2)}$ ,  $i_{A(0)}$ , имеет вид

$$i_{A(1)} + i_{A(2)} + i_{A(0)} = 0; \quad (1.30)$$

$$\delta_{B(1)} i_{A(1)} z_{B(1)} + \delta_{B(0)} i_{A(0)} z_{B(0)} = E; \quad (1.31)$$

$$i_{A(1)} - i_{A(2)} + i_{A(0)} = 0.$$

После преобразований по аналогии с (1.12) - (1.14), определяются составляющие волновых каналов:

$$i_{A(2)} = 0; \quad (1.32)$$

$$i_{A(1)} = \frac{E_{\phi}}{\delta_{B(0)} \left[ \frac{\delta_{B(1)}}{\delta_{B(0)}} z_{B(1)} - z_{B(0)} \right]} = \frac{E_{\phi}}{0,98 [2z_{B(1)} + z_{B(0)}]}; \quad (1.33)$$

$$i_{A(0)} = \frac{E_{\phi}}{\delta_{B(0)} \left[ z_{B(0)} - \frac{\delta_{B(1)}}{\delta_{B(0)}} z_{B(1)} \right]} = \frac{E_{\phi}}{0,98 [z_{B(0)} + 2z_{B(1)}]}; \quad (1.34)$$

$$i_{B(1)} = \delta_{B(1)} i_{A(1)} = \frac{\delta_{B(1)} E_{\phi}}{\delta_{B(0)} \frac{\delta_{B(1)}}{\delta_{B(0)}} z_{B(1)} - z_{B(0)}} = \frac{2E_{\phi}}{2z_{B(1)} + z_{B(0)}}; \quad (1.35)$$

$$i_{B(0)} = \delta_{B(0)} i_{A(0)} = \frac{E_{\phi}}{z_{B(0)} - \frac{\delta_{B(1)}}{\delta_{B(0)}} z_{B(1)}} = \frac{E_{\phi}}{z_{B(0)} + 2z_{B(1)}}. \quad (1.36)$$

### 1.3.3. Короткое замыкание между крайними фазами А и С

Граничные условия:

$$i_A = -i_C; \quad i_B = 0; \quad u_A - u_C = E_{\text{мф}}, \quad (1.37)$$

где  $E_{\text{мф}}$  – междуфазное напряжение.

Система уравнений имеет вид

$$\begin{cases} [i_{A(1)}z_{A(1)} + i_{A(2)}z_{A(2)} + i_{A(0)}z_{A(0)}] - [i_{A(1)}z_{C(1)} + i_{A(2)}z_{C(2)} + i_{A(0)}z_{C(0)}] = E_{\text{мф}}; \\ i_{A(1)} + i_{A(2)} + i_{A(0)} = - [i_{A(1)} - i_{A(2)} + i_{A(0)}]; \\ \delta_{B(1)}i_{A(1)} + \delta_{B(0)}i_{A(0)} = 0, \end{cases} \quad (1.38)$$

а составляющие волновых каналов после приведения (1.38) к виду

$$\begin{cases} 2i_{A(2)}z_{A(2)} = E_{\text{мф}}; \\ 2[i_{A(1)} + i_{A(0)}] = 0; \\ \delta_{B(1)}i_{A(1)} + \delta_{B(0)}i_{A(0)} = 0, \end{cases} \quad (1.39)$$

связаны соотношениями

$$i_{A(0)} = i_{A(1)} = 0; \quad (1.40)$$

$$i_{A(2)} = -i_{C(2)} = \frac{E_{\text{мф}}}{2z_{A(2)}}. \quad (1.41)$$

#### 1.3.4. Короткое замыкание между крайней $A$ и средней $B$ фазами

Граничные условия:

$$i_A = -i_B; \quad i_C = 0; \quad u_A - u_B = E_{\text{мф}}, \quad (1.42)$$

Система уравнений имеет вид

$$\begin{cases} [i_{A(1)}z_{A(1)} + i_{A(2)}z_{A(2)} + i_{A(0)}z_{A(0)}] - [i_{A(1)}z_{B(1)}\delta_{B(1)} + \delta_{B(0)}i_{A(0)}z_{B(0)}] = E_{\text{мф}}; \\ i_{A(1)} + i_{A(2)} + i_{A(0)} = - [\delta_{B(1)}i_{A(1)} + \delta_{B(0)}i_{A(0)}]; \\ i_{A(1)} - i_{A(2)} + i_{A(0)} = 0, \end{cases} \quad (1.43)$$

$$(1.44)$$

а составляющие волновых каналов

$$i_{A(1)} = \frac{E_{мф}}{z_{A(1)}\delta_{B(1)}z_{B(1)} + \left[1 - \frac{2 + \delta_{B(1)}}{2 + \delta_{B(0)}}\right]z_{A(2)} - \frac{2 + \delta_{B(1)}}{2 + \delta_{B(0)}}[z_{A(0)} - \delta_{B(0)}z_{B(0)}]} = \frac{E_{мф}}{3z_{A(1)} + z_{A(2)}} = \quad (1.45)$$

$$= \frac{E_{мф}}{2[1,5z_{A(1)} + 0,5z_{A(2)}]};$$

$$i_{A(2)} = -i_{C(2)} = i_{A(1)} \left[1 - \frac{2 + \delta_{B(1)}}{2 + \delta_{B(0)}}\right] = \frac{E_{мф}}{2[1,5z_{A(1)} + 0,5z_{A(2)}]} ; \quad (1.46)$$

$$i_{A(0)} = -\frac{2 + \delta_{B(1)}}{2 + \delta_{B(0)}} i_{A(1)} \approx 0 ; \quad (1.47)$$

$$i_{B(1)} = \delta_{B(1)} i_{A(1)} = -1,9 \frac{E_{мф}}{2[1,5z_{A(1)} + 0,5z_{A(2)}]} = \frac{-0,95E_{мф}}{1,5z_{A(1)} + 0,5z_{A(2)}} ; \quad (1.48)$$

$$i_{B(0)} = \delta_{B(0)} i_{A(0)} \approx 0 . \quad (1.49)$$

### 1.3.5. Другие виды КЗ

Аналогично определены составляющие в волновых каналах при остальных видах КЗ.

#### 1.3.5.1. Короткое замыкание на землю крайних фаз *A* и *C*

Составляющие фаза средняя – две фазы крайние

$$i_{A(1)} = \frac{E_A + E_C}{2[z_{A(1)} + 2z_{A(0)}]} ; \quad (1.50)$$

$$i_{B(1)} = \frac{-1,9(E_A + E_C)}{2[z_{A(1)} + 2z_{A(0)}]} ; \quad (1.51)$$

составляющие фаза – фаза крайние

$$i_{A(2)} = \frac{E_A + E_C}{2Z_{A(2)}} ; \quad (1.52)$$

составляющие все фазы – земля

$$i_{A(0)} = \frac{E_A + E_C}{z_{A(1)} + 2z_{A(0)}} ;$$

$$i_{B(0)} = \frac{-0,95(E_A + E_C)}{z_{A(1)} + 2z_{A(0)}}. \quad (1.53)$$

### 1.3.5.2. Короткое замыкание на землю крайней *A* и средней *B* фазы

Составляющие фаза средняя – две фазы крайние

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{A(1)} = \frac{E_B}{-2,05z_{A(1)}} \left\{ 1 + \frac{0,5 \frac{z_{A(0)}}{z_{A(1)}} \left[ 1 + \frac{z_{A(2)}}{z_{A(1)}} \right]}{1,5z_{A(0)} + z_{A(2)} + 0,5 \frac{z_{A(2)}z_{A(0)}}{z_{A(1)}}} \right\} - \frac{0,5E_A \frac{z_{A(0)}}{z_{A(1)}}}{1,5z_{A(0)} + z_{A(2)} + 0,5 \frac{z_{A(2)}z_{A(0)}}{z_{A(1)}}}; \\ i_{B(1)} = \frac{E_B}{z_{B(1)}} \left\{ 1 + \frac{0,5 \frac{z_{A(0)}}{z_{A(1)}} \left[ 1 + \frac{z_{A(2)}}{z_{A(1)}} \right]}{1,5z_{A(0)} + z_{A(2)} + 0,5 \frac{z_{A(2)}z_{A(0)}}{z_{A(1)}}} \right\} + \frac{0,95E_A \frac{z_{A(0)}}{z_{A(1)}}}{1,5z_{A(0)} + z_{A(2)} + 0,5 \frac{z_{A(2)}z_{A(0)}}{z_{A(1)}}}; \end{array} \right. \quad (1.54)$$

составляющие фаза – фаза крайние

$$i_{A(2)} = \frac{E_A}{z_{A(1)} + z_{A(2)}} - \frac{E_A - \frac{E_B}{-2,05} \left[ 1 + \frac{z_{A(2)}}{z_{A(1)}} \right]}{1,5z_{A(0)} + z_{A(2)} + 0,5 \frac{z_{A(2)}z_{A(0)}}{z_{A(1)}}} \times \frac{z_{A(0)} - z_{A(1)}}{z_{A(2)} + z_{A(1)}}; \quad (1.55)$$

составляющие все фазы – земля

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{A(0)} = \frac{E_A - \frac{E_B}{-2,05} \left[ 1 + \frac{z_{A(2)}}{z_{A(1)}} \right]}{1,5z_{A(0)} + z_{A(2)} + 0,5 \frac{z_{A(2)}z_{A(0)}}{z_{A(1)}}}; \\ i_{B(0)} = \frac{E_A - \frac{E_B}{-2,05} \left[ 1 + \frac{z_{A(2)}}{z_{A(1)}} \right]}{1,5z_{A(0)} + z_{A(2)} + 0,5 \frac{z_{A(2)}z_{A(0)}}{z_{A(1)}}} 1,05. \end{array} \right. \quad (1.56)$$

### 1.3.5.3. Трехфазное КЗ

Составляющие фаза средняя – две фазы крайние

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{A(1)} = \frac{E_A - 2E_B + E_C}{6z_{A(1)}}; \\ i_{B(1)} = -\frac{1,9(E_A - 2E_B + E_C)}{6z_{B(1)}}; \end{array} \right. \quad (1.57)$$

составляющие фаза – фаза крайние

$$i_{A(2)} = \frac{E_A - E_C}{2z_{A(2)}}; \quad (1.58)$$

составляющие все фазы – земля отсутствуют.

Численные значения токов и напряжений в волновых каналах в линии по фазам вблизи места КЗ, определяемые в соответствии с (1.12) – (1.49) для наиболее распространенных на ВЛ 500 кВ видов КЗ (при напряжении на поврежденной фазе линии и токе в ней, принятыми равными единице), равны

при КЗ между крайней *A* и средней *B* фазами

$$u_{A(1)} = u_{C(1)} = 0,45; \quad i_{A(1)} = i_{C(1)} = 0,5; \quad u_{B(1)} = -1; \quad i_{B(1)} = -1;$$

$$u_{A(2)} = -u_{C(2)} = 0,55; \quad i_{A(2)} = -i_{C(2)} = 0,5;$$

при КЗ крайней фазы *A* на землю

$$u_{A(1)} = u_{C(1)} = 0,128; \quad i_{A(1)} = i_{C(1)} = 0,165; \quad u_{B(1)} = -0,249; \quad i_{B(1)} = -0,6;$$

$$u_{A(2)} = -u_{C(2)} = 0,465; \quad i_{A(2)} = -i_{C(2)} = 0,5; \quad u_{A(0)} = u_{C(0)} = 0,407;$$

$$i_{A(0)} = i_{C(0)} = 0,33; \quad u_{B(0)} = 0,428; \quad i_{B(0)} = 0,247;$$

при КЗ средней фазы *B* на землю

$$u_{A(1)} = u_{C(1)} = -0,247; \quad i_{A(1)} = i_{C(1)} = -0,33; \quad u_{B(1)} = 0,558; \quad i_{B(1)} = 0,692;$$

$$u_{A(0)} = u_{C(0)} = 0,39; \quad i_{A(0)} = i_{C(0)} = 0,33; \quad u_{B(0)} = 0,442; \quad i_{B(0)} = 0,346;$$

при КЗ между крайними фазами A и C

$$u_{A(2)} = -u_{C(2)} = 1; \quad i_{A(2)} = -i_{C(2)} = 1.$$

Анализ полученных результатов показывает, что в ряде каналов при различных видах КЗ напряжения  $u_{(s)}$  и токи  $i_{(s)}$  могут быть равны нулю (при КЗ средней фазы на землю во втором канале, при КЗ между крайними фазами в первом и нулевом каналах, а при КЗ между крайней и средней фазами и между всеми тремя в нулевом канале).

Учитывая возможное сближение трасс ВЛ 500 кВ, был проведен аналогичный анализ токов и напряжений в системе двух параллельных линий, где образуется шесть волновых каналов:

средние фазы линий - крайние фазы линий;

средняя фаза одной, крайние фазы другой линии - крайние фазы одной, средняя фаза другой линии;

первая крайняя фаза одной, средняя и первая крайняя фазы другой линии - вторая крайняя и средняя фазы одной, вторая крайняя фаза другой линии;

первая крайняя и средняя фазы одной линии, вторая крайняя и средняя фазы другой линии - вторая крайняя одной и первая крайняя фазы другой линии;

все фазы обеих линий - земля;

все фазы одной линии - все фазы другой линии.

Трехфазные ВЛ СВН могут выполняться с двумя проводящими, нормально не заземленными тросами, каждый из которых в свою очередь может быть расщеплен на изолированные друг, от друга провода, что определяет, формирование двух внутритросовых каналов. Токи и напряжения, обоих внутритросовых каналов связаны практически только с проводами расщепленного троса, так как расстояние между последними значительно, меньше расстояния до земли и фаз ВЛ. Указанное позволяет при анализе переходных процессов учитывать влияние следующих пяти каналов:

фаза средняя - остальные фазы - тросы;

фаза - фазы крайние с учетом тросов;

фазы - тросы;

трос - трос с участием фаз;  
все фазы - земля с учетом тросов.

Результаты расчетов частотных составляющих волновых каналов в ВЛ СВН с проводящими тросами показали [5], что по идентичности способов выделения из комбинаций фазных значений, сопровождающихся незначительным изменением суммарных значений в этих комбинациях, токи и напряжения каналов фаза средняя - остальные фазы - тросы в фазах и фазы - тросы можно объединить в первую группу, а токи и напряжения каналов фаза - фазы крайние с учетом тросов и трос - трос с участием фаз - во вторую группу, которые аналогичны соответственно первому и второму волновым каналам ВЛ 500 кВ без проводящих тросов. По аналогии с ВЛ СВН без проводящих тросов первая группа каналов формируется при наибольшем числе видов КЗ (между фазой и землей, между средней и крайней фазами и между всеми тремя фазами), вторая группа - при однофазных и двухфазных КЗ крайних фаз между собой и на землю, а нулевая группа - только при КЗ на землю.

#### **1.4. Измерительные органы защиты**

##### **1.4.1. Характер распространения волн по ВЛ**

С целью выявления преимуществ и окончательного выбора способов контроля анализируется степень деформации расчетных сигналов в волновых каналах при распространении волн в ВЛ СВН. Параметры волн после распространения их по однородным ВЛ СВН, полученные с использованием частотного метода [5, 44, 47, 48 ], характеризуются, согласно (1.9) - (1.10), следующими данными:

на неповрежденной параллельной ВЛ сигналы волновых каналов все фазы - земля и фазы - фазы запаздывают относительно друг друга, что при увеличении длины пробега по ВЛ приводит к появлению в течение сотен микросекунд импульсов тока и напряжения, совпадающих по знаку и соизмеримых по уровню

с аналогичными величинами при повреждении линии, но вблизи общих шин таких импульсов не возникает из-за влияния преломления и отражения волн в узловой точке (рис. 1.4);

под влиянием потерь в земле и проводах волны подвергаются деформации, причем составляющие междуфазных каналов — в меньшей степени, чем нулевые.

Так, согласно расчетам формы падающих волн в точке контроля характеризуются следующим (рис. 1.5 - 1.7):

основная часть спектра коэффициента передачи  $e^{-\alpha_{(1,2)l}}$  первой и второй групп сосредоточена в диапазоне от 0 до 20 - 100 кГц при  $l = 600$  км и от 0 до 2 - 15 кГц при  $l = 5000$  км;

уровни сигналов, формируемых составляющими этих групп, после пробега волной расстояний до 600 км имели значения, близкие к амплитуде сигналов у места КЗ, с длительностью фронта 20 - 130 мкс, а на расстоянии до 5000 км они по уровню оставались теми же, но длительность фронта возрастала до 250 - 750 мкс;

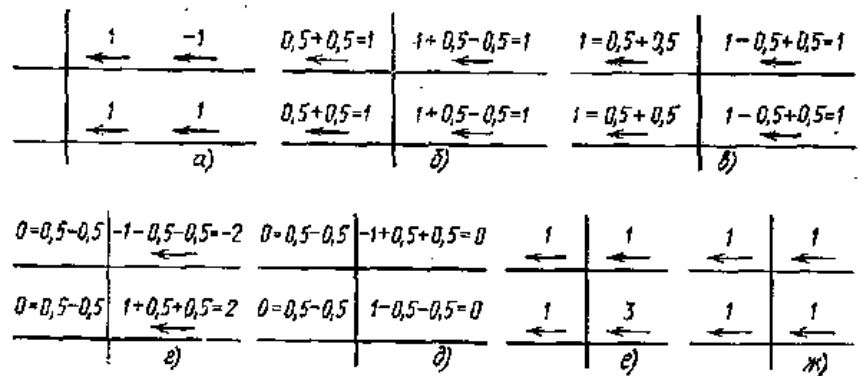


Рис. 1.4. Формирование волн нулевого и нулевого — штрих каналов на параллельных ВЛ 500 кВ: а — возникновение составляющих двух нулевых каналов при повреждении одной из параллельных ВЛ; б — перераспределение составляющих тока нулевого канала; в — перераспределение составляющих напряжения нулевого канала; г — перераспределение составляющих тока нулевого — штрих канала; д — перераспределение составляющих напряжения нулевого — штрих канала; е — сумма составляющих тока обоих каналов; ж — сумма составляющих напряжения обоих каналов

спектр коэффициента передачи  $e^{-\alpha_{(0)l}}$  нулевой группы формируется в диапазоне 0 - 10 кГц при  $l = 100$  км, а в диапазоне 0 - 2 кГц при  $l = 600$  км; уровни



сигналов этой группы обладают более существенным затуханием по сравнению с первой и второй группами.

Получаемая информация требует соответствующей обработки в целях обеспечения правильного функционирования органов направления в различных режимах в соответствии с требованиями, сформулированными в разделе 1.2 диссертации.

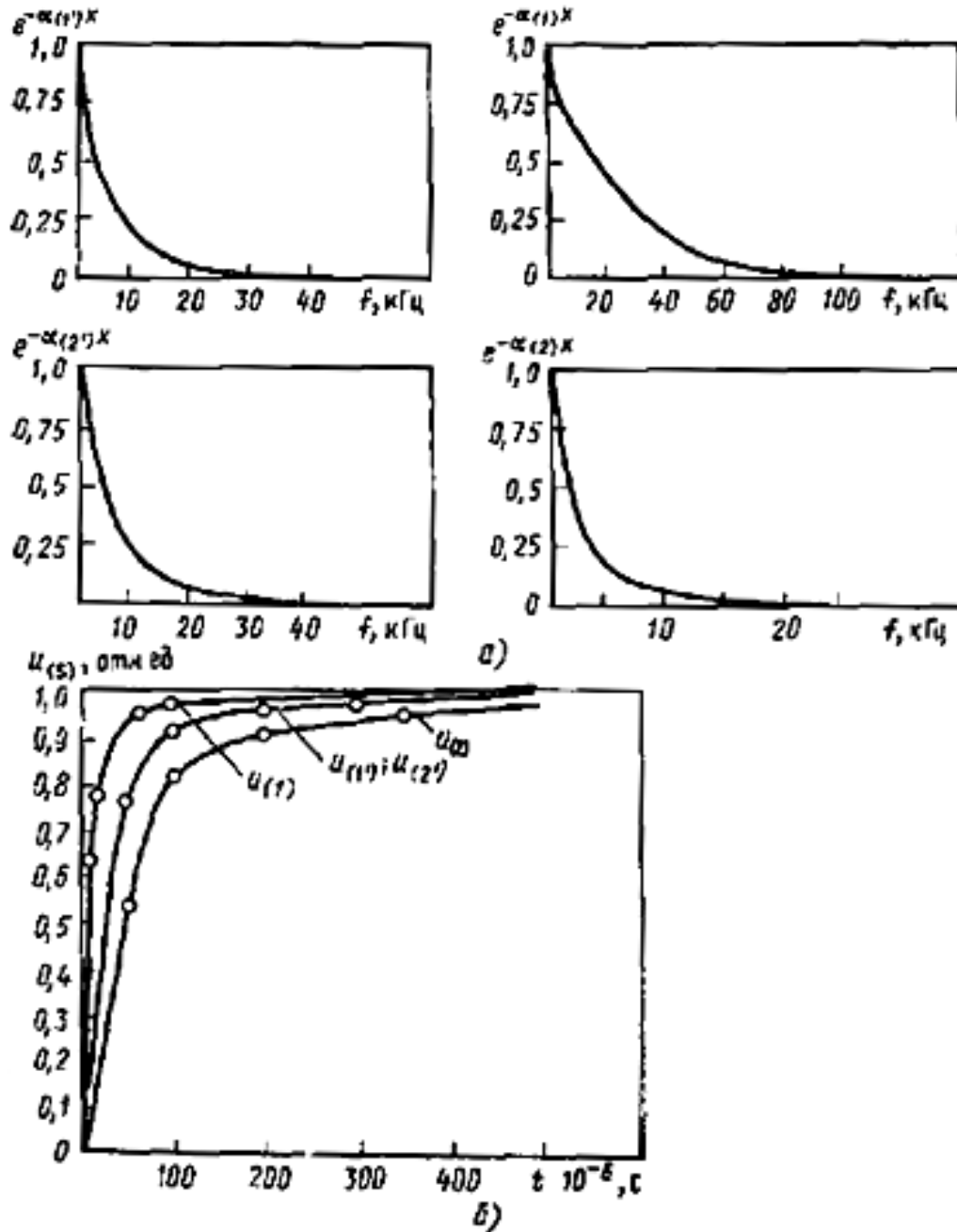


Рис. 1.5. Частотные характеристики коэффициентов затухания междуфазовых волновых каналов (а) и  $u(s)$  (б) падающих волн этих каналов на ВЛ СВН с проводящими тросами после пробега 1000 км. За единицу принято амплитудное значение волны в поврежденной фазе вблизи места повреждения

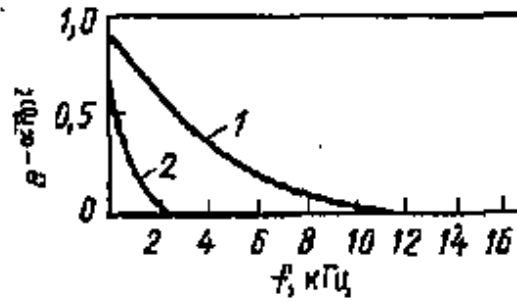


Рис. 1.6. Частотная характеристика коэффициента затухания волнового канала ВЛ СВН с проводящими тросами после пробега: 1 — 100 км; 2 — 600 км. За единицу принято амплитудное значение волны в поврежденной фазе вблизи места повреждения

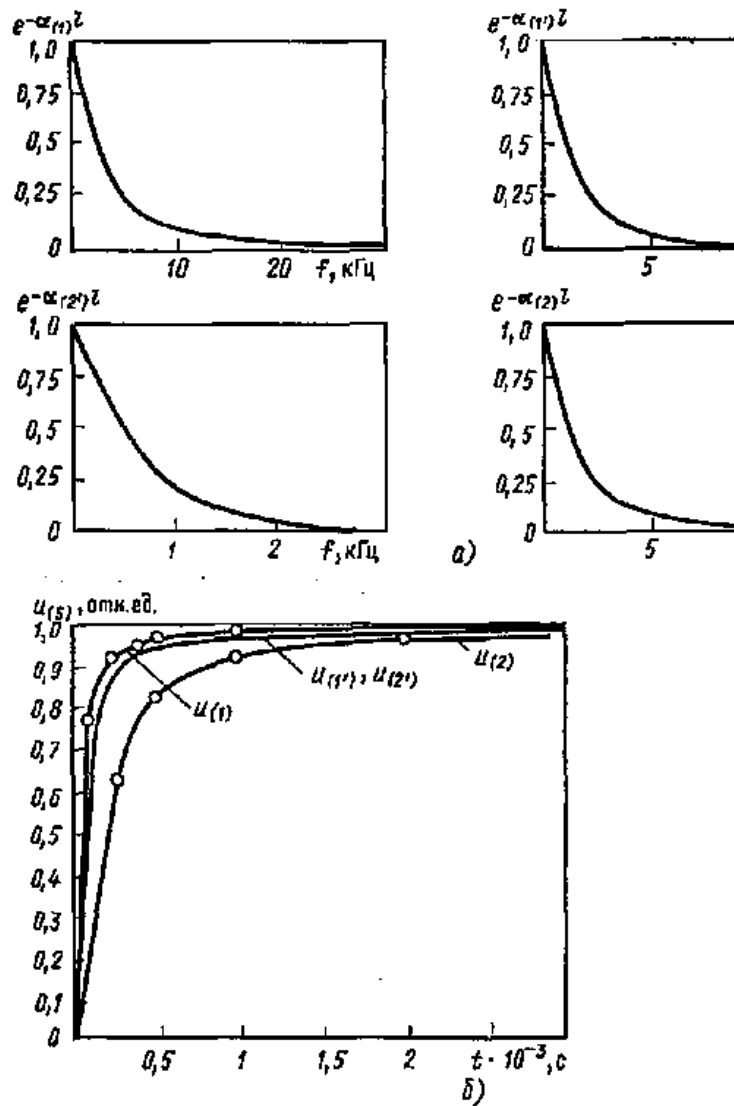


Рис. 1.7. Частотные характеристики коэффициентов затухания междуфазовых волновых каналов (а) и  $u_{(s)}$  (б) падающих волн этих каналов на ВЛ СВН с проводящими тросами после пробега 5000 км

### 1.4.2. Выделение контролируемых составляющих

В целях обеспечения независимости работы от нормальных режимов органы направления мощности (ОНМ) защиты должны реагировать на изменение электрических величин при КЗ в условиях переходного процесса, т. е. на аварийные составляющие. При этом  $\Delta u_a(t)$ ,  $\Delta i_a(t)$  выражаются через свои принужденные и свободные составляющие

$$\begin{cases} \Delta u_a(t) = \Delta u_{a, \text{прин}}(t) + \Delta u_{a, \text{св}}(t); \\ \Delta i_a(t) = \Delta i_{a, \text{прин}}(t) + \Delta i_{a, \text{св}}(t). \end{cases} \quad (1.59)$$

Для ВЛ СВН запаздывание волн второго канала относительно первого (рис.1.5) не превышает десятков микросекунд, а запаздывание волн нулевого канала может составлять сотни микросекунд. При этом на поврежденной фазе напряжения и токи возрастают без изменения знаков, а на неповрежденных они могут изменяться и по знаку [4, 5].

Правильное срабатывание ОНМ при фазном контроле могло быть достигнуто после прихода токов и напряжений нулевого канала, когда завершается формирование фазных волн. Но при удаленных КЗ на протяженной передаче (до 1000 км) запаздывание нулевой составляющей определяется значением в  $600 \div 800$  мкс. В этих интервалах времени частотные составляющие в спектре информационного сигнала, определяемые собственными частотами сети, могут изменять знак и тем самым исказить контролируемый сигнал. Следовательно, существуют определенные трудности при контроле направления распространения фазных волн, в том числе и в защите RALDA [13, 14].

Поэтому для осуществления защиты ВЛ СВН от всех видов КЗ целесообразно в ОНМ использовать информацию от токов и напряжений первой и второй групп (каналов), которые по сравнению с составляющими нулевого канала подвергаются существенно меньшей деформации.

Составляющие волновых каналов (групп каналов) выделяются путем комбинаций фазных величин (рис. 1.8). В первом волновом канале волны распространяются по средней и крайним фазам. При этом напряжение (ток) волны средней фазы имеет практически вдвое большее значение и противоположные знаки по отношению к напряжениям (токам) крайних фаз. Выделяемые сигналы напряжения и тока первого волнового канала определяются выражениями

$$u_1 = u_A + u_C - 2u_B; \quad i_1 = i_A + i_C - 2i_B. \quad (1.60)$$

Во втором волновом канале волны распространяются только по крайним фазам, где имеют равные значения и противоположные знаки. Выделяемые сигналы выражаются как

$$u_2 = u_A - u_C; \quad i_2 = i_A - i_C. \quad (1.61)$$

Следует отметить, что в нулевом канале аналогично обычной системе нулевой последовательности токи и напряжения определяются выражениями

$$u_0 = u_A + u_B + u_C; \quad i_0 = i_A + i_B + i_C. \quad (1.62)$$

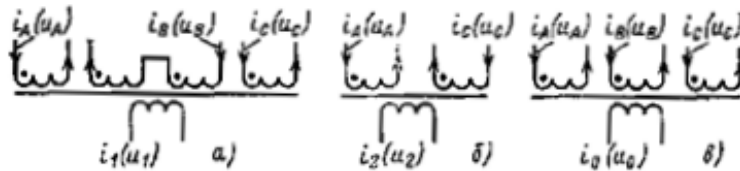


Рис. 1.8. Трансформаторные схемы выделения составляющих волновых каналов:  $i_{(1)}(u_{(1)})$  — первый волновой канал;  $i_{(2)}(u_{(2)})$  — второй волновой канал;  $i_{(0)}(u_{(0)})$  — нулевой канал

Из выражений (1.60) и (1.61) следует, что составляющие первого и второго (междуфазных) волновых каналов в нормальном режиме не равны нулю. Составляющие нулевого канала в нормальном режиме отсутствуют и являются аварийными составляющими.

### 1.4.3. Принципы построения измерительных органов с контролем направления распространения волн

Контроль напряжений и токов первого и второго волновых каналов осуществляется (в соответствии с разделом 1.3 диссертации) двумя ОНМ. Оба органа в совокупности обеспечивают действие защиты при всех видах КЗ и в большинстве случаев эти органы резервируют друг друга. Относительно небольшое затухание сигналов в этих каналах не оказывает существенного влияния на снижение чувствительности защиты даже при значительной длине защищаемых линий (рис. 1.5, 1.7). Уровни контролируемых сигналов  $u_{(1)}$ ,  $i_{(1)}$  и  $u_{(2)}$ ,  $i_{(2)}$  не зависят от сигналов нулевой составляющей  $u_{(0)}$ ,  $i_{(0)}$ , что увеличивает необходимые запасы по чувствительности. При этом относительно небольшое запаздывание составляющих второго канала относительно первого (до 100 мкс при пробеге до 1000 км даже без учета транспозиции) позволяет принять время фиксации одинаковым для обоих органов.

Преломленные волны, формирующиеся в узловой точке (месте установки защиты) отличаются по форме и спектральному составу от падающих волн. При наличии в узловой точке смежных линий напряжения  $u_{\text{пр}(s)}(t)$  и токи  $i_{\text{пр}(s)}(t)$  преломленных волн в волновых каналах определяются коэффициентами преломления по напряжению  $k_{\text{пру}(s)}$  и по току  $k_{\text{при}(s)}$ , значения которых обеспечивают (рис. 1.9) одинаковую полярность преломленных и падающих волн [4, 5] в интервалах до прихода отраженных волн от других узловых точек сети или от точек нарушения ее однородности. Следовательно, контроль направления распространения преломленной волны по знаку мощности  $p_{\text{пр}(s)}$  в  $s$  – том волновом канале также как и для падающей волны по знаку мощности  $p_{\text{пад}(s)}$ , характеризует для ОНМ направление расположения места повреждения.

При распространении волн в сети и появлении отражений от точек, в которых  $k_{\text{пру}(s)} \rightarrow 0$  (большое число линий в узлах) или  $k_{\text{при}(s)} \rightarrow 0$  (наличие разомкнутых линий), а также - повторных отражений от места повреждения величины  $u(s)$  или  $i(s)$  в точке контроля могут [5] снижаться до нуля или изменять знак.

Интервалы времени этих изменений определяются временами пробега волн до мест изменений однородности волновых сопротивлений.

Изменения формы и спектра преломленной волны в большей степени проявляются при наличии на конце линии сосредоточенного сопротивления в виде, например трансформатора, и отсутствии смежных линий [5]. Параметры схемы замещения блока линия - трансформатор с учетом емкости шин приводят к увеличению длительности фронта напряжения (на 10 - 20 мкс) и появлению импульса тока длительностью того же порядка. Затем напряжение снижается, а ток возрастает, но их полярность совпадает с исходной для падающей волны. В дальнейшем отражения и преломления волн на участке конец линии - точка КЗ могут приводить к изменениям значений и знаков  $u_{\text{пад}(s)}(t)$ ,  $i_{\text{пад}(s)}(t)$  в различные моменты, определяемые соответствующими собственными частотами сети. При указанных пробегах волн изменение знака напряжения имеет место на конце линии, где включен трансформатор, при приходе фронта напряжения повторно отраженной от места КЗ волны  $u_{\text{отр,к}}$ , если к этому моменту экспоненциально затухающее напряжение преломленной волны примет значение  $u_{\text{пр}} < u_{\text{отр,к}}$  [5]. При близких КЗ напряжение не успевает затухать, знак не изменяется и в пределе принимает значение  $u_{\text{пад}(s)}(t)$ . В качестве примера указывается на изменение знака тока на конце ВЛ (рис. 1.9) при КЗ на шинах у этого конца и приходе фронта тока волны, отраженной от трансформатора ( $L_T$ ,  $R_T$ ), установленного на конце 1 ВЛ, с измененным знаком [5].

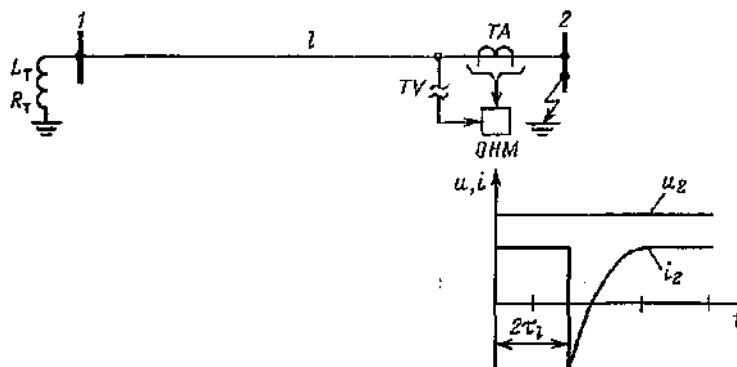


Рис. 1.9. Схема участка сети при КЗ в точке 2 линии (иллюстрирует условия изменения знака тока волны за счет отражений от точки 1 для защиты в точке 2)

Построение ОНМ реализуется с использованием пороговых элементов, к которым подается информация о значении и знаке напряжения и тока волны, дешифраторов знака мощности, элементов времени, контролирующих длительность исходного сигнала  $p=ui$  первоначальной полярности, и запоминающих элементов, фиксирующих знак мощности. Чувствительность ОНМ выбирается по условиям обеспечения действия защиты при КЗ в расчётном случае - при фазовом угле мгновенного значения напряжения, предшествующего КЗ, равном нулю ( $\psi_u = 0$ ).

Вместе с тем для ограничения отрицательного влияния элементов сети на формирование контролируемых сигналов могут быть рекомендованы органы направления мощности, реагирующие на падающие от места КЗ волны, приходящие со стороны защищаемой линии. Такие органы основаны на контроле сигналов, определяемых выражением

$$u_{\text{пад}(s)} = \frac{u_{(s)} + z_{B(s)}i_{(s)}}{2}, \quad (1.63)$$

где  $u_{\text{пад}(s)}$  - напряжение падающей волны составляющей ( $s$ );  $u_{(s)}$ ,  $i_{(s)}$  - напряжение и ток волны составляющей  $s$  на конце линии;  $z_{B(s)}$  - волновое сопротивление канала  $s$  линии.

В органе направления, реагирующем на падающую волну, осуществляются выделение величин  $u_{(s)}$ ,  $i_{(s)}$  и моделирование  $z_{B(s)}$  с учетом масштабов, определяемых характеристиками измерительных преобразователей напряжения и тока. Функционирование такого органа не будет зависеть от параметров элементов, непосредственно примыкающих к защищаемой линии, поскольку оно не зависит от отражений и преломлений волны в точке контроля. При внешнем КЗ ток волны имеет обратное направление по отношению к току падающей волны при КЗ в зоне и  $u_{\text{пад}} = \frac{1}{2}(u_{(s)} + z_{B(s)}i_{(s)}) = 0$ , поскольку в этих условиях  $u_{(s)} = -z_{B(s)}i_{(s)}$ .

Следовательно, на внешние КЗ орган направления, реагирующий на падающую волн не реагирует. Однако после отражения волны, возникшей при внешнем КЗ,

от противоположного конца защищаемой линии знак тока может измениться. Предотвращение указанного требует блокировки органа направления падающей волны другим органом, реагирующим на внешние КЗ. Возможность блокировки внешних КЗ органом, реагирующим на обратную (отраженную) волну  $u_{отр} = \frac{1}{2}(u_{(s)} - z_B i_{(s)})$ , принципиально невозможен, так как при КЗ в защищаемой зоне падающая и отраженная от узла сети волны на конце линии появляются одновременно. Кроме того, орган падающей волны и орган отраженной волны могут неправильно действовать при нарушениях цепей трансформатора напряжения, вследствие возникновения импульсов напряжения, которые могут привести к срабатыванию данных органов. Для устранения указанного потребуется использование специального измерительного органа, контролирующего переходный процесс при КЗ в ВЛ (например, с помощью устройств присоединения ВЧ каналов ВЛ) [5].

Таким образом, рассмотрение принципов контроля направления распространения волн в ВЛ СВН показывает, что наиболее предпочтительно выполнение импульсных ОНМ защиты в виде органов, реагирующих на преломленные волны, возникающие при КЗ на защищаемой ЛЭП и при внешних КЗ. Органы падающей волны, имеющие преимущества в отношении уменьшения влияния элементов, подключаемых на концах линий, требуют применения специального пускового органа. При этом для блокирования ОНМ при внешних КЗ необходим орган, реагирующий на преломленную волну.

#### **1.4.4. Методы и результаты расчета переходных процессов в цепях органов направления мощности**

При контроле ОНМ волновых составляющих в условиях КЗ необходимо обеспечить сохранение закономерности соотношения знаков сигналов  $u_{пр(s)}(t)$  и  $i_{пр(s)}(t)$  в интервале времени достаточной длительности для формирования устойчивых сигналов требуемых уровней с учетом также требований



помехоустойчивости. Особенностью расчетов применительно к исследованию переходных процессов на ВЛ для целей оптимизации схемы построения и параметров защиты является то, что помимо определения процессов непосредственно в ЛЭП требуется проведение расчетов в измерительных цепях защиты, включая измерительные трансформаторы тока и напряжения (ТТ и ТН) и частотные фильтры защиты, необходимые для подавления параметров токов и напряжений предшествующего КЗ установившегося режима с учетом воздействия высших гармонических составляющих и отклонения частоты от номинального значения. Для упрощения анализа рассматривается переходный процесс в цепи защиты без учета пробега волны по ВЛ, вследствие незначительной деформации сигналов междуфазных волновых каналов (рис. 1.5).

Определение напряжений в указанной цепи производилось по теореме Бореля [49] на основе операторных выражений и использования частотных характеристик элементов цепи. В частности, напряжение на выходе  $n$ -го элемента цепи

$$U_{\text{вых } n}(p) = U_{\text{вх}}(p) \cdot H_1(p) \cdot H_2(p) \dots H_n(p), \quad (1.64)$$

где  $U_{\text{вх}}(p)$  - изображение входного напряжения,  $H_1(p) \cdot H_2(p) \dots H_n(p)$  - изображения передаточных функций элементов цепи. При этом напряжение на выходе  $k$ -го элемента цепи может быть определено по выражению

$$U_{\text{вых } k}(p) = U_{\text{вх } k}(p) \cdot H_k(p) \doteq \frac{d}{dt} \int_0^t U_{\text{вх } k}(\lambda) \cdot H_k(t - \lambda) d\lambda. \quad (1.65)$$

Переходная функция звена режекторного (подавляющего) фильтра промышленной частоты, в качестве которого использован активный Т-образный RC-фильтр на базе усилителя с общей отрицательной обратной связью (рис. 1.10 а), в операторной форме имеет следующий вид

$$H(p) = 1 - \frac{\frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2} \cdot C_1 p}{1 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_3} (C_1 + C_2) p + \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 + R_2} C_1 C_2 p^2}, \quad (1.66)$$

где  $R_1 = R_3 = 51$  кОм,  $C_1 = 3,3$  мкФ,  $C_2 = 0,05$  мкФ.

Для определения характера переходного процесса в фильтре исследуем дискриминант  $D$  знаменателя второго члена (1.66), равный

$$D = \left[ \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} (C_1 + C_2) - 4 \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 + R_2} \cdot C_1 \cdot C_2 \right].$$

При  $R_2 = 600$  Ом  $D < 0$  и процесс на выходе фильтра является периодически затухающим.

Переходная функция однозвенного Т-образного RC-фильтра, подавляющего частоту 50 Гц, вычисляется [49] по операторному выражению

$$\begin{aligned} H_\phi(p) &= 1 - \frac{Cp}{1 + Bp + Ap^2} = \frac{\frac{1}{A} + \frac{B-C}{A}p + p^2}{\frac{1}{A} + \frac{B}{A}p + p^2} \doteq \\ &\doteq 1 - \frac{B}{A\omega} e^{-\frac{B}{2A}t} \sin \omega t + \frac{B-C}{A\omega} e^{-\frac{B}{2A}t} \sin \omega t = \\ &= 1 - \frac{C}{A\omega} e^{-\frac{B}{2A}t} \sin \omega t = 1 - 1,27 e^{-200t} \sin 242t. \end{aligned} \quad (1.67)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \frac{C}{A} &= \frac{1}{R_1 \cdot C_2} = \frac{\frac{R_2 R_3}{R_1 + R_2} \cdot C_1}{\frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2} \cdot C_1 \cdot C_2} = 392; \\ \frac{B}{A} &= \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 + R_2} \cdot C_1 C_2 = \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)(R_1 + R_2)}{(R_1 + R_2) R_1 R_2 R_3 C_1 C_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2 C_3} = 400; \\ \omega &= \sqrt{\frac{1}{A} - \frac{B^2}{4A^2}} = \frac{\sqrt{4A - B^2}}{2A} = \sqrt{\frac{4A - B^2}{4A^2}} = \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 R_3 C_1 C_2} - \frac{(C_1 + C_2)^2}{4C_1^2 C_2^2 R_3^2}} = \\ &= \frac{1}{2R_3 C_1 C_2} \cdot \sqrt{\frac{4R_1 C_1 C_2 R_3 + 4R_2 C_1 C_2 R_3 - C_1^2 R_1 R_2 - 2C_1 C_2 R_1 R_2 - C_2^2 R_1 R_2}{R_1 R_2}}. \end{aligned}$$

Переходная функция цепи из двух последовательно соединенных звеньев, выполненных в соответствии со схемой рис.1.10а, вычисляется [49] по операторному выражению

$$H_{2\phi}(p) = \left( 1 - \frac{\frac{C}{A}p}{\frac{1}{A} + \frac{B}{A}p + p^2} \right)^2 = 1 - \frac{2 \cdot \frac{C}{A}p}{\frac{1}{A} + \frac{B}{A}p + p^2} + \frac{\left(\frac{C}{A}\right)^2 p^2}{\left(\frac{1}{A} + \frac{B}{A}p + p^2\right)^2} \doteq$$

$$\doteq 1 + e^{-\frac{B}{2A}t} \left\{ \left[ \frac{C^2}{2A^2 \omega^3} \left( \omega^2 t - \frac{B}{2A} \right) - \frac{2C}{A\omega} \right] \sin \omega t + \frac{BC^2}{4A^3 \omega^2} t \cos \omega t \right\}. \quad (1.68)$$

При подключении трех звеньев, выполненных в соответствии со схемой рис.1.10 а, к источнику единичного сигнала по формуле Бореля [49] напряжение на выходе цепи

$$H_{3\phi}(p) = \left( 1 - \frac{\frac{C}{A}p}{p^2 + \frac{B}{A}p + \frac{1}{A}} \right)^3 \doteq 1 - \frac{3}{\omega} \cdot \frac{C}{A} e^{-\frac{a}{2}t} \sin \omega t + \frac{3}{2\omega^3} \cdot \frac{C^2}{A^2} e^{-\frac{a}{2}t} \times$$

$$\times \left[ \frac{a}{2} \omega t \cos \omega t + \left( \omega^2 t - \frac{a}{2} \right) \sin \omega t \right] - \left( \frac{C}{A} \right)^3 \frac{e^{-\frac{a}{2}t}}{8\omega^5} \left[ \left( -\frac{a^2 \omega^2 t^2}{4} + \frac{3a^2}{4} + \omega^4 t^2 - \right. \right.$$

$$\left. \left. - a \omega^2 t + \omega^2 \right) \sin \omega t + \left( a \omega^3 t^2 - \omega^3 t - \frac{3a^2 \omega t}{4} \right) \cos \omega t \right] = 1 - e^{-\frac{a}{2}t} \times$$

$$\times \left\{ \left[ \frac{3C}{\omega A} - \frac{3C^2}{2\omega^3 A^2} \left( \omega^2 t - \frac{a}{2} \right) + \left( \frac{C}{A} \right)^3 \cdot \frac{1}{8\omega^5} \left( -\frac{a^2 \omega^2 t^2}{4} + \frac{3a^2}{4} + \omega^4 t^2 - a \omega^2 t + \omega^2 \right) \right] \times \right.$$

$$\left. \times \sin \omega t + \left[ -\frac{3}{2\omega^2} \left( \frac{C}{A} \right)^2 \cdot \frac{a}{2} \omega t + \left( \frac{C}{A} \right)^3 \cdot \frac{1}{8\omega^5} \left( a \omega^3 t^2 - \omega^3 t - \frac{3a^2 \omega t}{4} \right) \right] \cos \omega t \right\}. \quad (1.69)$$

Значения напряжений на выходе фильтров, рассчитанные по (1.67) – (1.69), приведены на рис. 1.11. Амплитуда установившегося синусоидального сигнала на выходе трехзвенного фильтра может быть определена из выражения

$$|H_{3\phi}(\omega)| = \left| \left[ 1 - \frac{j392\omega}{\frac{1}{A} - \omega^2 + j400\omega} \right]^3 \right| = \left( \frac{\left[ \sqrt{1 + \left( \frac{314^2 - \omega^2}{400\omega} \right)^2} - 0,98 \right]^2 + \left( \frac{314^2 - \omega^2}{408\omega} \right)^2}{1 + \left( \frac{314^2 - \omega^2}{400\omega} \right)^2} \right)^3. \quad (1.70)$$

При  $\omega = 314$   $|H_{3\phi}(\omega)| = 0,000008$ . На частотах 45 Гц и 55 Гц (принятых граничными при отклонении промышленной частоты)  $|H_{3\phi}(\omega)|$  составляет соответственно 0,0047 и 0,0035, что указывает на существенное подавление указанным фильтром токов и напряжений промышленной частоты с учетом ее вероятных отклонений.

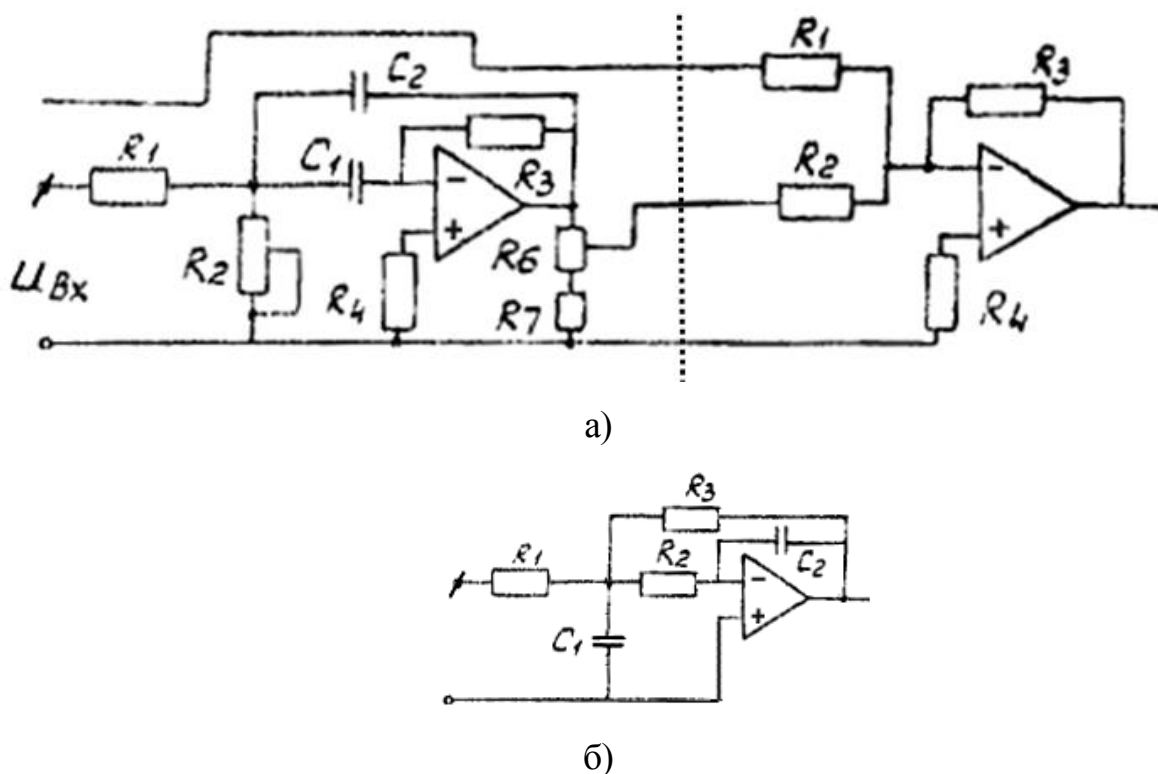


Рис.1.10. Структура активного режекторного фильтра, подавляющего промышленную частоту (частоту гармонических составляющих), состоящего из фильтра промышленной частоты (слева от пунктира) и сумматора (справа от пунктира) (а), активного фильтра нижних частот (б)

Переходная функция режекторного фильтра третьей гармоники определяется с учетом его следующих параметров (индекс «4» характеризует параметры фильтра 150 Гц):

коэффициент затухания

$$\epsilon_4 = \frac{B_4}{2A_4} = \frac{C_{14} + C_{24}}{2(C_{14} \cdot C_{14} \cdot R_{34})} = \frac{2,75}{(2,7 \cdot 0,05 \cdot 10^{-6} \cdot 30 \cdot 10^3) \cdot 2} = \frac{679}{2} = 340 \text{ 1/c}$$

$$(C_{14} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}; C_{24} = 0,05 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}; R_{34} = 30 \cdot 10^3 \text{ Ом}; R_{14} = 30 \cdot 10^3 \text{ Ом});$$

общие множители

$$\frac{C}{A_4} = \frac{1}{R_{14}C_{24}} = \frac{1}{30 \cdot 10^3 \cdot 0,05 \cdot 10^{-6}} = 667; \quad \frac{C_4}{R_4} = \frac{1}{R_{14}C_{24}} = \frac{1}{30 \cdot 10^3 \cdot 0,05 \cdot 10^{-6}} = 667;$$

резонансная частота

$$\omega_{04} = \sqrt{\frac{1}{A_4}} = 6,28 \cdot 150 = 942 \text{ 1/c};$$

собственная частота

$$\omega_4 = \sqrt{\omega_{04}^2 - \epsilon_4^2} = \sqrt{942^2 - 340^2} = 878,5 \text{ 1/c}.$$

Переходная функция режекторного фильтра имеет вид:

$$\begin{aligned} U_{\phi_5}(t) &= \frac{d}{dt} \int_0^t U_{\text{ex}}(\lambda) \left[ 1 - \frac{C_4}{A_4 \omega_4} e^{-\epsilon_4(t-\lambda)} \sin \omega_4(t-\lambda) d\lambda \right] = \\ &= U_{\text{ex}}(t) - \frac{C_4}{A_4 \omega_4} e^{-\epsilon_4 t} [(\omega_4 \cos \omega_4 t - \epsilon_4 \sin \omega_4 t) \int_0^t U_{\text{ex}}(\lambda) e^{\epsilon_4 \lambda} \times \\ &\times \cos \omega_4 \lambda d\lambda + (\epsilon_4 \cos \omega_4 t + \omega_4 \sin \omega_4 t) \int_0^t U_{\text{ex}}(\lambda) e^{\epsilon_4 \lambda} \sin \omega_4 \lambda d\lambda]. \quad (1.71) \end{aligned}$$

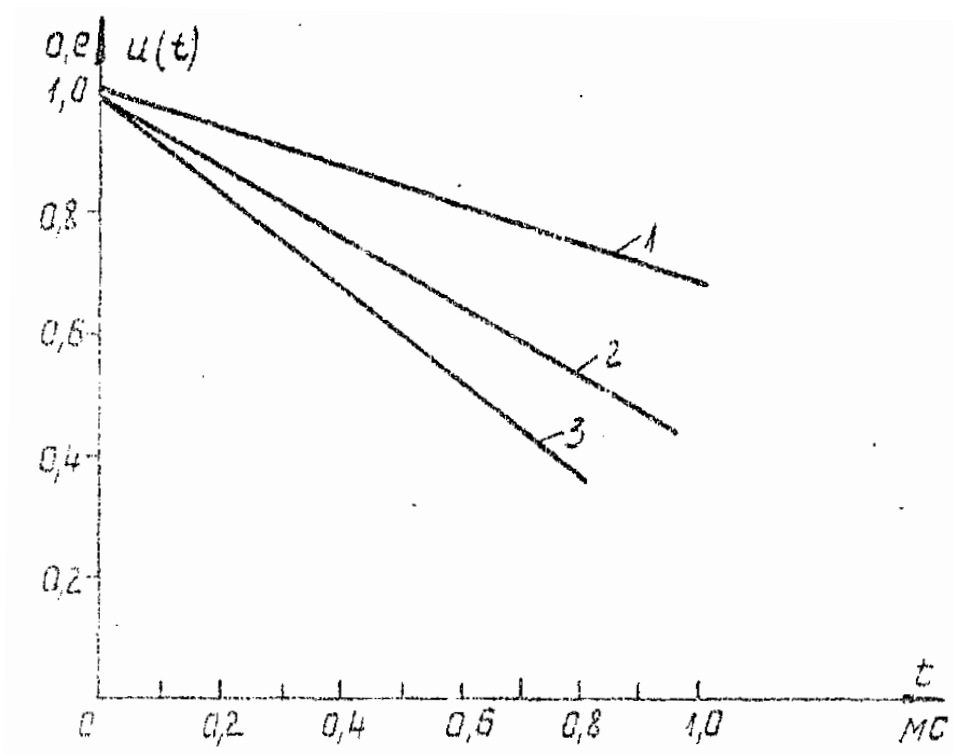


Рис. 1.11. Напряжение на выходе фильтров при включении одного (1), двух (2) или трех (3) к источнику единичного сигнала

Напряжение на выходе фильтра низких частот (ФНЧ) (рис. 1.10 б) определяется с помощью передаточной функции

$$H(p) = \frac{-1}{1 + 3RC_2p + R^2C_1C_2p^2} = -\frac{\frac{1}{R_{15}^2C_{15}C_{25}}}{p^2 + \frac{3p}{R_5C_{15}} + \frac{1}{R_5^2C_{15}C_{25}}}, \quad (1.72)$$

где резонансная частота

$$\frac{1}{A_5} = \frac{1}{R_5^2C_{15}C_{25}} = \frac{1}{R_5^2C_{15}^2} \cdot \frac{C_{15}}{C_{25}}; \text{ коэффициент затухания } \frac{B_5}{2A_5} = \frac{3}{2R_5C_{15}} \text{ и}$$

$$\text{собственная граничная частота } \omega_5 = \sqrt{\frac{1}{R_5^2C_{15}C_{25}} - \frac{9}{4R_5^2C_{15}^2}}.$$

После подстановки соответствующих численных значений получим

$$\frac{1}{A_5} = \frac{1}{R_5^2C_{15}C_{25}} = \frac{1}{5,1^2 \cdot 10^6 \cdot 0,04 \cdot 10^{-6} \cdot 2200 \cdot 10^{-12}} = 2,09 \cdot 10^4 \text{ 1/c};$$

$$b_5 = \frac{B_5}{2A_5} = \frac{3}{2 \cdot R_5 \cdot C_{15}} = \frac{3}{2 \cdot 5,1 \cdot 10^3 \cdot 0,04 \cdot 10^{-6}} = 7,35 \cdot 10^3 \text{ 1/c} \text{ и}$$

$$\omega_5 = \sqrt{\frac{1}{R_5^2 C_{15} C_{25}} - \frac{9}{4 K_5^2 C_{15}^2}} = \sqrt{4,37 \cdot 10^8 - 54,1 \cdot 10^6} = 1957 \cdot 7,831 / c \rightarrow 3114,3 \approx 3,11 \text{ кГц}.$$

Напряжение на выходе указанной цепи при включении единичного сигнала имеет вид

$$\begin{aligned} U_{\text{фНЧ}}(t) &= \frac{d}{dt} \int_0^t U_{\text{вх}}(\lambda) \left\{ 1 - e^{-7350(t-\lambda)} \left[ \cos 19568(t-\lambda) + \frac{7350}{19568} \sin 19568(t-\lambda) \right] \right\} d\lambda = \\ &= U_{\text{вх}}(t) - \frac{d}{dt} \left\{ e^{-7350t} \left[ (\cos 19568t + 0,377 \sin 19568t) \cdot \int_0^t e^{7350\lambda} \cos 19568\lambda \cdot U_{\text{вх}}(\lambda) d\lambda + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (\sin 19568t - 9,377 \cos 19568t) \int_0^t e^{7350\lambda} \sin 19568\lambda \cdot U_{\text{вх}}(\lambda) d\lambda \right] \right\} = \\ &= 22338 e^{-7350t} \sin 19568t \int_0^t e^{7350\lambda} \cos 19568\lambda \cdot U_{\text{вх}}(\lambda) d\lambda - \\ &\quad - 22338 e^{-7350t} \cos 19568t \int_0^t e^{7350\lambda} \sin 19568\lambda \cdot U_{\text{вх}}(\lambda) d\lambda = \\ &= \left( \frac{\omega_5^2}{\omega} + \omega \right) e^{-\omega t} \left[ \sin \omega t \int_0^t e^{\omega\lambda} \cos \omega\lambda \cdot U_{\text{вх}}(\lambda) d\lambda - \cos \omega t \int_0^t e^{\omega\lambda} \sin \omega\lambda \cdot U_{\text{вх}}(\lambda) d\lambda \right]. \quad (1.73) \end{aligned}$$

Тогда форма напряжения на выходе всей цепи при включении ее на синусоидальное напряжение с начальной фазой  $\psi$  определяется по выражению

$$\begin{aligned} U_{\text{вых}}(t) &= \frac{d}{dt} \int_0^t \sin(314t + \psi - 314\lambda) \cdot H(\lambda) d\lambda = \\ &= \frac{d}{dt} \int_0^t [\sin(314t + \psi) \cos 314\lambda - \cos(314t + \psi) \sin 314\lambda] \cdot H(\lambda) d\lambda = \\ &= \left[ \sin(314t + \psi) \frac{d}{dt} \int_0^t \cos 314\lambda \cdot H(\lambda) d\lambda + 314 \cos(314t + \psi) \times \right. \\ &\quad \left. \times \int_0^t \cos 314\lambda \cdot H(\lambda) d\lambda \right] - \cos(314t + \psi) \frac{d}{dt} \int_0^t \sin 314\lambda \cdot H(\lambda) d\lambda + \\ &\quad + 314 \sin(314t + \psi) \int_0^t \sin 314\lambda \cdot H(\lambda) d\lambda = H(t) \sin \psi + \\ &\quad + 314 \int_0^t \cos(314t + \psi - 314\lambda) \cdot H(\lambda) d\lambda. \quad (1.74) \end{aligned}$$

Преимущество такого метода расчета переходного процесса в измерительной цепи защиты особенно проявляется в том, что напряжение на входе цепи, да и на входе отдельных ее элементов может быть задано произвольной формы, что особенно важно для анализа воздействия разнообразных по форме токов и напряжений на линии в месте установки защиты. Так, например, при переключении трехкаскадного режекторного фильтра к источнику напряжения произвольной формы ( $E(t)$ ) напряжение на выходе фильтра может быть определено по выражению

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t H(t-\lambda) \cdot E(\lambda) d\lambda = \frac{d}{dt} \left\{ \left[ 1 - e^{-200(t-\lambda)} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[ 9900(t-\lambda)^2 - 1200(t-\lambda) + 10 \right] \cdot \sin 242(t-\lambda) + \left[ 5100(t-\lambda)^2 - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - 1200(t-\lambda) \right] \cdot \cos 242(t-\lambda) \right\} E(\lambda) d\lambda \right\}. \quad (1.75)$$

Переходные функции ТТ и ТН определялись по их амплитудно-частотным и фазо-частотным характеристикам с помощью метода трапеций [44]. В частности, переходная функция ТТ 1150 кВ (в соответствии с предоставленными проектными данными) представлялась в виде

$$H_{TT1}(t) = 1,13 \sin 900t \quad \text{при } 0 \leq t \leq 1,75 \cdot 10^{-3} \quad \text{и}$$

$$H_{TT2}(t) = 0,75 + 0,38 e^{-667(t-1,75 \cdot 10^{-3})} \cos 1570(t-1,75 \cdot 10^{-3}) \quad \text{при } 1,75 \cdot 10^{-3} \leq t \leq \infty.$$

При такой аппроксимации сигнал на выходе ТТ при включении единичного сигнала имеет вид (по формуле Бореля [49])

$$U_{TT1}(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t H_{TT1}(t-\lambda) \cdot U_{\text{вх}}(\lambda) d\lambda = \\ = 1015 \left[ \cos 900t \int_0^t \cos 900\lambda \cdot U_{\text{вх}}(\lambda) d\lambda + \sin 900t \times \int_0^t \sin 900\lambda \cdot U_{\text{вх}}(\lambda) d\lambda \right]; \quad (1.76) \\ U_{TT2}(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t \left\{ 0,75 + 0,38 e^{-667[(t-\lambda)-1,75 \cdot 10^{-3}]} \times \cos 1570[(t-\lambda)-1,75 \cdot 10^{-3}] \right\} U_{\text{вх}}(\lambda) d\lambda =$$



$$\begin{aligned}
&= 0,75 \cdot U_{\text{ex}}(t) + 0,38 \left\{ -667 e^{-667t+1,17} \left[ \cos 1570(t-1,75 \cdot 10^{-3}) \int_0^t e^{667\lambda} \cos 1570\lambda \cdot U_{\text{ex}}(\lambda) d\lambda + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \sin 1570(t-1,75 \cdot 10^{-3}) \int_0^t e^{667\lambda} \sin 1570\lambda \cdot U_{\text{ex}}(\lambda) d\lambda \right] + \right. \\
&\quad \left. + e^{-667t+1,17} \left[ -1570 \cdot \sin 1570(t-1,75 \cdot 10^{-3}) \int_0^t e^{667\lambda} \cos 1570\lambda \cdot U_{\text{ex}}(\lambda) d\lambda + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \cos 1570(t-1,75 \cdot 10^{-3}) \cdot U_{\text{ex}}(t) e^{667t} \cos 1570t + \sin 1570(t-1,75 \cdot 10^{-3}) \times \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \times U_{\text{ex}}(t) e^{667t} \sin 1570t \right] \right\} = 2080 e^{-667} \left[ \sin(1570t-1,58) \int_0^t e^{667\lambda} \sin 1570\lambda \cdot U_{\text{ex}}(\lambda) d\lambda - \right. \\
&\quad \left. - \sin(1570t-2,35) \int_0^t e^{667\lambda} \cos 1570\lambda \cdot U_{\text{ex}}(\lambda) d\lambda \right] - 0,38 U_{\text{ex}}(t) . \quad (1.77)
\end{aligned}$$

Переходную функцию ТН 1150 кВ (в соответствии с проектными данными) можно представить в виде  $H_{\text{ТН}}(t) = 830 \cdot t e^{-350t}$ .

Тогда по формуле Бореля

$$\begin{aligned}
U_{\text{ТН}}(t) &= \frac{d}{dt} \int_0^t 830(t-\lambda) e^{-350(t-\lambda)} \cdot U_{\text{ex}}(\lambda) d\lambda = \\
&= 830 e^{-350t} \left[ 350 \int_0^t \lambda e^{350\lambda} \cdot U_{\text{ex}}(\lambda) d\lambda + (1-350t) \int_0^t e^{350\lambda} U_{\text{ex}}(\lambda) d\lambda \right]. \quad (1.78)
\end{aligned}$$

На основании выражений (1.65) - (1.78) проведен расчет переходных процессов в цепях измерительных органов защиты, включающих однозвенные и трехзвенные режекторные фильтры промышленной частоты, а также ФНЧ, с варьированием его полосы пропускания при воздействии сигнала промышленной частоты с различным значением начальной фазы. Результаты предварительных оценок переходных процессов в частотных цепях измерительных органов защиты, включающих однозвенные режекторные фильтры промышленной частоты, а также фильтры низкой частоты [5], показали, что изменений знаков входных сигналов  $u_{(s)}(t)$ ,  $i_{(s)}(t)$ , соответствующих их собственным частотам, может не происходить после прохождения через ФНЧ с соответствующей полосой пропускания (рис.

1.12). Так, при расстоянии от места КЗ, равном 40 км, ток  $i(t)$  при граничной частоте ФНЧ, составляющей 10 кГц,

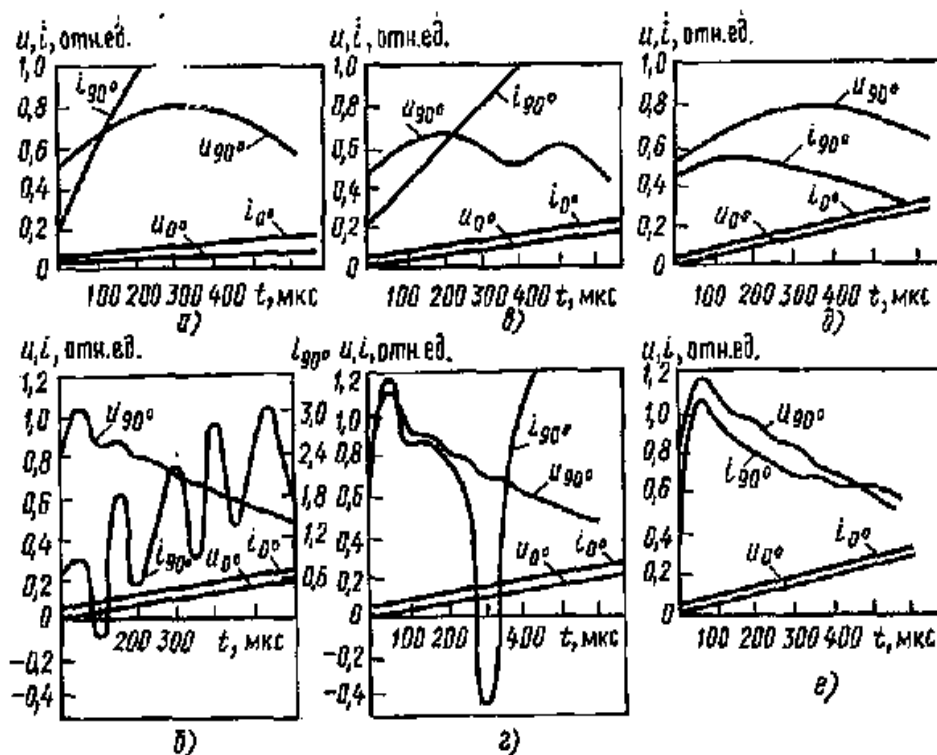


Рис. 1.12. Расчетные кривые (для рис. 6.5)  $u(t)$ ,  $i(t)$  на выходе цепи из последовательно соединенных однозвенного Т-образного фильтра  $f_0=50$  Гц и фильтра нижних частот с полосой пропускания от 0 до 1 кГц (а, в, д) и от 0 до 10 кГц (б, г, е) при КЗ в точке 2 и длинах линии  $l=10$  км (а, б), 40 км (в, г) и 90 км (д, е);  $L_T=0,035$  Гн;  $\psi_u=0$  и  $90^\circ$

изменяет знак через  $t = 270$  мкс, а на выходе ФНЧ с граничной частотой 1 кГц изменения знака  $i(t)$  не происходит, так как собственные частоты (2 кГц и выше) не пропускаются фильтром. Следовательно, использование ФНЧ позволяет отстроить ОНМ от изменений знаков входных сигналов в начале переходного процесса, что дает возможность расширить длительности интервала контроля с целью повышения устойчивости функционирования ОНМ.

Выполнение режекторного фильтра промышленной частоты из трех звеньев, обеспечивает при его включении на источник синусоидального напряжения (рис. 1.13-1.23) при значениях начальной фазы  $\Psi$  в диапазоне от  $20^\circ$  до  $180^\circ$  максимальное значение  $U_{\text{ФМЗ}}$ , примерно совпадающее с максимальным значением

$U_{\phi m1}$  однозвенного фильтра. Однако при значениях  $\Psi$ , равных  $0^\circ - 20^\circ$ , значение  $U_{\phi m3}$  становится в 1,5-2,5 раза ниже, чем  $U_{\phi m1}$  при некотором уменьшении длительности сигнала, различие в которой возрастает в 7 раз при  $\Psi = 25^\circ$ , в 5 раз при  $\Psi = 60^\circ$  и в 1,5 раза при  $\Psi = 90^\circ - 155^\circ$ . При этом длительность сигналов с малыми значениями  $\Psi$  составляет несколько миллисекунд, а при  $\Psi = 20^\circ - 30^\circ$  находится на уровне 1 мс и ниже.

Подключение к указанному трехзвенному фильтру активного ФНЧ с частотой среза  $f_{cp} = 3$  кГц приводит, в целом, к увеличению амплитуды напряжения на выходе измерительной цепи на 10-30 %, а также к увеличению его длительности (рис. 1.24-1.25), что особенно проявляется в сигналах с  $\Psi$ , близкими к  $165^\circ - 180^\circ$ . При уменьшении втрое  $f_{cp}$  ФНЧ происходит увеличение длительности выходного напряжения для этих  $\Psi$  на 100 мкс, однако, его амплитуда снижается почти вдвое, достигая при  $\Psi = 175^\circ$  примерно 6 % от номинальной величины, вместо 9 % при  $f_{cp} = 3$  кГц.

Дополнительное подключение последовательно с указанной цепью режекторного фильтра 150 Гц (рис. 1.26-1.34), приводит к снижению выходного сигнала на 5-30%. Причем, это существенно проявляется, в основном, для сигналов с начальной фазой  $\Psi$ , близкой к  $5^\circ - 10^\circ$ . С увеличением фазы темпы снижения выходного сигнала уменьшаются. Кроме того, происходит дальнейшее уменьшение длительности сигнала в месте его перехода через нулевое значение.

Однокаскадные трансформаторы тока с замкнутым магнитопроводом, как показали экспериментальные исследования [5], передают импульсы токов с крутыми фронтами ( $t_{фр} = 5 \div 10$  мкс), содержащие частотные составляющие до нескольких десятков килогерц, без существенных искажений. Применяемые на ВЛ СВН двухкаскадные трансформаторы тока типов ТФНД-500 и ТРН-750 [50], также с замкнутыми магнитопроводами, передают частотные составляющие переходных токов в более ограниченном диапазоне, что определяется, в

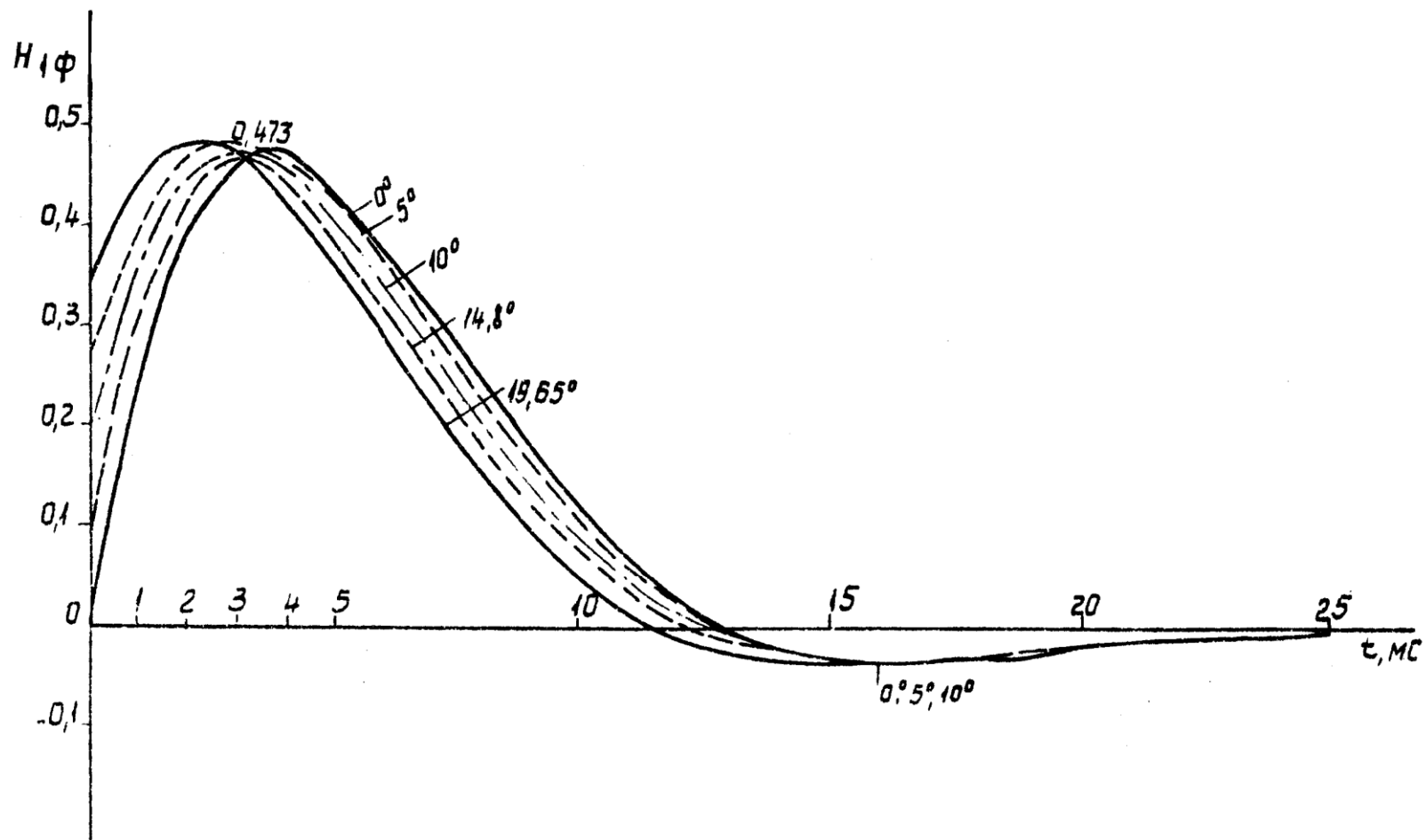


Рис. 1.13. Выходное напряжение однозвенного режекторного фильтра 50 Гц при подключении к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\psi$ , принимающей значения  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $14,8^\circ$  и  $19,65^\circ$

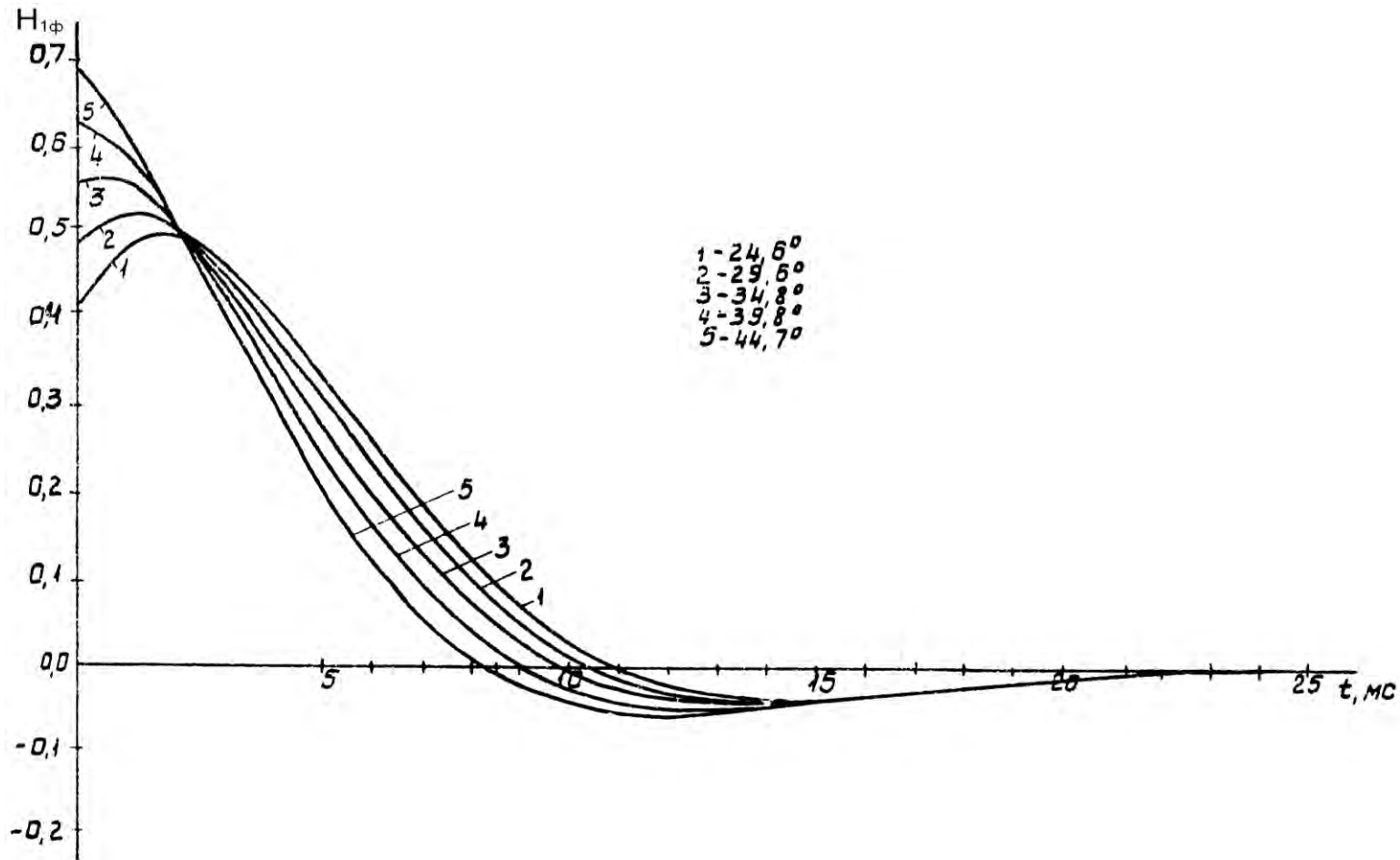


Рис. 1.14. Выходное напряжение однозвенного режекторного фильтра 50 Гц при подключении к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\psi$ , принимающей значения 24,8°, 29,6°, 34,8°, 39,8° и 44,7°

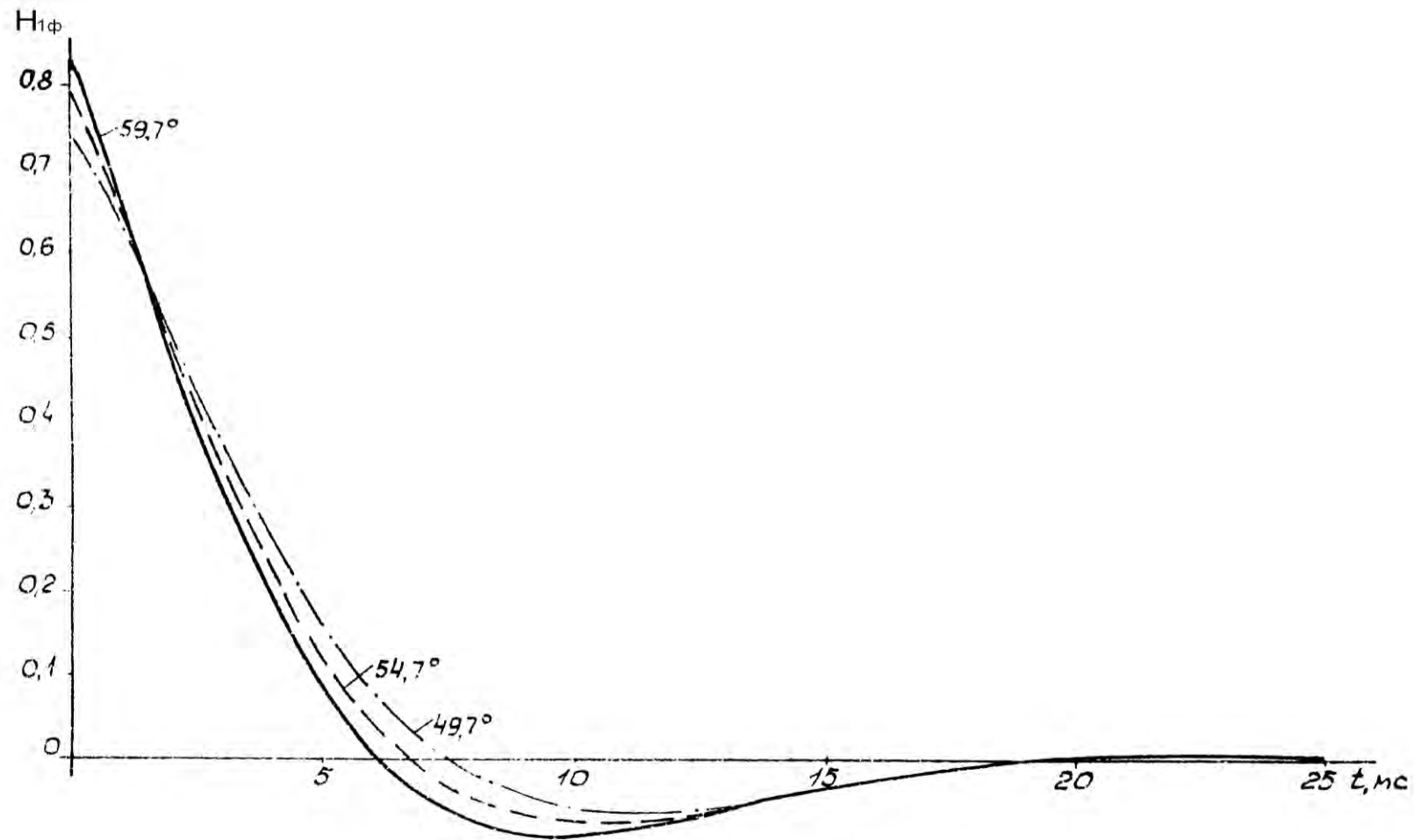


Рис. 1.15. Выходное напряжение однозвенного режекторного фильтра 50 Гц при подключении к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\psi$ , принимающей значения  $59,7^\circ$ ,  $54,7^\circ$  и  $49,7^\circ$

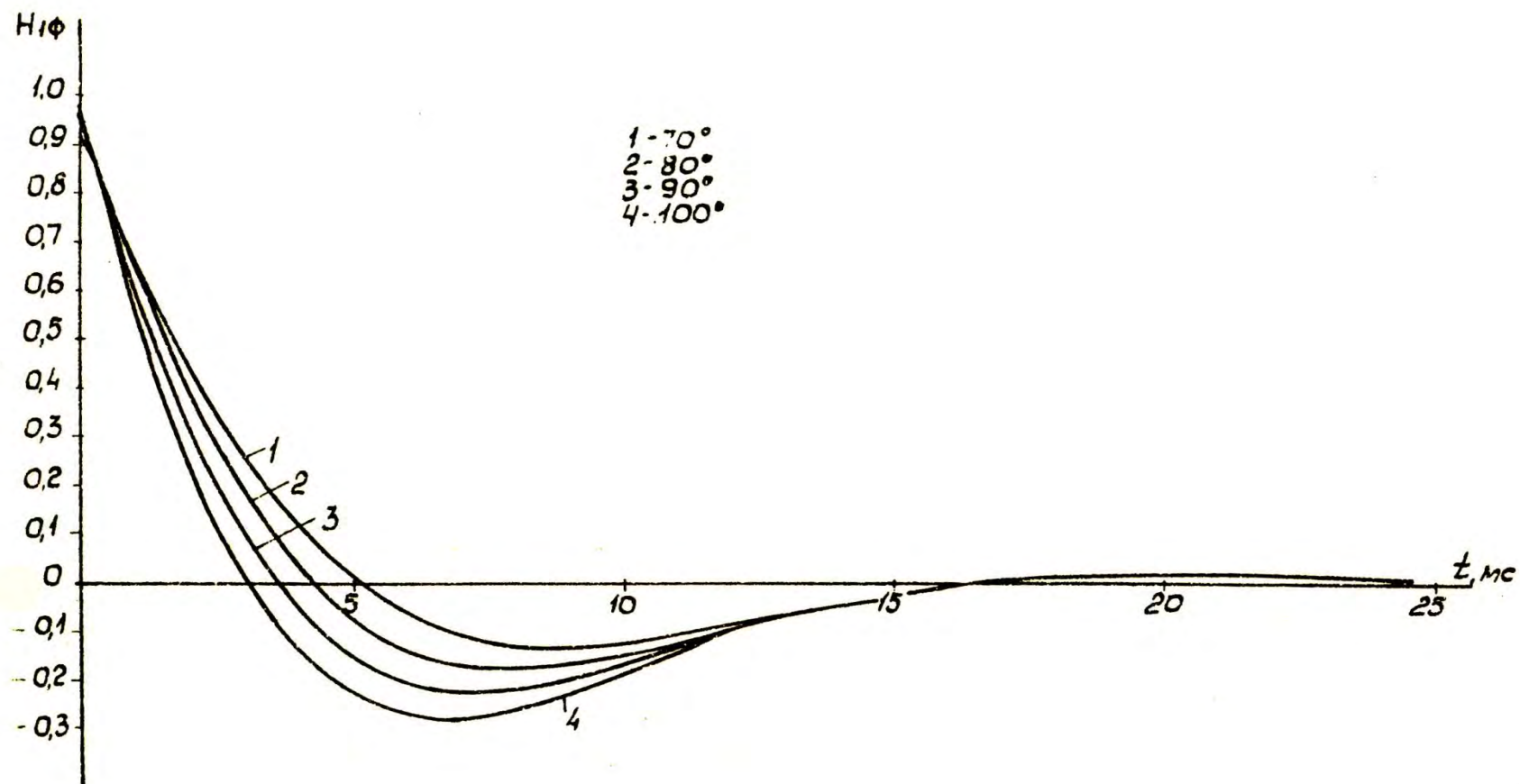


Рис. 1.16. Выходное напряжение однозвенного режекторного фильтра 50 Гц при подключении к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\psi$ , принимающей значения  $70^\circ$ ,  $80^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $100^\circ$

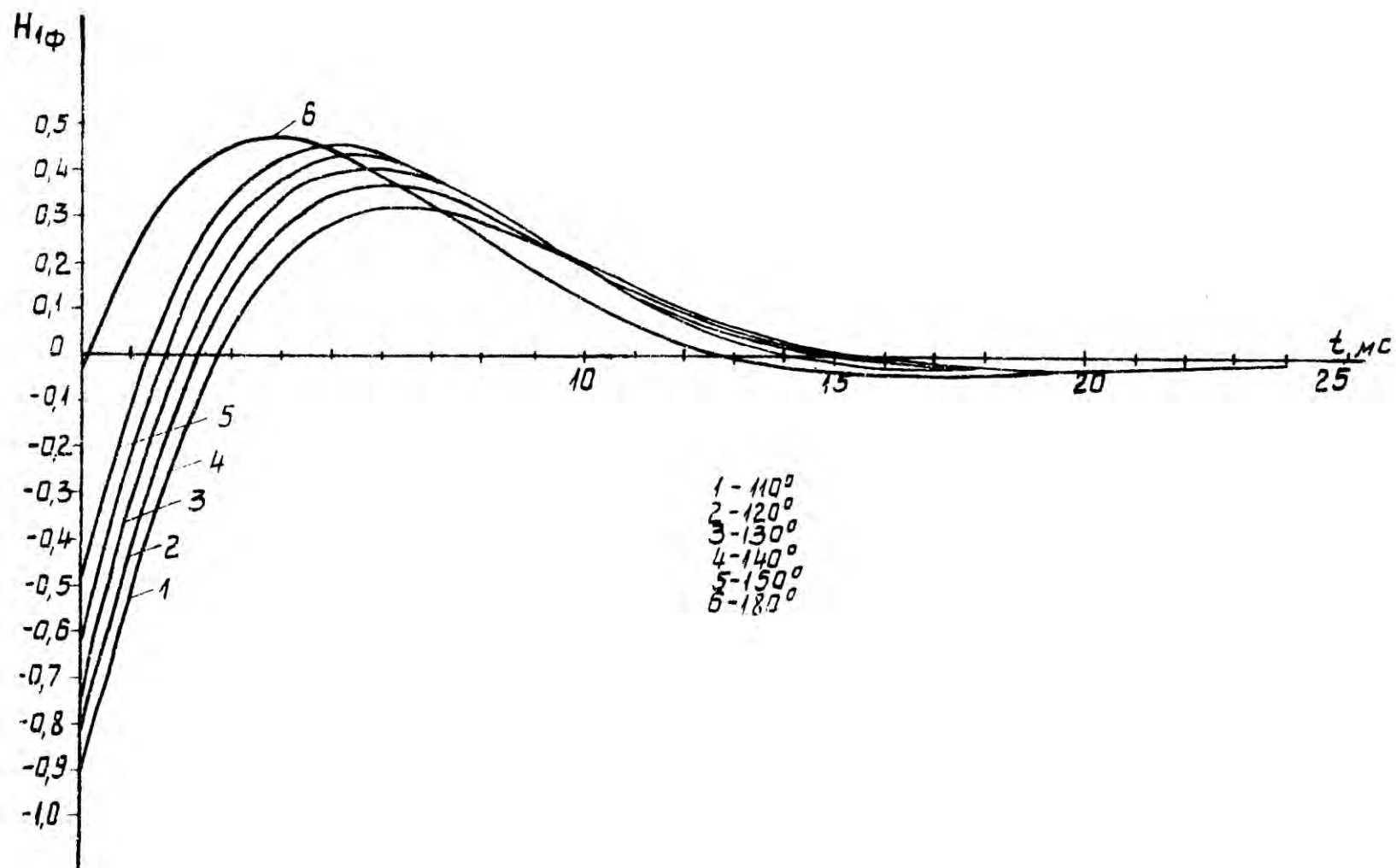


Рис. 1.17. Выходное напряжение однозвенного режекторного фильтра 50 Гц при подключении к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\psi$ , принимающей значения  $110^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $130^\circ$ ,  $140^\circ$ ,  $150^\circ$  и  $180^\circ$



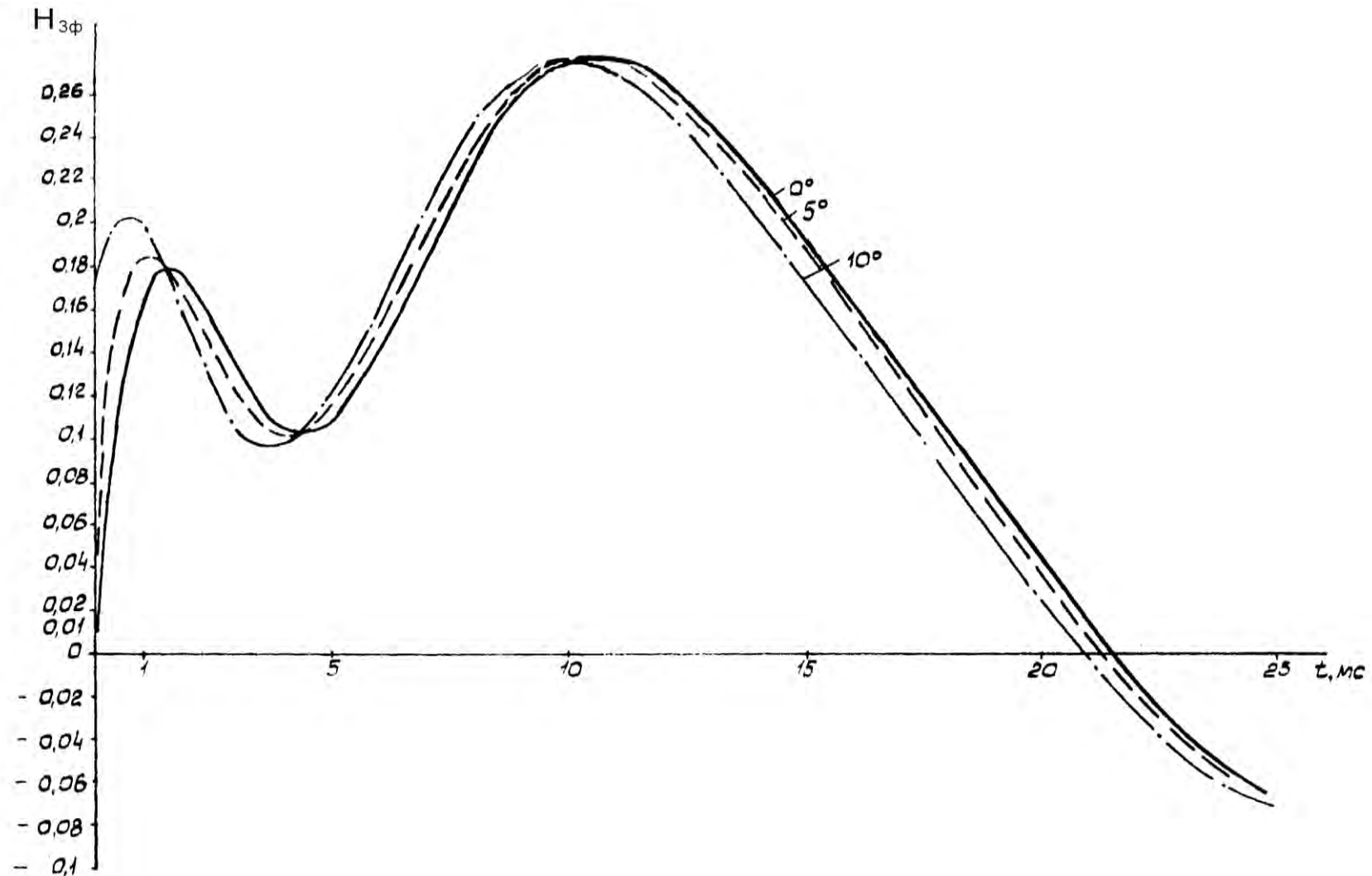


Рис. 1.18. Выходное напряжение трехзвенного режекторного фильтра 50 Гц при подключении к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\psi$ , принимающей значения  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  и  $10^\circ$

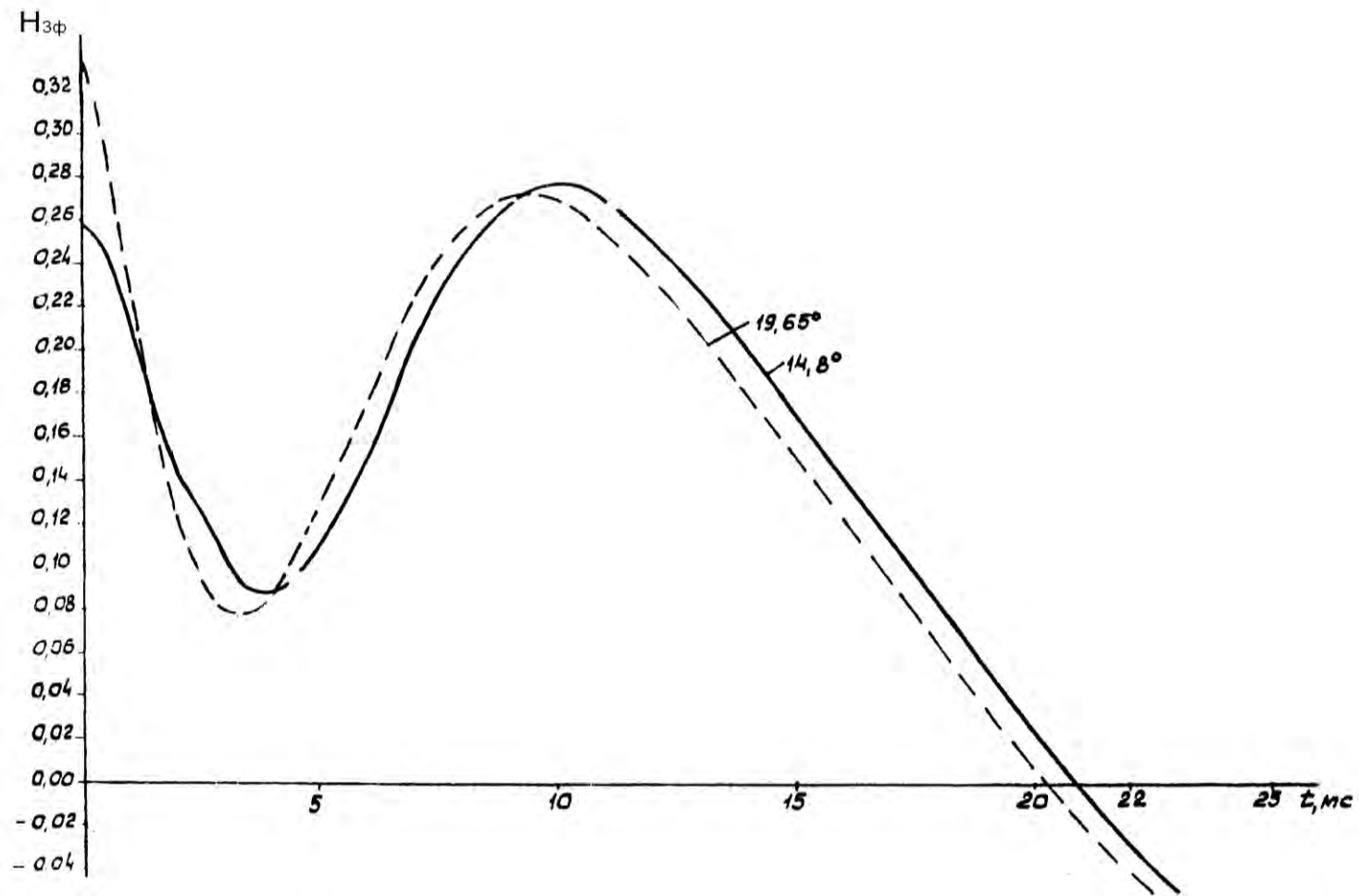


Рис. 1.19. Выходное напряжение трехзвенного режекторного фильтра 50 Гц при подключении к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\psi$ , принимающей значения  $14,8^\circ$  и  $19,65^\circ$

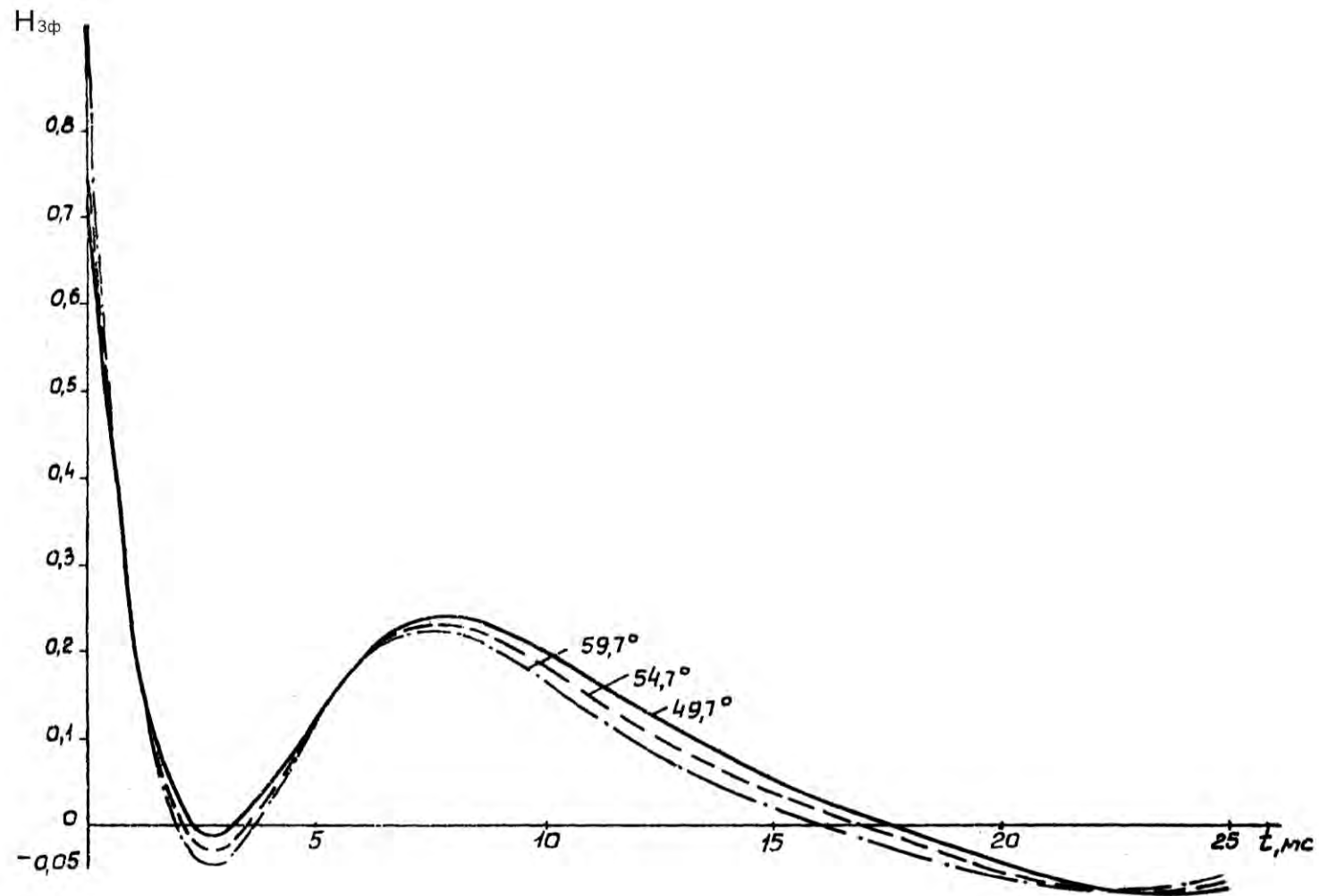


Рис. 1.20. Выходное напряжение трехзвенного режекторного фильтра 50 Гц при подключении к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\Psi$ , принимающей значения  $59,7^\circ$ ,  $54,7^\circ$  и  $49,7^\circ$

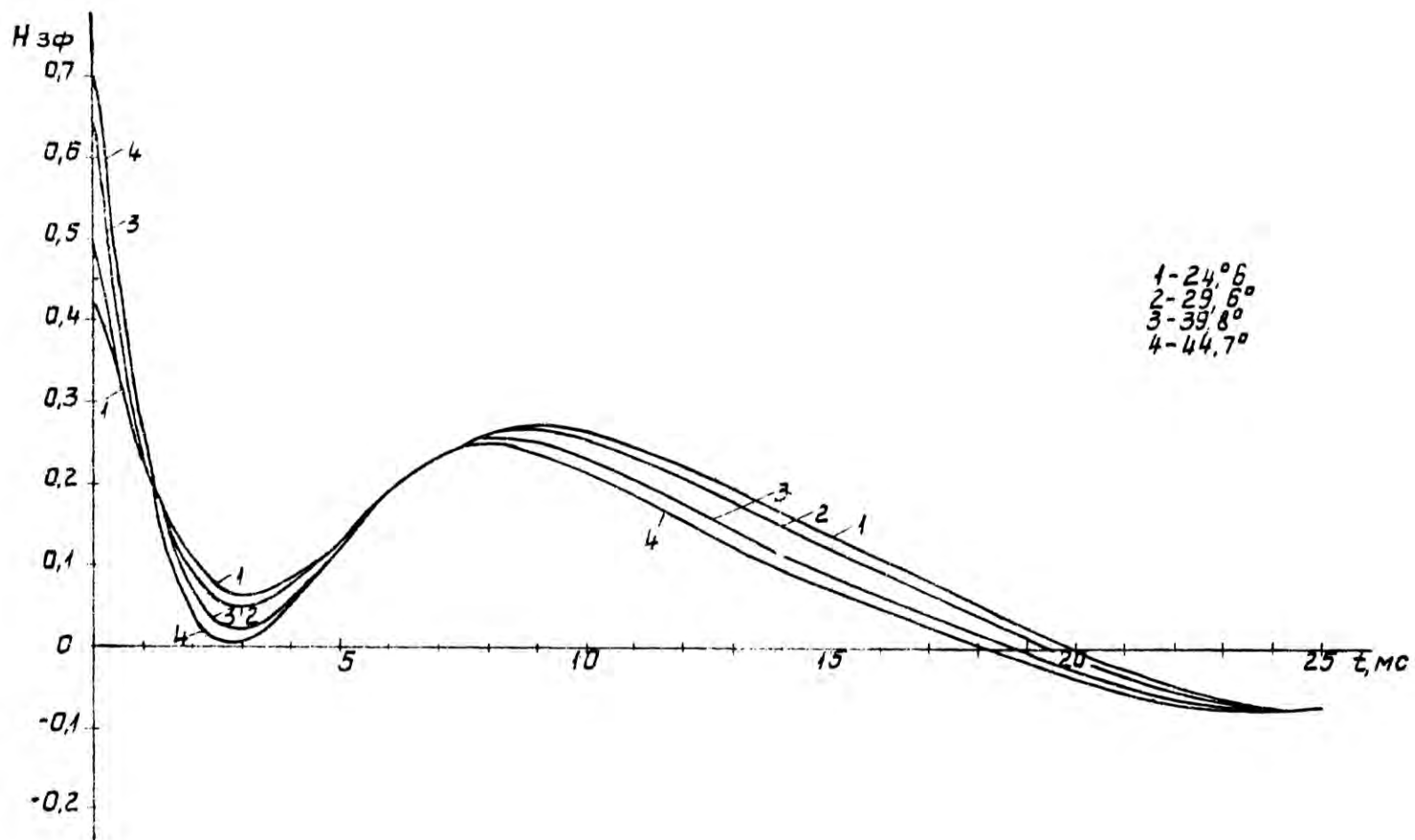


Рис. 1.21. Выходное напряжение трехзвенного режекторного фильтра 50 Гц при подключении к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\psi$ , принимающей значения  $24,6^\circ$ ,  $29,6^\circ$ ,  $39,8^\circ$  и  $44,7^\circ$

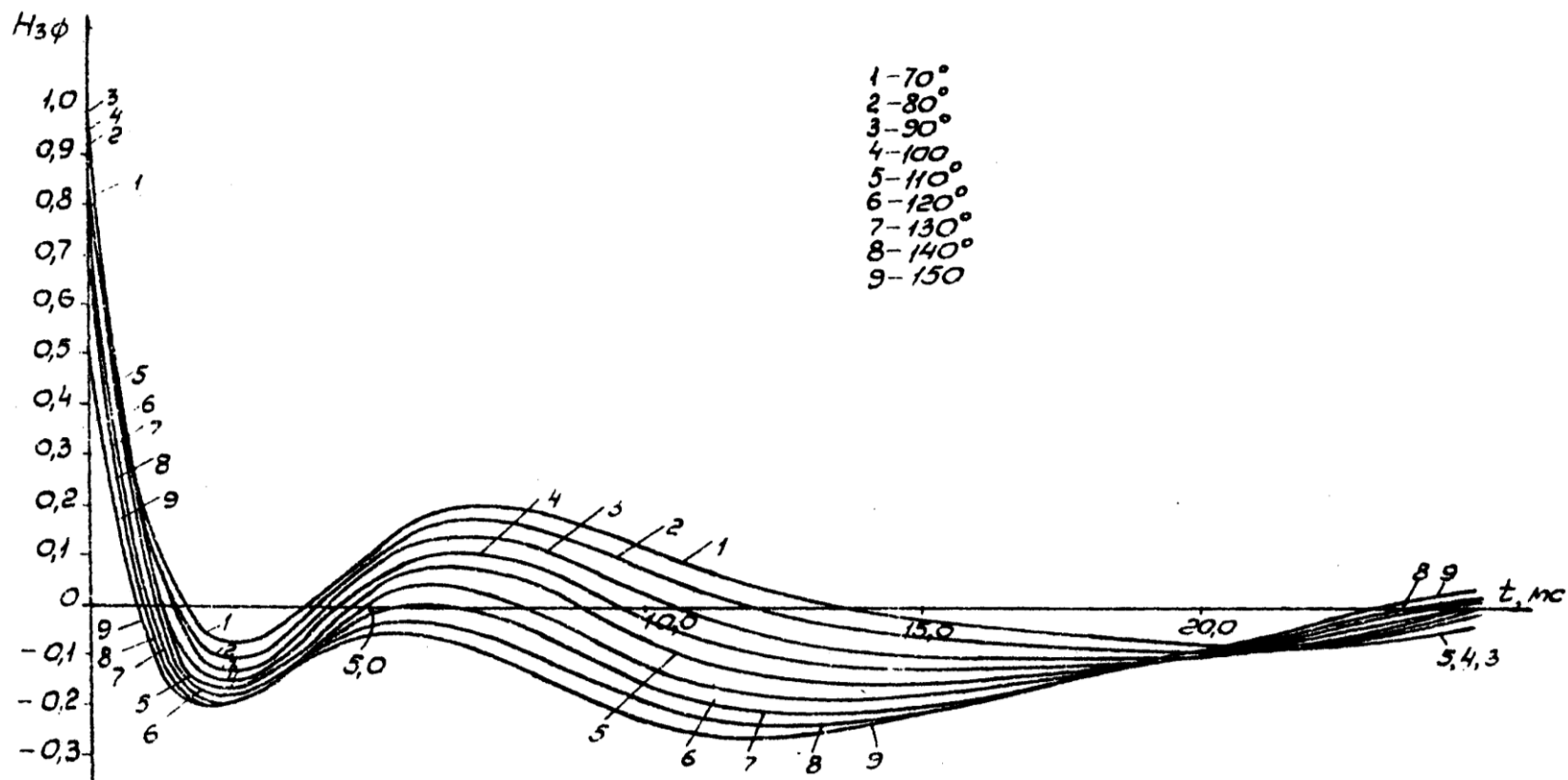


Рис. 1.22. Выходное напряжение трехзвенного режекторного фильтра 50 Гц при подключении к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\psi$ , принимающей значения 70°, 80°, 90°, 100°, 110°, 120°, 130°, 140° и 150°

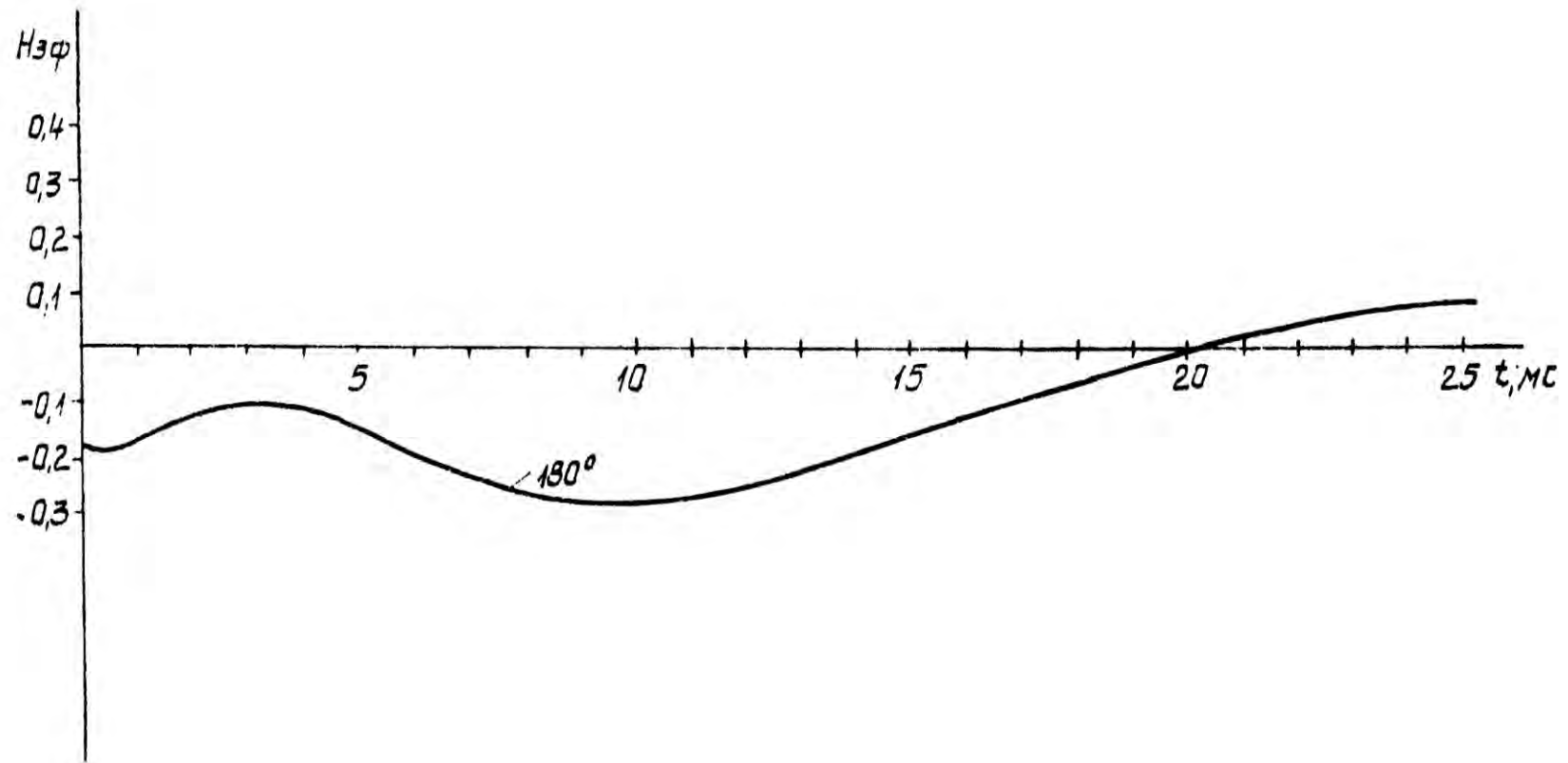


Рис. 1.23. Выходное напряжение трехзвенного режекторного фильтра 50 Гц при подключении к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\psi$ , принимающей значения  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $14,8^\circ$  и  $19,65^\circ$

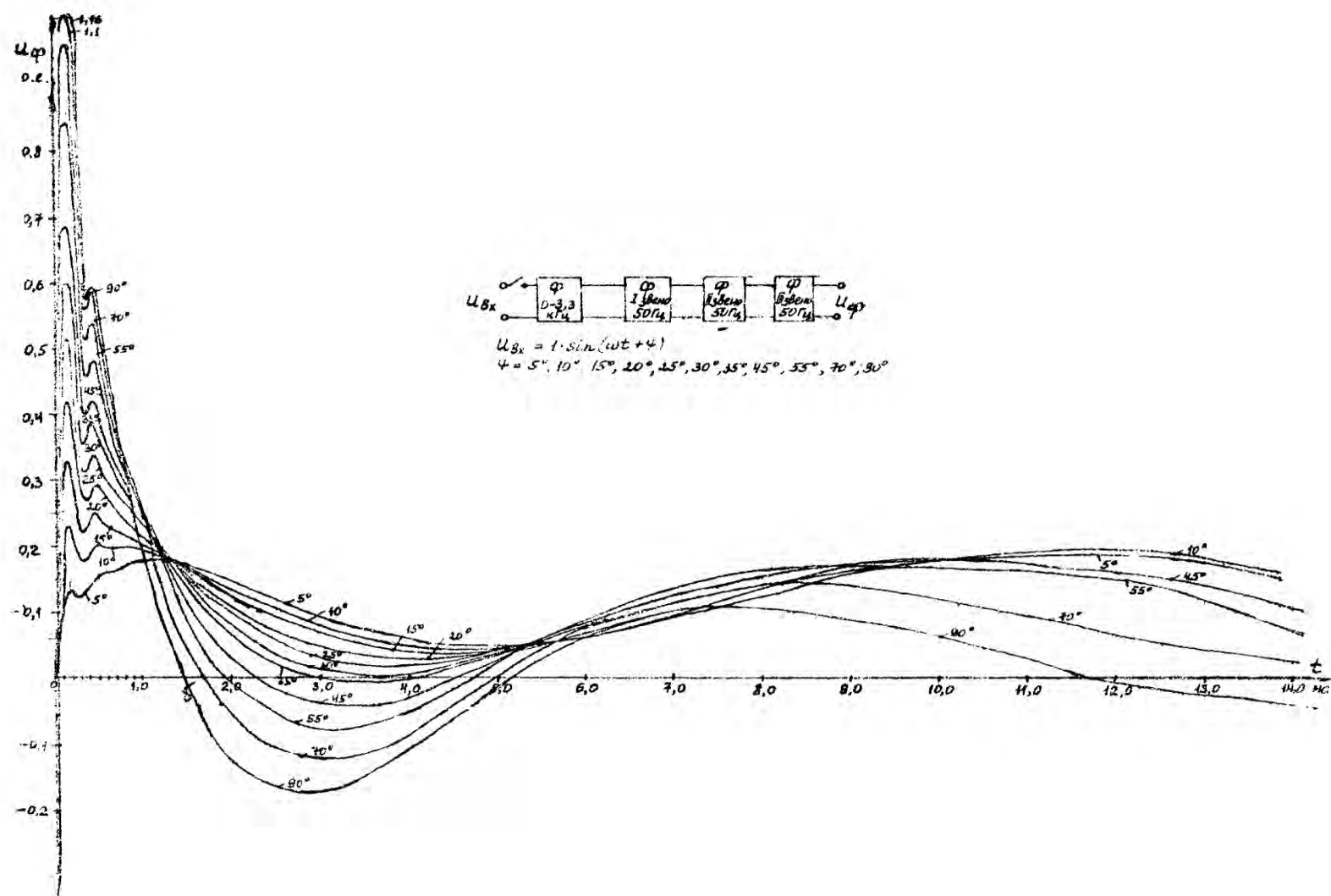


Рис. 1.24. Выходное напряжение цепи ФНЧ (0-3,3 кГц) с трехзвенным режекторным фильтром 50 Гц при подключении к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\psi$ , принимающей значения  $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 45^\circ, 55^\circ, 70^\circ$  и  $90^\circ$

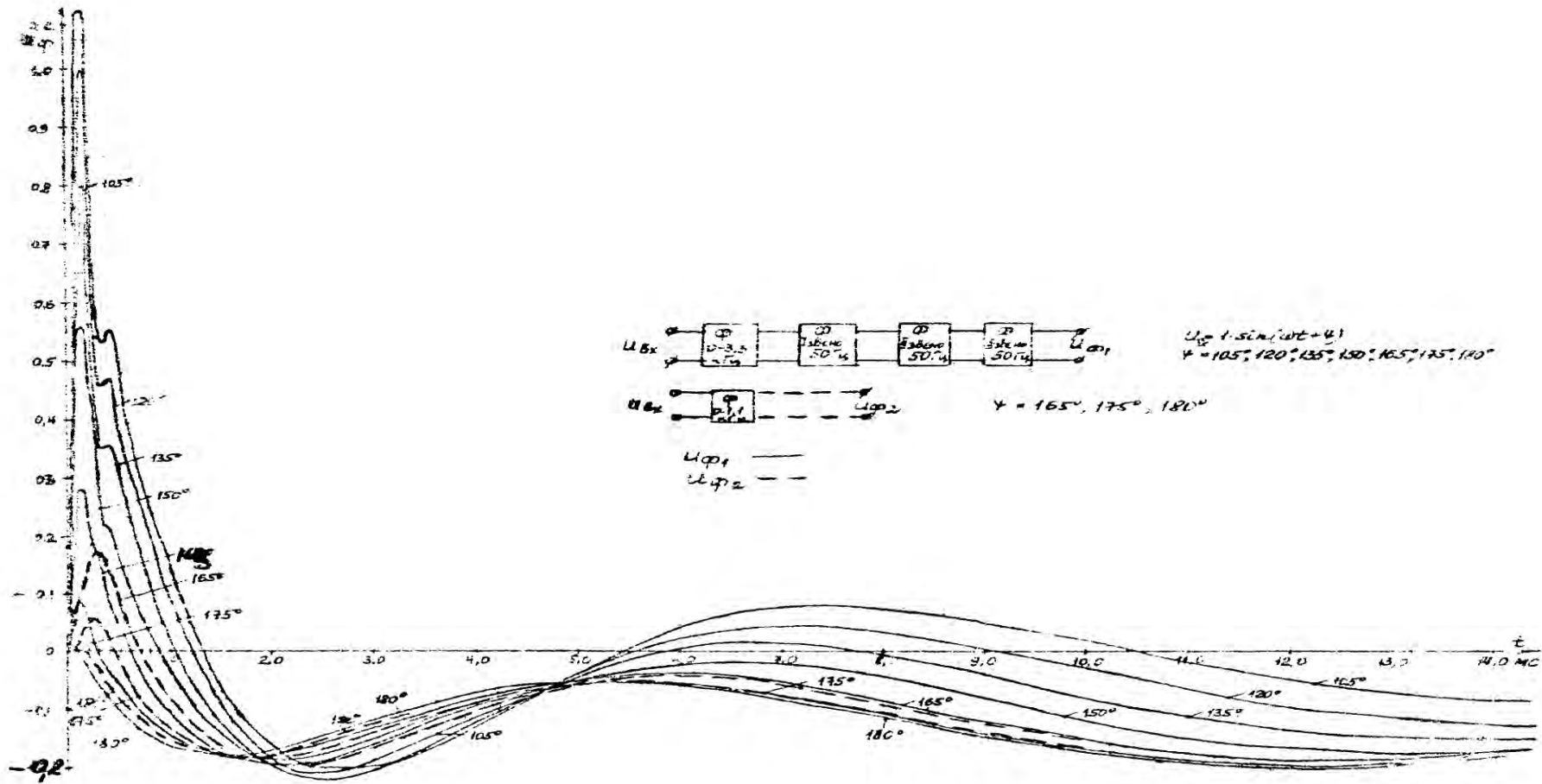


Рис. 1.25. Выходное напряжение цепи ФНЧ (0-3,3(1,1) кГц) с трехзвенным режекторным фильтром 50 Гц при подключении к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\psi$ , принимающей значения  $105^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ, 165^\circ(165^\circ), 175^\circ(165^\circ)$  и  $180^\circ(165^\circ)$



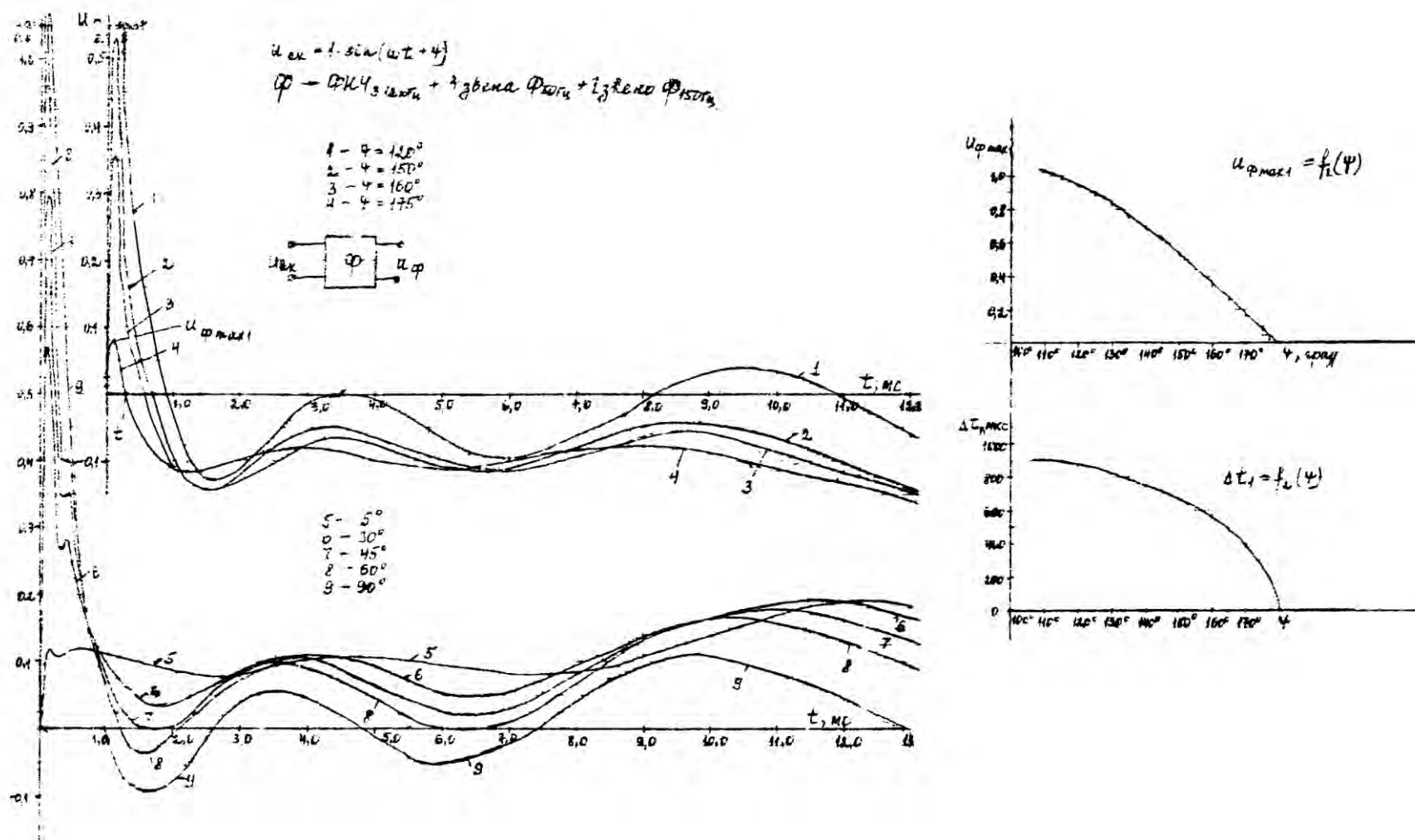


Рис. 1.26. Выходное напряжение цепи ФНЧ (0-3,12 кГц) с трехзвенным режекторным фильтром 50 Гц и режекторным фильтром 150 Гц при подключении к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\psi$ , принимающей значения  $120^\circ, 150^\circ, 160^\circ$  и  $175^\circ$

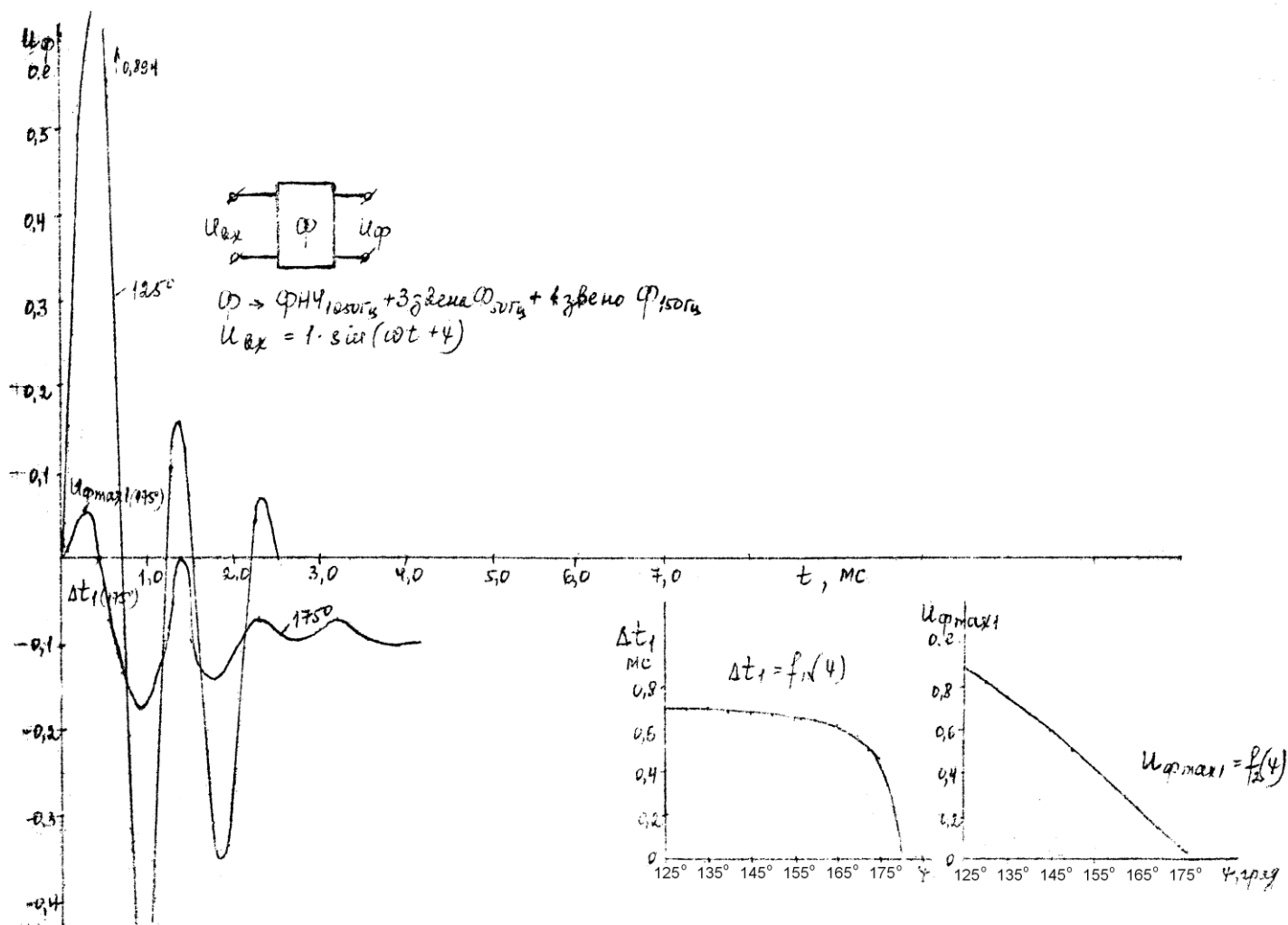


Рис. 1.27. Выходное напряжение цепи ФНЧ (0-1,05 кГц) с трехзвенным режекторным фильтром 50 Гц и режекторным фильтром 150 Гц при подключении к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\psi$ , принимающей значения  $125^\circ$  и  $175^\circ$

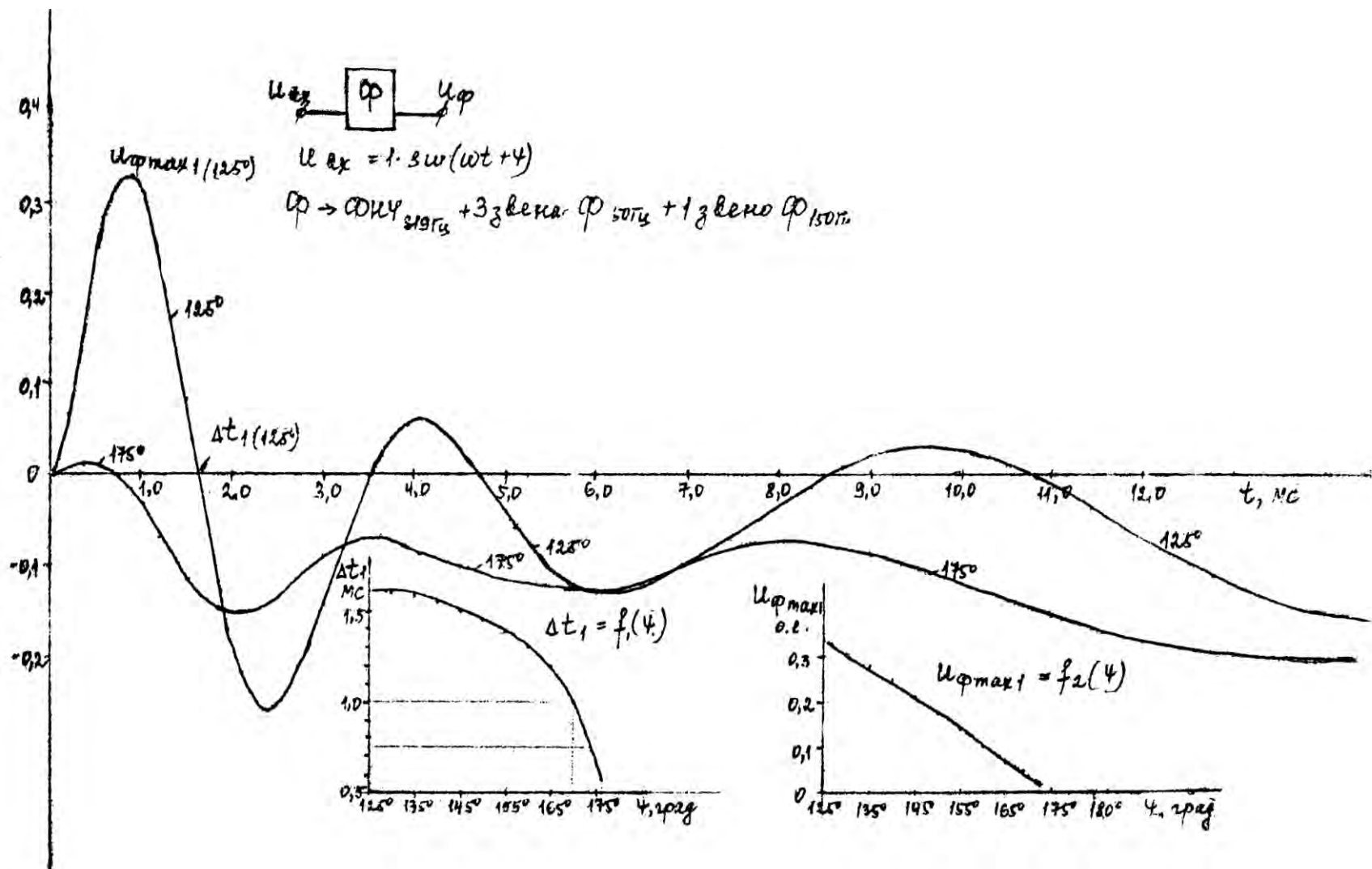


Рис. 1.28. Выходное напряжение цепи ФНЧ (0-319 Гц) с трехзвенным режекторным фильтром 50 Гц и режекторным фильтром 150 Гц при подключении к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\psi$ , принимающей значения  $125^\circ$  и  $175^\circ$

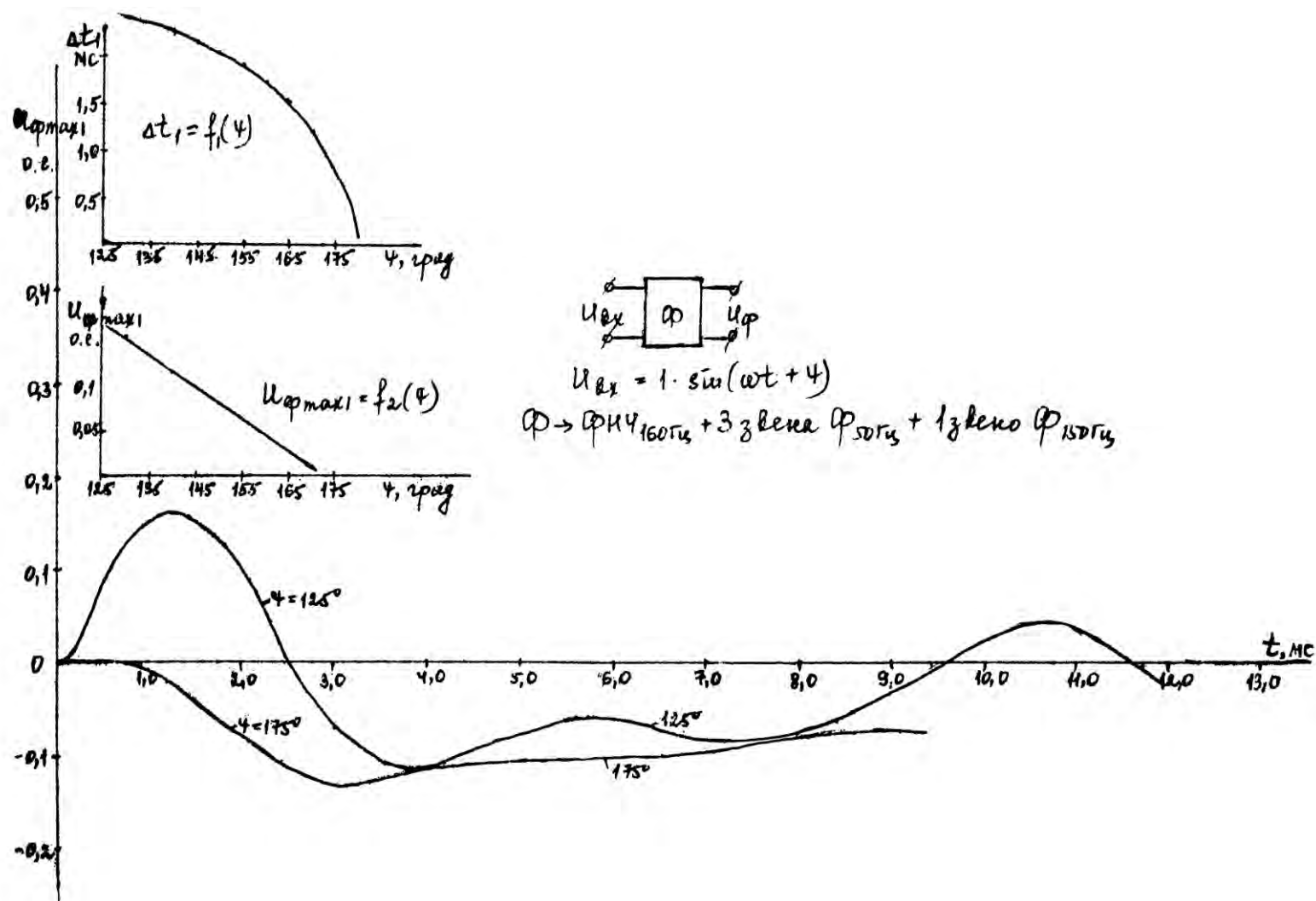


Рис. 1.29. Выходное напряжение цепи ФНЧ (0-160 Гц) с трехзвенным режекторным фильтром 50 Гц и режекторным фильтром 150 Гц при подключении к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\psi$ , принимающей значения  $125^\circ$  и  $175^\circ$

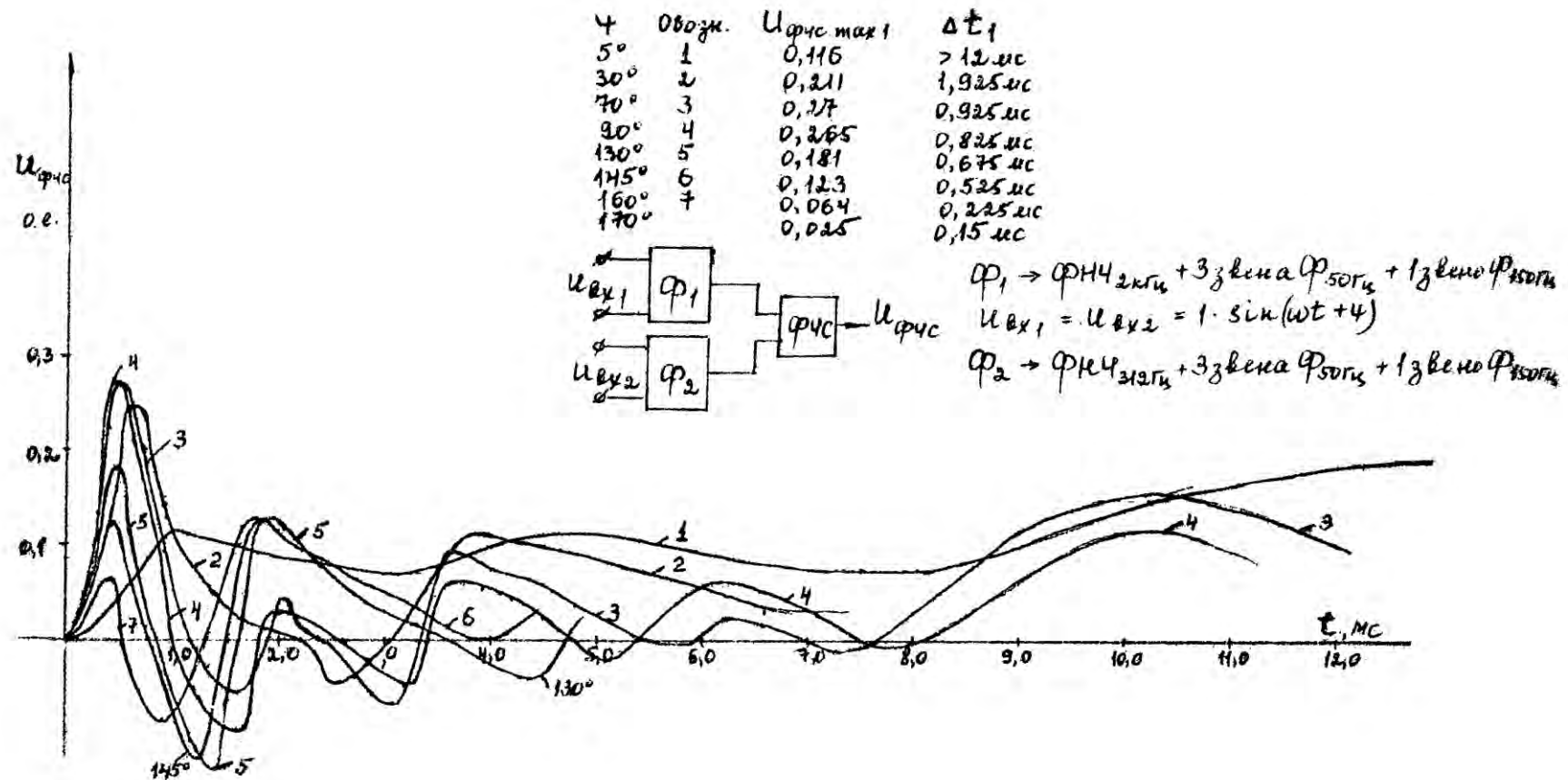


Рис. 1.30. Выходное напряжение фазочувствительной схемы (ФЧС) при подключении источников напряжения промышленной частоты с начальными фазами  $\psi$ , принимающими значения  $5^\circ, 30^\circ, 70^\circ, 90^\circ, 130^\circ, 145^\circ, 160^\circ$  и  $170^\circ$ , к одному из входов ФЧС - через цепь ФНЧ (0-2,0 кГц) с трехзвенным режекторным фильтром 50 Гц и режекторным фильтром 150 Гц, а к другому - через цепь ФНЧ (0-312 Гц) с трехзвенным режекторным фильтром 50 Гц и режекторным фильтром 150 Гц

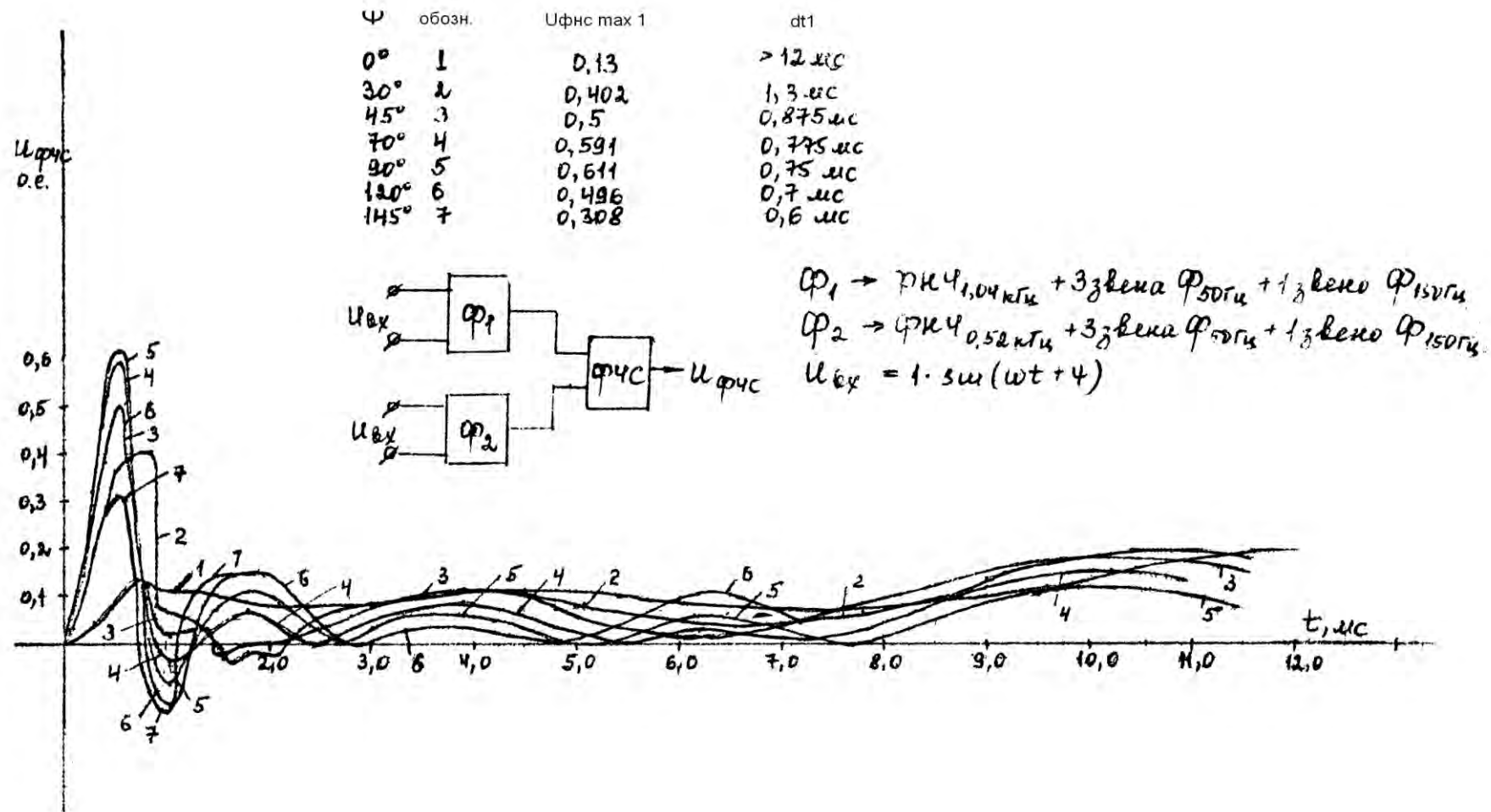


Рис. 1.31. Выходное напряжение фазочувствительной схемы (ФЧС) при подключении источников напряжения промышленной частоты с начальными фазами  $\psi$ , принимающими значения  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 70^\circ, 90^\circ, 120^\circ$  и  $145^\circ$ , к одному из входов ФЧС - через цепь ФНЧ (0-1,04 кГц) с трехзвенным режекторным фильтром 50 Гц и режекторным фильтром 150 Гц, а к другому - через цепь ФНЧ (0-520 Гц) с трехзвенным режекторным фильтром 50 Гц и режекторным фильтром 150 Гц

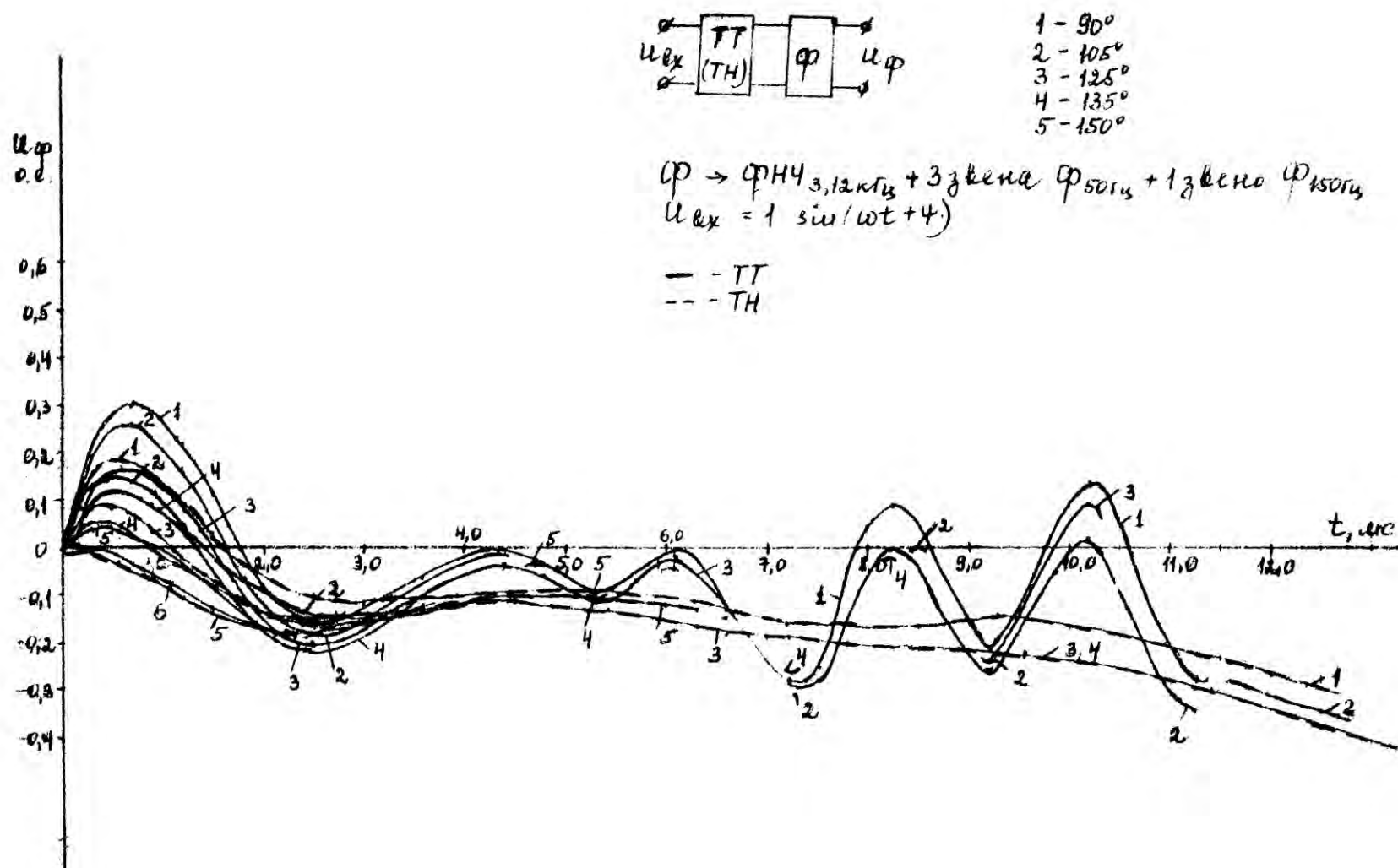


Рис. 1.32. Выходное напряжение цепи: четырехполюсник с частотными характеристиками ТТ (или ТН), ФНЧ (0-3,12 кГц), трехзвенный режекторный фильтр 50 Гц и режекторный фильтр 150 Гц при подключении ее к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\psi$ , принимающей значения  $90^\circ$ ,  $105^\circ$ ,  $125^\circ$ ,  $135^\circ$  и  $150^\circ$

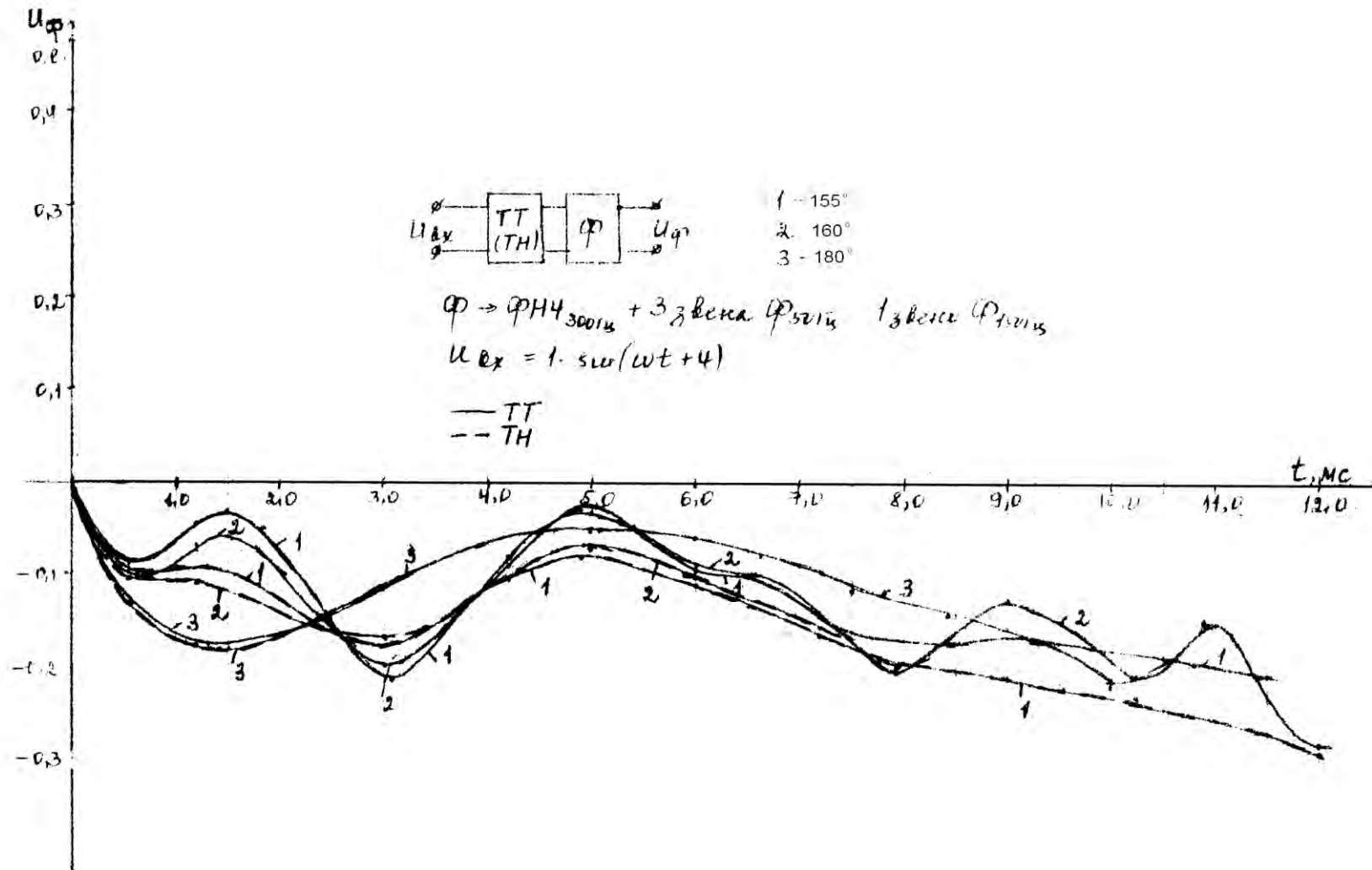


Рис. 1.33. Выходное напряжение цепи: четырехполюсник с частотными характеристиками ТТ (или ТН), ФНЧ (0-300 Гц), трехзвенный режекторный фильтр 50 Гц и режекторный фильтр 150 Гц при подключении ее к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\psi$ , принимающей значения  $155^\circ$ ,  $160^\circ$  и  $180^\circ$



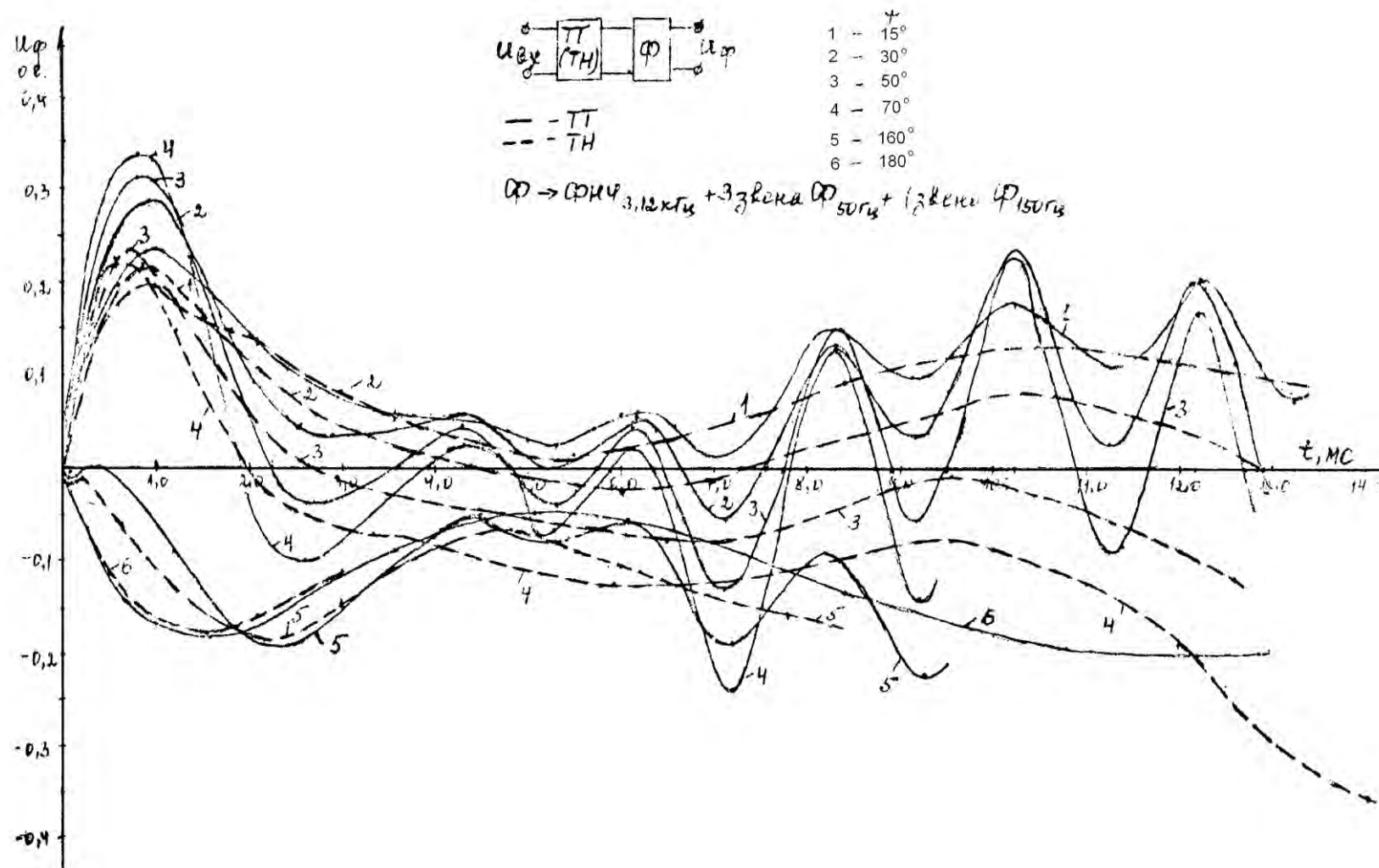


Рис. 1.34. Выходное напряжение цепи: четырехполюсник с частотными характеристиками ТТ (или ТН), ФНЧ (0-3,12 кГц), трехзвенный режекторный фильтр 50 Гц и режекторный фильтр 150 Гц при подключении ее к источнику напряжения промышленной частоты с начальной фазой  $\varphi$ , принимающей значения  $15^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 150^\circ$  и  $180^\circ$

основном, параметрами индуктивностей схемы замещения. При этом следует отметить, что в интервале времени порядка единиц миллисекунд кратности переходных токов, содержащих апериодические слагающие, не достигают уровней, определяющих насыщение сердечников. В этих условиях сердечники работают в пределах линейной характеристики намагничивания, что определяет передачу апериодической слагающей в указанном интервале времени. В течение этого интервала не происходит искажений знака вторичного тока [51]. Результаты измерений тока КЗ в начальной стадии переходного процесса (в интервале времени от 0 до 3 мс) при опытах на линии 500 кВ [4] показали, что передача трансформатором тока ТФНД-500 сигнала тока КЗ с частотными составляющими до нескольких килогерц происходит без искажений его знака.

Применяемые на ВЛ СВН электромагнитные трансформаторы напряжения типа НКФ-500 имеют частотную характеристику, согласно которой передача составляющих до 3 - 5 кГц происходит без существенных искажений [52].

На рис. 1.30-1.31 иллюстрируются процессы на выходе фазочувствительной схемы ОНМ при учете различия частотных характеристик ТТ и ТН ВЛ СВН. Результаты показывают, что при этом происходит дополнительное снижение амплитуды выходных сигналов при более низких значениях  $\psi$  в диапазоне от  $140^\circ$  до  $160^\circ$ , что в условиях неидентичности частотных характеристик цепей ТТ и ТН может привести к нарушению соотношения полярностей выходных сигналов тока и напряжения в указанных цепях в начальные моменты переходного процесса. Так, при  $\psi = 150^\circ$ , выходные сигналы цепей тока и напряжения с ТТ и ТН отличаются по знаку при  $f_{cp} = 3,12$  кГц (рис. 1.32 и 1.34). Совпадение по знаку достигается при более низких частотах, например, при  $f_{cp} = 300$  Гц (рис. 1.33). Следовательно, в целях уменьшения вероятности неселективной работы защиты в условиях различия частотных характеристик ТТ и ТН целесообразно принять меры по выравниванию указанных характеристик.

С учетом приведенных расчетных данных выбор  $f_{cp}$  представляется целесообразным в пределах 0,5—1 кГц.

#### 1.4.5. Избирательные органы поврежденных фаз ВЛ

Использование в сочетании с защитами, реагирующими на бегущие волны, применяемых в действующих устройствах ОАПВ избирательных органов поврежденных фаз (ИПФ), реагирующих на электрические величины промышленной частоты, нецелесообразно, поскольку при этом будет ограничено быстрое действие отключения КЗ. Поэтому избирательные органы по своим характеристикам должны соответствовать параметрам ОНМ волновой защиты. Способ выделения аварийных составляющих в ИПФ в отличие от измерительных органов защиты должен предусматривать возможность контроля не только первоначального повреждения, но и перехода его в более сложные виды, а также в цикле ОАПВ.

При этих условиях для определения поврежденных фаз целесообразно использование органа [53], в котором осуществляется сравнение трех средних по модулю значений фазных аварийных токов (напряжений). Отстройка от небалансов при измерении аварийных величин в блоке сравнения (БС) достигается применением селектора. Выходной сигнал селектора подается на компараторы избирателя и выполняет функции опорного напряжения, определяя соответствующие виду КЗ расчетные сигналы. Такое решение позволяет определять повреждение не только при однофазных КЗ, но и при других видах повреждения. Информация, полученная от компараторов, запоминается на время, достаточное для отключения поврежденных фаз. В неполнофазном режиме фазовая селекция не требуется.

Следует отметить, что в схеме волновой защиты RALDA фирмы ASEA [13,14] фазовая селекция осуществляется с помощью фазных ОНМ, параметры срабатывания которых выбираются по условиям контроля наиболее удаленных КЗ. Однако в публикациях фирмы нет указаний на

оценку надежности выбора поврежденной фазы в условиях изменения величин в месте контроля и перехода однофазных КЗ в более сложные виды повреждения.

#### **1.4.6. Измерительные органы защиты при включении ВЛ**

Коммутация ВЛ 330-750 кВ является внешним возмущением для волновой защиты, и ее органы направления будут работать на блокировку. Поэтому для такой защиты необходимо построение специальных измерительных органов, вводимых только при включении ВЛ. В целях упрощения допускается не учитывать вероятность совпадения внешних КЗ с процессом включения защищаемой ВЛ.

При включении неповрежденной ВЛ процессы определяются соотношениями для многопроводной системы и условиями одновременного замыкания контактов выключателей по фазам. Появляются зарядные волны, отражающиеся от концов линии с учетом взаимного влияние процессов в фазах. Например, согласно расчетам [54], при коммутации протяженной ВЛ СВН со стороны узла, содержащего только индуктивности, возникают свободные колебания относительно высокого уровня, в спектре которых формируются частоты, близкие к 100—150 Гц. После включения выключателя тремя фазами и затухания свободных составляющих устанавливаются симметричные фазные напряжения и емкостные токи. Включение выключателей противоположного конца ВЛ, находящейся под напряжением, также сопровождается переходным процессом в условиях одновременного замыкания фаз выключателей, что определяет кратковременную несимметрию токов, в которых на емкостные токи налагаются токи нагрузки. Уровни этих токов могут быть соизмеримы с токами срабатывания органов защиты.

Включение линии на КЗ сопровождается появлением отражений от места КЗ. Характер переходного процесса при этом кроме условий

коммутации зависит от расстояния до места КЗ и вида КЗ, а также значений зарядного (емкостного) тока ВЛ.

Для отстройки измерительного органа, контролирующего состояние ВЛ при ее включении, от емкостных токов на протяженных передачах может быть предложен контроль напряжения ВЛ. При этом нахождение напряжения ниже заданного минимального уровня в течение определенного интервала времени может являться одним из признаков КЗ. Пуск защиты при включении должен осуществляться от контактов выключателей или по признаку появления тока. Применение изложенного принципа защиты при включении, однако, имеет следующие ограничения

отстройка по времени от зарядных токов приведет к увеличению времени срабатывания защиты на протяженных передачах, не удовлетворяя предъявляемым требованиям защиты по быстродействию;

при малых значениях сопротивления сети, примыкающей к защищаемой ЛЭП, падение напряжения при КЗ может оказаться недостаточным для срабатывания органа минимального напряжения.

Наиболее эффективно применение этого принципа при наличии в цепи выключателей так называемых предвключенных сопротивлений, используемых для ограничения перенапряжений при включении и соизмеримых по величине с волновым сопротивлением ВЛ [13,14]. Это приводит к более быстрому затуханию коммутационных процессов и обеспечению больших уровней напряжения при КЗ.

При отсутствии предвключенных сопротивлений должны использоваться другие органы защиты, например дистанционного типа. В устройствах релейной защиты и линейной автоматики на промышленной частоте для контроля КЗ при включении ЛЭП используются реле сопротивления, включаемые на междуфазные величины, избирательные органы ОАПВ дистанционного типа, включаемые на фазные величины с компенсацией тока нулевой последовательности, реле направления мощности обратной последовательности и реле тока нулевой

последовательности [1]. Однако реле сопротивления дистанционных защит от междуфазных КЗ на ВЛ 750-1150 кВ, имеющие сложные четырехугольные характеристики с целью отстройки от нагрузочных режимов и обеспечения необходимой чувствительности при КЗ на сложной линии (с учетом источников питания на промежуточных ПС), практически не чувствительны к однофазным КЗ.

Применение органов направления мощности обратной или прямой последовательности для защиты линии в режиме включения также неприемлемо. При включении на трехфазное КЗ реле направления мощности обратной последовательности не сработает. В режиме включения при ОАПВ оно не может выводиться на самостоятельное действие, так как под влиянием тона нагрузки будет работать на отключение. Реле направления мощности прямой последовательности правильно будет работать при включении поврежденной линии после включения последней фазы выключателя, но будет отказывать в действии при включении на трехфазное КЗ. При ОАПВ такое реле также не может выводиться на самостоятельное действие из-за влияния нагрузки.

Избирательные органы дистанционного типа широко используются на ВЛ ВН и СВН [1] в качестве неселективной защиты в цикле ОАПВ и выводятся на самостоятельное действие при опробовании линии и при АПВ. Эти органы включаются на фазные величины с компенсацией током нулевой последовательности. По условию несрабатывания в режиме нагрузки характеристики срабатывания таких реле выполняются либо в виде двух окружностей, либо в виде четырехугольника. В режимах включения линии не требуется отстройка рассматриваемого органа защиты, кратковременно вводимого в действие с конца линии, включаемого первым, от нагрузки. При этом рассматривается вариант включения реле на фазные величины [55].

## **1.5. Испытания волновой защиты на электродинамической модели**

Для оптимизации частотной полосы пропускания и параметров срабатывания защиты требуется анализ переходного процесса с учетом многократных отражений и преломления волн в узловых точках и точках нарушения однородности линии. Этой цели вполне удовлетворяла созданная во ВНИИЭ электродинамическая модель (ЭДМ) [56], параметры которой соответствовали частотному диапазону входных цепей измерительных органов волновой защиты. Кроме того, модель включала (см. Приложение 1) комплекс устройств, моделирующих ТТ и ТН, что являлось весьма ценным из-за проблемы математического моделирования их характеристик.

### **1.5.1. Особенности выполнения опытного образца волновой защиты**

Представленное на испытания устройство волновой защиты конструктивно размещалось в трех стандартных кассетах, включающих 18 модулей (рис. 1.35). Блок питания (БП) типа БП-180, занимающий 5 модулей, и модуль преобразователей напряжения (МПН) выполняли функции преобразования напряжения 220 В оперативного постоянного тока источника питания в стабилизированные напряжения +15 В, -15 В и +24 В. Для передачи сигналов от измерительных трансформаторов напряжения и тока к измерительным органам защиты применены согласующие промежуточные трансформаторы TV и тока ТА, включенные на соответствующие фазные напряжения и токи. Промежуточные трансформаторы размещены в модуле датчиков и тестового контроля (МДТК) второй кассеты (рис. 1.36), а их вторичные обмотки выведены на контрольный разъем модуля. В органах направления мощности (ОНМ) волновой защиты применен контроль аварийных составляющих токов и напряжений с помощью фазных фильтров аварийных составляющих (ФАС)

(ФАСТ в цепи тока, ФАСН в цепи) (рис. 1.37). Каждый из этих фильтров (в соответствии с результатами исследований раздела 1.5) состоит из трех последовательно соединенных одинаковых по структуре звеньев, настроенных на подавление частоты 50 Гц (с учетом ее вероятного отклонения), и звеньев фильтрации, настроенных на подавление некоторых из высших гармонических составляющих. Этими же результатами обусловлена необходимость ограничения частотного диапазона ОНМ. В связи с этим в каждую цепь выделения аварийных составляющих включен фильтр нижних частот (ФНЧ) Z0, верхняя частота которого может изменяться от 0,5 до 2,5 кГц с целью проверки результатов, полученных в 1.5. Рассмотренные элементы защиты размещены в отдельных модулях аварийных составляющих напряжения (МАСН) и тока (МАСТ) второй кассеты.

Структурная схема органов направления мощности KW1 и KW2 двухстороннего действия - на отключение (О) линии при внутренних КЗ и на блокировку (Б) защиты при внешних КЗ, приведена на рис. 1.37. Величины, пропорциональные токам и напряжениям волновых каналов (групп), выделяются из фазных аварийных составляющих токов и



Рис. 1.35. Схема размещения модулей в кассетах

напряжений при помощи сумматоров SM и преобразуются в прямоугольные импульсы формирователями F1 импульсов. Схематическими D1 сравнения на диодах [57] контролируются положительные и отрицательные знаки



полярностей мгновенных значений напряжения и тока с целью последующей фиксации знаков этих полярностей в волновых каналах по истечении заданного времени  $t_{\Phi}$  с момента превышения порога срабатывания ОНМ. Время  $t_{\Phi}$  задается элементами DT1 задержки, подключенными к выходам схем D1 сравнения, а фиксация знаков осуществляется триггерными блоками АВ1, подключенными к выходам элементов DT1 задержки. Взаимная блокировка триггерных блоков, обеспечивающая определение начального знака полярностей мгновенных значений напряжения и тока, осуществляется в течение времени до момента возврата ОНМ. Триггерные блоки АВ1 выполнены с использованием RS - триггеров с логическими элементами И-НЕ, усилительных каскадов и герконовых реле. В элементах DT1 задержки предусмотрена регулировка времени  $t_{\Phi}$ .

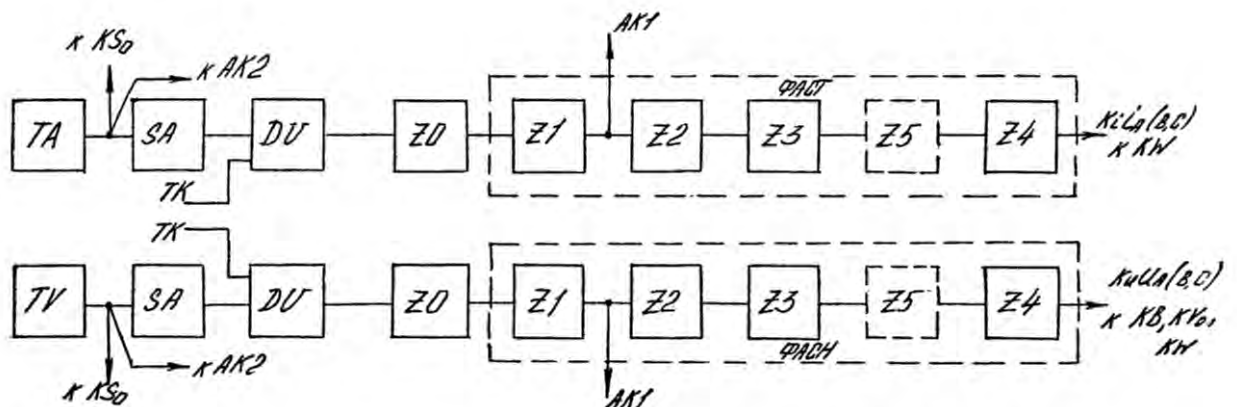


Рис. 1.36. Структурная схема выделения аварийных составляющих тока и напряжения фазы

Параметры срабатывания импульсных органов направления мощности KW1 и KW2 первого и второго волновых каналов при фазе мгновенного значения напряжения промышленной частоты, предшествующего КЗ, равной  $0^\circ$  ( $180^\circ$ ), составляют (в процентах от номинальных величин) в положении по чувствительности (Ч) 1

- на блокировку 3,5 % по напряжению и 8,5 % по току;
- на отключение 7 % по напряжению и 17 % по току.

В положении по Ч 0,5 чувствительность снижается в 2 раза, а в положении по Ч 0,25 - в 4 раза. Одновременное ступенчатое регулирование уровня чувствительности (положения по чувствительности) в каждой из фаз осуществляется с помощью переключателя SA "Чувствительность", расположенного на лицевой части модулей МАСН и МАСТ, путем изменения входного сопротивления согласующих масштабных усилителей DU. В ОНМ KW1 и KW2 с целью повышения надежности их работы предусмотрен контроль срабатывания по току с помощью последовательно соединенных выпрямителя VD1 и порогового органа F2, подключенных к выходам сумматоров SM первого и второго волновых каналов. Сигналы О или Б формируются при одновременном появлении сигналов на выходе триггерного блока AB1 и на выходе порогового органа F2, контролируемых логическими элементами "И" и "ИЛИ" исполнительного блока AB2 [58]. Конструктивно блок органов KW1 и KW2 выполнен в виде отдельного модуля органов направления мощности (МОНМ), размещенного во второй

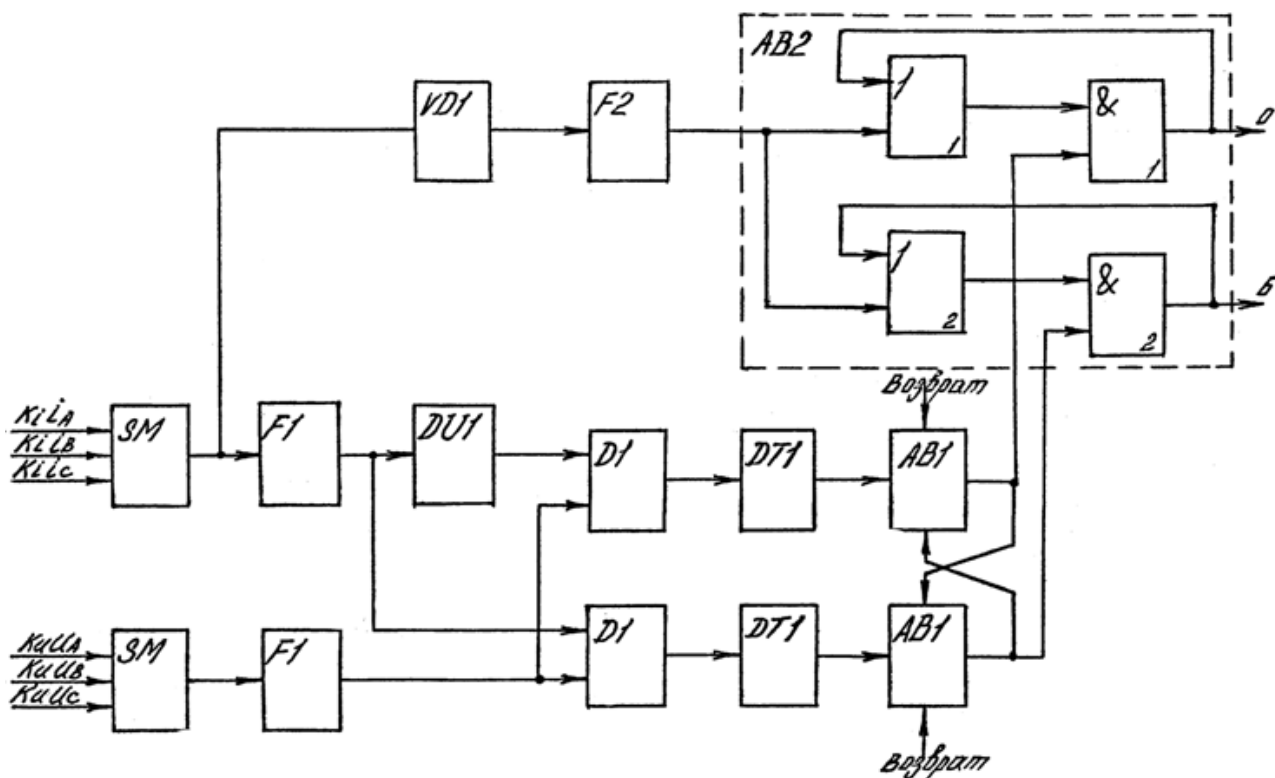


Рис. 1.37. Структурная схема органов направления мощности KW1, KW2

кассете (рис. 1.39). На лицевой части МОИМ расположены контрольный разъем, светодиоды "Б1", "О1", "Б2" и "О2", переключатель "  $t_{\phi}$ , мс" (для регулировки времени фиксации) и кнопка "Возврат" (для ручного возврата триггерных блоков в исходное состояние).

Структурная схема блока контроля грозовых возмущений АК1 [59,60], предназначенного для обеспечения правильного функционирования защиты при грозовой деятельности, приведена на рис.1.38. Пусковой орган КВ блока АКС1, контролирующий соотношение интегральных значений  $U_1$  и  $U_0$  в диапазоне частот до единиц килогерц при подавлении напряжения нормального режима, фиксирует факт возникновения грозовой ситуации на заданное время с помощью элемента ДТ выдержки времени в виде электронных часов. Запрещающий орган КV<sub>0</sub> напряжения, реагирующий на грозовые разряды, способные вызвать ложные срабатывания ОИМ, через элемент "И" ДХ и элемент "ЗАПРЕТ" АМС действует на запрет отключения защищаемой ЛЭП. В случае КЗ, возникшего в течение интервала грозовой деятельности, разрешающий орган тока КS<sub>0</sub> срабатывает, воздействуя на элемент "ЗАПРЕТ" АМС, и снимает запрет от органа КV<sub>0</sub>.

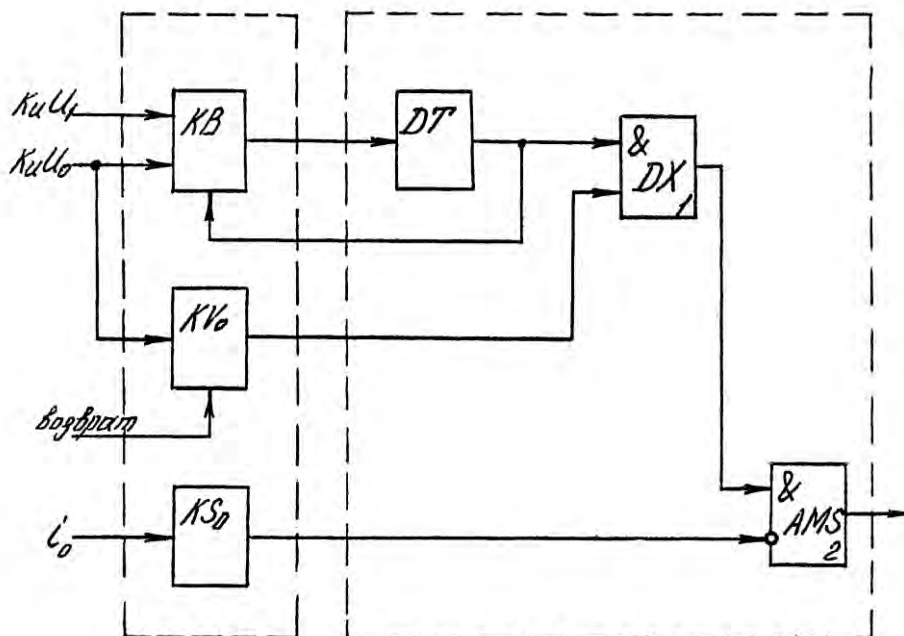


Рис.1.38. Структурная схема блока контроля грозовых возмущений АКС1

При двухфазных КЗ из-за отсутствия составляющих нулевого канала не срабатывают  $KV_0$  и  $KS_0$ . Поэтому, несмотря на срабатывание органа КВ при возникновении грозовой ситуации, сигнал на выходе элемента "И" ДХ отсутствует и запрета действия защиты на отключение не производится. Аварийная составляющая напряжения первого волнового канала  $K_U U_1$  подводится к органу КВ с выхода сумматора SM модуля МОНМ. Аварийная составляющая напряжения нулевого канала  $K_U U_0$  снимается с выхода фильтра напряжения нулевого канала.

Структурная схема пускового органа КВ представлена на рис. 1.39, где VD1 и VD2 – выпрямители, DJ1 и DJ2 – интегрирующие элементы, DU1 и DU2 - инверторы. Реагирующий орган DS выполнен на основе двухвходового компаратора. Плавная регулировка соотношения между  $U_0$  и  $U_1$  обеспечивается резистором в органе DS. Элемент DT задержки на срабатывание обеспечивает отстройку органа DS от помех с регулировкой времени срабатывания 0,5 - 0,73 - 1,0 мс. Триггерный исполнительный блок АВ выполнен с использованием RS – триггера на основе логических элементов И-НЕ. Усилительный каскад на выходе триггера обеспечивает подключение органа КВ к схеме защиты и световую сигнализацию срабатывания с помощью светодиода.

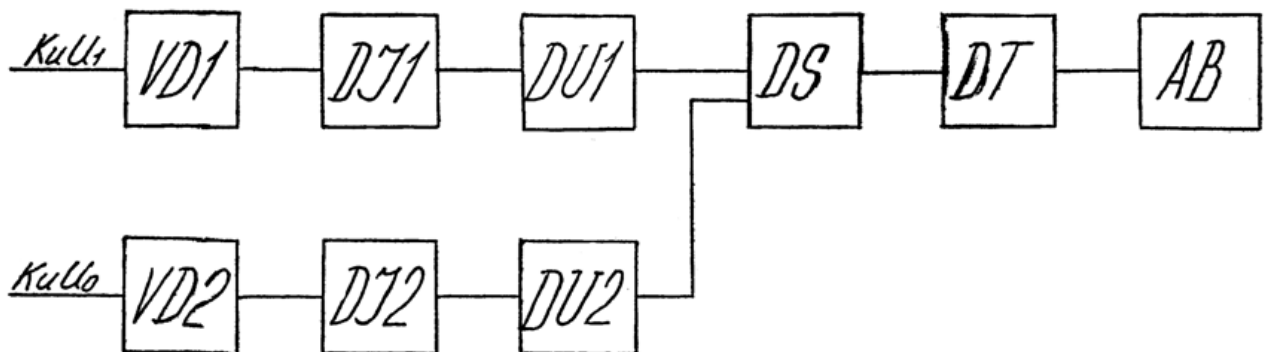


Рис. 1.39. Структурная схема пускового органа КВ блока АКС1

Структурная схема запрещающего органа  $KV_0$  приведена на рис. 1.40. На его вход подводится напряжение  $K_U U_0$ . Частотный диапазон определяется схемами ФАС и ФНЧ (как для органов направления мощности и пускового органа КВ). Выпрямитель  $VD$  – двухполупериодный. Реагирующий орган  $DS$  выполнен на основе регенеративного компаратора. Элемент  $DT$  задержки на срабатывание и триггерный исполнительный элемент  $AB$  выполнены аналогично соответствующим элементам пускового органа КВ.

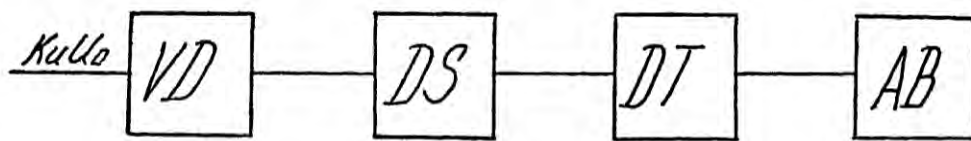


Рис. 1.40. Структурная схема запрещающего органа  $KV_0$  блока АКС1

Структурная схема разрешающего органа  $KS_0$  представлена на рис. 1.41. В основу принципа действия  $KS_0$  положено свойство колебательного звена частотного фильтра [10] по - разному реагировать на установившиеся и переходные процессы. Выбор частоты собственных колебаний этого звена на уровне 500 Гц, на порядок превышающего промышленную частоту, и постоянной времени звена, соответствующей максимально возможной постоянной времени затухающего по экспоненте грозового импульса, позволяет осуществить как отстройку от грозовых явлений, так и фиксацию КЗ.

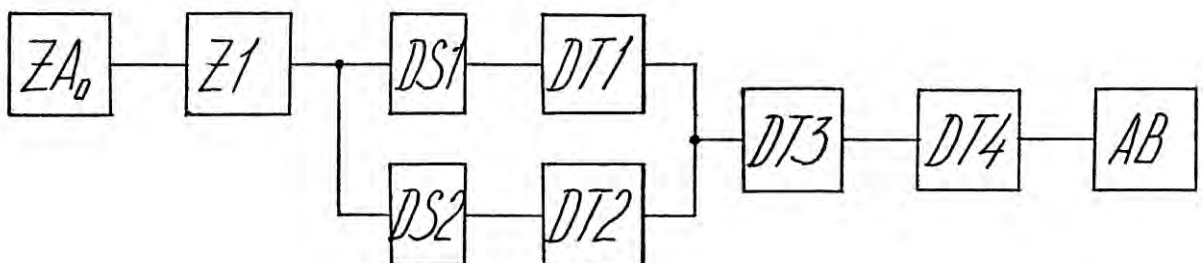


Рис. 1.41. Структурная схема разрешающего органа  $KS_0$  блока АКС1

В качестве колебательного звена использован фильтр  $Z1$  нижних частот второго порядка, подключенный к фильтру падающей волны нулевой

последовательности  $ZA_0$ . На выход фильтра  $Z1$  включены формирователи  $DS1$  и  $DS2$  прямоугольных импульсов положительных и отрицательных полувольт. Длительность импульсов контролируется элементами  $DT1$  и  $DT2$  задержки с выдержкой времени 3 мс. Сигнал с выходов  $DT1$  и  $DT2$  поступает на расширитель  $DT3$  импульсов и через элемент  $DT4$  задержки на срабатывание (с выдержками времени 0, 10 и 20 мс) передается на исполнительный блок АВ. Элемент  $DT4$  предназначен для отстройки от низкочастотных собственных колебаний в сети при грозовых разрядах на ВЛ СВН большой протяженности.

Блок контроля грозовых возмущений выполнен в виде модуля контроля грозы (МКГ), расположенного во второй кассете. На лицевой плате МКГ размещены контрольный разъем, светодиоды, сигнализирующие о срабатывании органов, переключатели " $t_{KB}, KV_0$ " и " $t_{KS} 0$ ", обеспечивающие соответственно регулировку времени задержки на срабатывание органов  $KV_0$  и  $KS_0$ ;

Структурная схема избирателя поврежденных фаз АК1[61] приведена на рис. 1.42. К фазным входам избирателя подводятся аварийные составляющие токов  $Ki_A$ ,  $Ki_B$  и  $Ki_C$ , компенсированные током нулевой последовательности. С помощью сумматора  $SM$  эти сигналы пофазно подаются на выпрямители  $VD$ , последовательно соединенные с интегрирующими элементами  $DJ$ , и далее - через управляемые ключи  $SA$  - к схеме фиксации минимальных величин  $D$  (миниселектор) и к двухвходовым компараторам  $E$  с триггерными выходами. Фиксация срабатывания обеспечивается в компараторах  $E$ , а возврат триггеров - от логической части защиты через заданное время после их срабатывания. В схеме избирателя поврежденных фаз от реле  $KQT$  положения отключено соответствующих фаз исключается из сравнения отключенная фаза. Избиратель поврежденных фаз АК1 размещен в модуле избирателя поврежденных фаз (МИБН) второй кассеты совместно с устройством блокировки при неисправностях цепей напряжения.

На лицевой части МИБН расположены светодиоды, сигнализирующие о неисправности цепей напряжения защиты, кнопка "Возврат" для ручного возврата триггеров в исходное состояние, резисторы " $K_0$ " и " $U_{оп}$ " переменного сопротивления, регулирующие соответственно коэффициент компенсации по току нулевой последовательности и величину опорного напряжения компараторов.

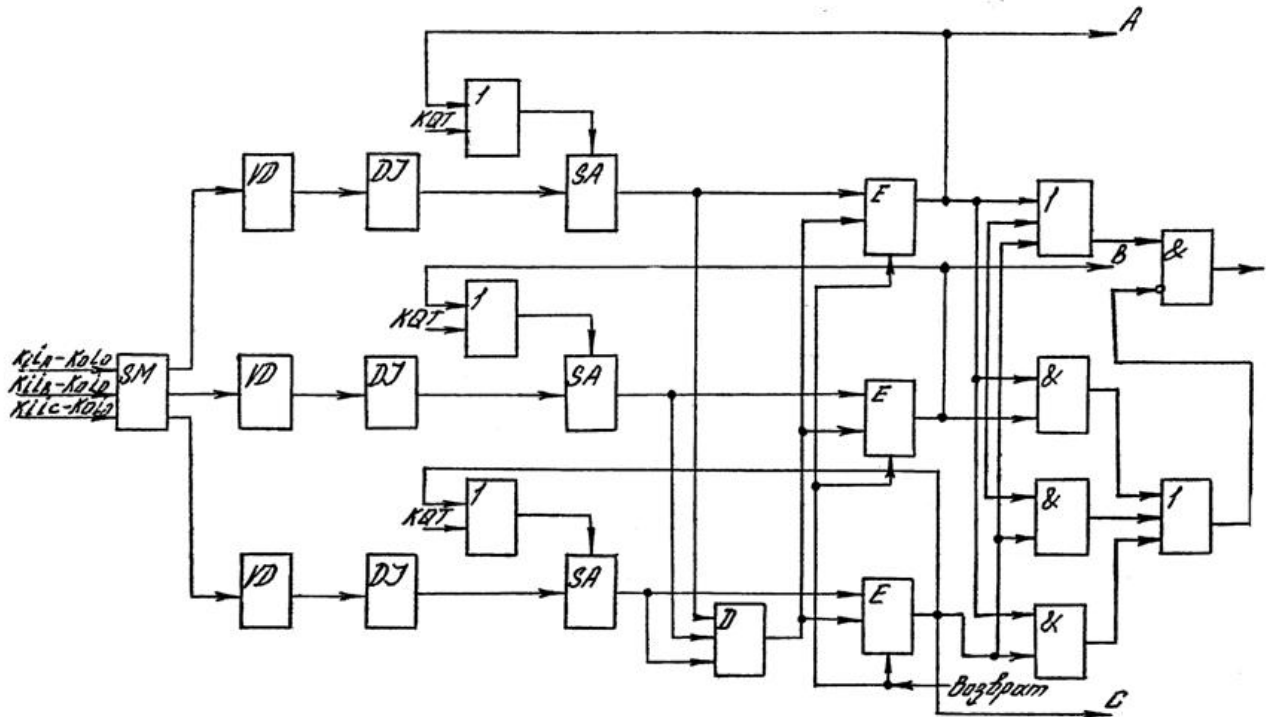


Рис. 1.42. Структурная схема избирателя поврежденных фаз AKS1

#### Устройство защиты при включении линии (AK2) [55].

Реле полного сопротивления (рис.1.43), вводимое в работу кратковременно на 3 секунды при включении выключателя, содержит фазоповоротное звено  $\Phi$  и блок сумматоров БС, формирующих электрические величины  $\dot{U} + KI$  и  $\dot{U} - KI$ , подводимые через последовательно соединенные полосовой фильтр ПФ2 и фильтр нижних частот ФНЧ2 к двухполупериодной логической схеме сравнения СС фаз. Устройство защиты AK2 размещено в модуле реле сопротивления (МРС) третьей кассеты.

На лицевой панели модуля размещены светодиод, разделительные переключки и резисторы для грубой и плавной регулировки характеристики реле сопротивления.

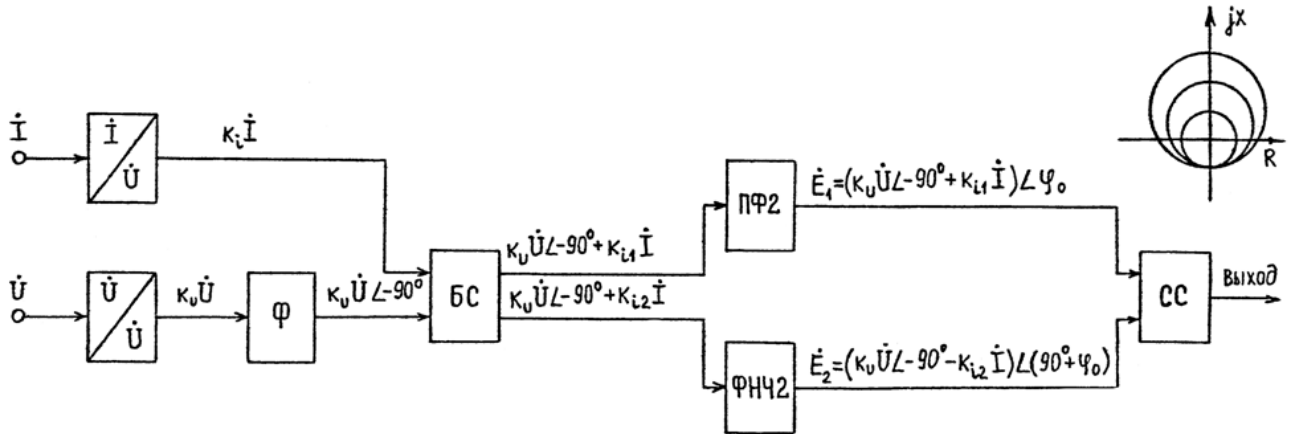


Рис. 1.43. Структурная схема устройства защиты при опробовании линии АК2

В третьей каскаде панели защиты расположены также модули логики, контроля сигнализации (МЛКС), выходных реле (МВП), отключения (МО), регистрации (МР) и сигнализации направленности (МСН).

### 1.5.2. Схема и параметры электродинамической модели

При испытаниях моделировалась электрическая схема электрической сети напряжением 1150 кВ [62], схема и параметры элементов которой представлены на рис.1.44. На рис.1.45 приведена схема модели электропередачи. Два генерирующих узла Г1 и Г3 представлены модельными генераторами типа МТ-5-1500, узел Г2 - модельным генератором МГ-15-1000, а узел Г4 – шинами электрической сети Мосэнерго за соответствующим сопротивлением. Все генераторы снабжены автоматическими регуляторами возбуждения сильного действия. Каждый из узлов нагрузки состоял из электролампового реостата и асинхронного двигателя. Мощность, потребляемая узлами нагрузки, могла изменяться таким образом, чтобы в сочетании с изменением генерируемой мощности в узле обеспечить перетоки по линиям, необходимые по условиям исследования. ЛЭП воспроизводятся в виде цепочечной схемы замещения. Каждая ячейка одноцепного участка ЛЭП моделировала примерно 50 км линии, а двухцепного - 40 км.



Модель оснащена соответствующей измерительной и регистрирующей аппаратурой. Измерительные органы испытываемой защиты были подключены к трансформаторам тока и напряжения, установленным по концам ЛЭП. Первый полукомплект защиты подключался к трансформаторам тока 2ТТ и трансформаторам напряжения 1ТН, второй полукомплект - к трансформаторам тока 4ТТ и трансформаторам напряжения 2ТН (рис.1.45).

На рис.1.46 приведена схема замещения модели с указанием параметров элементов, составляющих модель. Выбор масштабов моделирования, расчет и подробное описание схем и параметров элементов модели приведены в Приложении 2. В ходе испытаний конфигурация схемы электропередачи и длина ЛЭП варьировались. Каждая новая схема собиралась из указанных на схеме рис. 1.45 генерирующих узлов. При осуществлении КЗ использовалось тиристорное коммутирующее устройство с выбором моментов коммутации, позволяющих выполнять КЗ всех видов при заданном значении фазового угла напряжения в месте КЗ.

При проверке эффективности функционирования защиты на электродинамической модели (ЭДМ) в нормальных и аварийных режимах работы энергосистемы с ВЛ СВН в исследованиях волновой защиты применялись:

шлейфовый осциллограф Н – 010 М для записи токов и напряжений , выходных напряжений схем сравнения (СС), а также выходных напряжений ОНМ защиты - KW1, KW2 (Б1,О1,Б2 и О2), запрещающего органа KV<sub>0</sub>, разрешающего органа KS<sub>0</sub> и избирателя поврежденных фаз АК1 (собственные частоты шлейфов - от 500 Гц до 2 кГц);

электронные запоминающие осциллографы С8-13 (однолучевые) и С8-17 (двухлучевые) для записи переходных процессов в сумматорах волновых каналов, в цепях МАСТ, МАСН и схем сравнения KW1 и KW2;

электронный осциллограф С1-67 (двухлучевой) для контроля процессов на входе защиты и в ее цепях;

цифровой электронный вольтметр В7-16;  
анализатор гармоник 2107 токов и напряжений в цепях МАСТ и МАСН.

До начала исследований на ЭДМ проводилось уточнение настройки фильтрующих звеньев в МАСТ и МАСН с помощью частотомера типа ЧЗ-57 и звукового генератора типа ГЗ-34;  
проверка чувствительности органов KW1 и KW2 генератором однократных импульсов типа ГИНТ по разработке ЭНИН;  
исследование чувствительности органов KW1 и KW2 с помощью устройства включения в заданную фазу типа УВЗФ (разработка института «Энергосетьпроект»).

### 1.5.3. Испытания образца защиты

На первом этапе испытаний исследовались основные органы полуккомплекта защиты, в том числе органы направления мощности первого (KW1) и второго (KW2) волновых каналов, разрешающий  $KS_0$  и запрещающий  $KV_0$  органы блока контроля грозовых возмущений AKS1, избиратель поврежденных фаз АК1 и устройство защиты при опробовании линии АК2. Схемы ЭДМ, использовавшиеся в опытах, приведены на рис.1.47.

Уровни гармонических составляющих напряжения  $U_A$  и тока  $i_A$  на входе защиты, а также напряжения  $U_{A,TV}$  на входе ФАС защиты после подключения измерительных цепей полуккомплекта к трансформаторам тока и напряжения схемы ЭДМ представлены в табл. 1.1. По результатам измерений (табл. 1.1) отмечены повышенные небалансы напряжений и токов на выходах фильтров аварийных составляющих (ФАС) в нормальном режиме, в отдельных случаях приводившие к действию защиты на блокировку при максимальной чувствительности органов направления мощности KW1 и KW2.

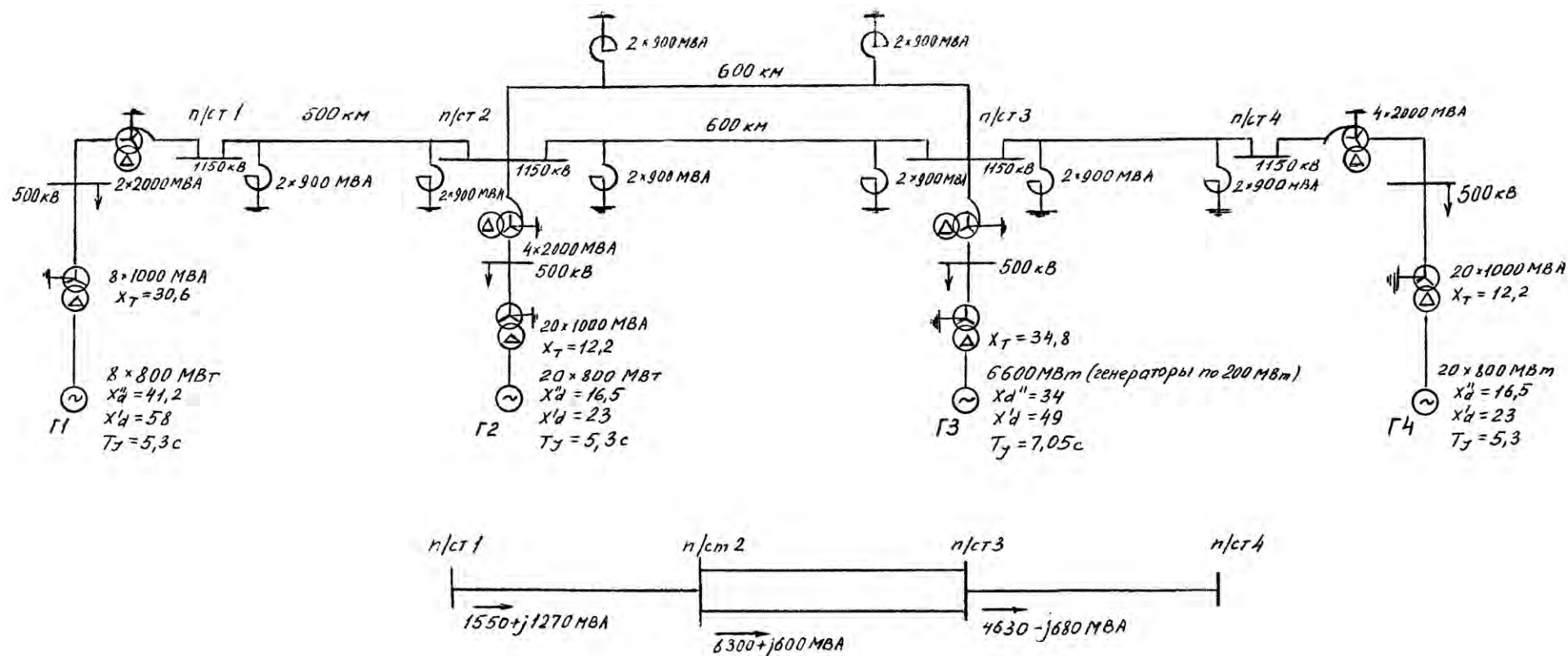


Рис. 1.44. Условная схема электропередачи 1150 кВ для моделирования на электродинамической модели с целью выполнения исследований устройств релейной защиты и линейной автоматики. На схеме указаны трехфазные мощности автотрансформаторов, трансформаторов. Реактансы генераторов и трансформаторов даны в Омах и приведены к напряжению 1150 кВ. Сопротивление взаимной индукции нулевой последовательности между параллельными линиями можно принять равным  $1,5 X_1$ . Реактансы автотрансформатора 1150 кВ мощность 2000 МВА:  $X_{АТВ}=79,2$  Ом,  $X_{АТН}=155$  Ом,  $X_{АТС}=0$ . Удельные параметры ВЛ 1150 кВ:

- а) Прямая последовательность:  $X_1=0,268$  Ом/км,  $R_1=0,00135$  Ом/км,  $b_1=4,45 \cdot 10^{-6}$  1/Ом/км;  
 б) Нулевая последовательность:  $X_0=1,05$  Ом/км,  $b_0=3,15 \cdot 10^{-6}$  1/Ом/км

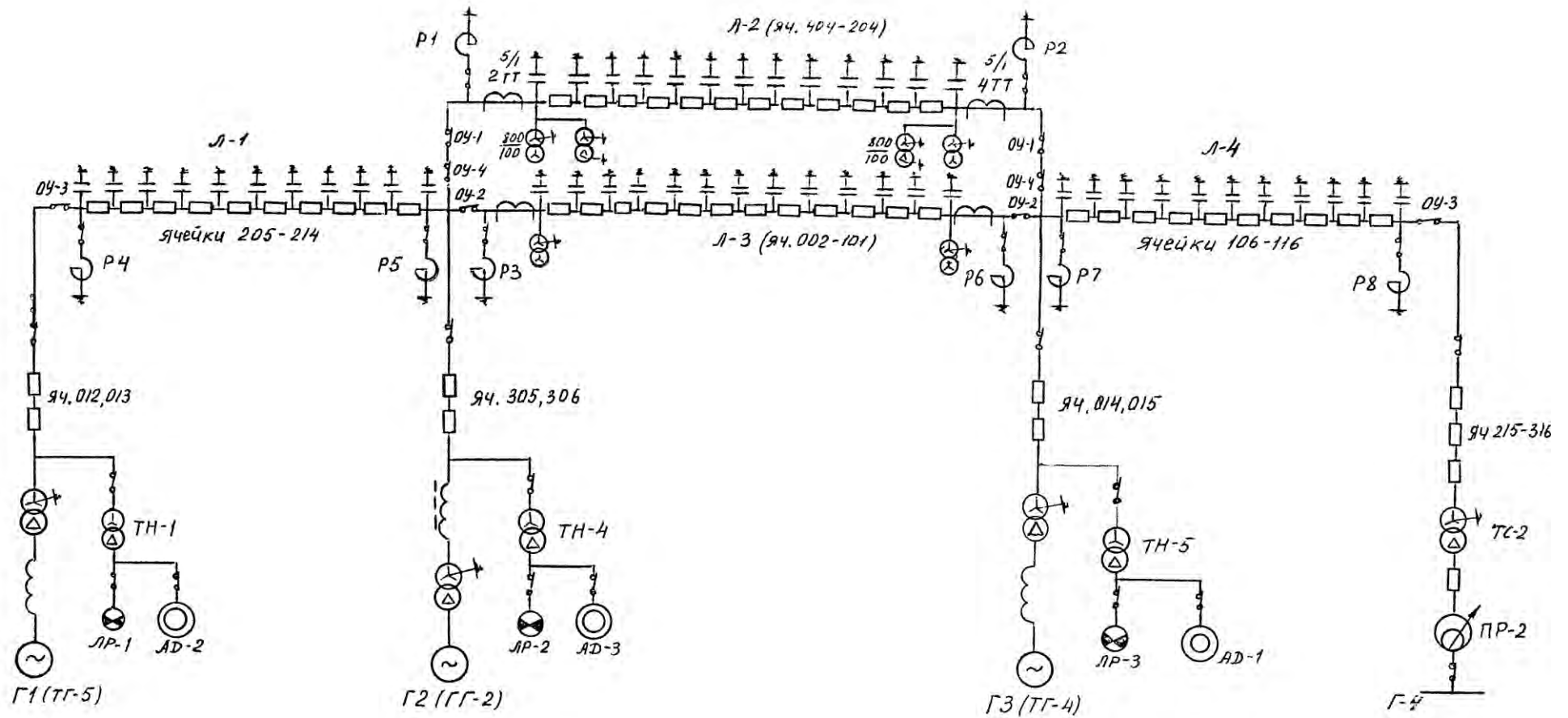


Рис. 1.45. Схема модели электропередачи 1150 кВ

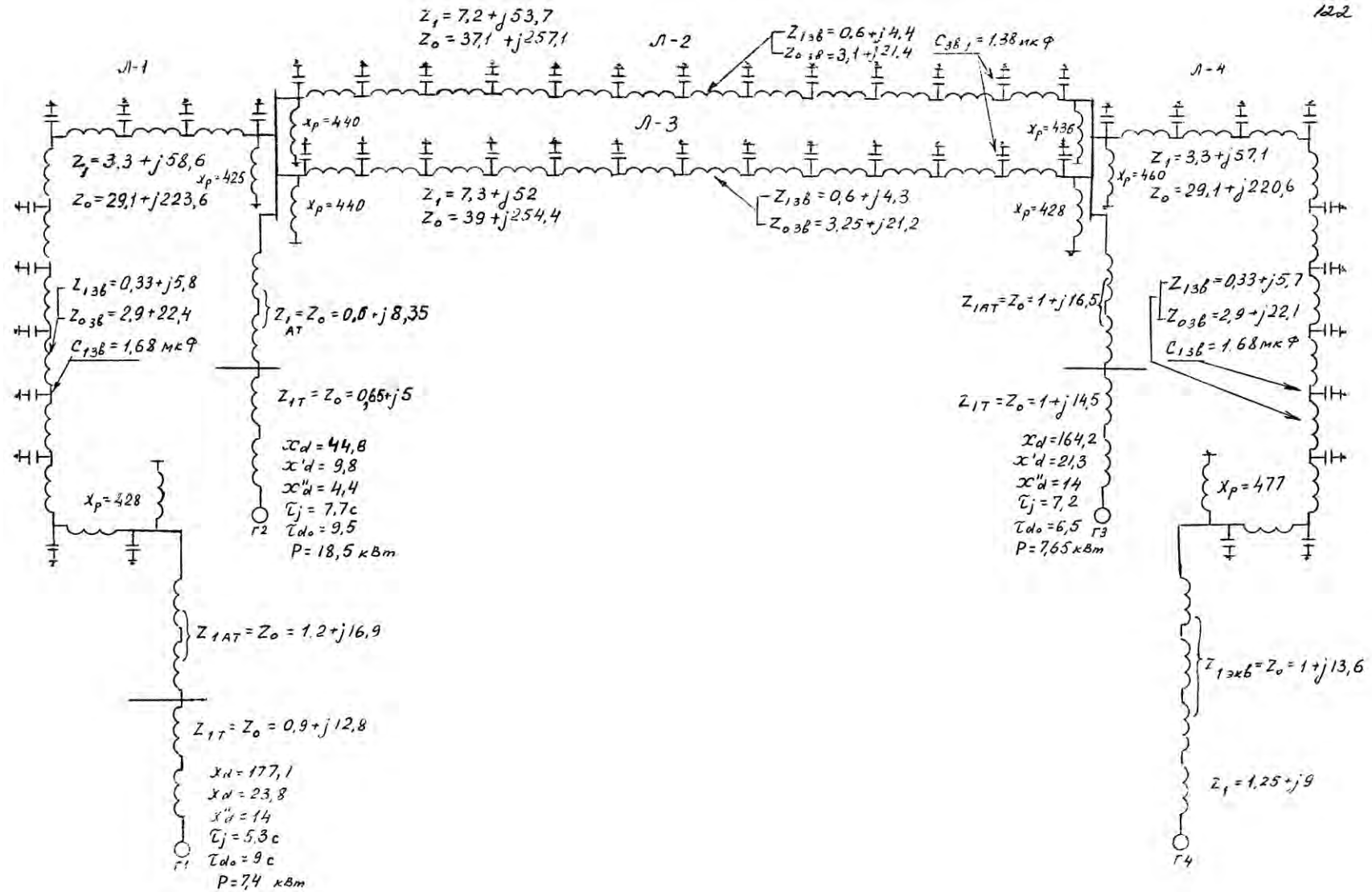


Рис. 1.46. Схема замещения модели электропередачи ВЛ 1150 кВ (значения параметров всех элементов схемы даны в омах, приведенных к напряжению модели линии)

Таблица 1.1.

Частота, Гц	50	100	150	250	350	450	550	650	950
$U_{A,max}, B$	80,0	0,47	0,55	0,32	0,18	0,1	0,12	0,1	0,15
$\frac{U_{A,max гарм}}{U_{A,max 50 Гц}}, \%$	100	0,59	0,69	0,4	0,225	0,125			
$U_{A,TV,max}, B$	13	0,076	0,35	0,033	0,035	0,02		0,017	0,025
$\frac{U_{A,TV,max гарм}}{U_{A,TV,max 50 Гц}}, \%$	100	0,59	2,7	0,25	0,27	0,15		0,13	0,19
$i_{Amax}, A$	0,45	0,0038	0,007	0,0035	$0,8 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$0,83 \cdot 10^{-3}$	$1,43 \cdot 10^{-3}$	
$\frac{i_{Amax гарм}}{i_{Amax 50 Гц}}, \%$	100	0,845	1,55	0,78	$1,78 \cdot 10^{-3}$				

Уровень пятой гармоники в напряжении и токе ЭДМ, сопоставимый с уровнем третьей гармоники, обусловили наличие в схеме ФАС фильтрующих звеньев, подавляющими частоту 250 Гц. Результаты последующих измерений напряжения на фазных выходах ФАСН в режиме работы от сети подтвердили эффективность проведенного мероприятия. Повышенное напряжение небаланса на выходе сумматора нулевого волнового канала в нормальном режиме работы модели определило необходимость установки на входе разрешающего органа  $KS_0$  блока АКС1 фильтрующего звена, подавляющего частоту 150 Гц.

Отличительная особенность этапа заключалась в исследовании чувствительности защиты на ВЛ СВН большой протяженности (порядка 500 км). Было осуществлено моделирование порядка 500 различного вида КЗ в точках ВЛ, расположенных на различных расстояниях от места установки защиты как в защищаемом направлении, так и при внешних КЗ. Около 420 опытов удалось зафиксировать шлейфовым осциллографом Н -010 М.

В опытах КЗ на защищаемой линии по схеме ЭДМ № 2 (рис. 1.47) с расстоянием до точки КЗ, равным 250 км от места установки защиты, при положениях по Ч по току 0,25 и по напряжению 0,5 и  $t_{\phi} = 0,5$  мс (рис.1.48), а также в нескольких опытах КЗ при  $t_{\phi} = 0,75$  мс не было зафиксировано отказов и неселективных действий, а быстродействие защиты оценивалось единицами миллисекунд. То же самое наблюдалось и в опытах КЗ в той же точке, но при переходе к положению по Ч по напряжению до 0,25 (рис.1.49). Перенос точки КЗ на 500 км от места установки защиты при положениях по Ч по току 0,25 и по напряжению 0,5 и  $t_{\phi} = 0,5$  мс также не приводило к нарушению функционирования защиты (рис.1.50). И лишь при увеличении  $t_{\phi}$  до 0,75 мс зафиксировано действие ОНМ на блокирование, что вызвано недостаточной чувствительностью ОНМ при параметрах срабатывания, соответствующих данному положению по чувствительности.

Выбранное время фиксации  $t_{\phi} = 250$  мкс обеспечило правильное функционирование органов направления мощности при близких КЗ в зоне и вне зоны (рис.1.51, 1.53 и 1.54) и удаленных КЗ (рис.1.52) ( $L_{КЗ} = 500$  км) по схемам ЭДМ № 1 и № 2 (рис. 1.47). Исключение составили результаты некоторых опытов удаленных КЗ ( $L_{КЗ} = 500$  км) в схеме № 3 (например, КЗ на землю фазы А при  $\psi_A = 0^{\circ}$  и  $160^{\circ}$ ), когда из-за недостаточной чувствительности ОНМ защита так же блокировалась. Переход на более чувствительные параметры срабатывания устранил этот недостаток.

Результаты исследований варианта защиты с  $t_{\phi} = 250$  мкс на ВЛ длиной 39 км (схема модели № 5) указали на необходимость дополнительного увеличения чувствительности ОНМ.

Работа органов направления мощности КВ1 и КВ2 была проверена в схеме ЭДМ № I при включении защищаемой на холостой ход (рис.1.55) и под нагрузку (рис.1.56 и 1.57) с учетом разновременностей включения выключателей фаз (0, 5, 10 мс; 0,10, 10 мс; 0,10, 15 мс и 0,10, 20 мс).

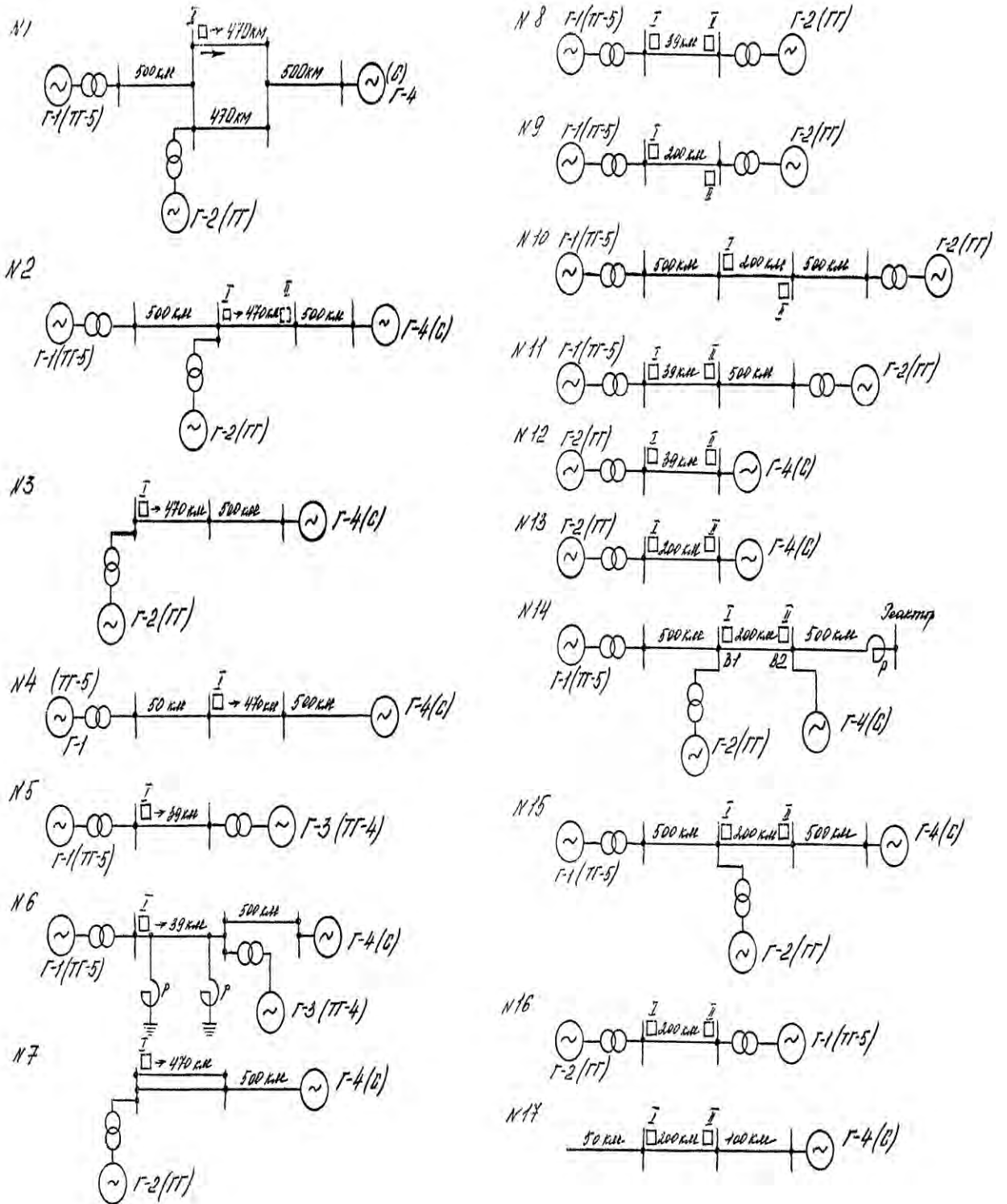


Рис. 1.47. Схемы ЭДМ при испытаниях защиты

В схеме ЭДМ № 1 (рис.1.47) было смоделировано несколько КЗ на землю фазы А ( $L_{КЗ} = 500 \text{ км}$ ) через переходное сопротивление, равное 40 Ом,



при различных углах  $\psi_A$ . Действие органов направления мощности KW1 и KW2 было правильным (рис.1.58).

Избиратель поврежденных фаз АК1 в серии опытов однофазных КЗ срабатывал на отключение поврежденной фазы. При междуфазных КЗ, а также при переходах однофазных КЗ в двухфазные КЗ при различных углах коммутации на ВЛ с  $L_{КЗ} = 0$  (рис.1.59),  $L_{КЗ} = 500$  км (рис.1.60) и  $L_{КЗ} = 250$  км (рис.1.61) избиратель также функционировал правильно. Устройство защиты при включении АК2 было успешно испытано при опытах включения защищаемой ЛЭП на КЗ в начале, конце и средней части ВЛ длиной 500 км при изменении сопротивления срабатывания  $Z_Y$  от 35 до 100 Ом.

#### 1.5.4. Испытания образцов защиты, установленных по концам ВЛ

На втором этапе испытаний волновой защиты на ЭДМ проводилась проверка измерительных органов полукомплектов защиты, установленных с двух сторон защищаемой ВЛ. Первый полукомплект устанавливался в той же точке ВЛ, что и на первом этапе, а второй - с противоположной стороны ВЛ (рис.1.47). К началу второго этапа испытаний была проведена работа по повышению помехозащищенности органов направления KW1 и KW2 с переходом на время фиксации  $t_\phi = 0,5$  мс. При этом частота среза фильтрующего звена ФНЧ снижена до 500 Гц. Проверкой настройки фильтрующих звеньев в ФАС установлено, что небалансы нормального режима на выходе трехзвенного фильтра на промышленной частоте и при ее отклонениях на  $\pm 5$  Гц несколько превышают расчетные (на  $f = 50$  Гц - 0,129 % вместо 0,0008 %, на  $f = 45$  Гц - 1,3 % вместо 0,47 %, на  $f = 55$  Гц - 1,64 % вместо 0,35 %), а фильтрующие звенья 150 Гц и 250 Гц имеют достаточно большую крутизну амплитудно-частотной характеристики, обуславливающей возрастание небалансов при этих отклонениях промышленной частоты.

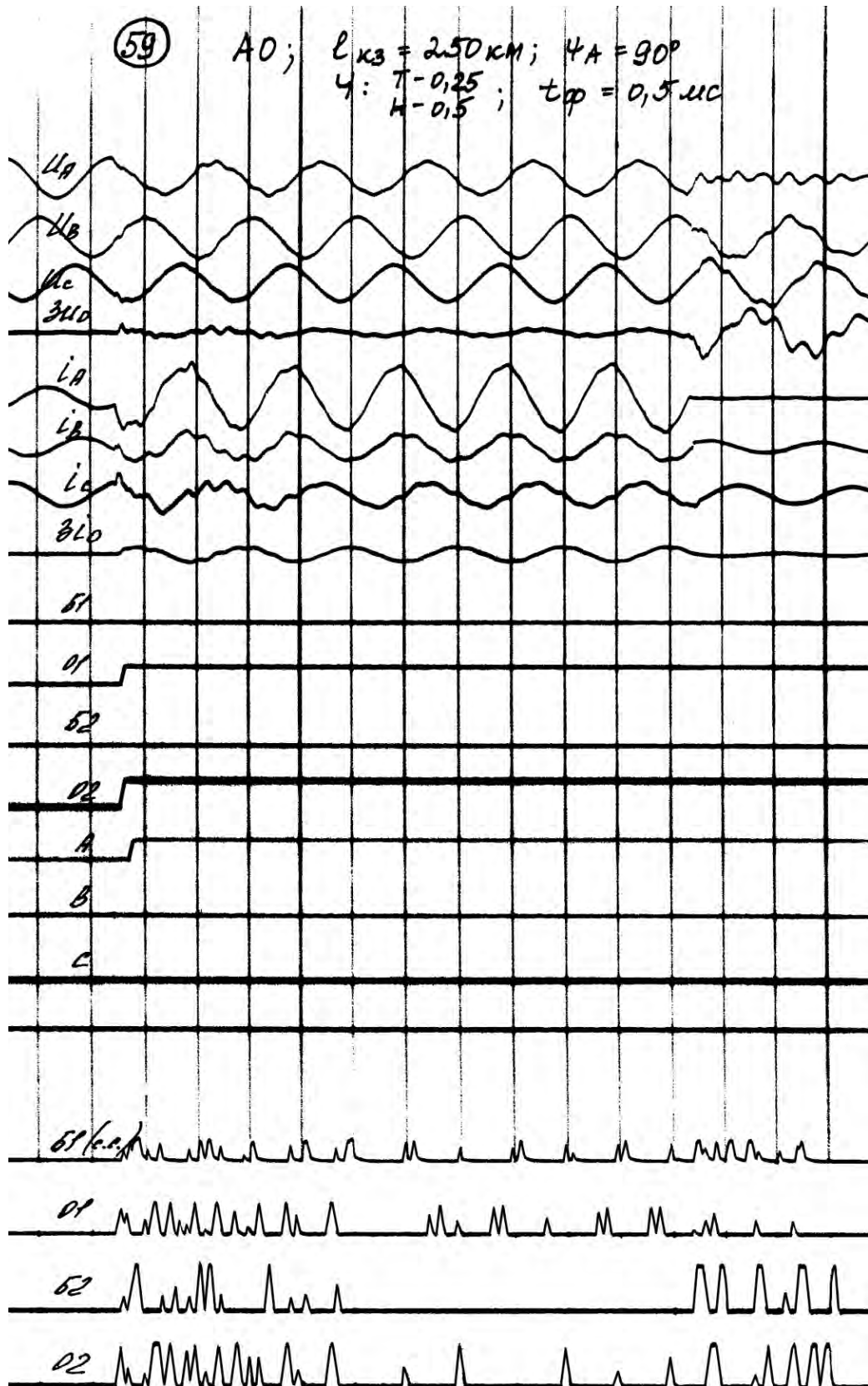


Рис. 1.48. Опыт КЗ на защищаемой линии по схеме ЭДМ № 3 (рис. 1.47) на расстоянии, равном 250 км от места установки защиты до точки КЗ, при положениях по Ч по току 0,25 и по напряжению 0,5 и  $t_{\phi} = 0,5 \text{ мс}$

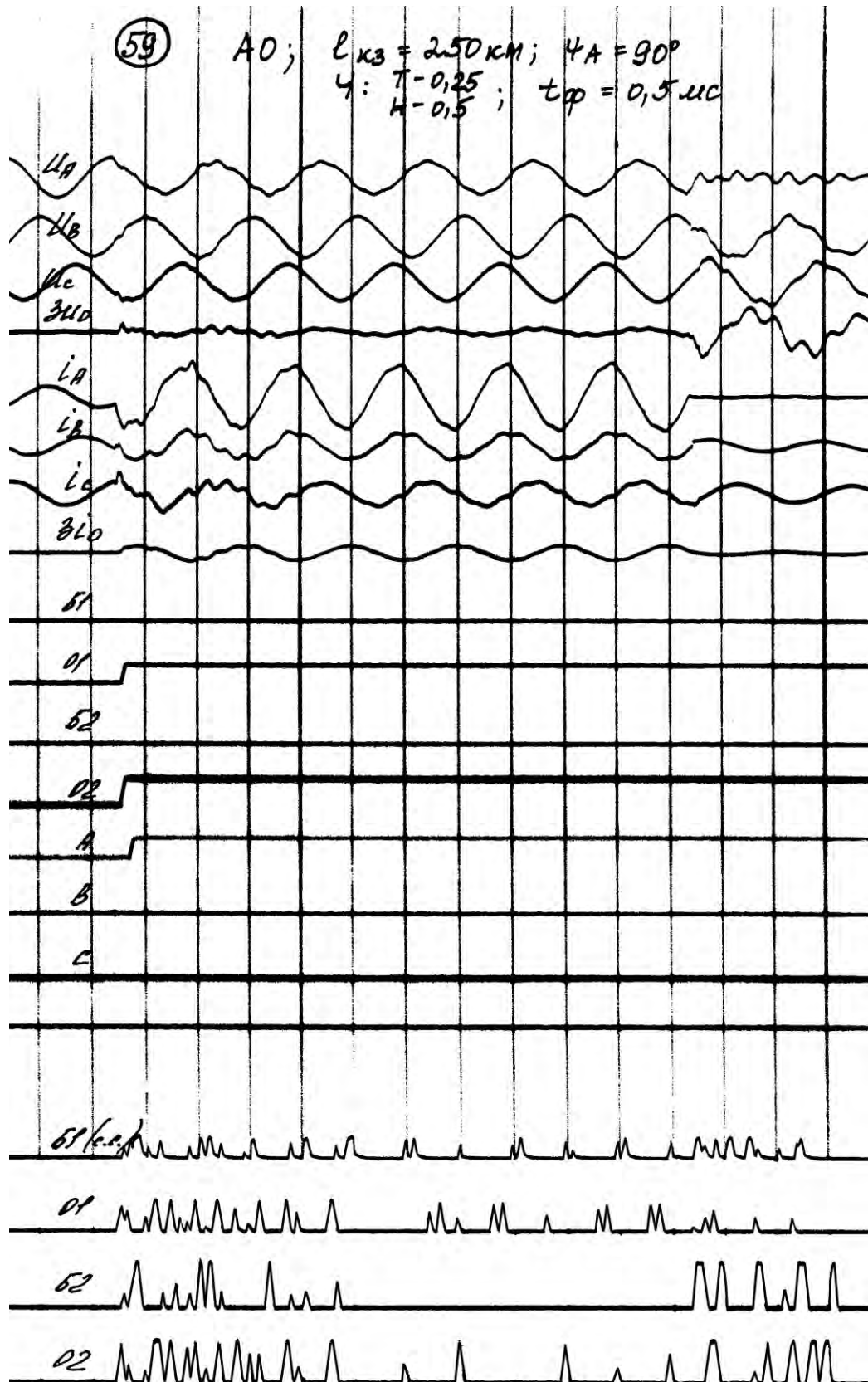


Рис. 1.49. Опыт КЗ на защищаемой линии по схеме ЭДМ № 3 (рис. 1.47) на расстоянии, равном 250 км от места установки защиты до точки КЗ, при положениях по Ч по току 0,25 и по напряжению 0,25 и  $t_{\phi} = 0,5$  мс

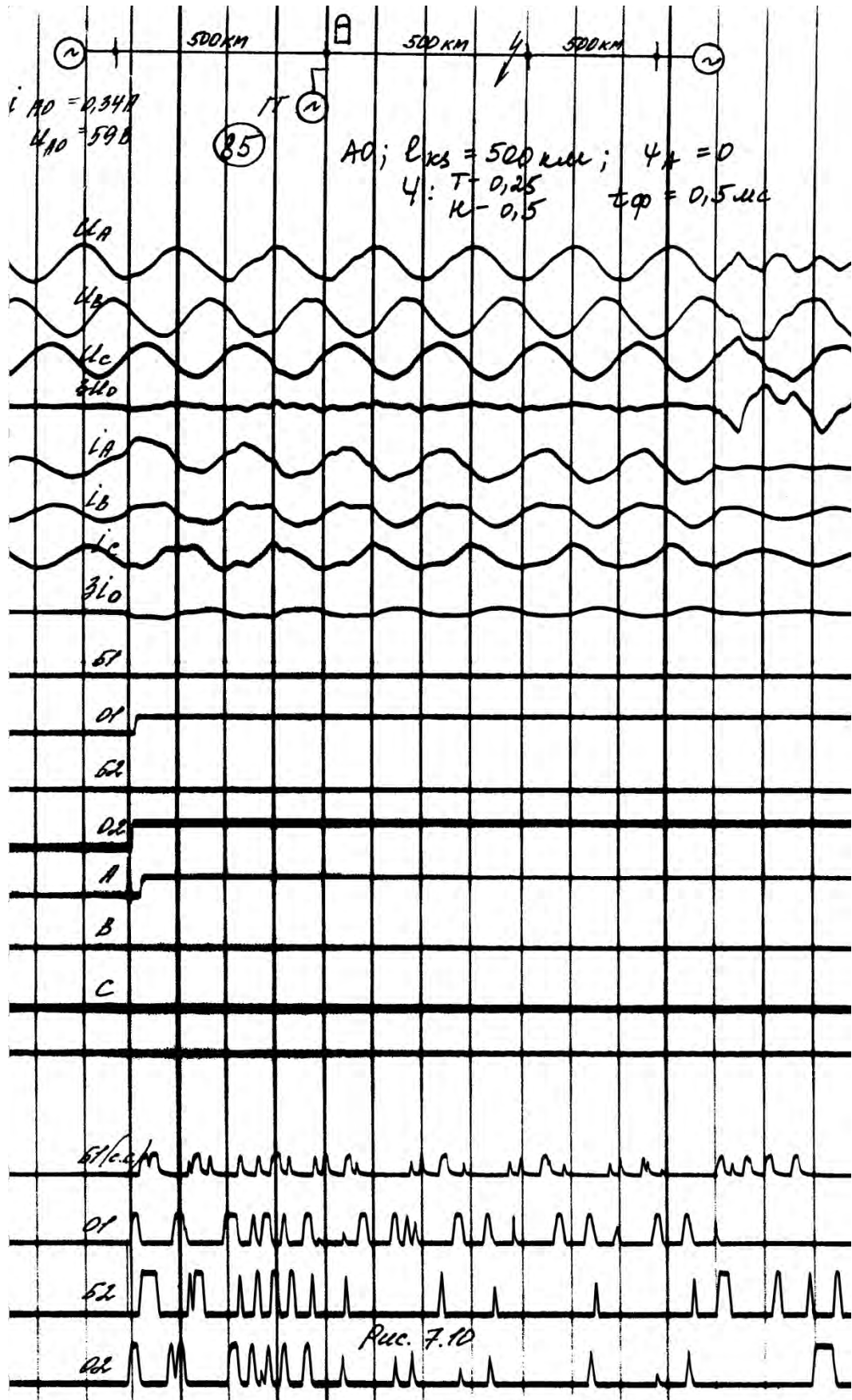


Рис. 1.50. Опыт КЗ на защищаемой линии по схеме ЭДМ № 3 (рис. 1.47) на расстоянии, равном 500 км от места установки защиты до точки КЗ, при положениях по Ч по току 0,25 и по напряжению 0,5 и  $t_{\phi} = 0,5$  мс

Близкие КЗ в исходной первичной схеме модели

( $A_0$ ;  $\rho_{кз} = 0$ ;  $\chi - \frac{T}{H} \frac{I:2}{I:2}$ )

ВЫХОДЫ СУММАТОРОВ ВОЛНОВЫХ КАНАЛОВ В ОНМ  
( $P = 0,2$  мс/дел;  $\chi_{лучей} = 0,5$  В/дел)

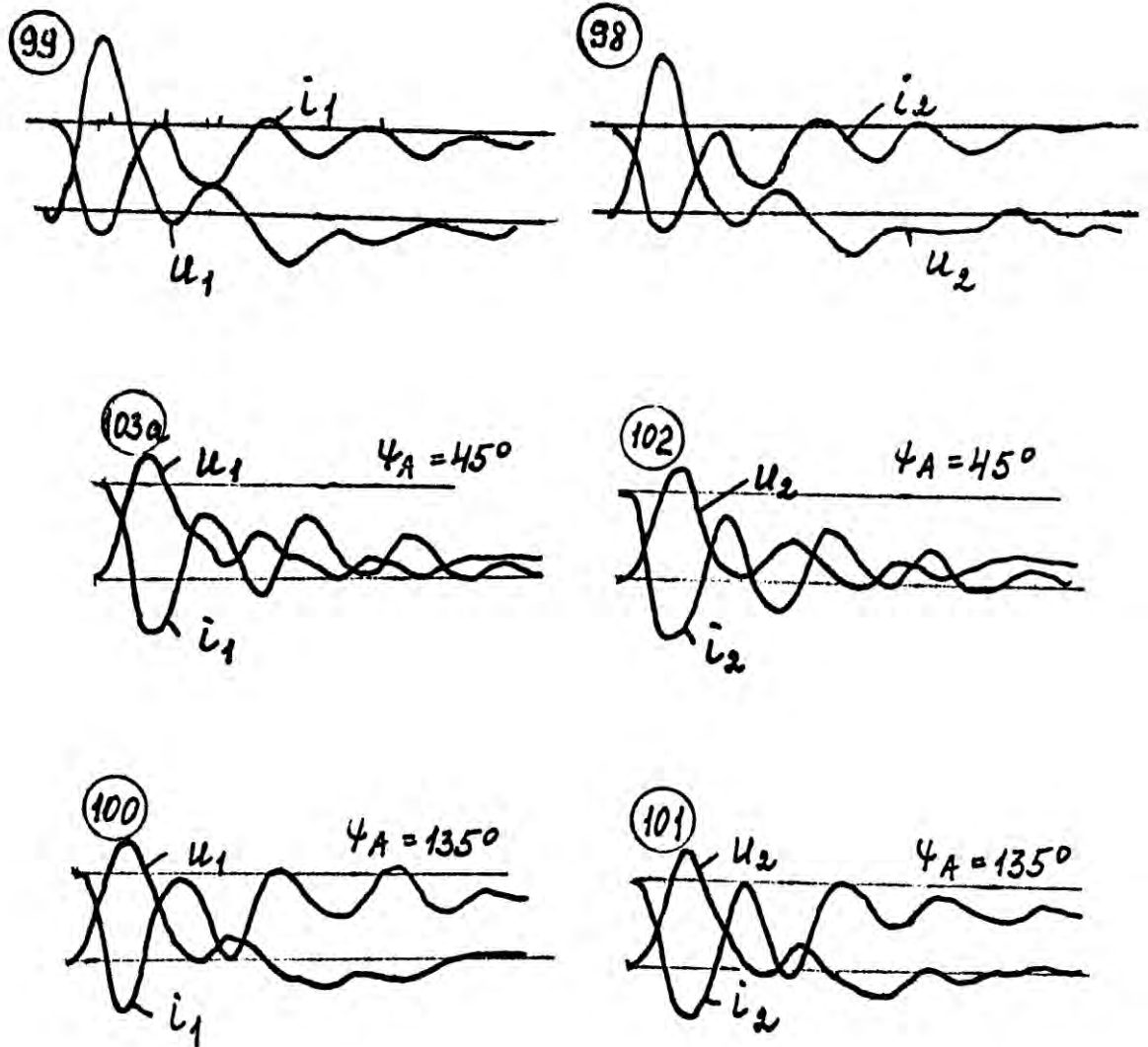


Рис. 1.51. Опыт КЗ на защищаемой линии по схеме ЭДМ № 1 и № 2 при КЗ вблизи места установки защиты, при положениях по  $\chi$  по току 0,5 и по напряжению 0,5 и  $t_\phi = 0,25$  мс

Удаленные КЗ на защищаемой линии в исходной первичной  
схеме модели ( $A0$ ;  $l_{кз} = 500\text{км}$ )

ВЫХОДЫ СУММАТОРОВ ВОЛНОВЫХ КАНАЛОВ в ОНМ при  $\frac{U}{I} = \frac{1}{2}$   
( $P - I$  мс/дел)



ВЫХОДЫ СХЕМЫ СРАВНЕНИЯ в ОНМ ( $P - I$  мс/дел)

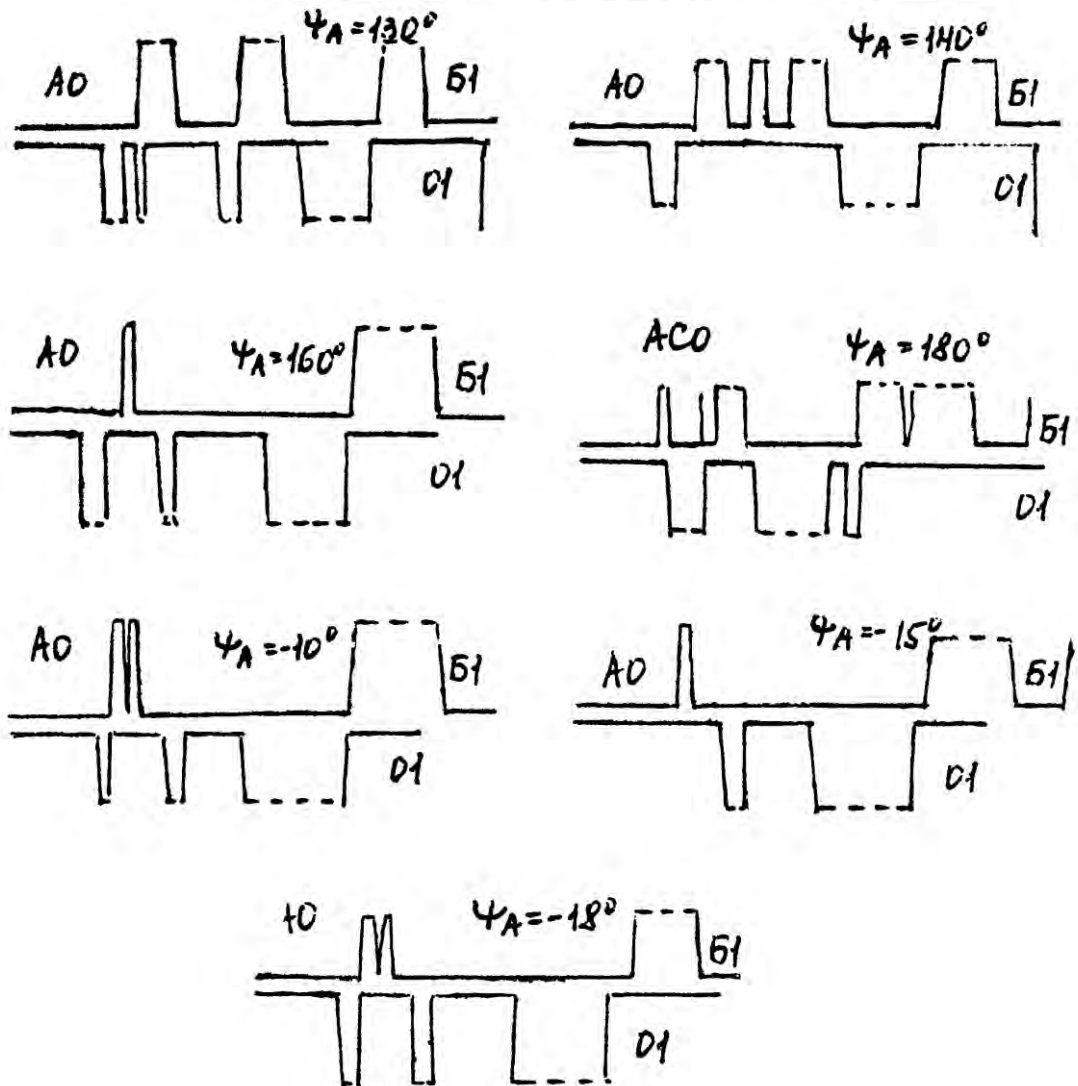
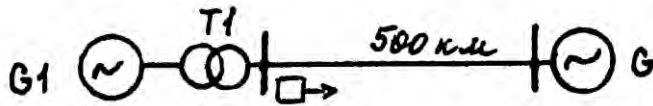


Рис. 1.52. Опыт КЗ на защищаемой линии по схеме ЭДМ № 1 и № 2  
(рис. 1.47) на расстоянии, равном 500 км от места установки защиты до точки  
КЗ, при положениях по  $\psi$  по току 0,5 и по напряжению 0,5 и  $t_{\phi} = 0,25$  мс



$$l_{кз} = 0$$

Близкое КЗ на защищаемой ВЛ ( $\Delta 0$ ;  $l_{кз} = 0$ )

ВЫХОДЫ СХЕМЫ СРАВНЕНИЯ (Р - 0,2 мс/дел)

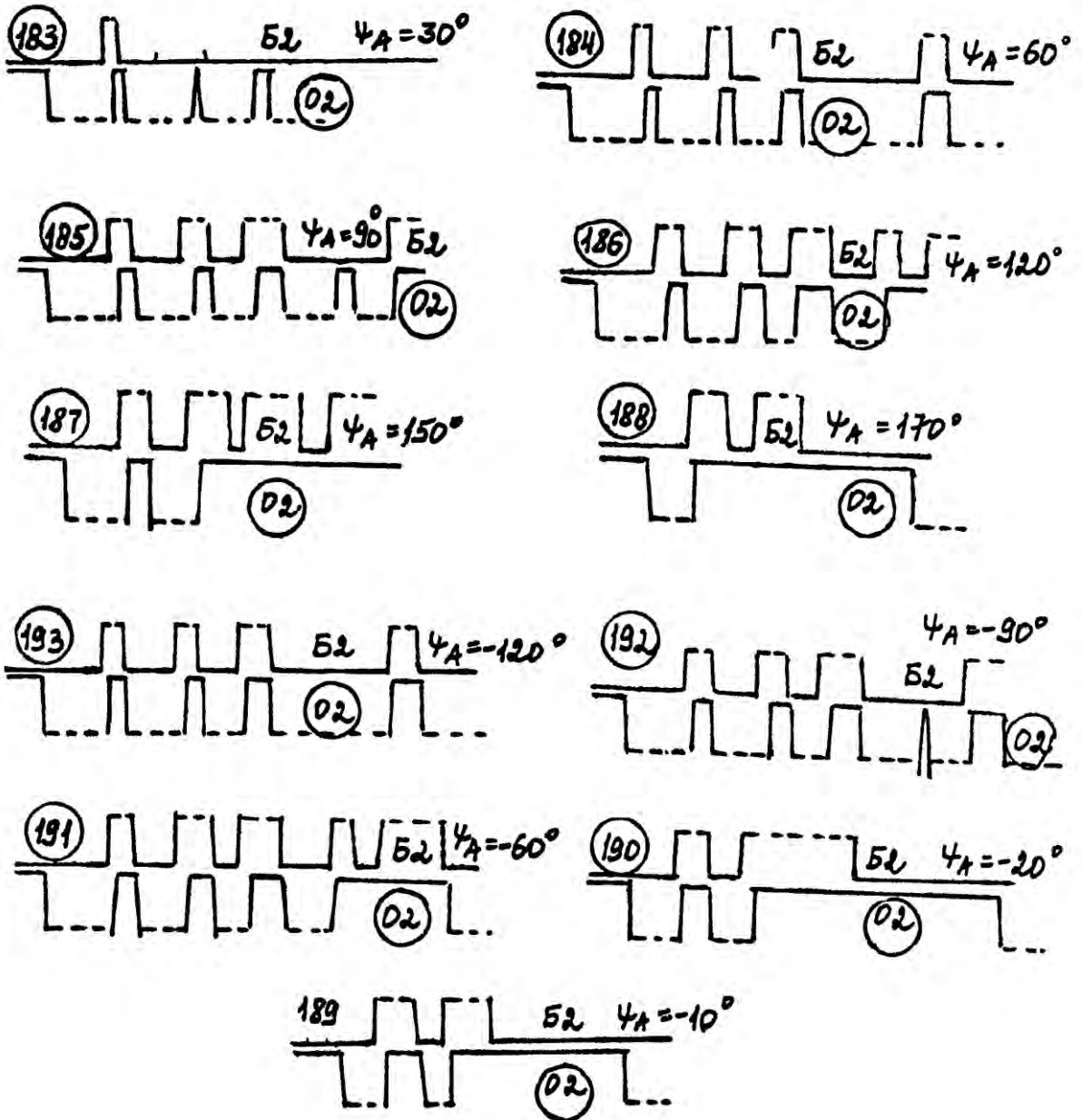


Рис. 1.53. Опыт КЗ на защищаемой линии по схеме ЭДМ № 1 и № 2 (рис. 1.47) при КЗ вблизи места установки защиты, при положениях по Ч по току 0,5 и по напряжению 0,5 и  $t_{\phi} = 0,25$  мс





КЗ на защищаемой ВЛ  
 ВЫХОДЫ СХЕМЫ СРАВНЕНИЯ (  $\ell_{кв} = 0$  )  
 (  $P = 0,2$  мс/дел )

АО

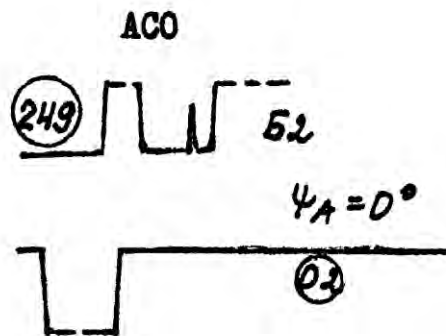
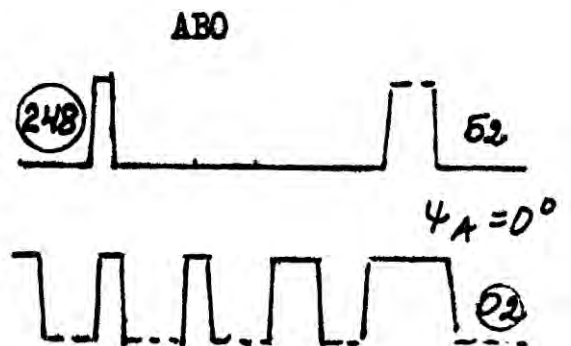
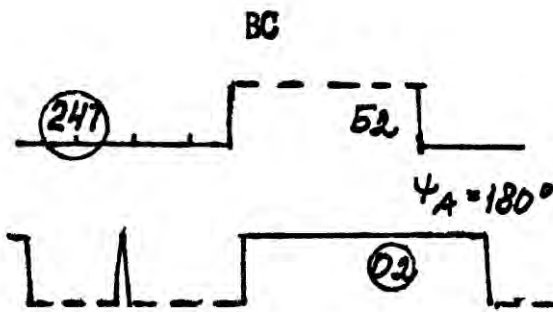
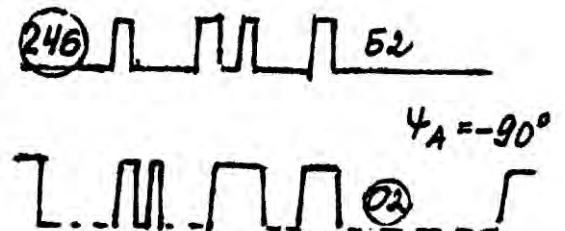
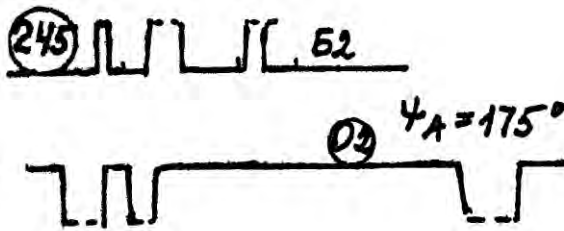
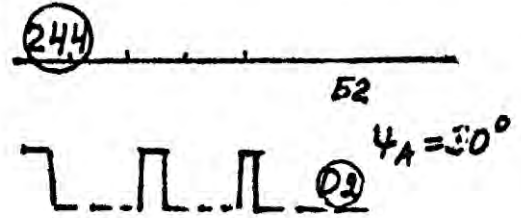
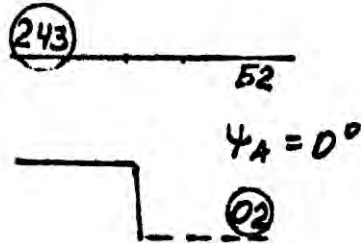


Рис. 1.54. Опыт КЗ на защищаемой линии по схеме ЭДМ № 1 и № 2 (рис. 1.47) при КЗ вблизи места установки защиты, при положениях по Ч по току 0,5 и по напряжению 0,5 и  $t_\phi = 0,25$  мс



Разработанный орган сигнализации направленности (МСН), на выходе которого установлен светодиод, позволил проверить правильность подключения органов направления мощности KW1 и KW2 к измерительным трансформаторам тока и напряжения. С помощью вспомогательного генератора импульсов ГИИТ устанавливались однополярные входные клеммы фазных тока и напряжения защиты для обеспечения условий срабатывания KW1 и KW2 и выходного светодиода МСН. Подключение цепей тока и напряжения ОНМ к измерительным трансформаторам осуществлялось таким образом, чтобы срабатывание светодиода МСН происходило при перетоке активной мощности в направлении из ВЛ к шинам в нормальном режиме защищаемой линии, а при перетоке в противоположном направлении - нет. Правильность ориентирования защиты в защищаемом направлении была подтверждена опытами КЗ на защищаемой линии.

Чувствительность защиты к КЗ фазы А на землю в различных точках ВЛ в защищаемой зоне, в том числе и при  $L_{КЗ} = 500$  км в схеме ЭДМ № 2 (рис.1.47) была проверена при различных положениях по чувствительности. При этом определено, что требованиям по чувствительности органов KW1, KW2 и KV<sub>0</sub> удовлетворяют положения 1,0 и 0,5 по чувствительности по току и напряжению. На примере схемы ЭДМ № 11 (рис.1.47) определено, что при номинальной частоте, а также при отклонениях частоты в пределах 45 Гц ÷ 52 Гц измерительные органы защиты, реагирующие на токи и напряжения переходного процесса, отстроены от небаланса. За пределами указанных частот ОНМ действовали на блокировку.

При опытах КЗ, общее число которых составило около 500, волновая защита функционировала, в основном, правильно. В опытах внешних КЗ для первого полукомплекта по схеме ЭДМ № 10 (рис.1.47) в положении 0,5 по Ч и времени фиксации 0,5 мс первый полукомплект защиты действовал на блокирование, а второй полукомплект при КЗ фазы А на землю и  $\psi_A = 155^\circ \div 160^\circ$  также действовал на блокировку, несмотря на то, что для него это замыкание соответствовало действию ОНМ на срабатывание. При

повышении чувствительности до 1 ОНМ стал действовать на срабатывание (рис.1.62). При внешних для второго полукомплекта КЗ оба полукомплекта правильно функционировали во всех опытах.

В схеме ЭДМ № 13 (рис.1.47) на ВЛ длиной 200 км с двухсторонним питанием, в частности при близких (рис. 1.63) и удаленных КЗ (рис.1.64), в схеме ЭДМ № 14 (рис.1.47) при близких КЗ на ВЛ длиной 200 км с двухсторонним питанием и примыкающими ВЛ длиной 500 км, с тремя источниками питания и шунтирующим реактором на конце ВЛ 500 км (рис.1.65), а также в схеме ЭДМ № 15 (рис.1.47) при КЗ через переходное сопротивление 40 Ом (рис. 1.66) правильные действия осуществлялись при увеличении положения по чувствительности ОНМ до единицы по току и напряжению с установкой  $t_{\phi} = 0,5$  мс.

Во всех опытах КЗ на землю фазы В действовал только ОНМ первого волнового канала (Б1или О1), а в опытах КЗ крайних фаз А и С – только ОНМ второго волнового канала (Б2 или О1), что в полной мере соответствовало соотношениям составляющих волновых каналов, приведенным в разделе 1.3 диссертации. Анализ осциллограмм подтвердил высокое быстродействие органов направления мощности КВ, запрещающего органа КV<sub>0</sub> блока АКС1 и избирателей поврежденных фаз АК1. При однофазных КЗ на землю защита срабатывала с временем не свыше 6 мс, а при многофазных на землю - не свыше 10 мс.

Специально было проведено исследование действия волновой защиты в схеме ЭДМ № 17 (рис.1.47) при КЗ на защищаемой ВЛ, длиной 200 км, к которой с одной стороны подключена ВЛ, длиной 50 км, работающая на холостом ходу, а с другой – ВЛ длиной 100 км, соединенная с энергосистемой. Следует отметить, что такая схема может находиться в работе кратковременно. Отражения тока и напряжения от разомкнуто конца относительно короткой ВЛ, обусловили различный характер изменения токов и напряжений в первом и втором волновых каналах в точке контроля при близких КЗ в зоне (рис.1.67) с ярко выраженным колебательным процессом в

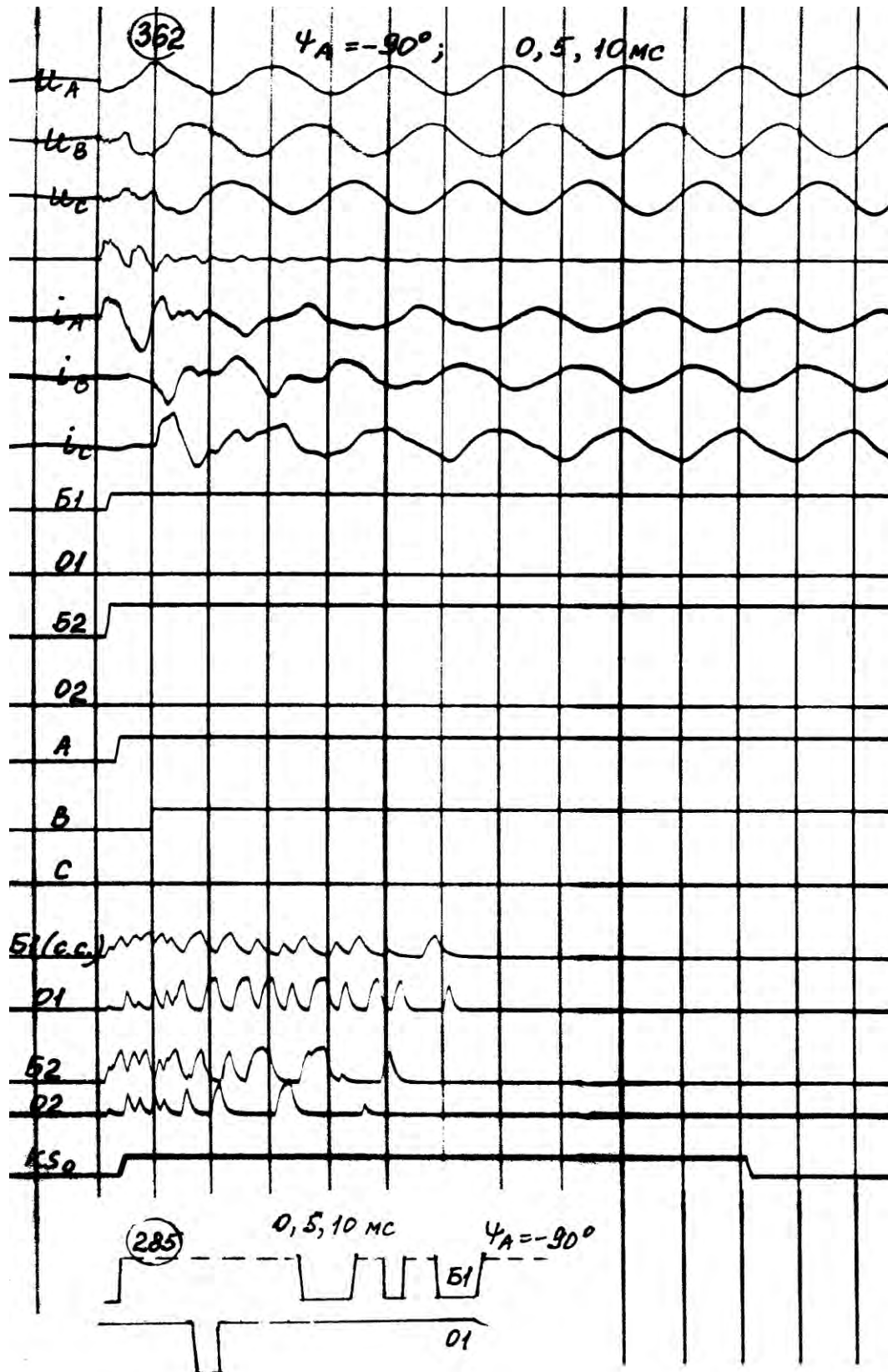


Рис.1.55. Работа органов направления мощности KW1 и KW2 при включении ВЛ на холостой ход с  $\psi_A = -90^\circ$  в схеме ЭДМ № I при разновременностях включения выключателей фаз 0, 5 и 10 мс

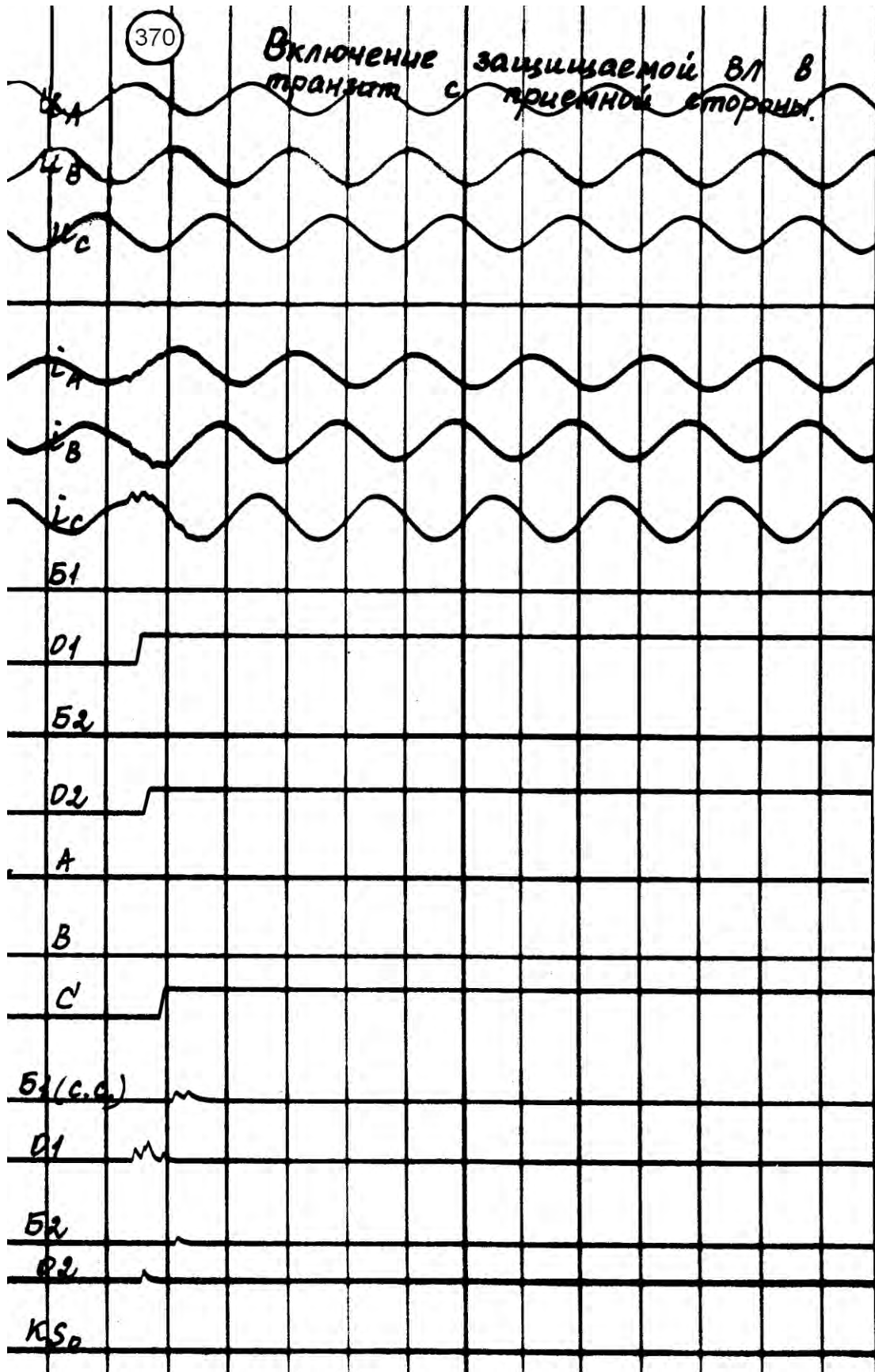


Рис. 1.56. Работа органов направления мощности KW1 и KW2 при включении ВЛ под нагрузку с противоположного конца в схеме ЭДМ № I

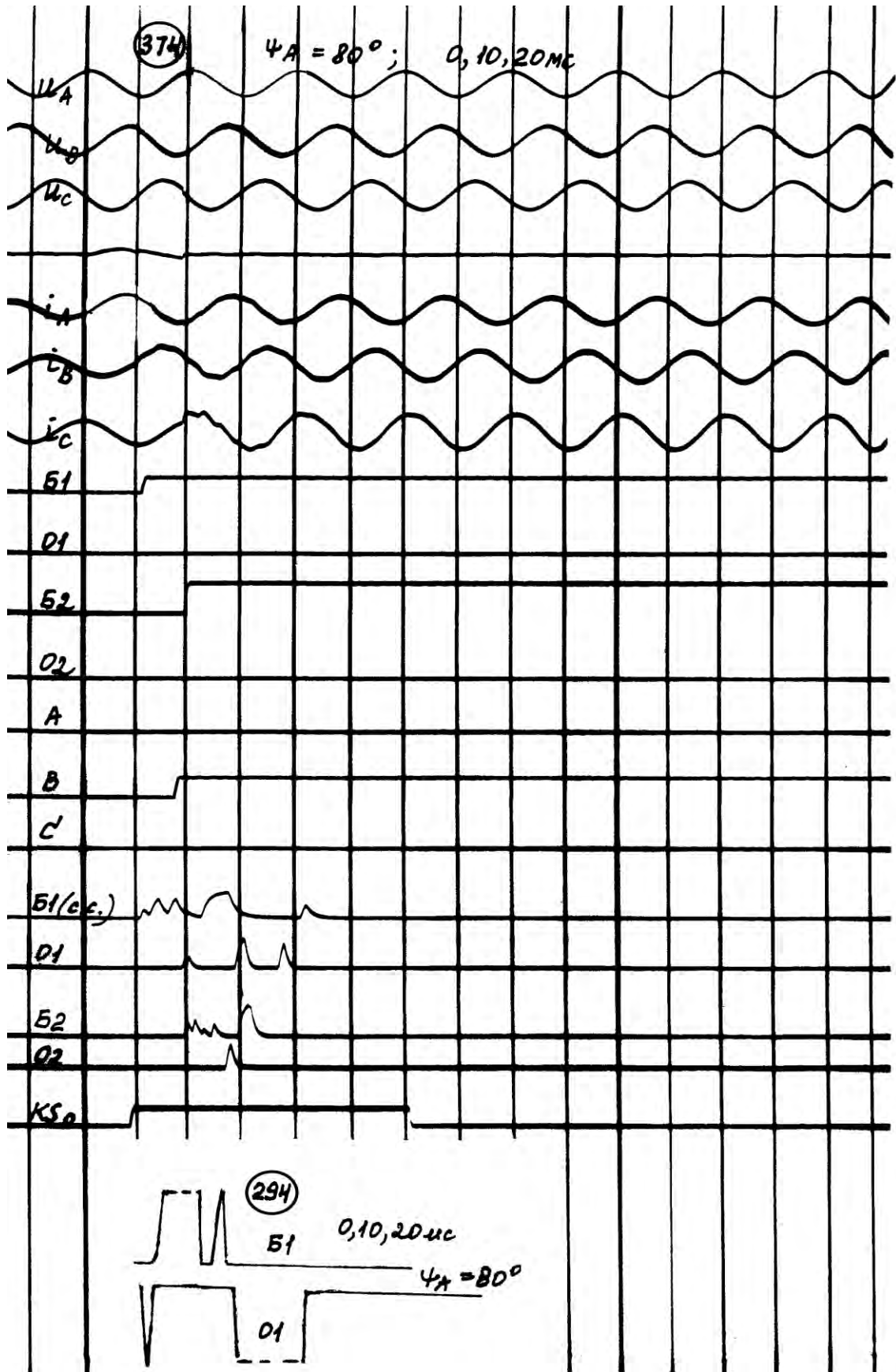


Рис. 1.57. Работа органов направления мощности KW1 и KW2 при включении ВЛ под нагрузку с питающей стороны с  $\psi_A = 80^\circ$  в схеме ЭДМ № I при разновременностях включения выключателей фаз 0, 10 и 20 мс

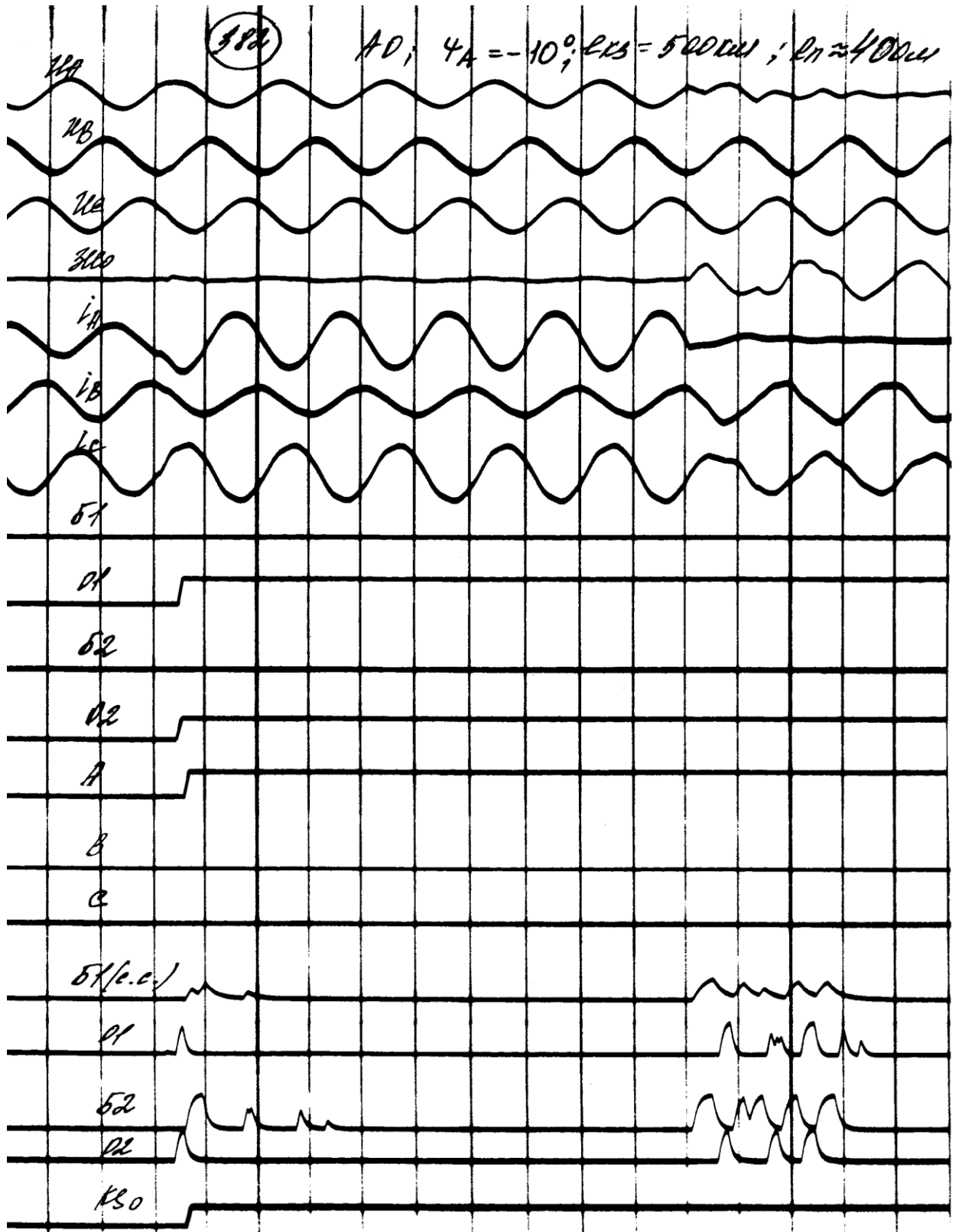


Рис. 1.58. Опыт КЗ на защищаемой линии по схеме ЭДМ № 1 на расстоянии, равном 500 км от места установки защиты до точки КЗ, при  $\psi_A = -10^\circ$  и переходном сопротивлении 40 Ом при положениях по Ч по току 0,5 и по напряжению 0,5 и  $t_\phi = 0,25$  мс





Рис. 1.59. Действие избирателя поврежденных фаз при переходе близких однофазных КЗ в двухфазные КЗ при  $\psi_A = 0^\circ$ , положениях по Ч по току 1,0 и по напряжению 0,5 и  $t_\phi = 0,5 \text{ мс}$

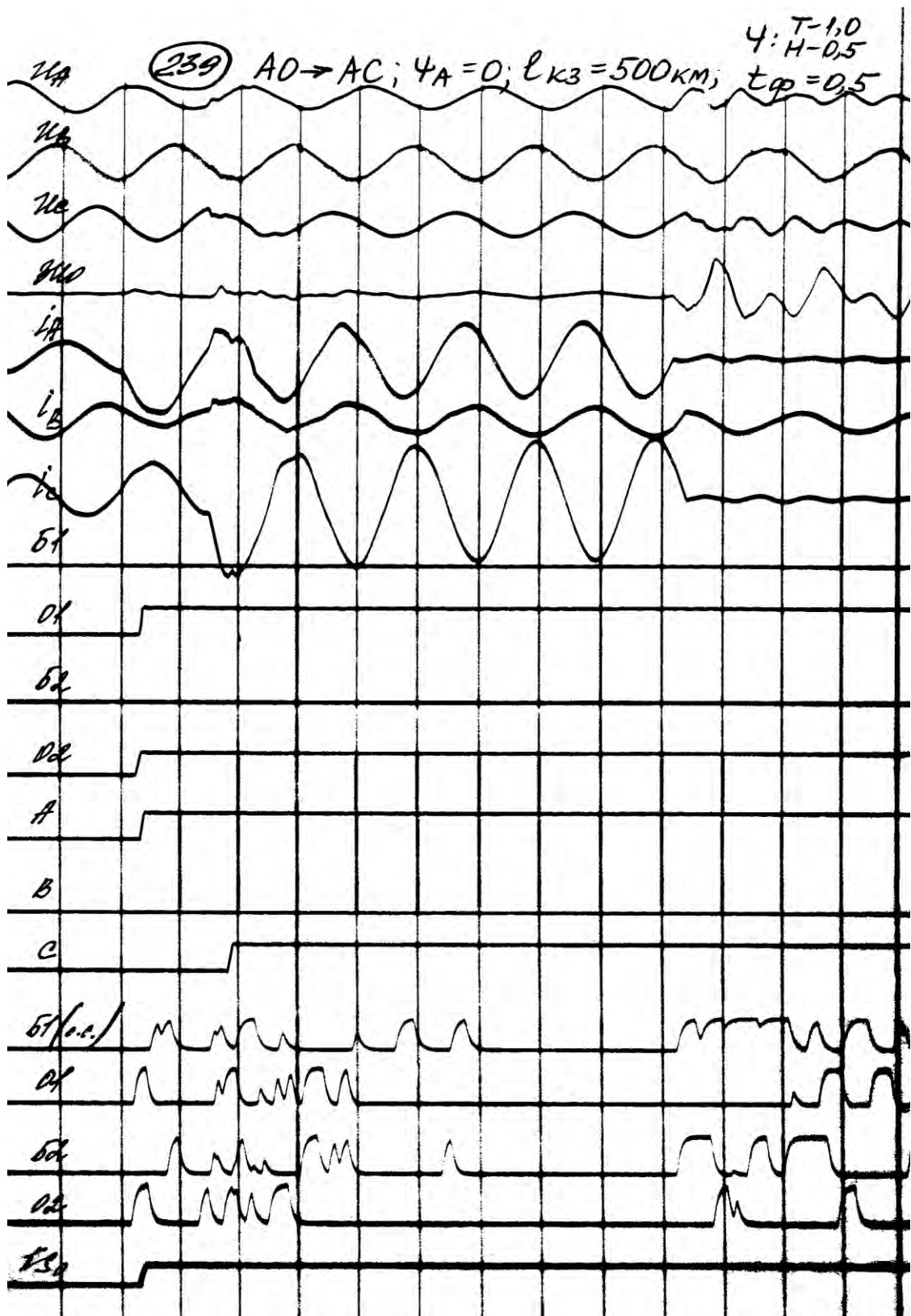


Рис. 1.60. Действие избирателя поврежденных фаз при переходе однофазных КЗ в двухфазные КЗ на расстоянии 500 км от места установки защиты при  $\psi_A = 0^\circ$ , положениях по Ч по току 1,0 и по напряжению 0,5 и  $t_\phi = 0,5$  мс



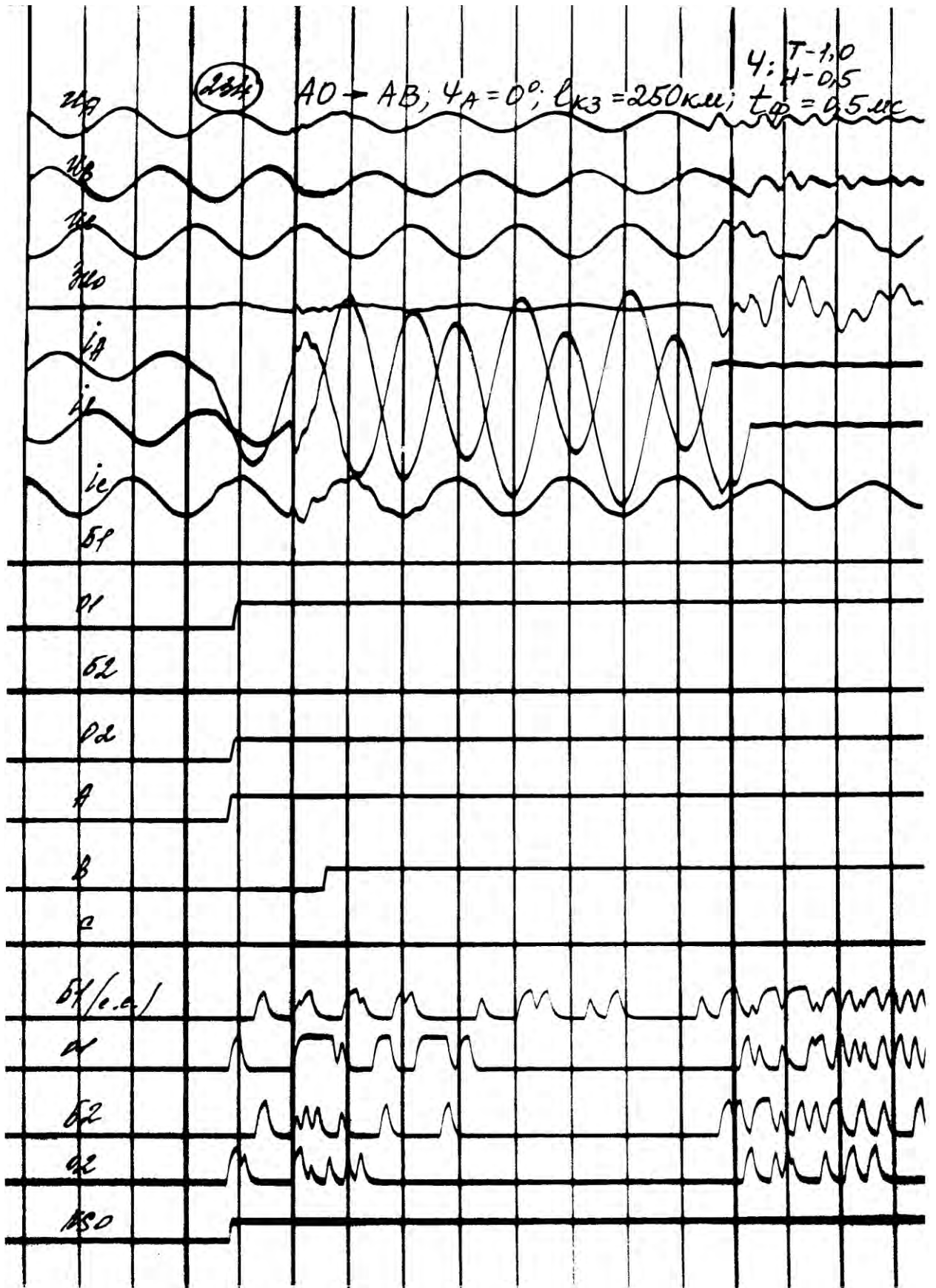


Рис. 1.61. Действие избирателя поврежденных фаз при переходе однофазных КЗ в двухфазные КЗ на расстоянии 250 км от места установки защиты при  $\psi_A = 0^\circ$ , положениях по Ч по току 1,0 и по напряжению 0,5 и  $t_\phi = 0,5 \text{ мс}$

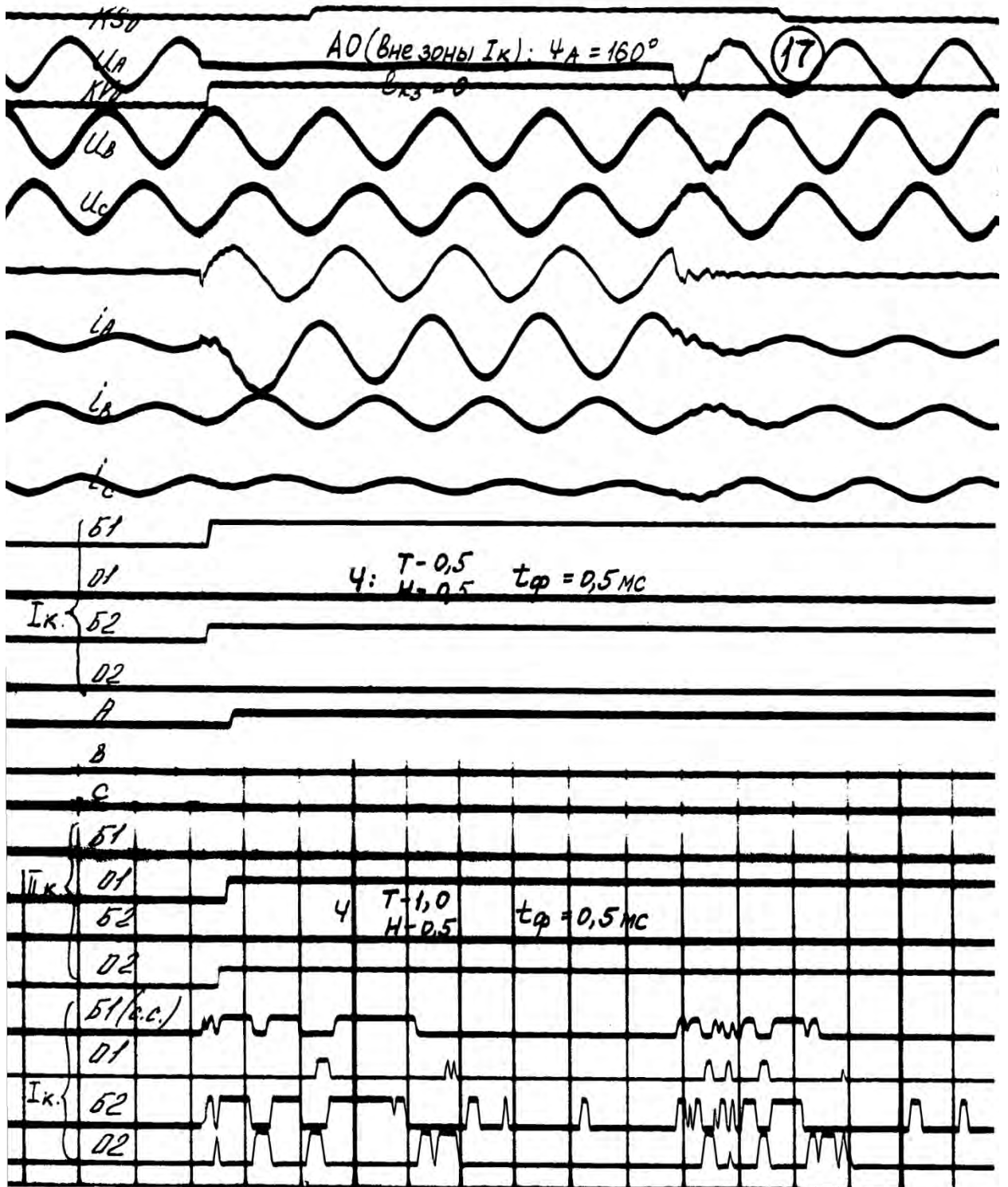


Рис. 1.62. Опыты в схеме ЭДМ № 10 в направлении КЗ фазы А на землю (с  $\psi_A = 155^\circ \div 160^\circ$ ) для ОНМ, противоположном для первого полукомплекта (в положении 0,5 по Ч), и в заданном направлении - для второго полукомплекта (в положении 0,5 по Ч для напряжения и 1,0 для тока)  $t_\phi = 0,5 \text{ мс}$

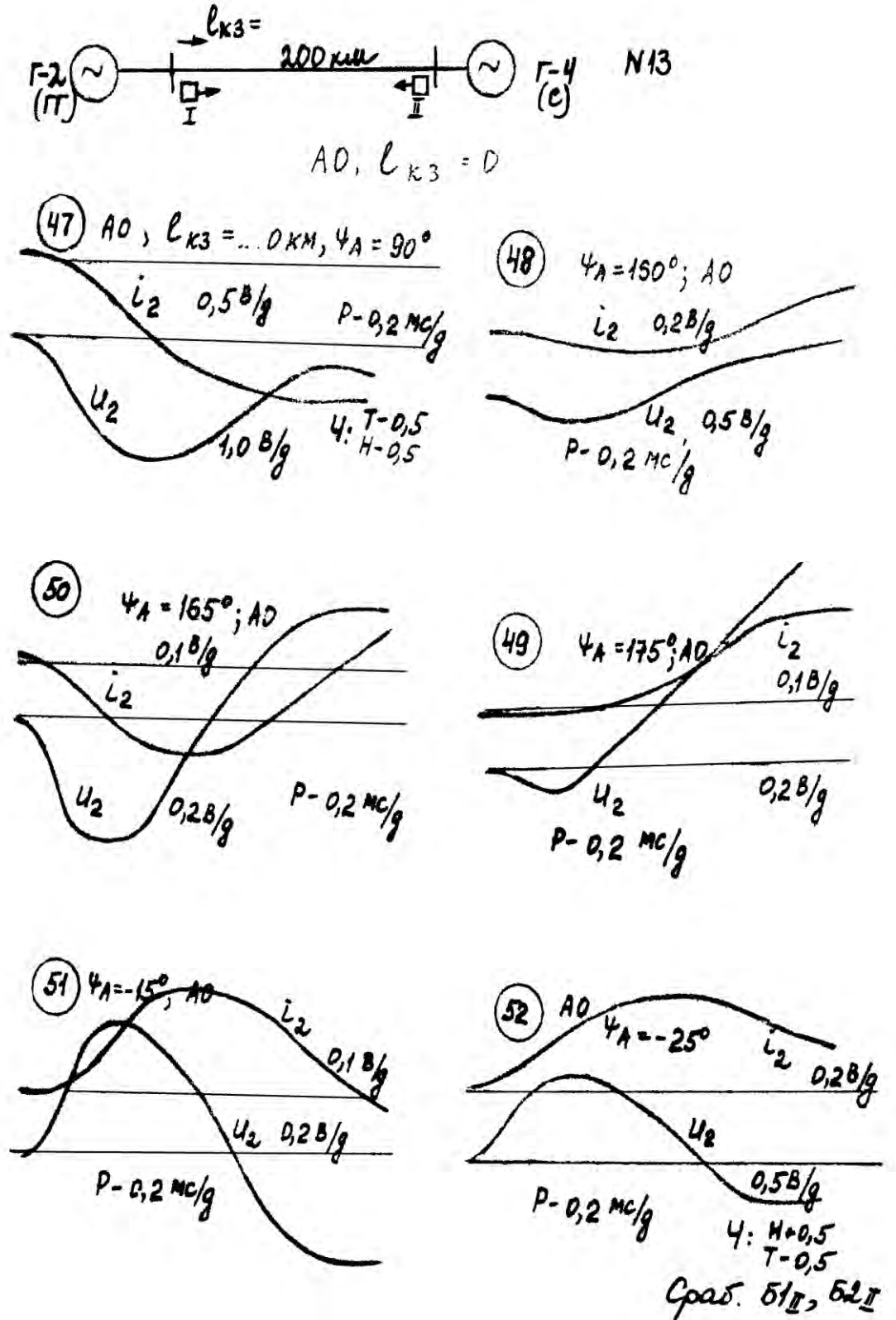


Рис. 1.63. Опыты в схеме ЭДМ № 13 при близких КЗ на одиночной ВЛ с двухсторонним питанием длиной 200 км при положении по чувствительности ОНМ по току 0,5 и напряжению 0,5 с  $t_\phi = 0,5$  мс

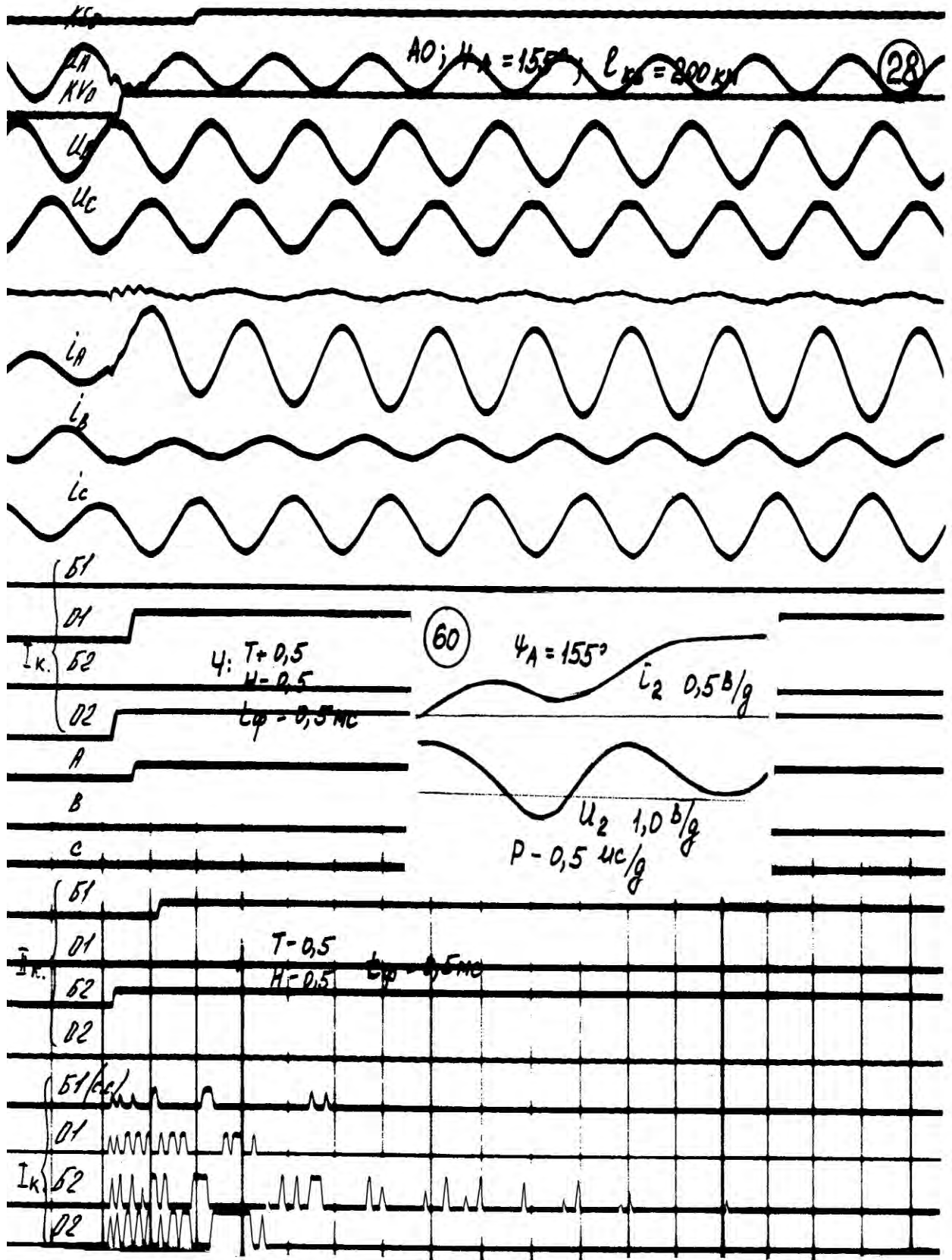
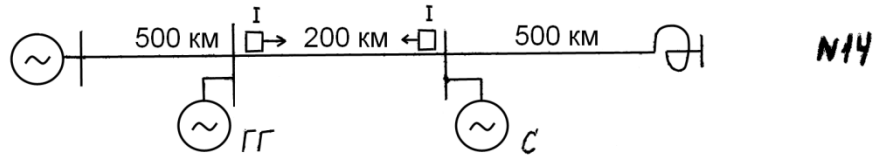


Рис. 1.64. Опыты по схеме ЭДМ № 13 при удаленных КЗ на одиночной ВЛ с двухсторонним питанием длиной 200 км при положении по чувствительности ОНМ по току 0,5 и напряжению 0,5 с  $t_{\phi} = 0,5 \text{ мс}$



$A0; \ell_{кз} = 0 \text{ км}$

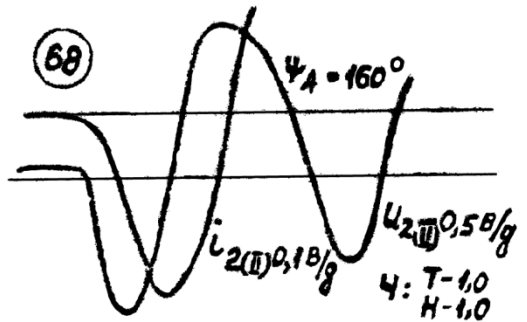
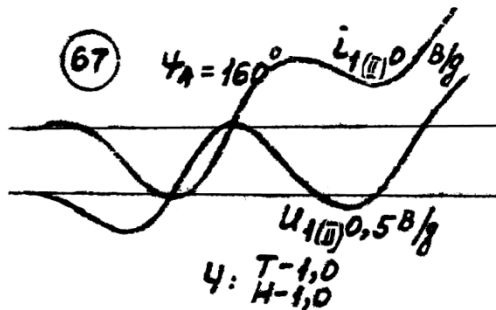
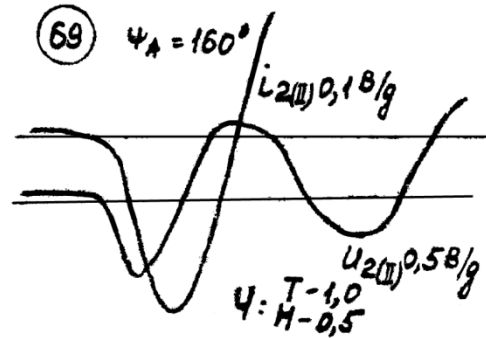
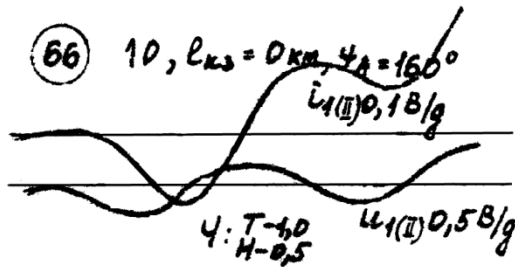
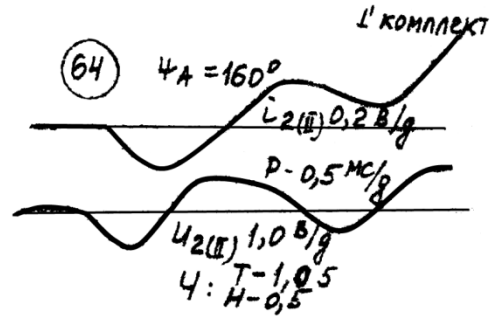
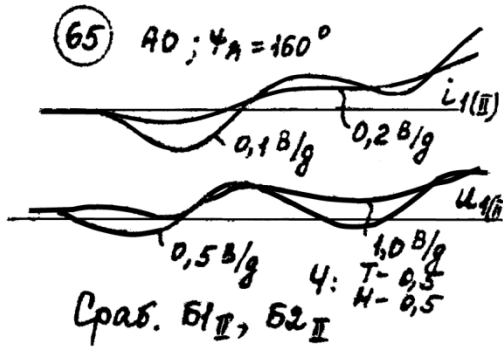
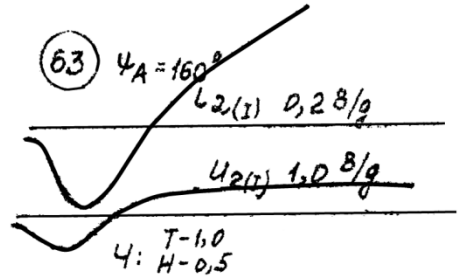
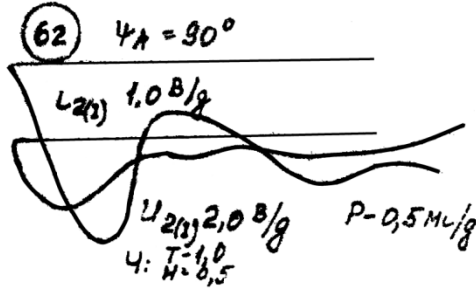


Рис.1.65. Опыты в схеме ЭДМ № 14 (рис.1.47) при близких КЗ на ВЛ с двухсторонним питанием длиной 200 км с примыкающими ВЛ длиной 500 км, с тремя источниками питания и шунтирующим реактором на конце ВЛ 500 км

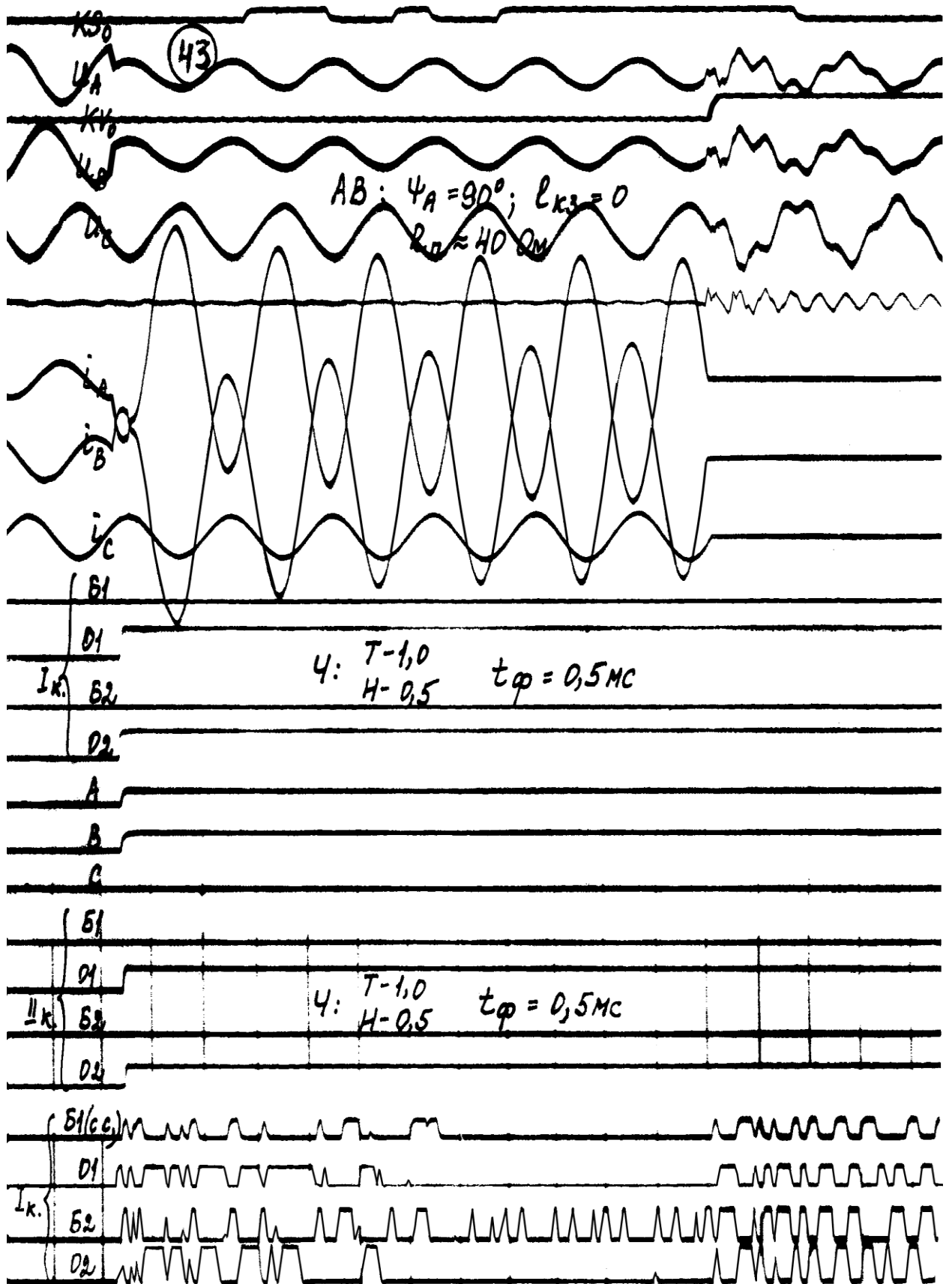


Рис. 1.66. Опыты в схеме ЭДМ № 15 при близких внутренних КЗ через переходное сопротивление 40 Ом при положении по чувствительности ОНМ по току 1,0 и напряжению 0,5 с  $t_{\phi} = 0,5$  мс

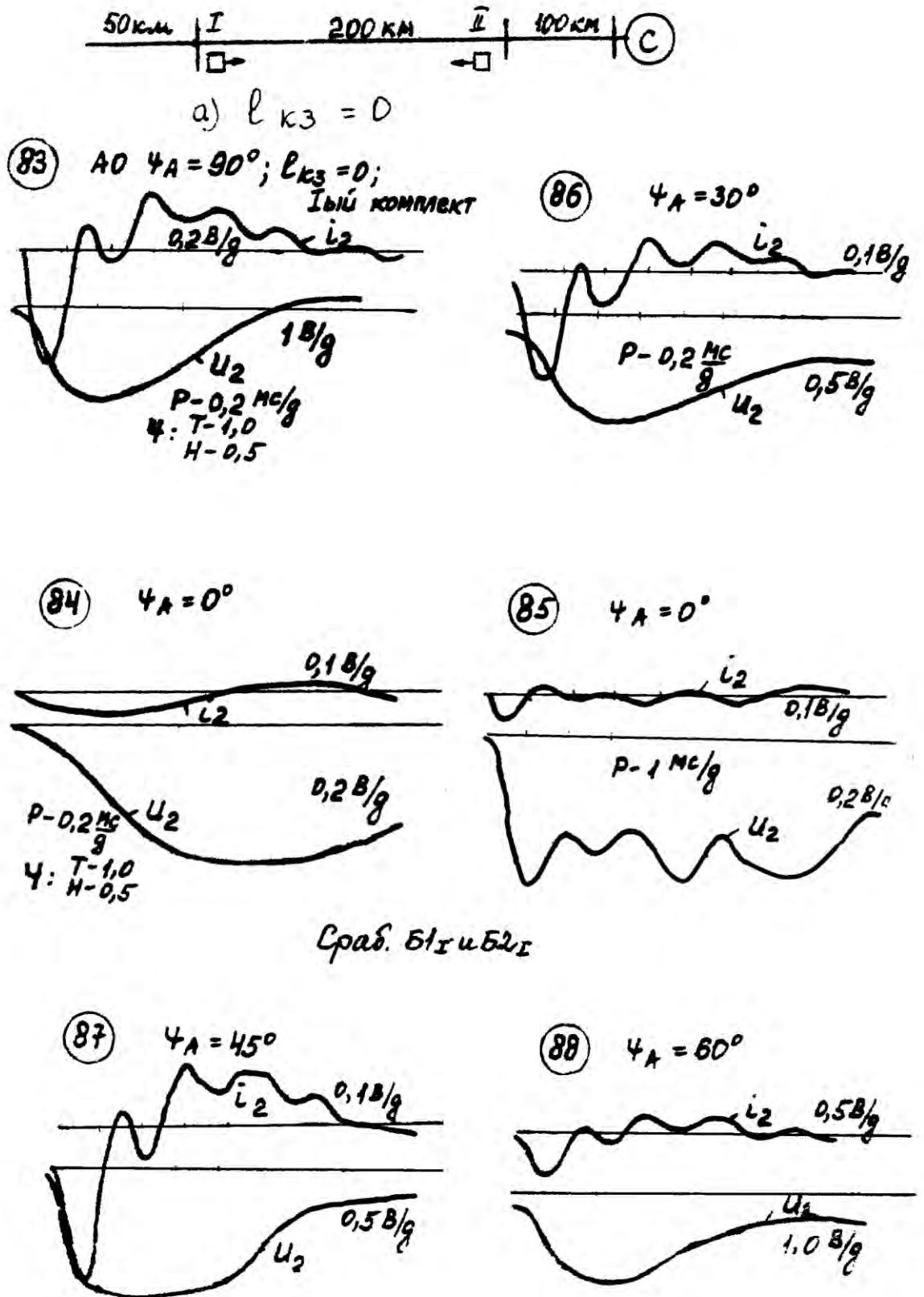


Рис. 1.67. Опыты в схеме ЭДМ № 17 при КЗ на защищаемой ВЛ, длиной 200 км, к которой подключена ВЛ, длиной 50 км, работающая на холостом ходу, а с другой – ВЛ длиной 100 км, соединенная с энергосистемой

токе с периодом, равным четырехкратному пробегу волны по разомкнутой ВЛ. В соответствии со схемой № 14 ЭДМ (рис.1.47) проверялась работа защиты при включениях и отключениях защищаемой ВЛ. Сопоставление действия обоих полукомплектов между собой с учетом передачи высокочастотного блокирующего сигнала показывает, что при коммутациях защищаемой линии защита с двух сторон линии будет действовать на блокировку защиты.

Действие волновой защиты при качаниях и асинхронном режиме в проверялось в схемах ЭДМ № 8, 9 и 16 (рис.1.47). Данные осциллограмм, позволяющие определить условия срабатывания ОНМ и ИПФ защиты при рассматриваемых процессах в положении чувствительности 0,5, представлены в табл.1.2. Определение боковых частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$  в цикле асинхронного хода и синхронных качаний в сети проводилось на основании расчетных выражений [63]

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \text{ - частота заполнения,}$$

$$\lambda = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \text{ - частота огибающей кривой.}$$

Частота огибающей кривой  $\lambda$  в режиме асинхронного хода определялась по длительности двойного интервала времени  $T_B = \frac{\pi}{\lambda}$  между узлами колебаний (биений) в токе, а в режиме синхронных качаний - по длительности интервала времени  $T = \frac{2\pi}{\lambda}$  между однополярными максимумами огибающей кривой. На ЭДМ преимущественно формировались режимы асинхронного хода с амплитудами тока от 2,7 А до 8,7 А и боковыми частотами  $f_1$  и  $f_2$  от 44 Гц до 58 Гц, и лишь в некоторых случаях проверка защиты осуществлялась в условиях синхронных качаний с амплитудами тока от 4,3 А до 6,2 А и боковыми частотами от  $f_2 = 28,5$  Гц до  $f_1 = 52,7$  Гц.





9	5,74	48,4	44,6	0,5	0,5	0,5	+		+						+	+	
9	5,7	48,5	44,1	0,5	0,5	0,5	+		+				+		+	+	
9	3,74	56,2	50,6	0,5	0,5	0,5	+		+								
9	4,67	56	49,2	0,5	0,5	0,5	+		+								
9	4,54	56,1	49,9	0,5	0,5	0,5							+				
16	3,47	52,5	49,1	1/0, 5	0,5	0,5	+		+							+	+
16	5,0	51,4	48,6	0,5	0,5	0,5	+										
16	5,0	56,7	52,9	0,5	0,5	0,5							+				
16	5,42	54,8	50,2	0,5	0,5	0,5	+		+							+	+
16	5,42	54,6	50,4	0,5	0,5	0,5	+		+							+	+
16	5,42	58	54	0,5	0,5	0,5							+				
16	3,74	53	50,5	0,5	0,5	0,5			+							+	+
16	6,2	51,5	37,7	0,5	0,5	0,5	+		+						+	+	
16	5,0	48,5	28,5	0,5	0,5	0,5						+		+			
16	5,0	49,5	32,9	0,5	0,5	0,5	+		+						+		+
16	5,0	48,7	43,9	0,5	0,5	0,5	+		+						+	+	
16	5,34	48,2	44,8	0,5	0,5	0,5	+		+						+	+	
16	5,5	47,9	35,5	0,5	0,5	0,5	+		+							+	+
16	5,5	52,2	36,6	0,5	0,5	0,5	+		+						+	+	
16	5,5	50,5	34,5	0,5	0,5	0,5						+		+			
16	5,5	50,0	33,4	0,5	0,5	0,5	+		+							+	+
16	5,1	52,2	44,5	0,5	0,5	0,5	+		+						+	+	
16	4,14	52,5	49,5	0,5	0,5	0,5	+		+							+	+
16	4,3	48,1	44,9	0,5	0,5	0,5	+		+						+	+	
16	4,3	52,5	36,3	0,5	0,5	0,5	+		+							+	+
16	-	-	-	0,5	0,5	0,5											
16	4,3	52,7	41,7	0,5	0,5	0,5	+		+						+	+	

## 1.6. Выводы

1. В соответствии с полученными в результате анализа расчетов основными характеристиками переходных процессов в ВЛ СВН селективный контроль всех видов КЗ в защите осуществляется путем контроля соотношения знаков токов и напряжений первого или второго волновых каналов (групп) в течение сотен микросекунд в диапазоне частот, исключая промышленную.

2. В качестве основных измерительных селективных органов макетного образца приняты импульсные органы двухстороннего действия с минимальными параметрами срабатывания - 4% от номинальных - и временем фиксации 500 мкс.

3. Для повышения устойчивости функционирования волновой рекомендуется выполнять схему ее устройства с измерительными органами направления, реагирующими на падающие и преломленные волны, распространяющиеся по первому и второму волновым каналам ВЛ.

4. Выделение аварийных составляющих в органах направления целесообразно осуществлять с помощью активных трехзвенных РС-фильтров, подавляющих промышленную частоту нормального режима с учетом ее отклонения на 10%. При этом уровень сигнала на их выходе при КЗ в линии не менее 10% от номинальных величин в интервале времени до 1 мс, что соответствует заданным требованиям. Оптимизация структуры измерительных цепей органов направления мощности показала, что ее целесообразно выполнять с трехзвенным режекторным фильтром промышленной частоты и ФНЧ с граничной частотой не свыше 0,5 - 1 кГц - с целью повышения стабильности знаков мощности рабочих сигналов.

5. Характер переходных аварийных напряжений и токов, передаваемых трансформаторами тока и напряжения и фильтрами аварийных составляющих защиты при КЗ и коммутациях на ЭДМ, и выделяемых по волновым каналам (группам), находится в соответствии с данными расчетов.

6. В цикле качаний и асинхронного хода (с изменением частоты в диапазоне от 45 до 55 Гц) возможно действие защиты на блокирование.

7. Избиратель поврежденных фаз выполнен с контролем величин, определяемых средним по модулю значением фазного тока без учета токов нулевого канала. При испытаниях на ЭДМ в режимах несимметричных КЗ, в том числе при переходах однофазного КЗ в двухфазное КЗ на землю, разработанный тип избирателя поврежденных фаз правильно выбирал поврежденные фазы. Время действия избирателя - не более 5 мс.

8. Схема блока защиты при включении реагирует на КЗ при опробовании линии и при подаче напряжения на отключенные фазы в цикле АПВ.

9. Испытания волновой направленной защиты на ЭДМ позволили убедиться в правильности принципа построения защиты и основных схемных решений по органам защиты и ее логической части, а также подтвердили повышенное быстродействие защиты - не более 5 мс.

## ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ГРОЗОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА НАДЕЖНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАЩИТЫ ВЛ СВН

### 2.1. Влияние ударов молнии, не вызывающих короткого замыкания, на работу защит ВЛ СВН, реагирующих на токи и напряжения промышленной частоты

#### 2.1.1. Метод расчета свободных составляющих

До 85-90 % ударов молнии имеет отрицательную полярность и в первом приближении могут быть представлены (рис. 2.1) импульсами тока [64 – 68] экспоненциальной формы

$$i_M = I_M e^{-\delta_M t},$$

где  $I_M$  - амплитуда тока молнии,  $\delta_M$  - показатель затухания. Следует отметить, что 40 - 60 % ударов молнии состоит из нескольких разрядов, интервал между которыми составляет от 7 до 150 мс со средним значением 33 мс с амплитудой тока второго разряда, примерно в три раза меньшей амплитуды тока первого разряда, и в 2 - 7 раз большим показателем затухания. В 50 % случаев грозовые разряды имеют длительность  $t_M$  не более 75 мкс, а в 75 % не более 150 мкс, при этом  $\delta_M$ , равное  $0,7/t_M$ , составляет соответственно 9200 1/с и 4600 1/с [64]. Амплитудное значение тока молнии отрицательной полярности, определяемое импульсным разрядным напряжением на гирлянде опоры ВЛ и волновыми сопротивлениями каналов ВЛ и грозового разряда, при которой ток молнии еще не приводит к КЗ, обозначаемое  $I_{M-гр}$ , для ВЛ 500 кВ составляет 20 кА, а для ВЛ 750 - 30 кА [65]. Удары молнии положительной полярности (рис. 2.1) характеризуются в 3 - 10 раз большей длительностью  $t_M$  и другой формой импульса.

Для оценки сигналов в месте установки релейной защиты при грозовых возмущениях, не приводящих к КЗ в ВЛ СВН, и определения возможности ее отстройки от этих воздействий, с учетом статистических данных [64],

рассматривался характер процесса распространения грозových волн в указанных ВЛ, который сравнивался с характером процесса при КЗ.

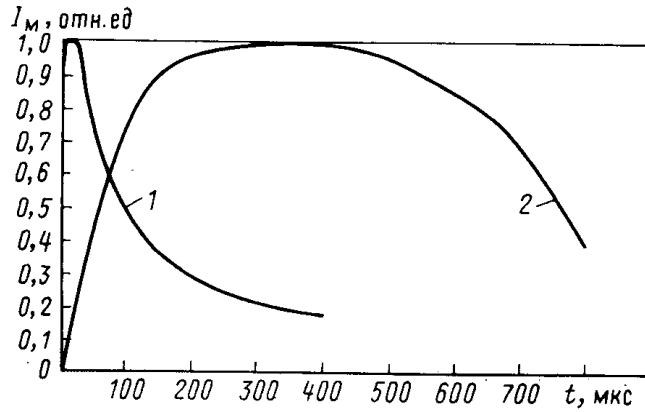


Рис. 2.1. Типичные формы тока молнии отрицательной (1) и положительной (2) полярности (за единицу принята амплитуда тока молнии)

Результаты расчетов, проведенных автором диссертации, показали [5], что амплитуда грозовой волны (даже без учета влияния импульсной короны [65]) после пробега расстояния 600 км по ВЛ СВН снижается в междуфазных каналах в 4 раза, а в нулевом — в 10 раз. Однако токи и напряжения грозových волн, несмотря на их существенное затухание, могут быть соизмеримы с токами и напряжениями при КЗ, поскольку напряжение волны в месте удара молнии в линию без последующего КЗ примерно в 6 раз превышает номинальное напряжение ВЛ СВН [69].

Для оценки влияния переходных процессов в ВЛ СВН на работу защит, реагирующих на токи напряжения промышленной частоты в диапазоне частот, близком к полосе пропускания частотных фильтров (25-75 Гц) измерительных органов этих защит, ВЛ может рассматриваться как симметричная, что позволяет применить метод симметричных составляющих [63]. При включении источника тока, моделирующего удар молнии в одну из фаз ВЛ, система уравнений для граничных условий через симметричные составляющие запишется в виде

$$\begin{aligned}
 I_1(p) + I_2(p) + I_0(p) &= I_m(p); \\
 a^2 I_1(p) + a I_2(p) + I_0(p) &= 0; \\
 a I_1(p) + a^2 I_2(p) + I_0(p) &= 0,
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

где  $I_m(p)$ ,  $I_1(p)$ ,  $I_2(p)$ ,  $I_0(p)$  — изображения тока молнии и его симметричных составляющих.

Из (2.1)

$$I_1(p) = I_2(p) = I_0(p) = \frac{1}{3} I_m(p). \tag{2.2}$$

Комплексная схема замещения, соответствующая этим уравнениям, приведена на рис. 2.2 для случая одиночной связи между двумя энергосистемами, где четырехполюсники моделируют участки ВЛ. Переходный процесс в схемах прямой, обратной и нулевой последовательности может рассматриваться как независимый.

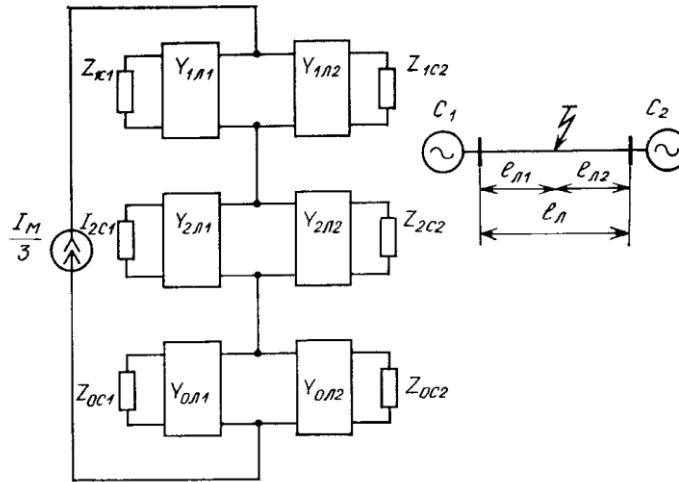


Рис. 2. 2. Комплексная схема замещения при ударе молнии в провод при  $Z_{kc1}$ ,  $Z_{kc2}$  и  $Y_{кл1}$ ,  $Y_{кл2}$  — соответственно сопротивления примыкающих систем  $C1$  к  $C2$  и проводимости участков  $l_1$  и  $l_2$  линии длиной  $l_l$  для  $k$  (прямой, обратной и нулевой) последовательностей

В соответствии с [54] для общего случая возмущающей силы

$$g(t) = G_m e^{-\delta_n t} \sin(\omega_n t + \varphi) \tag{2.3}$$

переходную функцию можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}
f(t) = & \frac{G_M e^{-\delta_H t}}{|H_\Sigma(-\delta_H + j\omega_H)|} \sin(\omega_H t + \varphi - \theta_H) + \sum_{s=1}^m \frac{G_M \cos(\varphi + \psi_{as}) e^{-\delta_{as} t}}{\sqrt{(\delta_{as} - \delta_H)^2 + \omega_H^2} H'_\Sigma(-\delta_{as})} + \\
& + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{2G_M e^{-\delta_s t} \left[ \sqrt{(\delta_s - \delta_H)^2 + \omega_s^2} \sin \varphi \sin(\omega_s t + \psi_{Ts} - \xi_s) - \omega_H \cos \varphi \cos(\omega_s t - \xi_s) \right]}{\left\{ (\omega_s^2 - \omega_H^2) - (\delta_s - \delta_H)^2 \right\}^2 + [2\omega_s(\delta_s - \delta_H)]^2 \}^{1/2} \times |H'_\Sigma(p_s)|}, \\
\psi_{as} = & \operatorname{arctg} \frac{\delta_{as} - \delta_H}{\omega_H}; \quad \psi_{Ts} = \operatorname{arctg} \frac{\delta_s - \delta_H}{\omega_s}; \quad (2.4) \\
\xi_s = & \operatorname{arctg} \frac{2\omega_s}{\omega_s^2 - \omega_H^2 - (\delta_s - \delta_H)^2} + \arg H'_\Sigma(p).
\end{aligned}$$

Первое слагаемое - принужденная составляющая, второе - сумма аperiodических и третье - сумма периодических свободных составляющих, где  $m$  — число аperiodических свободных составляющих,  $\delta_{as}$  и  $\delta_s$ ,  $\psi_{as}$  и  $(\psi_{Ts} - \xi_s)$ ,  $\theta$  и  $\omega_s$  - показатели затухания, начальная фаза и частота аperiodических и периодических свободных составляющих;  $p_s$  — нуль функции  $H_\Sigma(p)$  — входной проводимости схемы, а  $H'_\Sigma(p)$  — ее производная при  $p=p_s$ ,  $\theta_H$  — угол комплексной величины  $H_\Sigma(-\delta_H + j\omega_H)$ .

Для удара молнии возмущающая сила имеет вид

$$\begin{aligned}
g(t) = i_M(t) = & I_M e^{-\delta_M t}; \\
G_M = I_M; \quad \delta_H = \delta_M; \quad \omega_H = 0; \quad \varphi = & \frac{\pi}{2}, \quad (2.5)
\end{aligned}$$

а напряжение любой из последовательностей в месте удара молнии с учетом (2.4) и (2.5) может быть представлено в следующем виде:

$$u_M(t) = \frac{I_M e^{-\delta_M t}}{|Y(-\delta_M)|} \cos \theta_H + \sum_{s=1}^m \frac{I_M \cos\left(\frac{\pi}{2} + \psi_{as}\right) e^{-\delta_{as} t}}{(\delta_{as} - \delta_M) Y'_\Sigma(-\delta_{as})} + \sum_{s=1}^{\infty} \frac{2I_M e^{-\delta_s t} \sin(\omega_s t + \psi_{Ts} - \xi_s)}{Y'_\Sigma(p_s) \sqrt{\omega_s^2 + (\delta_M - \delta_s)^2}}. \quad (2.6)$$

Для определения амплитуды первой периодической свободной составляющей в соответствии с [54] рассматривается схема с реактивными элементами. Активные сопротивления учитываются



только при определении коэффициента затухания свободных составляющих  $\delta_s$  в виде  $R_{л}/2L_{л}$ . Параметры схемы замещения для вынужденной составляющей не учитываются ввиду ее малой длительности.

В соответствии со схемой замещения по рис. 2.2 для любой последовательности

$$Y_{\Sigma_{reak}}(j\omega_s) = \frac{1}{Z_{1reak}} + \frac{1}{Z_{2reak}}, \quad (2.7)$$

где  $Z_{1reak}$  и  $Z_{2reak}$  — входные сопротивления схемы замещения с обеих сторон от места удара молнии.

Обозначим  $\theta_{s1} = \omega_s \sqrt{L_{л} C_{л}} l_1$  и  $\theta_{s2} = \omega_s \sqrt{L_{л} C_{л}} l_2$ , где  $L_{л}$ ,  $C_{л}$  — удельные параметры линии и после преобразования (2.7) получим

$$Y_{\Sigma_{reak}}(j\omega_s) = -\frac{j}{z_B} \left[ \operatorname{ctg} \left( \theta_{s1} + \operatorname{arctg} \frac{\omega_s L_{c1}}{z_B} \right) + \operatorname{ctg} \left( \theta_{s2} + \operatorname{arctg} \frac{\omega_s L_{c2}}{z_B} \right) \right], \quad (2.8)$$

где  $z_B$  — волновое сопротивление.

Производная проводимости по (2.8)

$$Y'_{\Sigma_{reak}}(j\omega_s) = \frac{\partial Y_{\Sigma_{reak}}(j\omega_s)}{\partial(j\omega_s)} = -j \sqrt{\frac{C_{л}}{L_{л}}} \times \left\{ -\frac{1}{\sin^2 \left( \omega_s \sqrt{L_{л} C_{л}} l_1 + \operatorname{arctg} \frac{\omega_s L_{c1}}{z_B} \right)} \times \right. \\ \times \left[ -j \sqrt{L_{л} C_{л}} l_1 + \frac{1}{1 + \frac{\omega_s^2 L_{c1}^2}{z_B^2}} \left( -j \frac{L_{c1}}{z_B} \right) \right] - \frac{1}{\sin^2 \left( \omega_s \sqrt{L_{л} C_{л}} l_2 + \operatorname{arctg} \frac{\omega_s L_{c2}}{z_B} \right)} \times \\ \times \left[ -j \sqrt{L_{л} C_{л}} l_2 + \frac{1}{1 + \frac{\omega_s^2 L_{c2}^2}{z_B^2}} \left( -j \frac{L_{c2}}{z_B} \right) \right] \left. \right\}. \quad (2.9)$$

После преобразований

$$Y'_{\Sigma peak}(j\omega_s) = \left[ C_l l_1 + \frac{L_{C1}}{z_B^2 + (\omega_s L_{C1})^2} \right] \times \sin^{-2} \left( \omega_s \sqrt{L_l C_l} l_1 + \arctg \frac{\omega_s L_{C1}}{z_B} \right) + \left[ C_l l_2 + \frac{L_{C2}}{z_B^2 + (\omega_s L_{C2})^2} \right] \sin^{-2} \left( \omega_s \sqrt{L_l C_l} l_2 + \arctg \frac{\omega_s L_{C2}}{z_B} \right). \quad (2.10)$$

Частоты свободных составляющих определяются из (2.8) при  $Y'_{\Sigma peak}(j\omega_s) = 0$ .

При этом

$$\operatorname{tg} \left( \theta_{s2} + \arctg \frac{\omega_s L_{C2}}{z_B} \right) = -\operatorname{tg} \left( \theta_{s1} + \arctg \frac{\omega_s L_{C1}}{z_B} \right) \quad (2.11)$$

$$k = \pi - (\theta_{s1} + \theta_{s2}) = \arctg \frac{\omega_s L_{C1}}{z_B} + \arctg \frac{\omega_s L_{C2}}{z_B}.$$

Уравнение для определения частоты  $\omega_{s1}$  первой периодической свободной составляющей ( $\kappa = 1$ ) имеет вид

$$\pi - \omega_{s1} \sqrt{L_l C_l} l_l = \arctg \frac{\omega_{s1} L_{C1}}{z_B} + \arctg \frac{\omega_{s1} L_{C2}}{z_B}. \quad (2.12)$$

Из (2.11) и (2.12) следует, что частоты свободных составляющих не зависят от места удара молнии. Следует отметить, что частоты свободных составляющих при прорыве молнии сквозь тросовую защиту и при трехфазном включении ВЛ под нагрузку [54] совпадают.

### 2.1.2. Определение места удара молнии, при котором наблюдаются максимальные значения свободных составляющих в месте установки защиты

Определение свободных составляющих токов  $I_{3s}$  и напряжений  $U_{3s}$  в месте установки защиты, с учетом уравнений длинной линии, согласно принятым в [54] допущениям, производится по следующим выражениям, с учетом (2.6) и обозначений рис. 2.3

$$\begin{cases} \dot{U}_{3s} = \dot{U}_{Ms} \cos \theta_{s2} - j \dot{I}_{Ms} z_B \sin \theta_{s2} ; \\ \dot{I}_{3s} = -j \frac{\dot{U}_{Ms}}{z_B} \sin \theta_{s2} + \dot{I}_{Ms} z_B \cos \theta_{s2} , \end{cases} \quad (2.13)$$

где  $\theta_{s2} = \omega_s \sqrt{L_{Л} C_{Л}} l_2$ , а  $\dot{U}_{Ms}$  соответствует напряжению в месте удара молнии, например первой свободной составляющей с частотой  $\omega_{s1}$ .

Из (2.13)

$$\dot{U}_{3s} = \dot{U}_{Ms} \frac{\omega_s L_{C2}}{\omega_s L_{C2} \cos \theta_{s2} + z_B \sin \theta_{s2}} ; \quad (2.14)$$

$$\dot{I}_{3s} = -j \dot{U}_{Ms} \frac{1}{\omega_s L_{C2} \sin \theta_{s2} + z_B \cos \theta_{s2}} . \quad (2.15)$$

С учетом (2.6)

$$u_{3s} = \frac{2I_M e^{-\delta_s t} \sin(\omega_s t + \psi_{Ts} - \xi_S)}{3\sqrt{(\delta_M - \delta_s)^2 + \omega_s^2} Y'_{\Sigma peak}(j\omega_s) \left( \frac{z_B}{\omega_s L_{C2}} \sin \theta_{s2} + \cos \theta_{s2} \right)} ; \quad (2.16)$$

$$i_{3s} = \frac{2I_M e^{-\delta_s t} \sin(\omega_s t + \psi_{Ts} - \xi_S - 90^\circ)}{3\sqrt{(\delta_M - \delta_s)^2 + \omega_s^2} Y'_{\Sigma peak}(j\omega_s) (z_B \sin \theta_{s2} + \omega_s L_{C2} \cos \theta_{s2})} , \quad (2.17)$$

а с учетом (2.10) и (2.12)

$$Y'_{\Sigma peak} = \sin^{-2} \left( \omega_s \sqrt{L_{Л} C_{Л}} l_2 + \arctg \frac{\omega_s L_{C2}}{z_B} \right) \times \left[ C_{Л} l_{Л} + \frac{(L_{C1} + L_{C2})(z_B^2 + \omega_s^2 L_{C1} L_{C2})}{(z_B^2 + \omega_s^2 L_{C1}^2)(z_B^2 + \omega_s^2 L_{C2}^2)} \right]. \quad (2.18)$$

При обозначении второго сомножителя (2.18) через  $A$  после преобразований получим

$$i_{3s} = \frac{2I_M e^{-\delta_s t} \sin(\omega_s t + \psi_{Ts} - \xi_S - 90^\circ)}{3\sqrt{(\delta_M - \delta_s)^2 + \omega_s^2} A z_B} \times \sin \left( \omega_s \sqrt{L_{Л} C_{Л}} l_2 + \arctg \frac{\omega_s L_{C2}}{z_B} \right) \cos \left( \arctg \frac{\omega_s L_{C2}}{z_B} \right) ; \quad (2.19)$$

$$u_{3s} = \frac{2I_M e^{-\delta_s t} \sin(\omega_s t + \psi_{Ts} - \xi_S) \omega_s L_{C2}}{3\sqrt{(\delta_M - \delta_s)^2 + \omega_s^2} A z_B} \times \sin \left( \omega_s \sqrt{L_{Л} C_{Л}} l_2 + \arctg \frac{\omega_s L_{C2}}{z_B} \right) \cos \left( \arctg \frac{\omega_s L_{C2}}{z_B} \right). \quad (2.20)$$

В выражениях (2.19) и (2.20) от места удара молнии зависят только вторые сомножители, максимальное значение которых

$$\left| \sin \left( \omega_{s1} \sqrt{L_l C_l} l_{2\max} + \operatorname{arctg} \frac{\omega_{s1} L_{C2}}{z_B} \right) \right|$$

равно единице. Отсюда

$$l_{2\max} = \frac{\frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{\omega_{s1} L_{C2}}{z_B}}{\omega_{s1} \sqrt{L_l C_l}}. \quad (2.21)$$

Для упрощения анализа полагая, что  $L_{C1} = L_{C2} = L_C$ , получим из (2.12)

$$\operatorname{arctg} \frac{\omega_{s1} L_C}{z_B} = \frac{\pi}{2} - \omega_{s1} \sqrt{L_l C_l} \frac{l_l}{2}. \quad (2.22)$$

Подставляя (2.22) в (2.21), получаем  $l_{2\max} = l_l / 2$ , т.е. максимальные значения токов и напряжений первой свободной составляющей в месте установки защиты имеют место при ударе молнии в среднюю часть электропередачи.

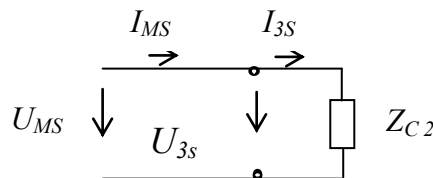


Рис. 2.3. К определению свободных составляющих в месте установки защиты

### 2.1.3. Распределение амплитуд периодических свободных составляющих вдоль ВЛ

Для определения распределения амплитуд периодических свободных составляющих в соответствии со схемой замещения, приведенной на рис.2.4, решается система уравнений

$$\begin{cases} \dot{U}_x = \dot{U}_{I_s} \cos \theta_{sx} - j \dot{I}_{I_s} z_B \sin \theta_{sx}; \\ \dot{I}_x = -j \frac{\dot{U}_{I_s}}{z_B} \sin \theta_{sx} + \dot{I}_{I_s} \cos \theta_{sx}, \end{cases} \quad (2.23)$$

где

$$\omega_{s1} \sqrt{L_l C_l} l_x = \theta_{sx}.$$

Если обозначить  $\omega_{s1} \sqrt{L_l C_l} l = \theta_s$ , то  $\theta_{sx} = \theta_s \frac{x}{l}$ .

Введя обозначение  $\frac{\omega_{s1} L_{C1}}{z_B} = \operatorname{tg} \delta$ , с учетом  $\dot{U}_{I_s} = -\frac{\dot{U}_{I_s}}{j \omega_{s1} L_{C1}}$ , после

преобразования (2.23)

$$\begin{cases} \dot{U}_{xs} = \dot{U}_{I_s} \frac{\sin\left(\theta_s \frac{x}{l} + \delta\right)}{\sin \delta}; \\ \dot{I}_{xs} = \dot{I}_{I_s} \frac{\cos\left(\theta_s \frac{x}{l} + \delta\right)}{\cos \delta}. \end{cases} \quad (2.24)$$

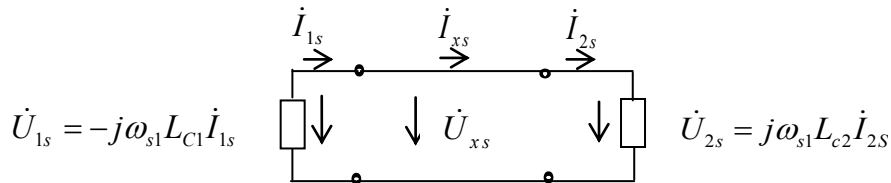


Рис. 2.4. К распределению амплитуд периодических свободных составляющих вдоль линии

При  $L_{C1} = L_{C2} = L_C$  из (2.24)

$$\theta_s = \pi - 2\delta. \quad (2.25)$$

При  $l_x = l_l$ ,  $\dot{U}_{xs} = \dot{U}_{II}$  и  $\dot{I}_{xs} = \dot{I}_{II}$ , после подстановки (2.25) в (2.24)

получим

$$\begin{cases} \dot{U}_{II} = \dot{U}_{I_s}; \\ \dot{I}_{II} = -\dot{I}_{I_s}. \end{cases} \quad (2.26)$$

Следует отметить, что характер распределения амплитуд указанных свободных составляющих вдоль линии не зависит от места удара молнии.

Уравнения (2.23), определяющие соотношения амплитуд токов и напряжений свободных составляющих по концам линии при  $L_{c1} \neq L_{c2}$  с учетом введенных обозначений при  $l_x = l_{\text{л}}$ , приводятся к виду

$$\begin{aligned}\dot{U}_{II s} &= \dot{U}_{I s} \left( \cos \theta_s + \frac{z_B}{\omega_{s1} L_{c1}} \sin \theta_s \right) = \sin \theta_s \left( \operatorname{ctg} \theta_s + \frac{z_B}{\omega_{s1} L_{c1}} \right) \dot{U}_{I s} \quad ; \\ \dot{I}_{II s} &= \dot{I}_{I s} \left( \cos \theta_s + \frac{\omega_{s1} L_{c1}}{z_B} \sin \theta_s \right) = \sin \theta_s \left( \operatorname{ctg} \theta_s - \frac{\omega_{s1} L_{c1}}{z_B} \right) \dot{I}_{I s}\end{aligned}$$

и далее к виду

$$\begin{cases} \dot{U}_{II s} = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \theta_s}} \left( \operatorname{ctg} \theta_s + \frac{z_B}{\omega_{s1} L_{c1}} \right) \dot{U}_{I s} ; \\ \dot{I}_{II s} = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \theta_s}} \left( \operatorname{ctg} \theta_s - \frac{\omega_{s1} L_{c1}}{z_B} \right) \dot{I}_{I s} . \end{cases} \quad (2.27)$$

Преобразуя (2.11), получим

$$\operatorname{ctg} \theta_s = \frac{\omega_{s1}^2 L_{c1} L_{c2} - z_B^2}{z_B \omega_{s1}^2 (L_{c1} + L_{c2})} . \quad (2.28)$$

Подставляя значение  $\operatorname{ctg} \theta_s$  в (2.27), получим

$$\begin{cases} \dot{I}_{II s} = - \frac{\omega_{s1}^2 L_{c1}^2 + z_B^2}{\sqrt{\omega_{s1}^4 L_{c1}^2 L_{c2}^2 + z_B^4 + z_B^2 \omega_{s1}^2 (L_{c1}^2 + L_{c2}^2)}} \dot{I}_{I s} ; \\ \dot{U}_{II s} = \frac{L_{c2}}{L_{c1}} \times \frac{\omega_{s1}^2 L_{c1}^2 + z_B^2}{\sqrt{\omega_{s1}^4 L_{c1}^2 L_{c2}^2 + z_B^4 + z_B^2 \omega_{s1}^2 (L_{c1}^2 + L_{c2}^2)}} \dot{U}_{I s} . \end{cases} \quad (2.29)$$

Следовательно, согласно (2.29), для первых периодических свободных составляющих токи  $\dot{I}_{II s}$  и  $\dot{I}_{I s}$  противоположны по знаку, а напряжения  $\dot{U}_{II s}$  и  $\dot{U}_{I s}$  - совпадают.

#### **2.1.4. Оценка воздействия грозových возмущений на работу направленных фильтровых и дифференциально-фазных защит ВЛ СВН**

Результаты расчетов переходных процессов, проведенных по данной методике при грозových явлениях, а также при КЗ на землю в сложной сети, содержащей ВЛ СВН, выполненные в [5, 47], указывают:

при грозových возмущениях вынужденные составляющие тока и напряжения носят затухающий характер, что определяется видом воздействующей функции источника возмущения;

при КЗ и грозových возмущениях формируются периодические свободные составляющие с частотами, близкими к номинальной частоте, но при грозových возмущениях эти составляющие гораздо ближе к номинальной частоте, чем при КЗ;

показатели затухания первых свободных периодических составляющих нулевого канала при КЗ на землю по величине существенно меньше соответствующих свободных составляющих при грозových разрядах.

Дополнительными отличительными признаками процессов при КЗ и при прорывах молнии в процессе их развития являются

независимость собственных частот переходного процесса от места удара молнии в отличие от зависимости частот переходного процесса при КЗ от места повреждения;

более быстрое затухание свободных составляющих нулевого канала при грозových разрядах, нежели чем при КЗ.

Результаты расчетов [5] указывают, что на очень протяженных ВЛ СВН (порядка 1000 км, рис. 2.5) при ударах молнии возможно появление свободных составляющих с частотой, близкой к промышленной (в рассматриваемом примере равной 84 Гц), с постоянной времени порядка десятков миллисекунд и с амплитудой, близкой к токам КЗ промышленной

ЧАСТОТЫ.

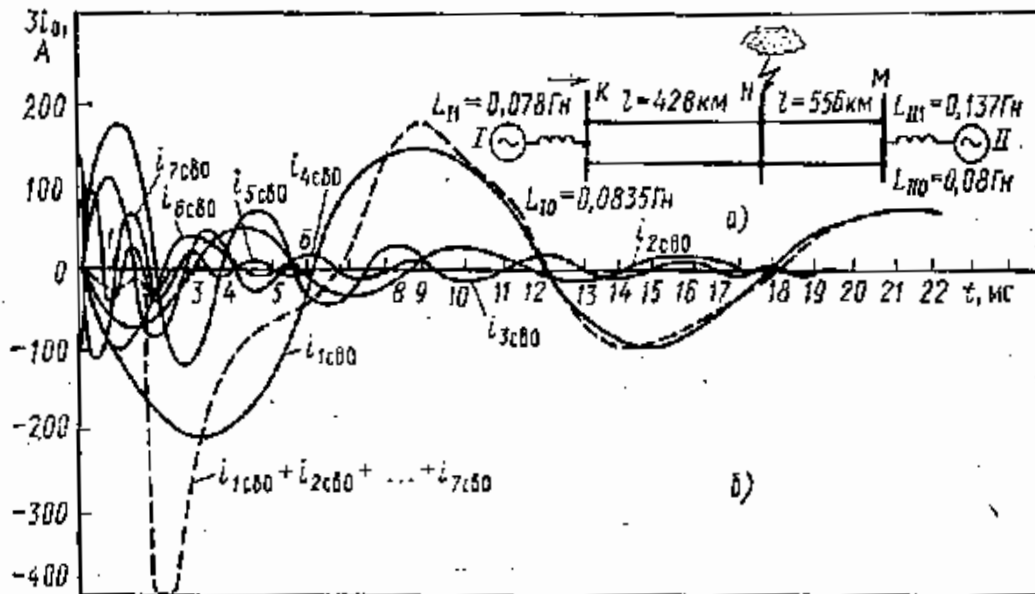


Рис. 2.5. Расчетная схема линий электропередачи 500 кВ (а) и свободные составляющие ( $i_{1св0}$ ,  $i_{2св0}$ , ...,  $i_{7св0}$ ) токов нулевого канала в точке  $K$  при ударе молнии в среднюю часть электропередачи (б):  $L_{I1}$  ( $L_{II1}$ ) и  $L_{I0}$  ( $L_{II0}$ ) – индуктивности прямой и нулевой последовательностей сопротивления систем  $I$  и  $II$

Следовательно, на ВЛ СВН токи и напряжения при прорывах молнии сквозь тросовую защиту могут оказаться соизмеримыми с токами и напряжениями при КЗ на землю не только по амплитуде, но и по частоте в течение времени, превышающем время срабатывания основной защиты ВЛ СВН (20—40 мс). Проблема отстройки защиты от токов и напряжений при прорывах молнии, не приводящих к КЗ, усугубляется при многократных разрядах, особенно при разрядах положительной полярности, когда общая длительность тока может увеличиться до единиц миллисекунд [64, 65].

Рассмотрим ряд примеров, касающихся работы основных защит ВЛ СВН с учетом ряда условий. На ВЛ 750 кВ ток молнии с амплитудой  $I_{м-гр} = 30$  кА соответствует импульсному разрядному напряжению на гирлянде ВЛ, равному 3200 кВ. В рассматриваемых примерах не учитывается работа разрядников или ограничителей перенапряжений (ОПН) [65], поскольку



максимальные первые свободные составляющие в месте установки защиты имеют место при ударе молнии в среднюю часть линии и при подходе к концу протяженной ВЛ волна молнии сможет затухнуть настолько, что разрядники или ОПН не сработают.

Учитывается, что в измерительных органах защиты используется компенсация емкостных токов, равная половине емкостной проводимости линии. Поэтому ток первой свободной составляющей в измерительном органе определяется по выражению

$$I_{3s1\kappa} = I_{3s1} - U_{3s1} \omega_{s1} C_{\text{л}} \frac{l_{\text{л}}}{2}. \quad (2.30)$$

Величины на входе реле, приведенные к промышленной частоте, вычисляются по выражениям

$$I_{3s1\kappa.BT} = \frac{I_{3s1\kappa}}{k_{\phi I} n_{T.T}};$$

$$U_{3s1BT} = \frac{U_{3s1}}{k_{\phi U} n_{T.H}},$$

где  $n_{T.T}$ ,  $n_{T.H}$  - коэффициенты трансформации соответственно трансформаторов тока и напряжения (коэффициент  $n_{T.T}$  выбирается минимальным по значению, равному 2000/1),  $k_{\phi I}$ ,  $k_{\phi U}$  - коэффициенты второй гармоники (100 Гц), ограниченные частотными фильтрами (вторая гармоника снижается в цепях тока в 2,5 раза, а в цепях напряжения - в 5 раз, по данным технического описания Чебоксарского электроаппаратного завода на направленную высокочастотную защиту типа НДЗ - 751).

Пример 1. Представлена ВЛ 750 кВ длиной  $l_{\text{л}}=526$  км с параметрами  $x_1=0,285$  Ом/км,  $r_1=0,0137$  Ом/км и  $b_1=4,2 \cdot 10^{-6}$  1/Ом·км. К ВЛ примыкают маломощные системы с  $x_{c1} = x_{c2} = 200$  Ом. На основании этих значений получим  $L_{c1} = L_{c2} = L_c = 0,637$  Гн,  $L_{\text{л}} = 0,908$  мГн/км;  $C_{\text{л}} = 1,34 \cdot 10^{-8}$  Ф/км;  $\delta_s = 7,54$  1/с;  $z_B = 260$  Ом.

Из (2.12) определяем, что  $\omega_{s1} = 628$  1/с, что соответствует частоте первой свободной составляющей, равной 100 Гц.

В провод на середине линии ударяет отрицательный импульс молнии с током  $I_M = I_{M.гр} = 30$  кА. Из (2.19) получим, что для тока молнии длительностью  $t_M = 75$  мкс ( $\delta = 9200$  1/с)

$$i_{3s1} = 0,360 e^{-7,5t} \sin(628 t - \pi/2), \text{ кА и } u_{3s1} = 144 e^{-7,5t} \sin 628 t, \text{ кВ.}$$

Действующие значения первичных токов, с учетом компенсации емкостного токов по выражению (2.30), и напряжений на обоих концах ВЛ составят соответственно

$$I_{3s1к} = 0,031 \text{ кА и } U_{3s1} = 102 \text{ кВ,}$$

а действующие значения вторичных токов и напряжений

$$I_{3s1к.ВТ} = 6 \text{ мА и } U_{3s1ВТ} = 2,7 \text{ В.}$$

Пример 2. Представлена ВЛ с теми же погонными параметрами ( $x_1=0,285$  Ом/км,  $r_1=0,0137$  Ом/км и  $b_1=4,2 \cdot 10^{-6}$  1/Ом·км). Одна из примыкающих систем имеет  $x_{c1} = 200$  Ом, а другая является системой бесконечной мощности ( $x_{c2} = 0$   $L_c = 0$ ). При этом, чтобы иметь частоту  $\omega_{s1}$ , равную 628 1/с (100 Гц), длина ВЛ должна оставлять 980 км, т. е. существенно превышать длину существующих ВЛ. Из (2.12) следует, что длина линии, при которой  $\omega_{s1} = 628$  1/с, определяется как

$$l_{Л} = \frac{\pi - \arctg \frac{\omega_{c1} L_{c1}}{z_B}}{\omega_{s1} \sqrt{L_{Л} C_{Л}}} = 980 \text{ км,}$$

а место удара молнии с максимальными первыми свободными составляющими в месте установки защиты соответствует расстоянию

$$l_{2\max} = \frac{\pi}{2 \omega_{s1} \sqrt{L_{Л} C_{Л}}} = 717 \text{ км.}$$

При ударе молнии с током  $I_M = 30$  кА и с  $\delta = 9200$  1/с со стороны маломощной системы

$$i_{3s1} = 0,462 e^{-7,5t} \sin(628 t - \pi/2), \text{ кА;}$$

$$u_{3s1} = 185 e^{-7,5t} \sin 628 t, \text{ кВ}$$

а со стороны мощной системы –

$$i_{3s1} = -0,849 e^{-7,5t} \sin(628t - \pi/2), \text{ кА};$$

$$u_{3s1} = 0.$$

Действующие значения первичного тока, с учетом компенсации емкостного тока по выражению (2.30), и напряжения составят соответственно со стороны маломощной системы

$$I_{3s1к} = -0,212 \text{ кА}; \quad U_{3s1} = 131 \text{ кВ},$$

а со стороны мощной системы

$$I_{3s1} = 0,6 \text{ кА}; \quad U_{3s1} = 0.$$

Соответственно действующие значения вторичного тока и напряжения для конца линии со стороны маломощной системы составят

$$I_{3s1к.ВТ} = -42 \text{ мА}; \quad U_{3s1ВТ} = 3,5 \text{ В},$$

а для конца линии со стороны мощной системы -

$$I_{3s1к.ВТ} = 124 \text{ мА}; \quad U_{3s1ВТ} = 0 \text{ В}.$$

При увеличении длительности грозового разряда до  $t_m = 150 \text{ мкс}$  ( $\delta_m = 4600 \text{ 1/с}$ ) амплитуды тока и напряжения увеличатся вдвое. Распределение амплитуд первых свободных составляющих рассчитано по (2.24) и обозначено на рис. 2.6 как (1) и (2). Распределение относительных значений амплитуд первых свободных составляющих в месте установки защиты в зависимости от места удара молнии, рассчитанное с учетом изменения  $l_2$  от 0 до  $l_{л}$ , обозначено как (3) на том же рисунке.

Пример 3. Представлена ВЛ с теми же погонными параметрами ( $x_1=0,285 \text{ Ом/км}$ ,  $r_1=0,0137 \text{ Ом/км}$  и  $b_1=4,2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Ом}\cdot\text{км}$ ), но с системами бесконечной мощности с обеих сторон ВЛ ( $x_{c1} = x_{c2} = 0$ ) частота  $\omega_{s1}$ , рассчитанная по уравнению (2.12) и равная  $1055 \text{ 1/с}$  ( $170 \text{ Гц}$ ), находится вне пределов полосы пропускания частотных фильтров защиты. Величины токов и напряжений при этом не превышают уровня срабатывания измерительных органов.

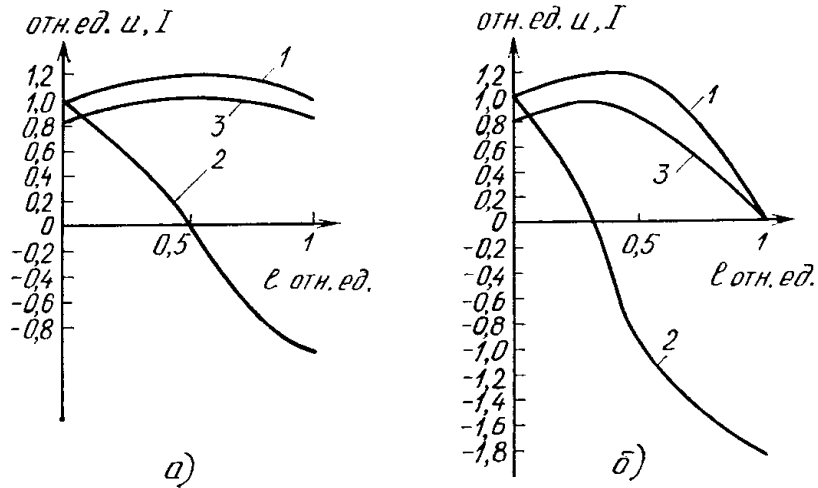


Рис. 2.6. Распределение амплитуд первых свободных составляющих напряжения (1) и тока (2) обратной последовательности вдоль линии, относительные величины амплитуд первых свободных составляющих тока (3) в месте установки защиты в зависимости от места удара молнии: *a* - для примера 1, *б* - для примера 2

В соответствии с (2.26) свободные составляющие токов имеют противоположное направление при принятых на рис. 2.4 положительных направлениях, т. е. принципиально воспринимаются как КЗ в зоне. Таким образом, реле направления мощности обратной последовательности направленной фильтровой защиты [3, 70] по концам ВЛ могут работать в сторону отключения под влиянием свободных составляющих. Величины, подводимые к реле мощности обратной последовательности, соответствуют данным [70]. Напряжения на выходе фильтра обратной последовательности с частотным коэффициентом  $\gamma = 0,5$  получаются примерно на 20 % больше, чем соответствующие им значения свободных составляющих обратной последовательности в особой фазе, так как свободные составляющие прямой последовательности частоты 100 Гц также создают напряжение на выходе фильтра. В этом случае напряжение на трехфазном выходе фильтра носит существенно несимметричный характер. Параметры срабатывания [71] реле

$$U_{2c_p} = 2 \text{ В}; \quad I_{2c_p} = 50 \text{ мА};$$

$$U_{2б_а} = 1 \text{ В}; \quad I_{2б_а} = 25 \text{ мА}.$$

В примере 1 реле мощности в сторону отключения работать не будет, так как ток в реле с учетом компенсации значительно меньше уставки  $I_{2c_p}$ . Следует отметить, что в условиях примера 1 успешно проявляется эффективность компенсации емкостных токов.

В примере 2 со стороны маломощного конца реле сработает в направлении блокировки (знак минус у тока  $I_{3s1к}$  - «преобладание» компенсации), а со стороны мощного конца может сработать на отключение при больших  $z_k$ , а устройство компенсации емкостных токов не сработает, так как  $U_{3s1} = 0$ .

Манипуляция ВЧ передатчиком дифференциально-фазной защиты производится напряжением  $U_m = \dot{I}_1 + k\dot{I}_2$  с участием составляющей нагрузочного режима [1]. При больших нагрузках в симметричном режиме определяющей будет составляющая  $I_1$  нагрузочного режима, и ложная работа этой защиты практически исключена. При малых нагрузках оценка работы направленных защит целиком распространяется на действие дифференциально-фазных защит.

Таким образом для высокочастотных защит ВЛ СВН существует определенная вероятность ложных срабатываний на действующих ВЛ максимальной длины. Однако для подавляющего большинства существующих и проектируемых ВЛ СВН частоты свободных составляющих при грозовых возмущениях пока еще существенно отличаются от промышленной частоты, и этот признак может быть использован для отстройки высокочастотных защит от прорывов молнии, не сопровождаемых КЗ.

Оценивая порядок величин, следует отметить, что вероятность ложной работы защиты ВЛ СВН, реагирующей на составляющие промышленной частоты, возрастает с увеличением длительности импульсов молнии. Наибольшую опасность в связи с этим представляют удары положительной полярности, так как они имеют большую энергию.

При этом для ориентировочной оценки процессов при положительной полярности разрядов молнии достаточно брать увеличенные значения показателей затухания тока молнии, что отражает большую энергию этих разрядов и повышенные значения амплитуд обусловленных ими свободных составляющих. При этом, как указывалось выше, их доля не превышает 10—15 % в общем числе ударов молнии.

## **2.2. Распознавание ударов молнии, не вызывающих короткого замыкания, на ППТ 1500 кВ**

### **2.2.1. Методы расчета переходных процессов**

Принципиальная схема электропередачи постоянного тока напряжением 1500 кВ Экибастуз-Центр показана на рис. 2.7 [72]. Исследуются волновые процессы в ЛЭП (рис. 2.8), возникшие под влиянием грозовых разрядов, а также КЗ. Разработан ряд программных методов [44, 73-82], основанных на анализе воздействия бегущих волн. При этом деформация и затухание волн в ЛЭП учитываются с различной степенью детализации. В частности, в Бакинском институте физики (ИФАН) [78] реализован метод характеристик численного решения системы гиперболических уравнений, описывающих волновые процессы в многопроводной ЛЭП с учетом поверхностного эффекта в земле и проводах, а также коронирования. При этом для моделирования частотных характеристик линий в диапазоне до 10 кГц используются  $RL$  цепочки с 3 ÷ 4 параллельными ветвями, учитывающими поверхностный эффект в земле и проводах. Все упомянутые программы помимо специфических проблем, связанных с обеспечением требуемой точности решения уравнений волновых процессов в многопроводных ЛЭП, позволяют провести согласование решений этих уравнений с решениями уравнений, описывающих переходные процессы в

цепях с сосредоточенными параметрами. В [77, 83] приводится информация о расчетах, проведенных с учетом поверхностного эффекта в нулевом канале,

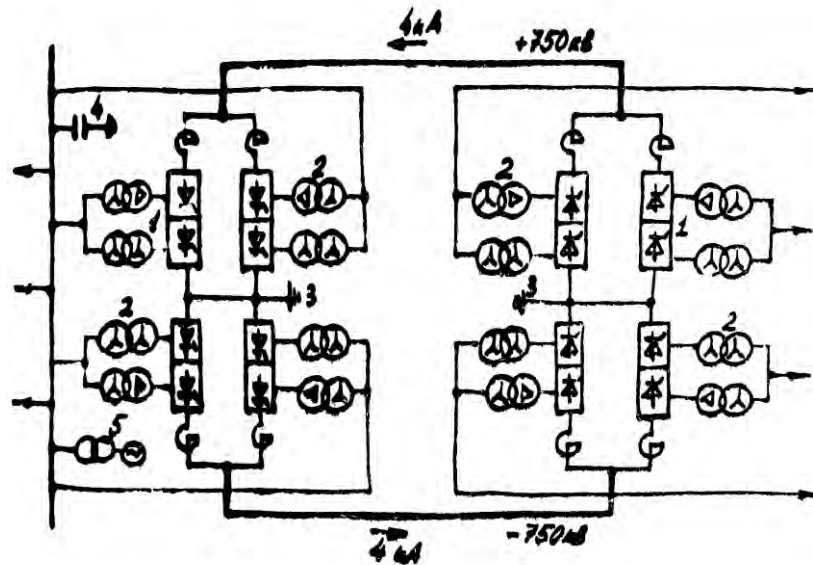


Рис. 2.7. Схема электропередачи постоянного тока напряжением 1500 кВ  
Экибастуз-Центр

в виде отдельной процедуры [81], использующей одну из форм интеграла Дюамеля и дополняющей основной комплекс программ МАЭС. Основной сложностью применения метода волновых каналов для многопроводных ВЛ СВН является зависимость матриц преобразования от частоты [44, 84 - 86]. Однако при рассмотрении переходных процессов в частотном диапазоне до 50 кГц изменения элементов этих матриц не превышают 10 % [44]. Поэтому расчеты велись с постоянной матрицей преобразования.

Особый интерес представляет использование модельного метода [73], в котором достаточно сложная и разветвленная электрическая цепь рассматривается как совокупность многополюсников. В качестве математической модели используется система уравнений первого закона Кирхгофа для электрической цепи и системы уравнений отдельных элементов цепи в виде уравнений многополюсников, связывающих напряжения и токи на выводах отдельных многополюсников. Модельный метод анализа электромагнитных процессов в сложных энергосистемах реализован в комплексе программ МАЭС [72] с использованием неявной

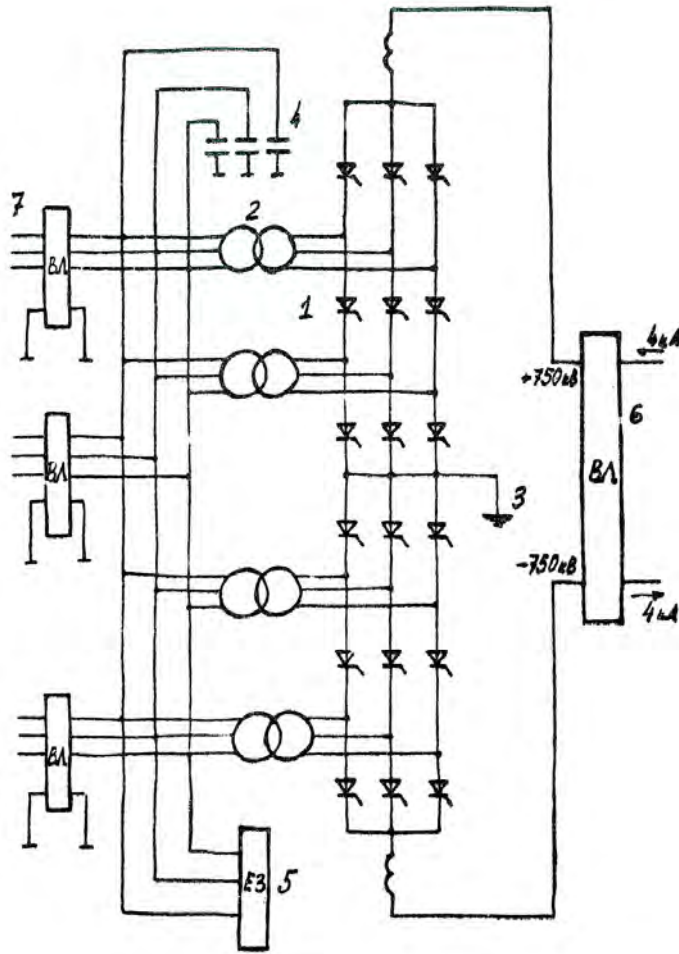


Рис. 2.8. Схема преобразовательной подстанции с примыкающими к ней ЛЭП (1 - двухмостовые преобразователи, 2 - трехфазные группы трансформаторов, 3 - рабочее заземление, 4 - конденсаторные батареи, 5 - синхронные компенсаторы, 6 - ЛЭП постоянного тока напряжением 1500 кВ, 7 - ЛЭП 500 кВ)

устойчивой разностной схемы расчета переходного процесса с постоянным шагом по времени. При этом математическая модель многопроводной линии основывается на аналитическом решении волновых уравнений в виде бегущих волн, распространяющихся в междуфазных каналах и каналах нулевой последовательности. Вследствие этого при исследовании рассматриваемых переходных процессов в ЛЭП ППТ 1500 кВ выбор был сделан в пользу модельного метода [73] и его программной реализации [74] с одновременным подключением к комплексу программ МАЭС модифицированного модуля, представляющего (в виде уравнений



многополюсника) математическую модель многопроводной линии на основе метода характеристик [78].

На основании выбранного метода в точке  $d$  с координатами по времени  $t$  и расстоянию  $x$  производится определение напряжений  $U_d$  и токов  $i_d$  по значениям токов  $i_p$  и  $i_q$  и напряжений  $U_p$  и  $U_q$ , в точках  $p$  и  $q$  с координатами соответственно  $x - h, t - \tau$  и  $x + h, t - \tau$  путем решения уравнений вида:

$$\begin{aligned} (1 + hzg)U_d + (z + z_n)i_d &= A_p; \\ -(1 + hzg)U_d + (z + z_n)i_d &= A_q; \\ A_p &= U_p + Zi_p + \Theta; \\ A_q &= -U_q + Zi_q + \Theta, \end{aligned} \quad (2.31)$$

в которых  $z$  характеризует волновое сопротивление ЛЭП без потерь,  $g$  – проводимость ЛЭП, а  $\Theta$  и  $z_n$  – потери в земле и проводах ЛЭП. При этом  $z_n$  определяется по формулам Карсона и Томсона, а  $\Theta$  – путем моделирования поверхностного эффекта в земле и проводах в промежуточных точках ЛЭП с помощью  $RL$  – элементов, численные значения которых получены в соответствии с моделью поверхностного эффекта Н.Н.Щедрина [78].

Параметры ЛЭП ППТ [72], использованные при проведении расчетов, определялись расстоянием между полупесями  $l_A = 26$  м и между тросами  $l_{тр} = 16,2$  м, эквивалентной высотой подвеса полупесяй  $h_n = 16$  м и тросов  $h_{тр} = 19,5$  м. Полуцепи и тросы выполнены расщепленными соответственно на 5 и 2 составляющих с проводами марки АС 1200/67 и АС 70/72. Шаг расщепления проводов полупесяй – 60 см, а тросов – 40 см. Удельное сопротивление грунта варьировалось от 100 до 3000 Ом.м. Коэффициент скрутки проводов принят равным 1,5. Тросы по концам передачи заземлены. Основная масса расчетов выполнена без учета дискретного заземления тросов на усилительных пунктах связи [87]. По концам каждой полупесяи последовательно включались реакторы с индуктивностью 1 Гн.

Предварительные оценки распространения грозových волн, полученные по приближенным выражениям [88]

$$\begin{aligned}
U_{(M\Phi)}(x,t) &= 1 - \Phi\left(\frac{0,074 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{t}} x\right) \quad \text{при } t < \tau; \\
U_{(M\Phi)}(x,t) &= \Phi\left(\frac{0,074 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{t-\tau}} x\right) - \Phi\left(\frac{0,074 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{t}} x\right) \quad \text{при } t > \tau; \\
U_{(0)}(x,t) &= 1 - \Phi\left(\frac{1,16 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{t}} x\right) \quad \text{при } t < \tau; \\
U_{(0)}(x,t) &= \Phi\left(\frac{1,16 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{t-\tau}} x\right) - \Phi\left(\frac{1,16 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{t}} x\right) \quad \text{при } t > \tau,
\end{aligned} \tag{2.32}$$

(где  $\tau$  - длительность грозового импульса,  $0,074 \cdot 10^{-4}$  и  $1,16 \cdot 10^{-4}$  - коэффициенты, учитывающие деформацию волн в междуфазовом и нулевом каналах,  $\Phi$  - интеграл вероятности,  $U_{(M\Phi)}$  и  $U_{(0)}$  - напряжения междуфазной и нулевой волн), показали, что отношение напряжений нулевого и междуфазного каналов превышает два при изменении  $x$  в интервале до 2400 км и  $\tau$  - от 35 мкс до 500 мкс.

Предпосылками для определения возможности распознавания грозовых возмущений на ЛЭП ППТ послужили результаты разработки и испытаний волновой релейной защиты ВЛ СВН, содержащей специальный блок контроля грозовых возмущений [59, 60]. В связи с этим рассмотрены соотношения сумм и разностей напряжений полюсов (полуцепей) ВЛ ППТ в точках контроля по концам ВЛ при изменении места удара молнии вдоль длины линии. При этом для моделирования грозовых напряжений, вызванных ударами молнии вблизи ППТ, использовано выражение [89]:

$$U_{\text{инд}} = \frac{30I_0 h}{\epsilon}, \tag{2.33}$$

где  $I_0$  - амплитуда тока молнии,  $h$  - высота подвеса провода или троса,  $\epsilon$  - расстояние до них от места удара.

Согласно [90], трос крепится на тросостойке к изолятору типа ПМ, который шунтируется искровым промежутком. Учитывая, что импульсное напряжение при перекрытии изолятора составляет 80 -120 кВ (т.е. находится

на уровне  $0,1 U_{\text{ППТ}}$ ), не считаться с анализом грозовых процессов, не приводящих к перекрытиям троса, не представляется целесообразным.

### 2.2.2. Анализ результатов расчетов

Результаты расчетов сумм и разностей напряжения полупетей ППТ по расчетным выражениям (2.31) и (2.33) при индуктированных ударах молнии вне зоны поражения ЛЭП, но с перекрытием искровых промежутков тросов, приведенные на рис. 2.9 и 2.10, указывают, что сумма напряжений полупетей больше чем вдвое превышает их разность в месте установки системы ОМП. Особенностью этих результатов является то, что первые максимумы падающих волн в обеих комбинациях напряжения практически совпадают по времени (максимум суммы напряжений формируется с некоторым опережением).

Результаты расчетов рис. 2.11 - 2.15, однако, внесли существенные коррективы в понимание процессов, происходящих при индуктированных перенапряжениях. Дело в том, что при воздействии грозовых ударов, не приводящих к перекрытию одного или двух тросов, формируются соизмеримые по величине максимальные значения сравниваемых комбинаций после пробегов волной более 100 км. Это объясняется тем, что при рассматриваемых индуктированных перенапряжениях за счет более высоких значений напряжения в тросах при отсутствии перекрытия хотя бы одного искрового промежутка формируются составляющие "полупетей - тросы", противоположные по знаку составляющим "все провода - земля", в отличие от ситуации с перекрытием искровых промежутков в обоих тросах, когда эти составляющие совпадают по знаку. Различие указанных составляющих по знаку приводит к тому, что более "быстрые" составляющие "полупетей - тросы" как бы компенсируются под влиянием существенно больших по значению, хотя и интенсивнее запаздывающих и затухающих составляющих "все провода - земля". Вследствие этого на уровне максимума

разности напряжений полупедей совершенно не выдерживается соотношение, присущее ситуации с перекрытием обоих тросов. Такая особенность дает основание сделать вывод, что не все из индуктированных грозových возмущений могут быть отделены от повреждений по уровню соотношений сумм и разностей напряжений полупедей в интервале времени, близком к шагу расчета.

Результаты расчетов рис. 2.16 - 2.28 не повлияли на ранее полученные результаты, позволив распространить их действие на ВЛ ППТ с учетом дискретного заземления тросов. Дополнительные данные были получены при расчетах напряжений, вызванных ударами молнии в полупедеи и тросы и КЗ полупедей. Они показали, что волны, вызванные прорывами молнии сквозь тросовую защиту (рис. 2.22 и 2.23), по соотношениям сумм и разностей напряжения полупедей не отличаются от волн от места КЗ (рис. 2.24). Следует отметить, что удар молнии в оба троса приводит к появлению одинаковых волн на обоих полупедах, вследствие чего создаются наиболее благоприятные условия для сравнения сумм и разностей их напряжений по уровню. Удар молнии в опору также подчиняется этим условиям, так как при этом по обоим тросам от опоры до подстанций распространяются одинаковые волны. Эти волны являются явно преобладающими при грозových ситуациях и поэтому их можно распознать по соотношению уровней сумм и разностей напряжений полупедей.

Анализ результатов расчетов также показал, что длительность импульсов грозového возмущения, сформированных из разностей напряжений полупедей, намного короче паузы между ними (см. например, рис. 2.16 - 2.23) по сравнению с соизмеримостью указанных параметров при КЗ (рис. 2.24). Этот факт позволил предложить в качестве дополнительного средства отстройки грозových сигналов от сигналов КЗ использование соотношений длительности и паузы сигнала. Если пауза превышает длительность сигнала более чем вдвое - выявляется грозовой сигнал, если нет - выявляется КЗ.

Таким образом, основываясь на результатах вышеприведенных расчетов, можно сделать следующие выводы. На ВЛ ППТ 1500 кВ все грозовые разряды сопровождаются формированием составляющих в контурах "все провода - земля" и "полуцепи - тросы", которые целесообразно выделять суммированием напряжений полуцепей. Для отличия волн КЗ от волн грозового происхождения следует рекомендовать сравнение (или их производных) вблизи максимума разности указанных напряжений. При грозовых возмущениях, сопровождающихся ударом молнии в опору, в оба троса, в объекты вне зоны грозозащиты ППТ (при перекрытии обоих тросов в месте удара) сумма напряжений полуцепей более чем вдвое превышает их разность, в то время как при КЗ эти величины соизмеримы. Однако при ударах молнии в полуцепь, а также в объекты вне зоны грозозащиты без перекрытия или с перекрытием одного из тросов указанное соотношение напряжений практически совпадает с тем, что имеет место при КЗ. Для более полной отстройки сигналов при КЗ от сигналов при грозовых возмущениях целесообразно дополнительно производить сравнение длительностей этих сигналов с паузами между ними, поскольку паузы грозовых сигналов длиннее, чем паузы сигналов при КЗ.

## **2.3. Пусковой орган для ППТ 1500 кВ**

### **2.3.1. Функциональная схема пускового органа**

ППТ предъявляет весьма высокие требования к комплексу устройств автоматики и РЗ, обеспечивающих эффективность их функционирования, в частности которые должно быть отстроены от возмущений, не связанных с КЗ, в том числе грозового происхождения, т.е. срабатывать только при КЗ в двухцепном и одноцепном режиме работы ППТ. Реализация этих требований должна осуществляться путем контроля сигналов срабатывания РЗ ППТ и

сигналов, подтверждающих отстройку от переходных процессов, связанных с грозowymi разрядами, не приводящими к КЗ.

Для отстройки устройства ОМП от указанных возмущений разработан пусковой орган [91], реагирующий на соотношения сумм и разностей напряжений полупедей ЛЭП ППТ и длительностей разностей напряжений этих полупедей с паузами между ними  $S$  целью проверки в условиях эксплуатации пусковой орган был установлен на панели волновой направленной защиты линии ВЛ СВН. Проведенные автором диссертации расчеты волновых переходных процессов при грозowych возмущениях и КЗ для ВЛ СВН переменного напряжения [5] и для ППТ и их анализ подтвердил наличие общих закономерностей и возможность создания единого технического решения.

Действие пускового органа КВ-1 основано на контроле в течение ограниченного отрезка времени (примерно нескольких миллисекунд)

отношения  $K_U = \frac{U_0}{U_1}$ <sup>1</sup> (условие срабатывания  $K_U > 2$ );

отношения  $K_T = \frac{T_p}{T_i}$  длительности сигнала  $T_i$ , и длительности паузы  $T_p$

напряжения  $U_1$  для фиксации грозowych возмущений без КЗ (условие срабатывания  $K_T \geq 2$ ).

Пусковой орган КВ-1 включает в себя блок  $KB_U$  контроля отношения напряжений и блок  $KB_T$  контроля отношения длительностей импульсов (рис. 2.29). Выпрямленные элементами  $VD1$  и  $VD$  сигналы подаются на входы интеграторов  $D12$  и  $D11$ , а затем сравниваются в компараторе  $DS$ , который настроен на заданное соотношение  $K_U$ . Сигнал срабатывания компаратора  $DS$  (при  $K_U > 2$ ) поступает через элемент задержки  $DT1$  на исполнительный блок  $AB1$ . Сигнал с выхода выпрямителя  $VD1$  поступает на входы блока

<sup>1</sup>  $U_0$  и  $U_1$  – соответственно напряжения  $U_0 = U_I + U_{II}$  и  $U_1 = U_I - U_{II}$ , где  $U_I$  и  $U_{II}$  – напряжения I и II полупедей

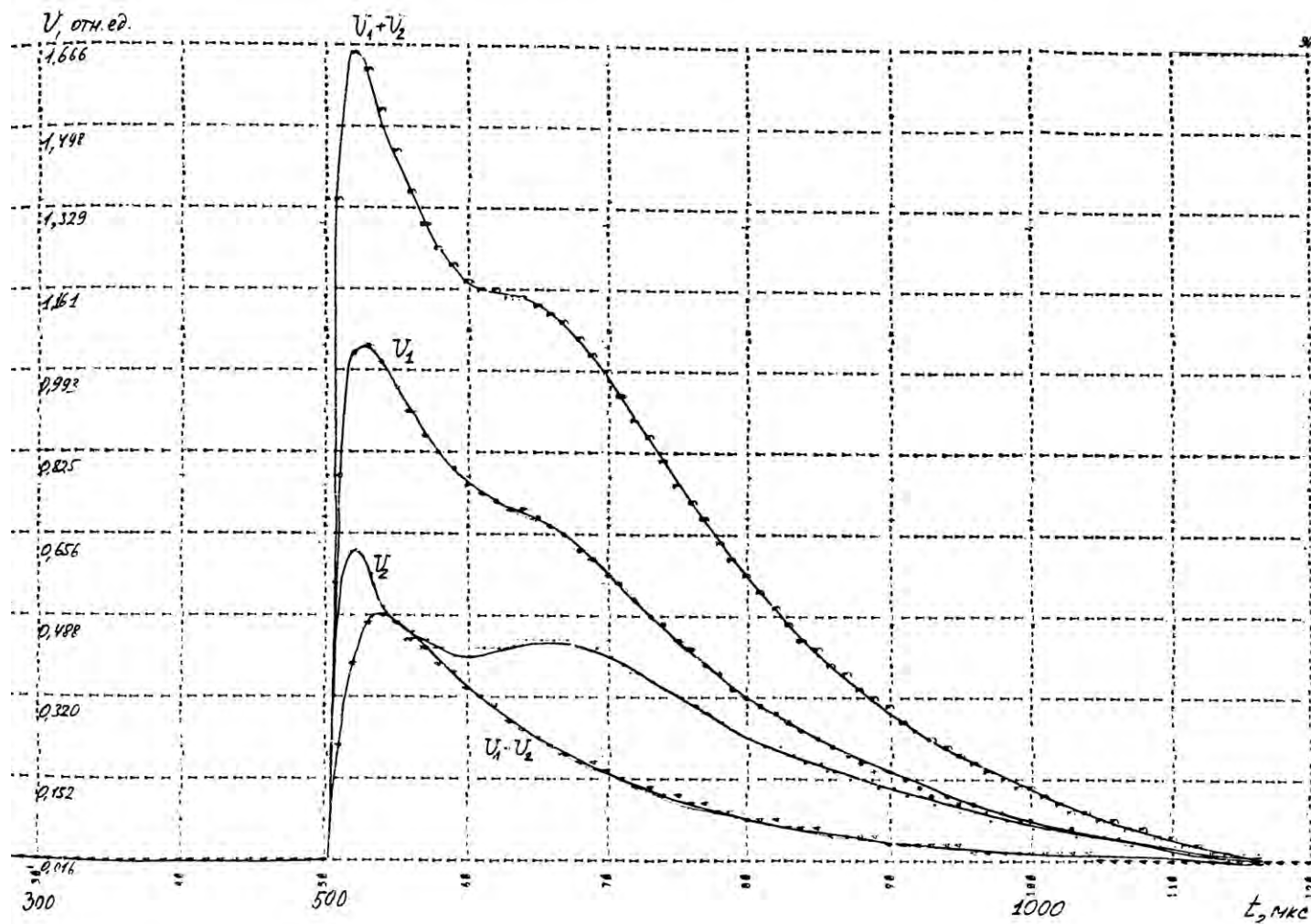


Рис. 2.9. Грозовой разряд в 150 км от преобразовательной подстанции на расстоянии 52 м от первой полупеци с перекрытием искровых промежутков тросов

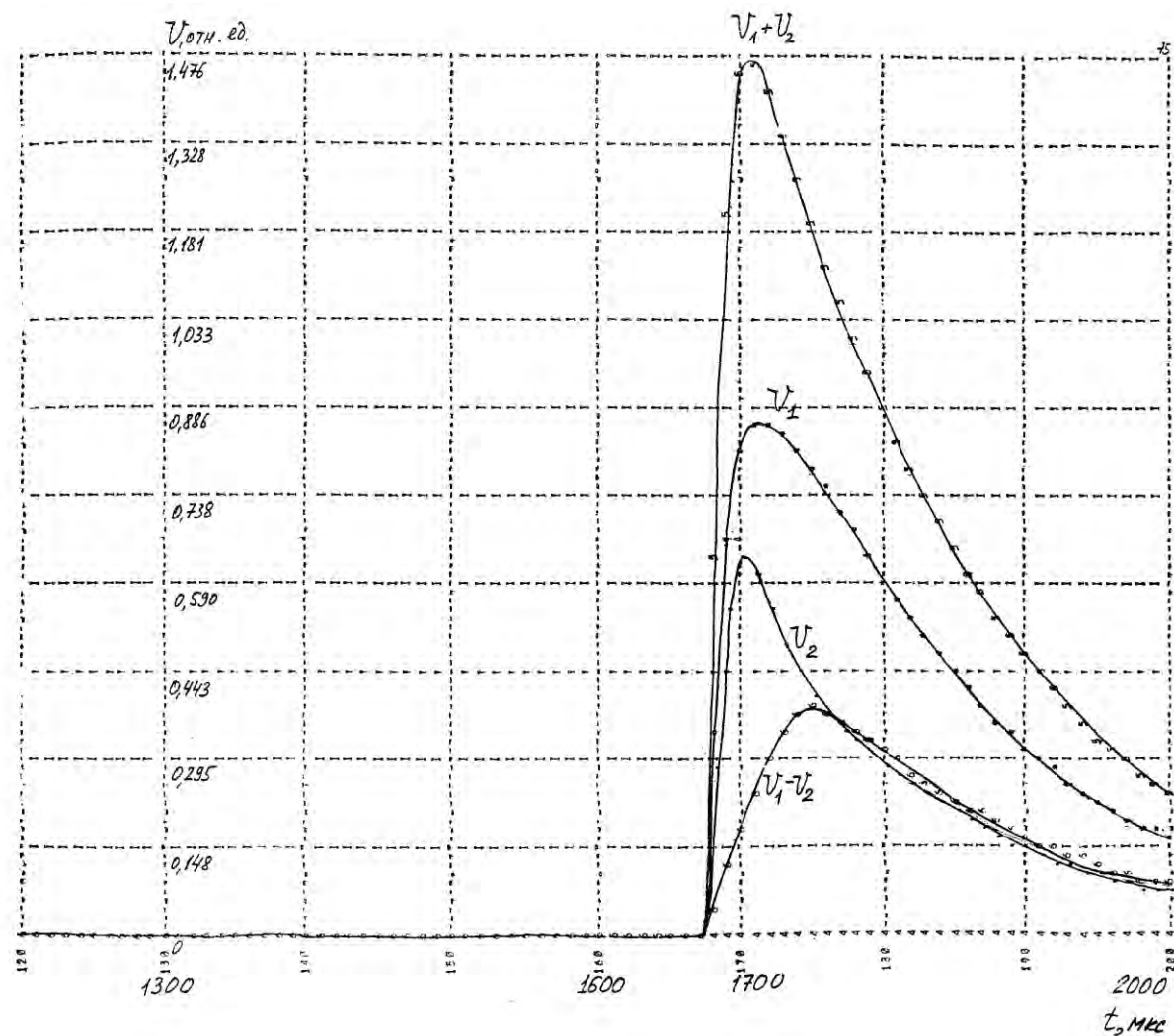


Рис. 2.10. Грозовой разряд в 501 км от преобразовательной подстанции на расстоянии 52 м от первой полупеци с перекрытием искровых промежутков тросов



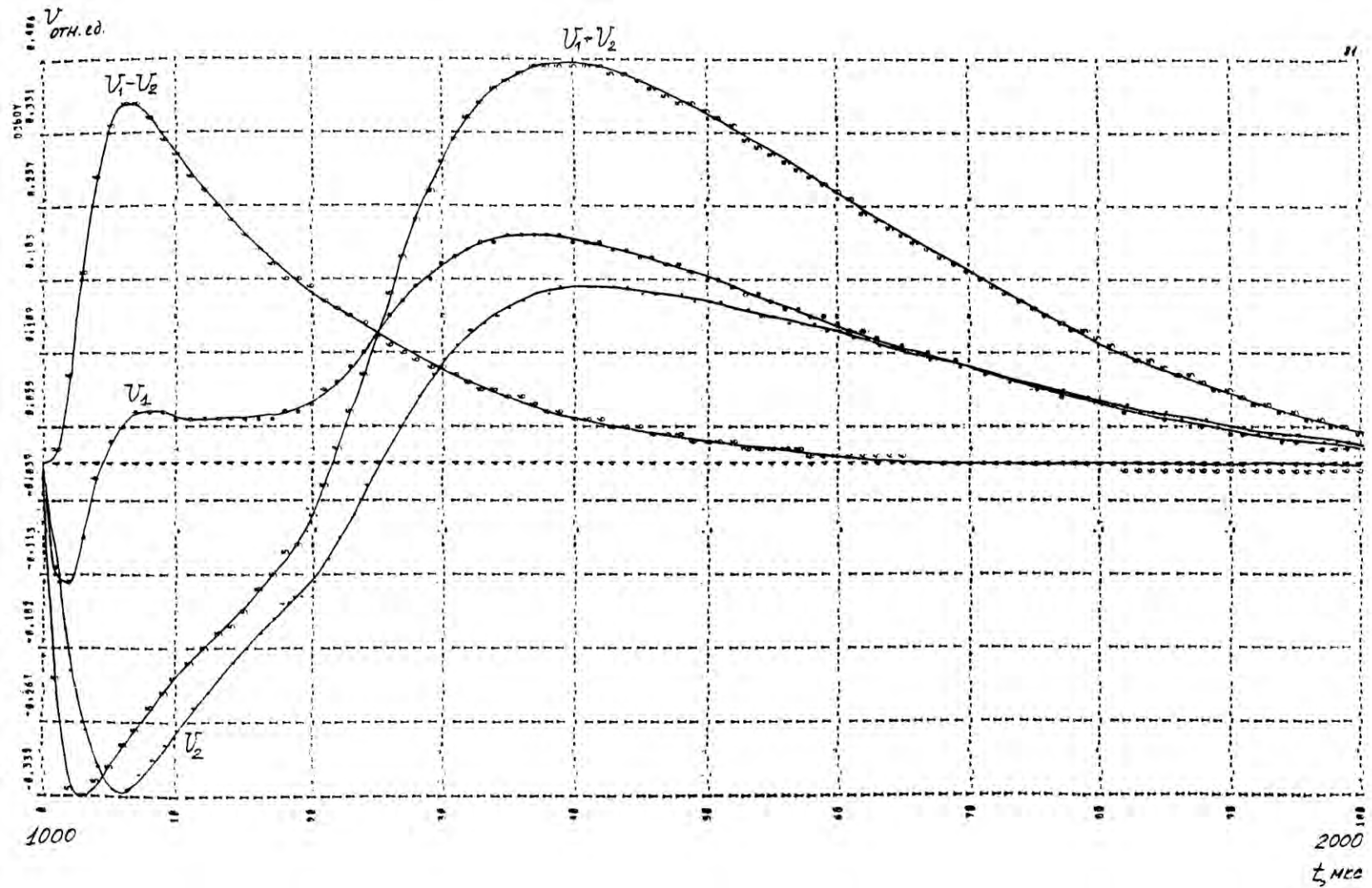


Рис. 2.11. Грозовой разряд в 300 км от преобразовательной подстанции на расстоянии 52 м от первой полупеи без перекрытия искровых промежутков тросов

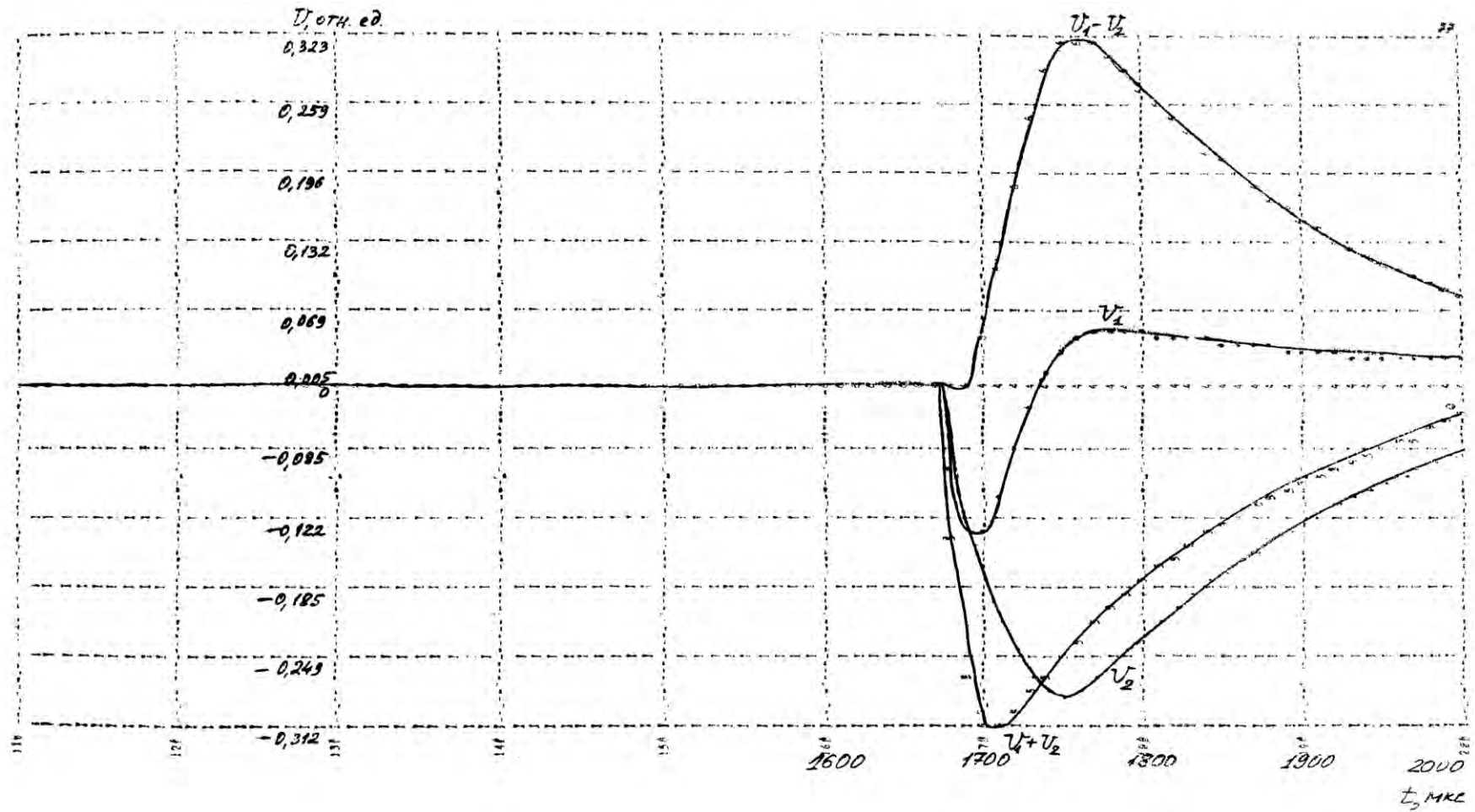


Рис. 2.12. Грозовой разряд в 501 км от преобразовательной подстанции на расстоянии 52 м от первой полупеи без перекрытия искровых промежутков тросов

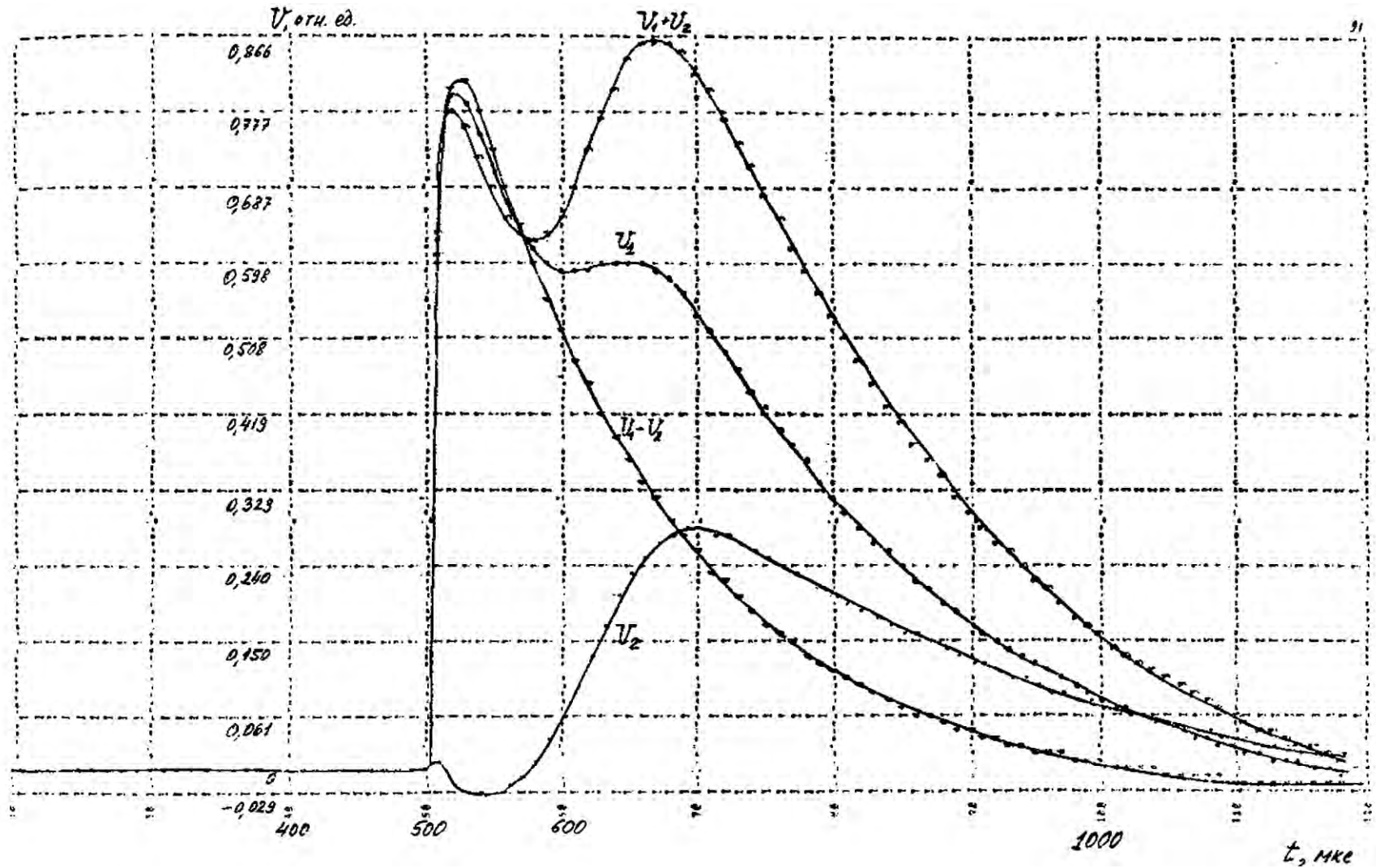


Рис. 2.13. Грозовой разряд в 150 км от преобразовательной подстанции на расстоянии 52 м от первой полупеи с перекрытием искровых промежутков ближайшего к месту удара троса

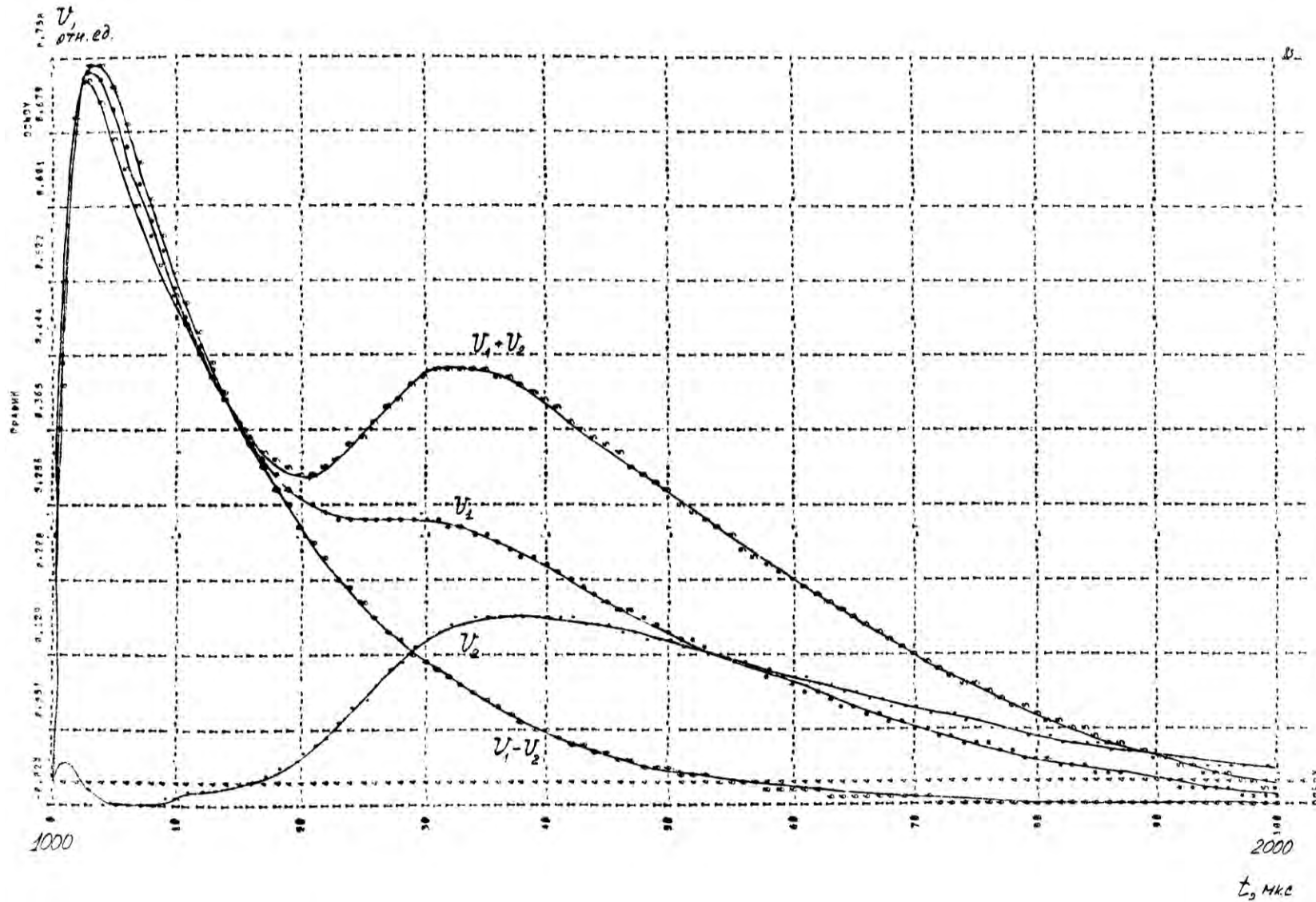


Рис. 2.14. Грозовой разряд в 300 км от преобразовательной подстанции на расстоянии 52 м от первой полупеи с перекрытием искровых промежутков ближайшего к месту удара троса

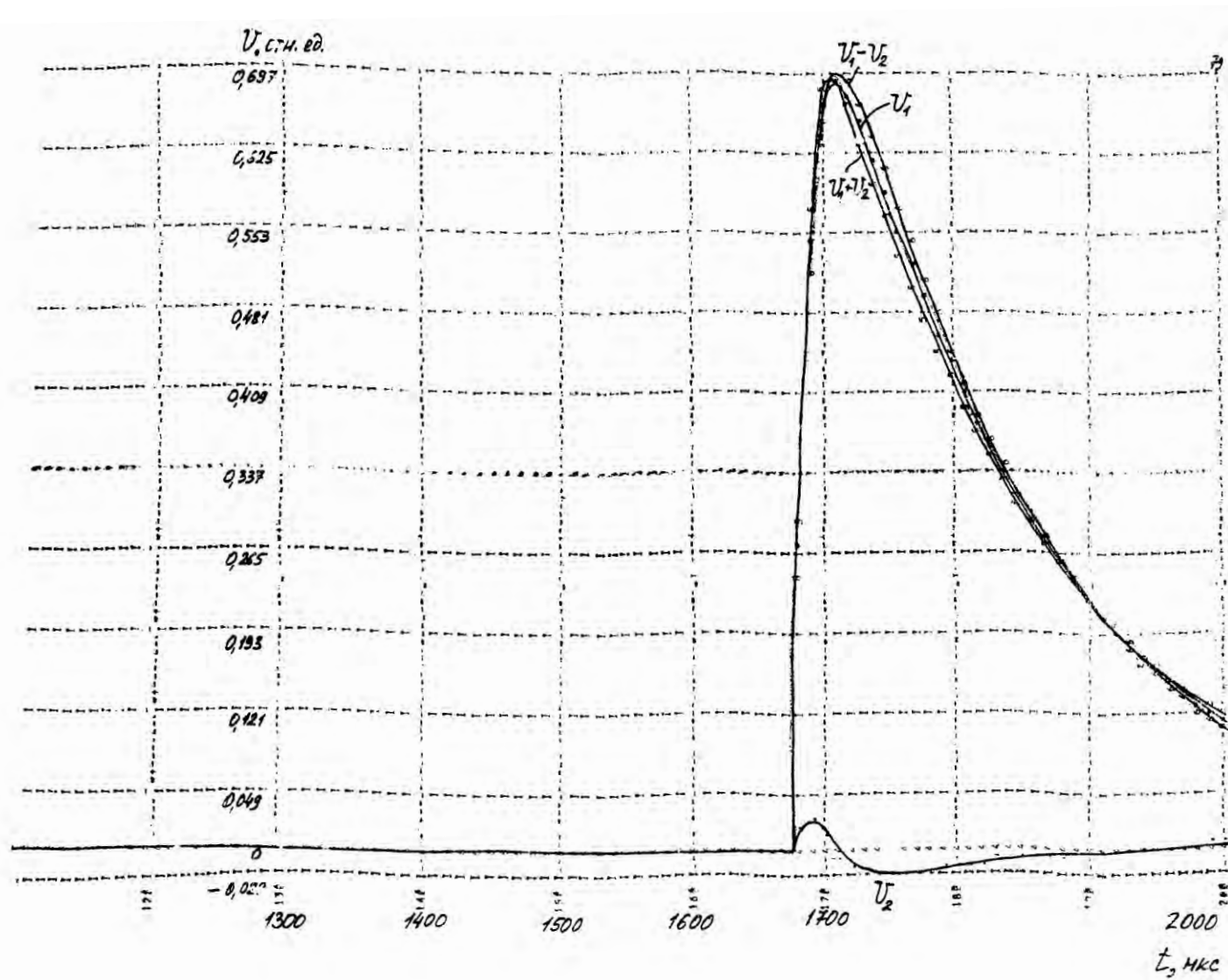


Рис. 2.15. Грозовой разряд в 501 км от преобразовательной подстанции на расстоянии 52 м от первой полупеи с перекрытием искровых промежутков ближайшего к месту удара троса

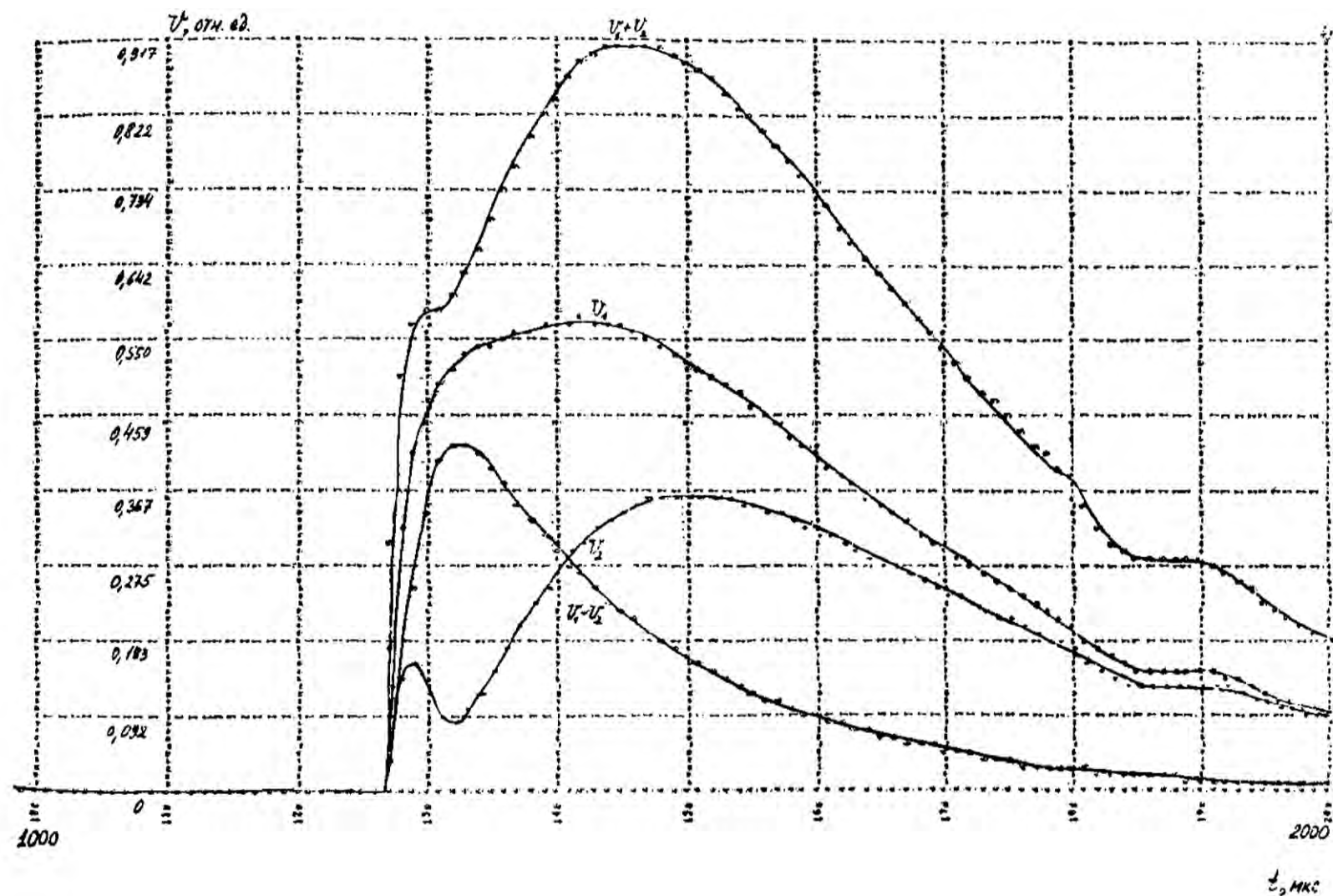


Рис. 2.16. Грозовой разряд в 378 км от преобразовательной подстанции на расстоянии 52 м от первой полупеи с перекрытием искровых промежутков тросов (удельное сопротивление земли 100 Ом·м)

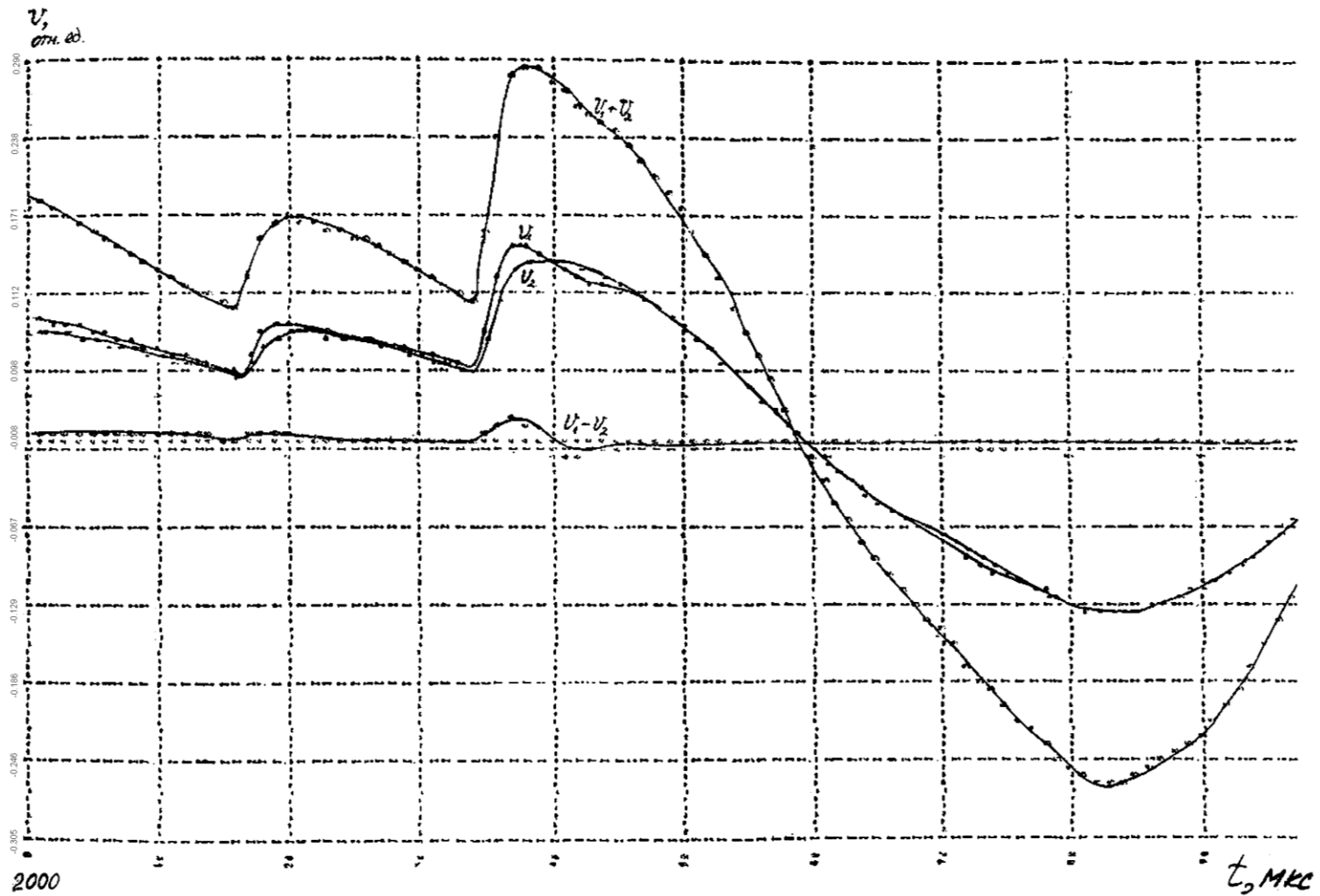


Рис. 2.17. Грозовой разряд в 378 км от преобразовательной подстанции на расстоянии 52 м от первой полупеи с перекрытием искровых промежутков тросов (удельное сопротивление земли 100 Ом·м) (продолжение рис.2.12)



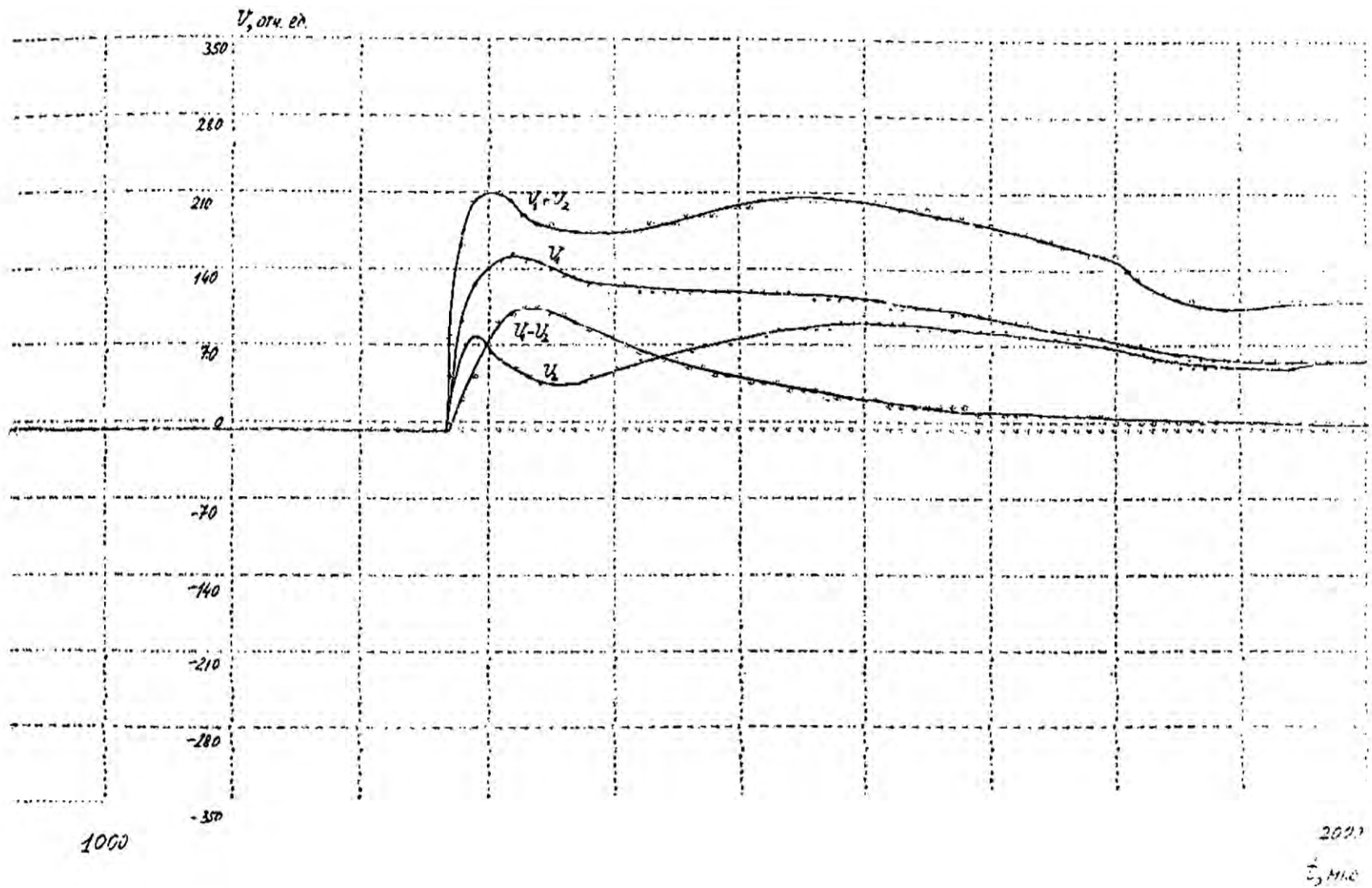


Рис. 2.18. Грозовой разряд в 378 км от преобразовательной подстанции на расстоянии 52 м от первой полупеи с перекрытием искровых промежутков тросов (удельное сопротивление земли 3000 Ом·м)



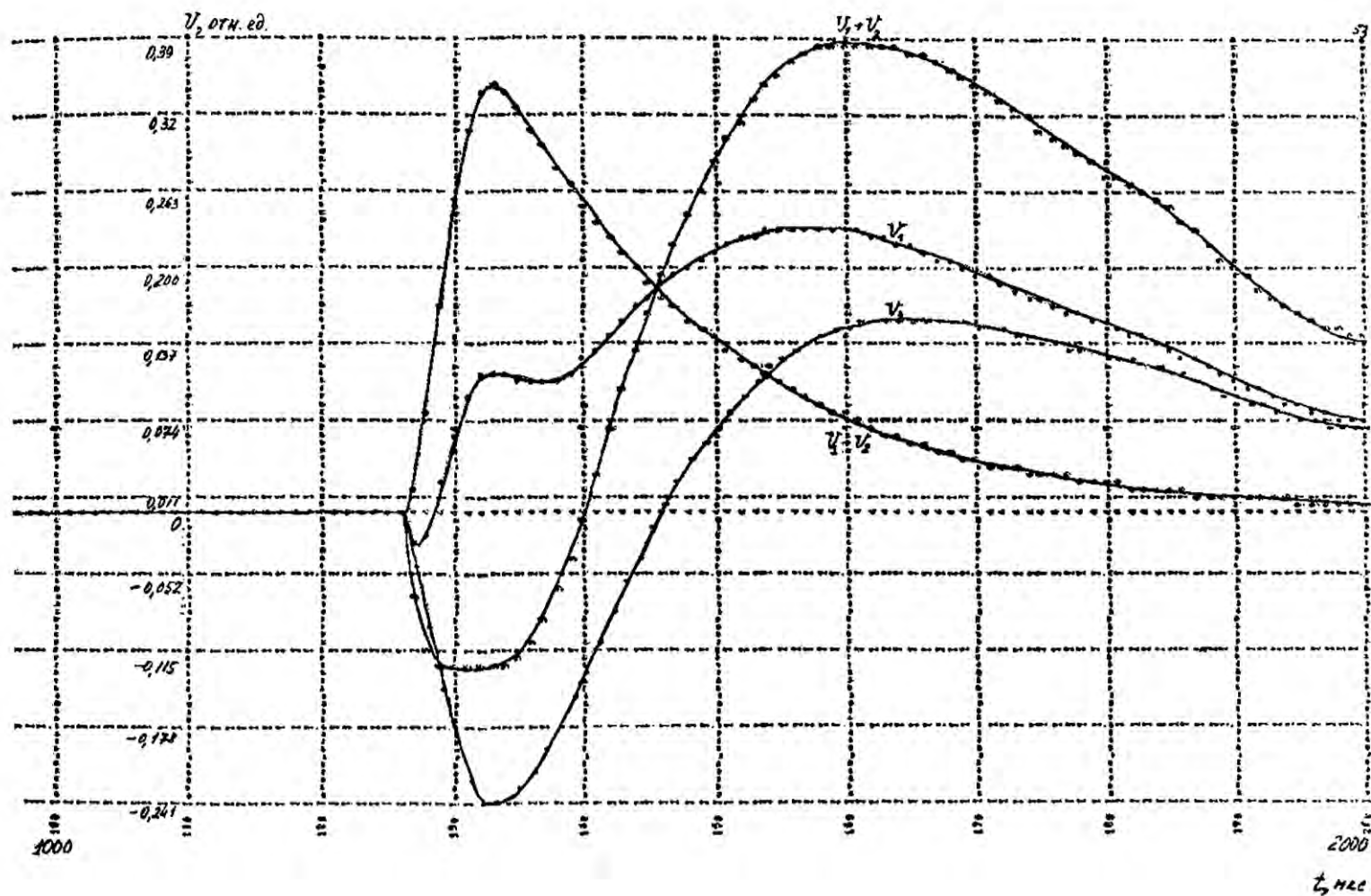


Рис. 2.19. Грозовой разряд в 378 км от преобразовательной подстанции на расстоянии 52 м от первой полупеци без перекрытия искровых промежутков тросов (удельное сопротивление земли 3000 Ом·м)

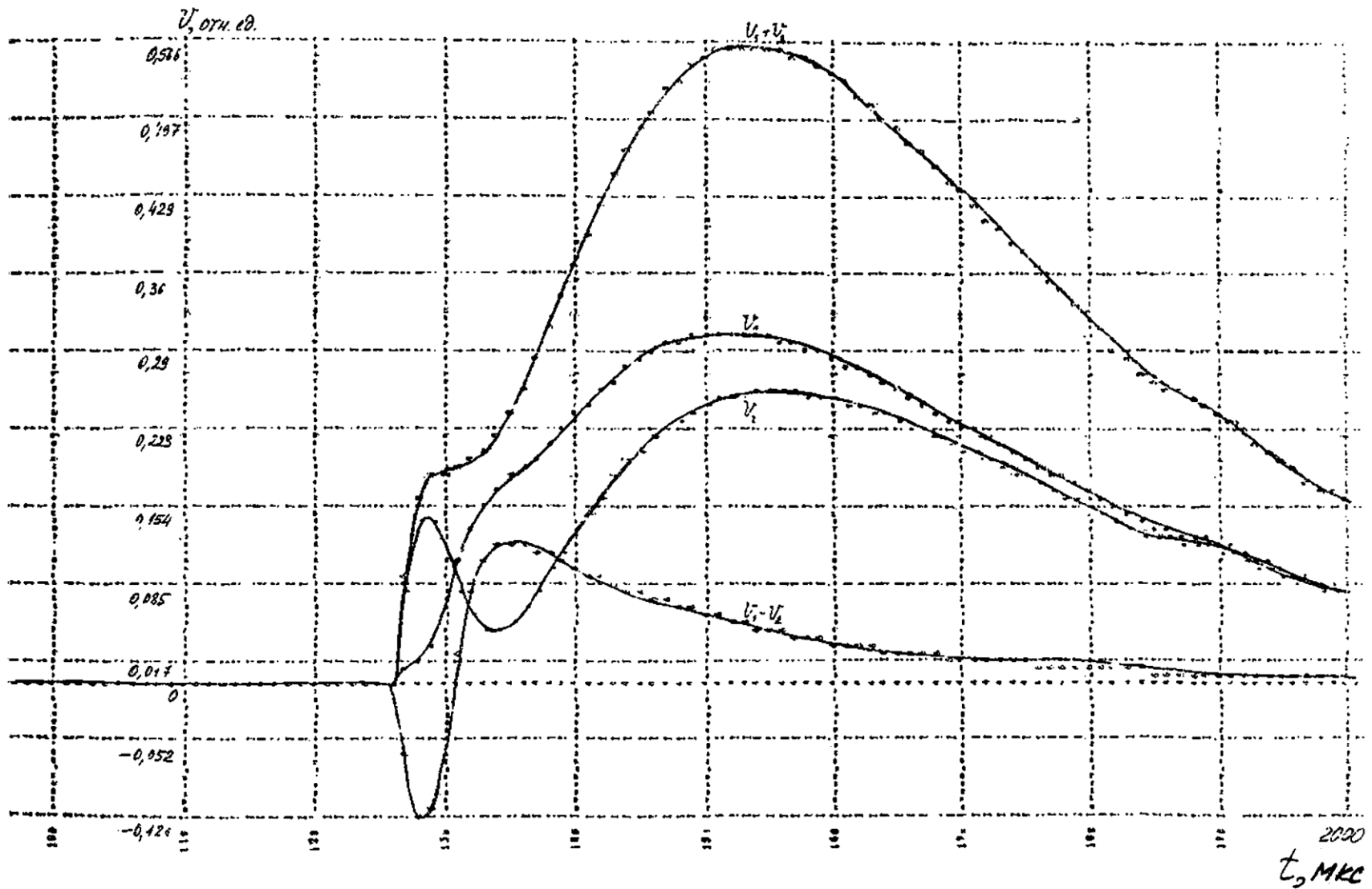


Рис. 2.20. Грозовой разряд в 378 км от преобразовательной подстанции на расстоянии 52 м от первой полупеи с перекрытием искровых промежутков второго троса (удельное сопротивление земли 3000 Ом·м)

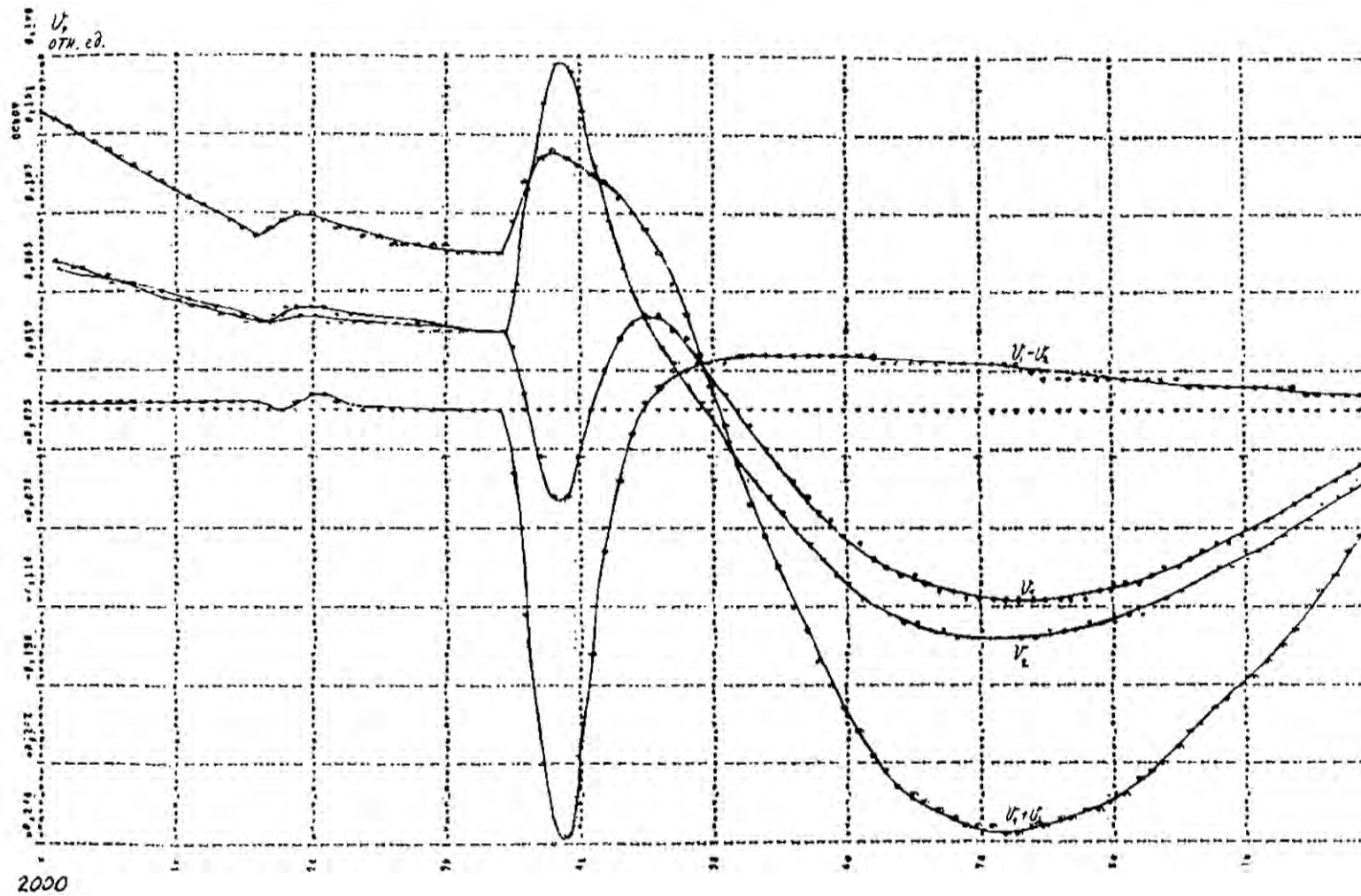


Рис. 2.21. Грозовой разряд в 378 км от преобразовательной подстанции на расстоянии 52 м от первой полупеи с перекрытием искровых промежутков второго троса (удельное сопротивление земли 3000 Ом·м) (продолжение рис. 2.16)

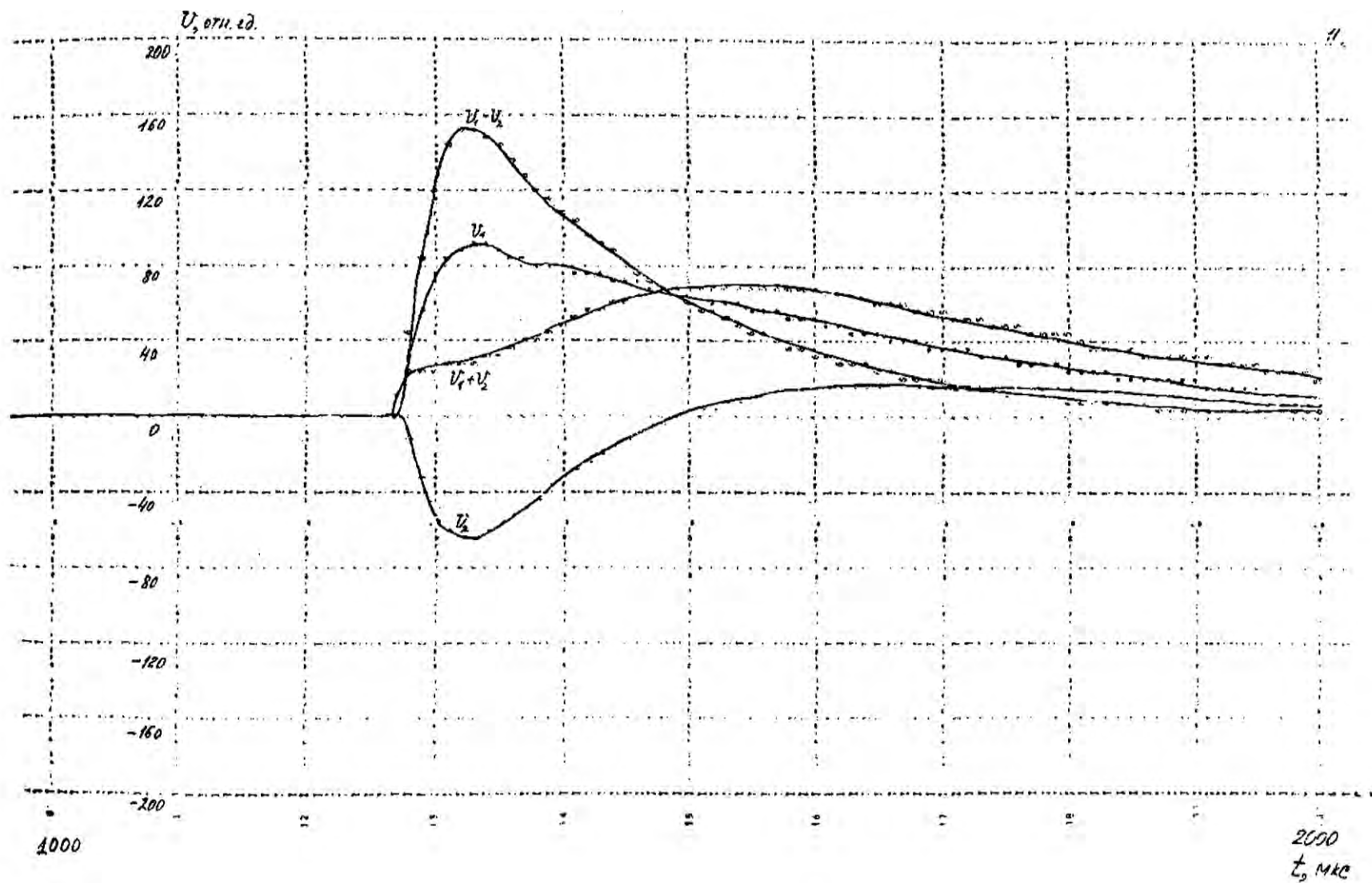


Рис. 2.22. Грозовой разряд в первую полупесть в 378 км от преобразовательной подстанции без перекрытия искровых промежутков тросов (удельное сопротивление земли 100 Ом·м)

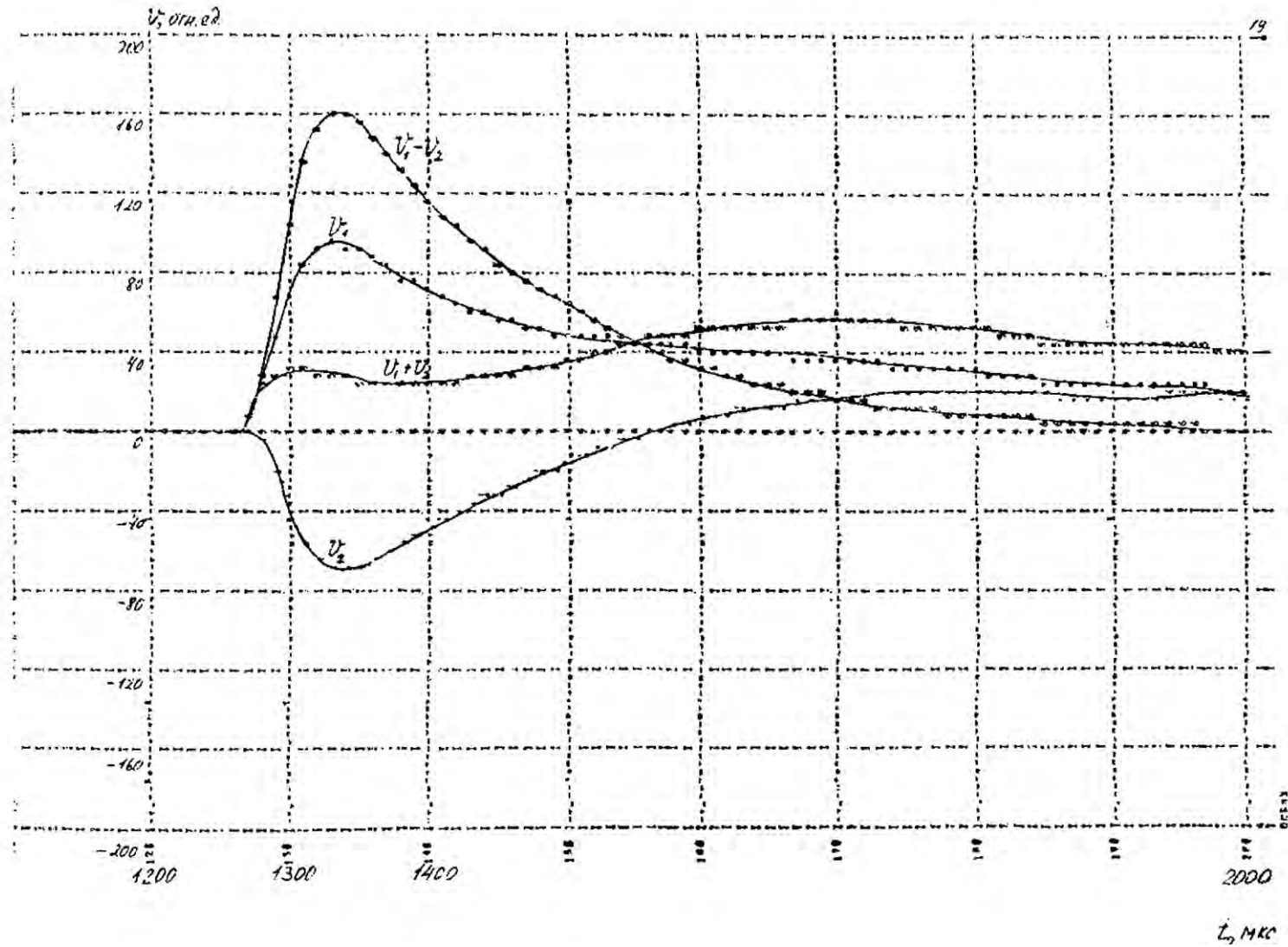


Рис. 2.23. Грозовой разряд в первую полупецу в 378 км от преобразовательной подстанции без перекрытия искровых промежутков тросов (удельное сопротивление земли 3000 Ом·м)

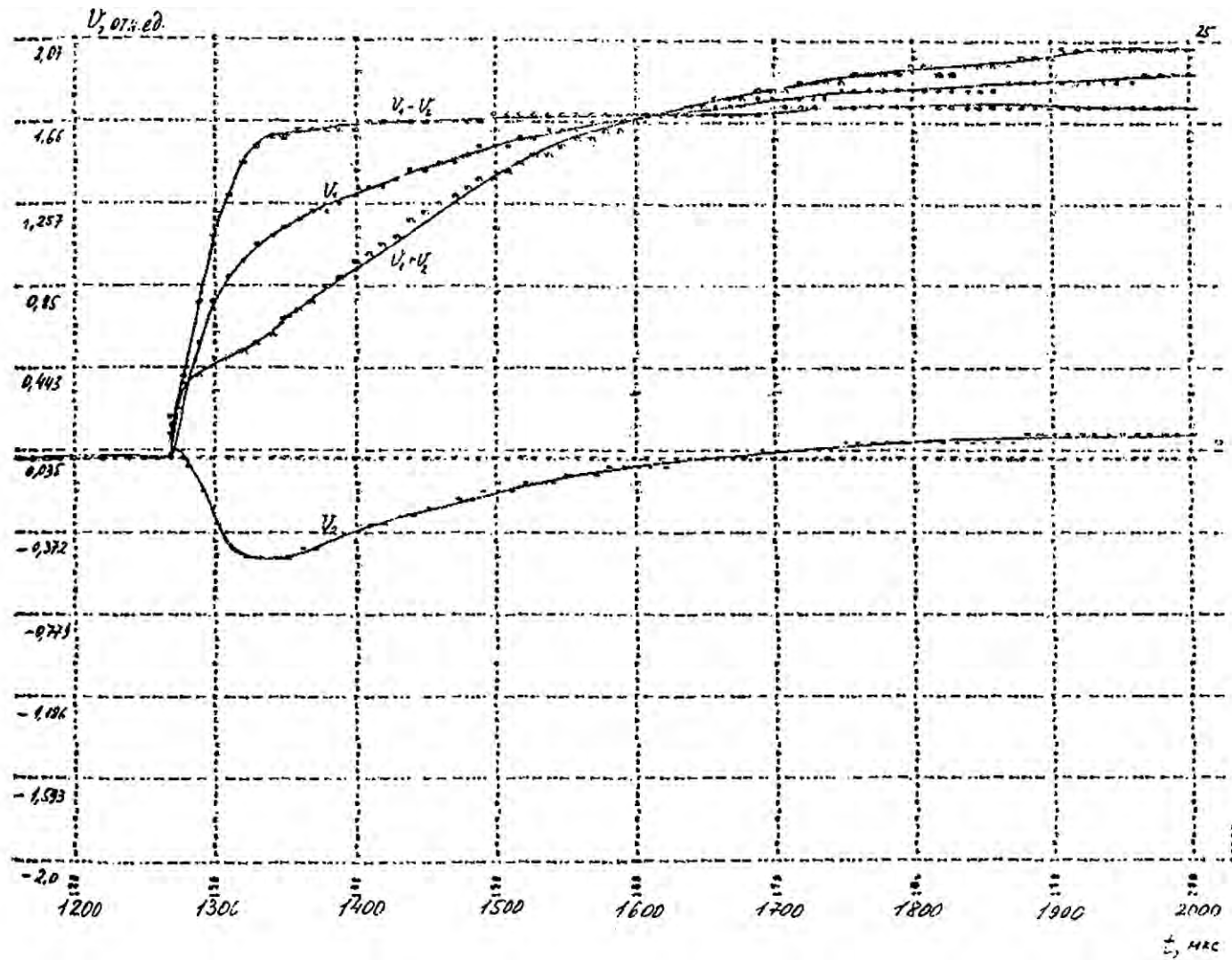


Рис. 2.24. Дополнительный режим с включением источника постоянного напряжения в первую полуцепь в 378 км от преобразовательной подстанции с перекрытием искровых промежутков тросов (удельное сопротивление земли 3000 Ом·м), моделирующий КЗ первой полуцепи на землю

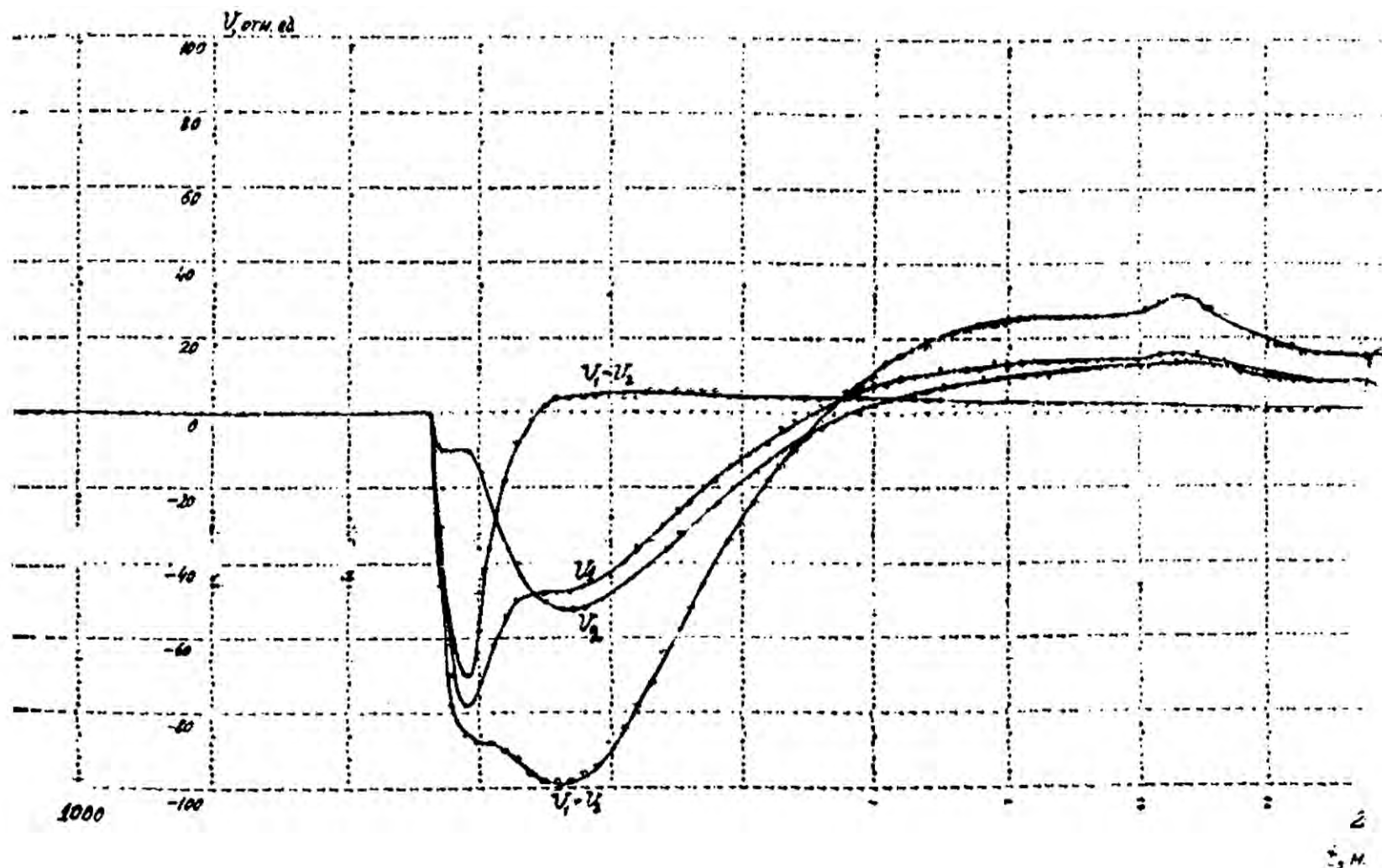


Рис. 2.25. Грозовой разряд в первый трос в 378 км от преобразовательной подстанции с перекрытием искровых промежутков второго троса (удельное сопротивление земли 100 Ом·м)



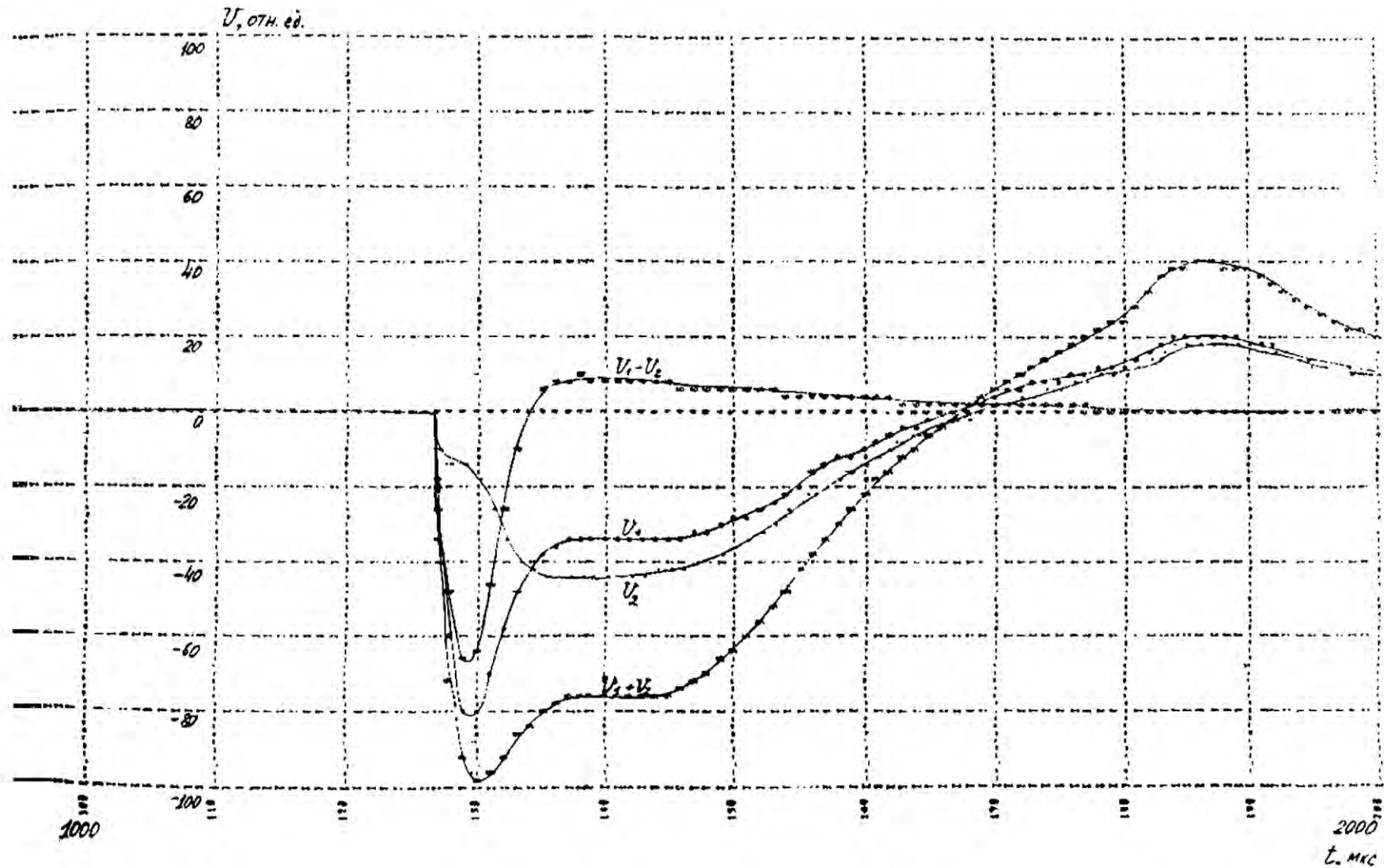


Рис. 2.26 . Грозовой разряд в первый трое в 378 км от преобразовательной подстанции с перекрытием искровых промежутков второго трое (удельное сопротивление земли 3000 Ом·м)



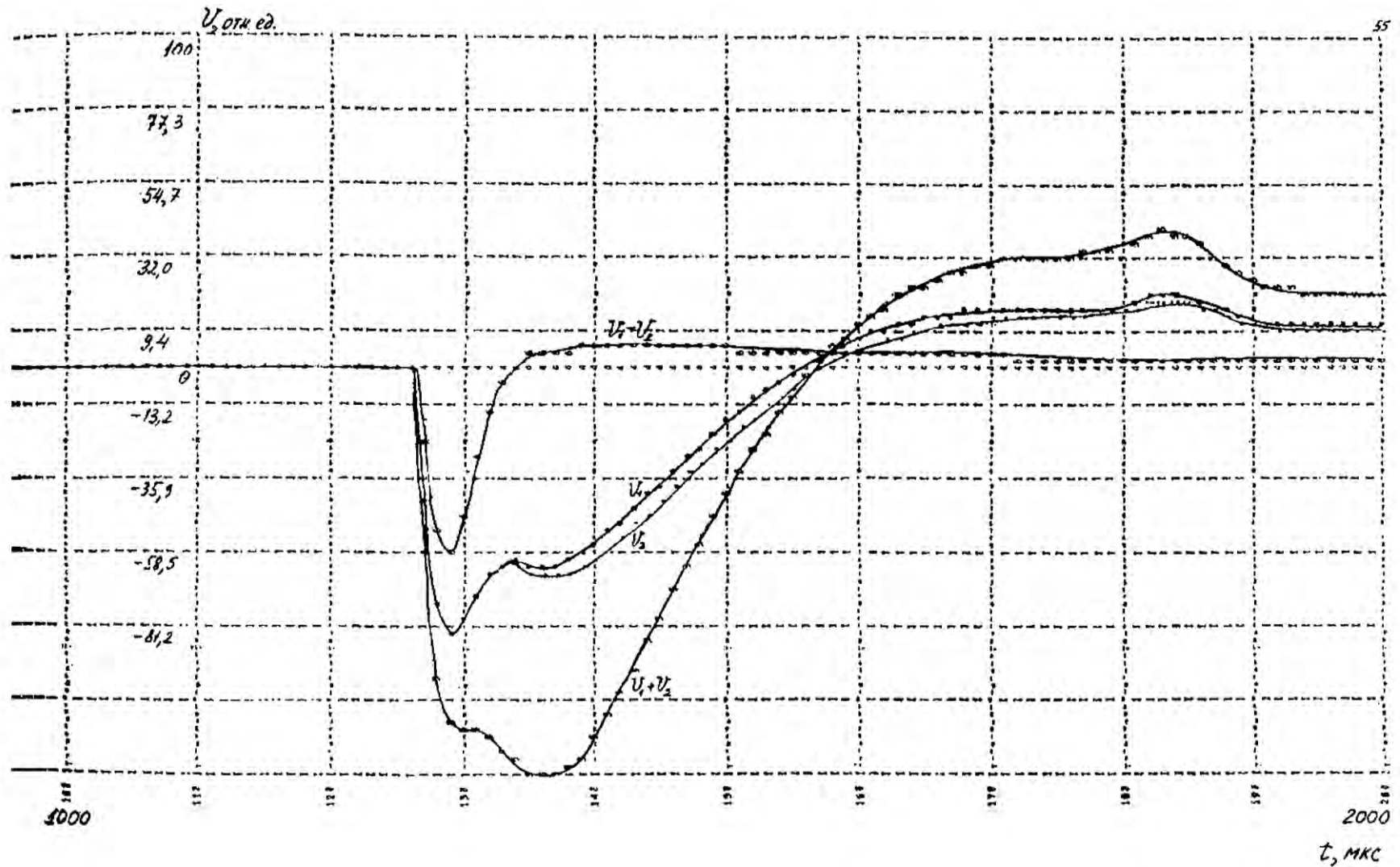


Рис. 2.27. Грозовой разряд в первый трос в 378 км от преобразовательной подстанции без перекрытия искровых промежутков второго троса (удельное сопротивление земли 100 Ом·м)

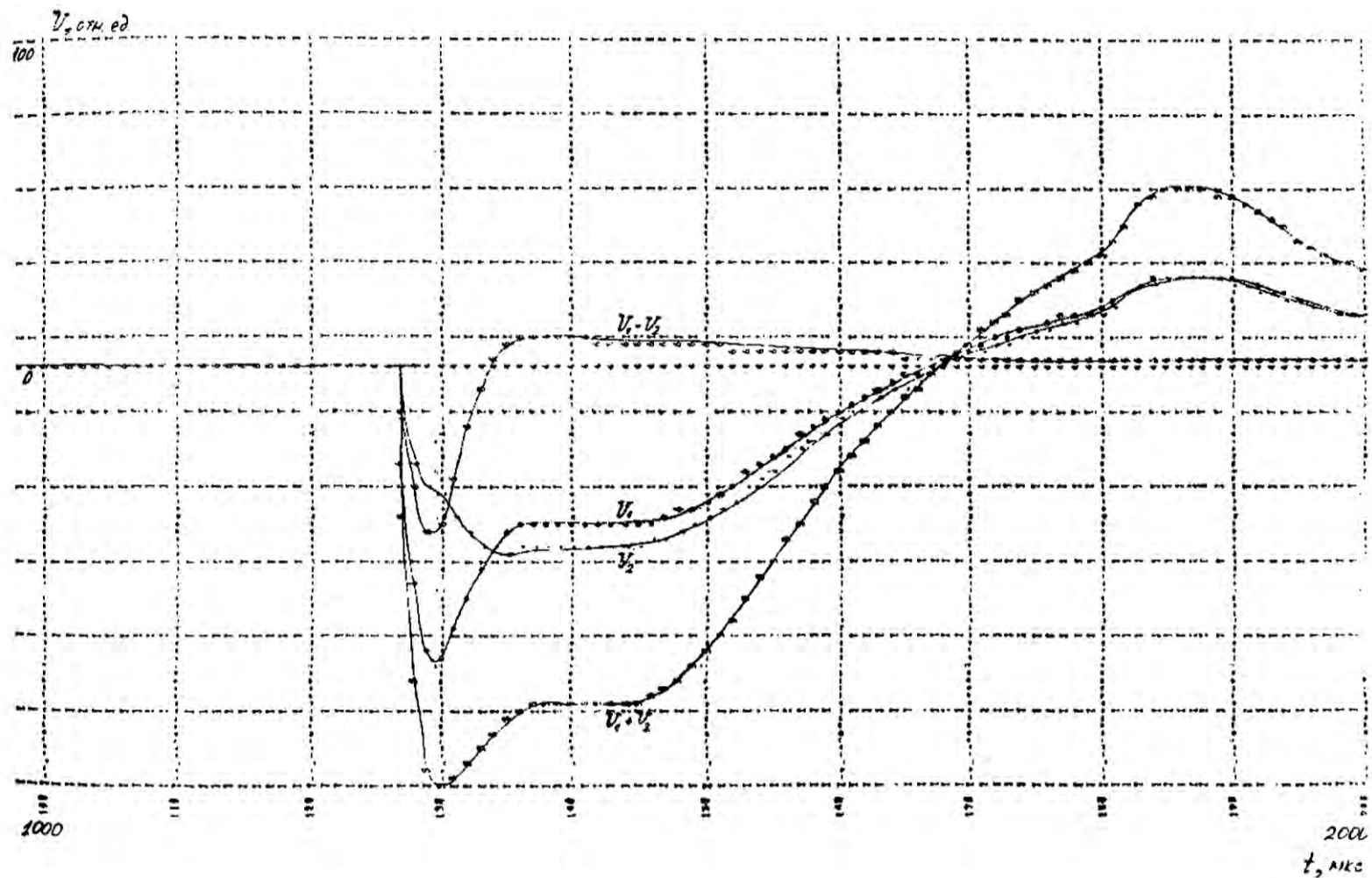


Рис. 2.28. Грозовой разряд в первый трос в 378 км от преобразовательной подстанции без перекрытия искровых промежутков второго троса (удельное сопротивление земли 3000 Ом·м)

контроля отношения длительностей  $K_T = \frac{T_p}{T_i}$  и блока контроля длительности  $T_i$ .

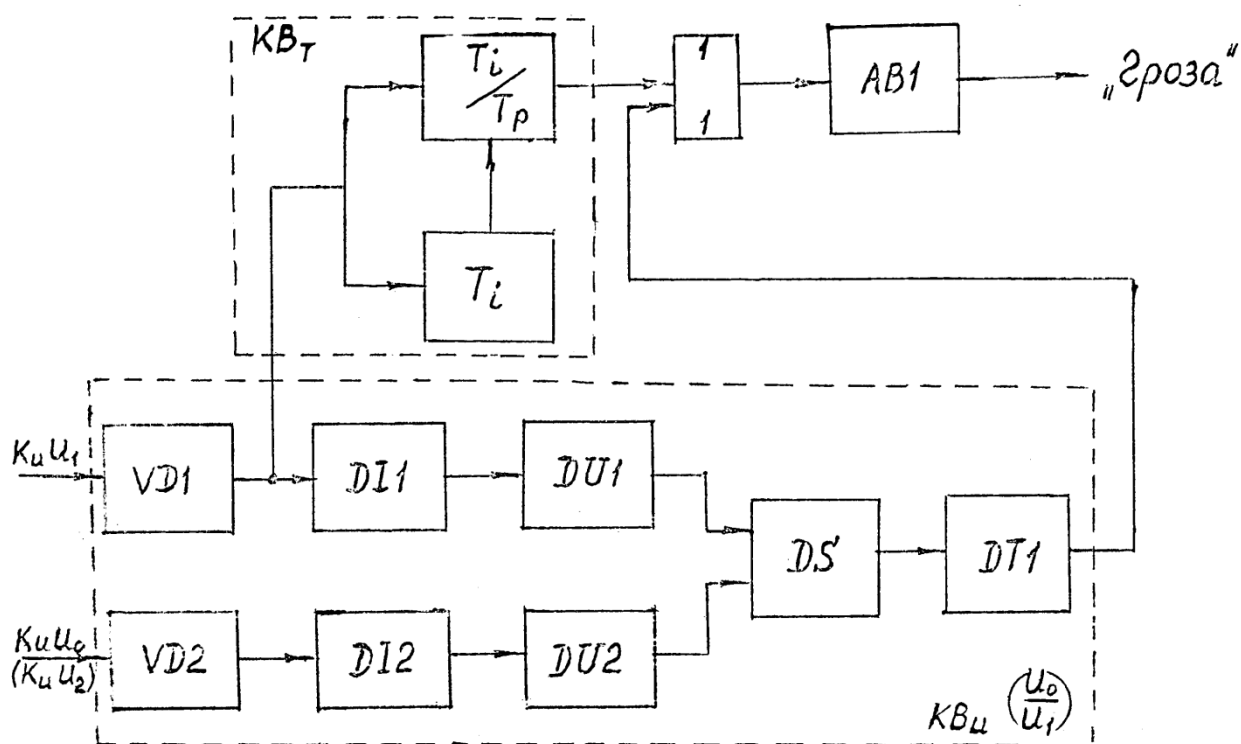


Рис. 2.29. Структура пускового органа KB\_T

При грозном возмущении без КЗ (запрет от блока контроля длительности  $T_i$  отсутствует) срабатывают блоки контроля отношений  $K_T = \frac{T_p}{T_i}$  и  $K_U = \frac{U_0}{U_1}$  и по схеме "ИЛИ" воздействуют на исполнительный блок  $AB1$ , что приводит к появлению сигнала "Гроза". При КЗ по принципу действия не срабатывают блоки контроля отношений  $\frac{U_0}{U_1}$  и  $\frac{T_p}{T_i}$ , а срабатывает блок  $T_i$  и дополнительно действует на блок  $\frac{T_p}{T_i}$  исключая тем самым появление сигнала "Гроза".

### **2.3.2. Особенности расчета переходных процессов, воздействующих на пусковой орган, при его функционировании на ВЛ СВН переменного тока**

Для учета влияния, оказываемого на характер волнового переходного процесса в электрической сети, включающей исследуемую ВЛ с прилегающими к ней другими ВЛ и ПС, используется программное обеспечение [72], реализующее совместное решение волновых уравнений многопроводной ЛЭП с дифференциальными уравнениями электрических цепей с сосредоточенными параметрами. С точки зрения методики вычислений основное внимание было уделено совершенствованию программного комплекса, представленного в разделе 2.2.1. Особенностью исследований является необходимость оценки влияния ПС и пунктов транспозиции ВЛ. Это требует учета участков ЛЭП между пунктами транспозиции и ПС как отдельных элементов схемы с проведением вычислений с помощью метода характеристик для отдельных участков ЛЭП, разделенных промежуточными узлами, в которых решаются системы дифференциальных уравнений с сосредоточенными параметрами совместно с волновыми уравнениями линии [72]. В результате модернизации программного комплекса удалось повысить точность вычислений с достаточно подробными численными исследованиями волновых переходных процессов в сети при различных видах КЗ, грозовых разрядах и других коммутациях. Описание алгоритмов модифицированного пакета программ ИФАН на примере сети, изображенной на рис. 2.30, приведено в Приложении 4.

На основании разработанного пакета программ проведены расчеты форм исследуемых сигналов при КЗ и грозовых возмущениях. Моделировались грозовые удары и КЗ на ВЛ Кинлери – Заинская ГРЭС, происходящие вблизи ПС Киндери (в 6 км от нее) и в средней части ВЛ. Грозовые разряды рассматривались, как прорыв молнии сквозь тросовую защиту на крайнюю фазу А ВЛ с длительностью тока 100-150 мкс.

Как следует из результатов расчетов, при грозовых возмущениях более устойчивую форму сохраняют сигналы междуфазовых составляющих, в

меньшей степени подвергающиеся деформации под влиянием поверхностного эффекта. Так, после пробега волной 100 км длительность напряжений междуфазных составляющих грозового импульса (на его полуспаде) находилась примерно на уровне 100 мкс, а амплитуды отличались не более, чем на 5%. Из-за наличия индуктивности в узле ПС Киндери (месте установки пускового органа КВ-1) напряжение грозовой волны после перехода через нуль достигает примерно 10% от амплитудного значения, а напряжения отраженных от концов смежных ВЛ (например, ПС Помары) волн достигают 10 -20 %, что должно быть учтено при выборе параметров срабатывания пускового органа КВ -1.

В отличие от напряжений грозовые токи не переходят через нуль в месте установки органа КВ-1, и их спад происходит медленнее (до половины амплитуды через 150 мкс и до 20% амплитуды через 550 мкс), т.е. они сохраняют величину, но не изменяют знак. Влияние транспозиций проявляется в изменении монотонности междуфазных токов и напряжений и появлении соответствующих отражений от пунктов транспозиции с импульсами, величиной не более 10% от амплитуды.

При КЗ в средней части ВЛ Киндери-ЗГРЭС при  $\psi_n = \frac{\pi}{2}$  длительность импульса междуфазного напряжения на уровне 50%  $U_{ф \text{ макс}}$  составляет около 250 мкс. Далее величина напряжения снижается и в течение последующих 3,7 мс приближается к 25%. Грозовой междуфазный импульс через 200 - 250 мкс изменяет знак (за счет индуктивности узла) и достигает амплитудного значения на уровне 20% от максимального в течение 750 мкс. При этом сигнал КЗ в течение этого времени не изменяет исходного знака.

Для ограничения влияния собственных частот сети входные сигналы пускового органа пропускаются через фильтры низких частот (ФНЧ), ограничивающие диапазон сигналов до 1 кГц. Прохождение сигналов

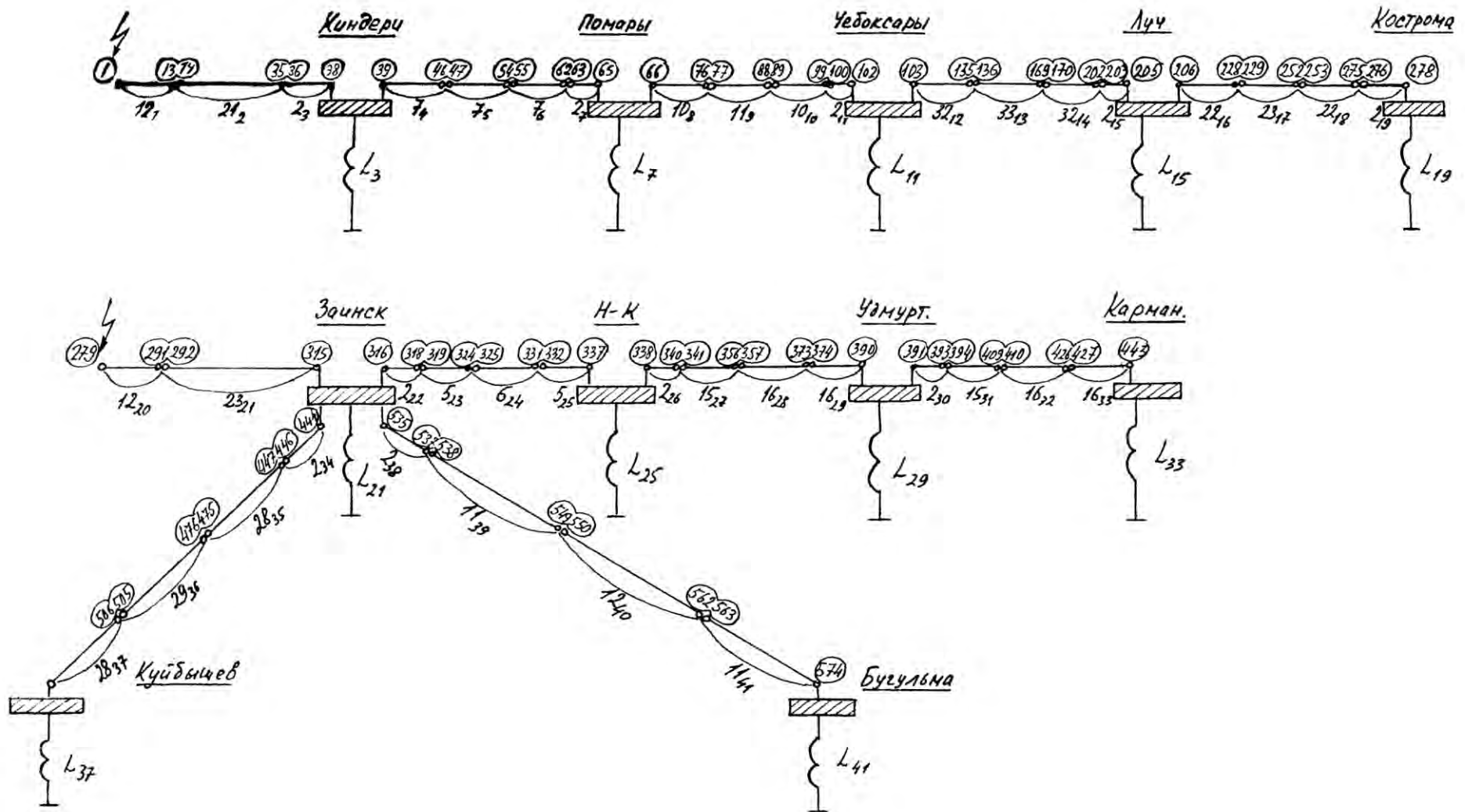


Рис. 2.30. Пример схемы электрической сети

напряжения пускового органа на ПС Киндери через такие ФНЧ при КЗ в средней части защищаемой ВЛ (при  $\psi_n = \frac{\pi}{2}$ ) приводит к растягиванию фронта междупазных сигналов до 100 мкс, исчезновению импульса составляющих "провода-тросы" в сигнале нулевого канала и увеличению фронта составляющей "фазы - земля" со 100-150 мкс до 200 мкс. Время до перехода через нуль междупазных сигналов увеличивается примерно на 50 мкс.

Установленный последовательно с ФНЧ режекторный фильтр третьей гармоники снижает уровень сигнала примерно на 10% в начальной части и в несколько большей степени – спустя несколько сотен микросекунд. Установка последовательно режекторного фильтра пятой гармоники еще на 5% снижает уровень сигнала в начальной части и укорачивает сигнал на 50 – 100 мкс.

Наиболее сильное влияние на уменьшение уровня и длительности исходного сигнала оказывает трехзвенный режекторный фильтр промышленной частоты, устанавливаемый последовательно с вышеуказанными для подавления влияния составляющих предшествующего режима. После прохождения исходного напряжения по тракту, состоящему из всех последовательно соединенных фильтров, при  $\psi_n = \frac{\pi}{2}$  амплитуда снижается до 91 – 93 % для  $U_{(2)}$  и  $U_{(1)}$ .

Таким образом анализ результатов расчетов токов и напряжений при КЗ и грозовых разрядах в сети, включающей ВЛ 500 кВ Киндери - Заинская ГРЭС и смежные ВЛ показывает, что соотношение интервалов времени между паузой, следующей за грозовым импульсом, и длительностью самого импульса превышает четыре при грозовых разрядах и примерно равно двум при КЗ и включениях выключателя. Это означает, что и на ВЛ переменного тока пусковой орган, построенный на контроле предложенных соотношений, вполне может быть использован для распознавания грозовых возмущений и КЗ.

По-видимому, более точно будет осуществляться контроль пусковым органом длительности сигнала, сформированного из комбинации  $\frac{U_{\kappa} + Z_{\epsilon} i_{\kappa}}{2}$ , соответствующего напряжению падающей волны.

#### 2.4. Выводы

1. На ВЛ ППТ 1500 кВ все грозовые разряды сопровождаются формированием составляющих в контурах "все провода - земля" и "полуцепи - тросы". Для отличия волн КЗ от волн грозового происхождения следует рекомендовать сравнение сумм и разностей напряжений полуцепей вблизи максимума разности указанных напряжений. При грозовых возмущениях, сопровождающихся ударом молнии в опору, в оба троса и в объекты вне зоны грозозащиты ППТ (при перекрытии обоих тросов в месте удара) сумма напряжений полуцепей более чем вдвое превышает их разность, в то время как при КЗ эти величины соизмеримы. Однако при ударах молнии в полуцепь, а также в объекты вне зоны грозозащиты без перекрытия или с перекрытием одного из тросов указанное соотношение напряжений практически совпадает с тем, что имеет место при КЗ.

2. Для повышения надежности отстройки волн КЗ от волн грозового происхождения целесообразно проведение сравнения длительностей импульсов напряжений (токов) с паузами между ними. При превышении паузой после импульса значения длительности самого импульса выявляется грозовое возмущение. По результатам расчетов созданы алгоритмы пускового органа .

3. Для экспериментальной проверки предложенных принципов был разработан и изготовлен пусковой орган, установленный в опытную эксплуатацию на ВЛ 500 кВ Киндери – Заинская ГРЭС. В отличие от ППТ на ВЛ СВН переменного тока целесообразно использовать токи волновых каналов, как имеющие более стабильный характер при КЗ, чем напряжения, чье экспоненциальное затухание после достижения максимума определяется



влиянием индуктивности узла в месте установки пускового органа. Лучший эффект дает использование напряжения падающей волны.

4. Представлена разработка методики, анализирующей влияние ударов молнии, не вызывающих короткого замыкания, на работу защит ВЛ СВН, реагирующих на токи и напряжения промышленной частоты.

5. Оценивая действующие значения токов и напряжений основных защит на ВЛ СВН, следует отметить, что ложное срабатывание защиты на существующих ВЛ СВН при ударах молнии отрицательной полярности маловероятно. Вероятность ложной работы защиты ВЛ СВН, реагирующей на составляющие промышленной частоты, возрастает с увеличением длительности импульса молнии и протяженности ВЛ.

6. Наибольшую опасность для защит ВЛ СВН, реагирующих на токи и напряжения промышленной частоты, представляют грозовые удары положительной полярности, а также многократные разряды, поскольку они обладают во много раз большей длительностью.

### **ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОГО МЕТОДА ДВУСТОРОННИХ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ**

#### **3.1. Особенности волновых методов и устройств определения места повреждения на воздушных линиях**

Согласно п. 1.6.2 [92], для определения мест повреждений (ОМП) на ВЛ 110 кВ и выше длиной более 20 км должны предусматриваться фиксирующие приборы. Согласно п. 1.4 [93], ОМП при устойчивых и неустойчивых КЗ производится для ВЛ 110 кВ и выше протяженностью 20 км и более. В отдельных случаях, в зависимости от характера трассы, значимости ВЛ и других местных условий выполняется установка устройств ОМП и на линиях протяженностью менее 20 км. Согласно п. 5.7.23 [94], для дистанционного ОМП ВЛ напряжением 110 кВ и выше должны быть установлены специальные приборы. В качестве повреждений рассматриваются трехфазные, двухфазные, однофазные и двухфазные на землю КЗ и разрывы проводов без образования КЗ. КЗ на ВЛ, как правило, определяются устройствами РЗ, действующими на отключение поврежденной ВЛ. Однако разрывы проводов без образования КЗ не всегда могут быть зафиксированы РЗ, особенно если фаза ВЛ выполнена с расщеплением на несколько проводов. При этом к методам и устройствам ОМП для разного типа ВЛ и при разных видах повреждения предъявляются различные требования, обусловленные технико-экономическими факторами, с учетом последовательности операций в структуре ОМП ВЛ, включающих определение поврежденного элемента и дистанционное ОМП [95].

Среди дистанционных методов ОМП (рис. 3.1), использующих устройства, указывающие расстояние до места повреждения, выделяются высокочастотные методы. Метод стоячих волн, как известно [95], практического применения не получил, поэтому из высокочастотных методов

на ВЛ ВН рассматриваются, в основном, импульсные методы. Их принцип действия основан на измерении интервалов времени распространения электромагнитных волн (импульсов) по участкам ВЛ. Локационные методы определяют время пробега специально генерируемого зондирующего импульса. Устройства, реализующие локационный метод ОМП, могут эффективно применяться для мониторинга состояния ВЛ [96], в том числе для определения расстояния до места КЗ и обрыва на ВЛ. Однако локаторы ОМП включают в себя дополнительные технические средства - генераторы и приемники зондирующих импульсов, которые вводятся в ВЛ через фильтры присоединения и конденсаторы связи.

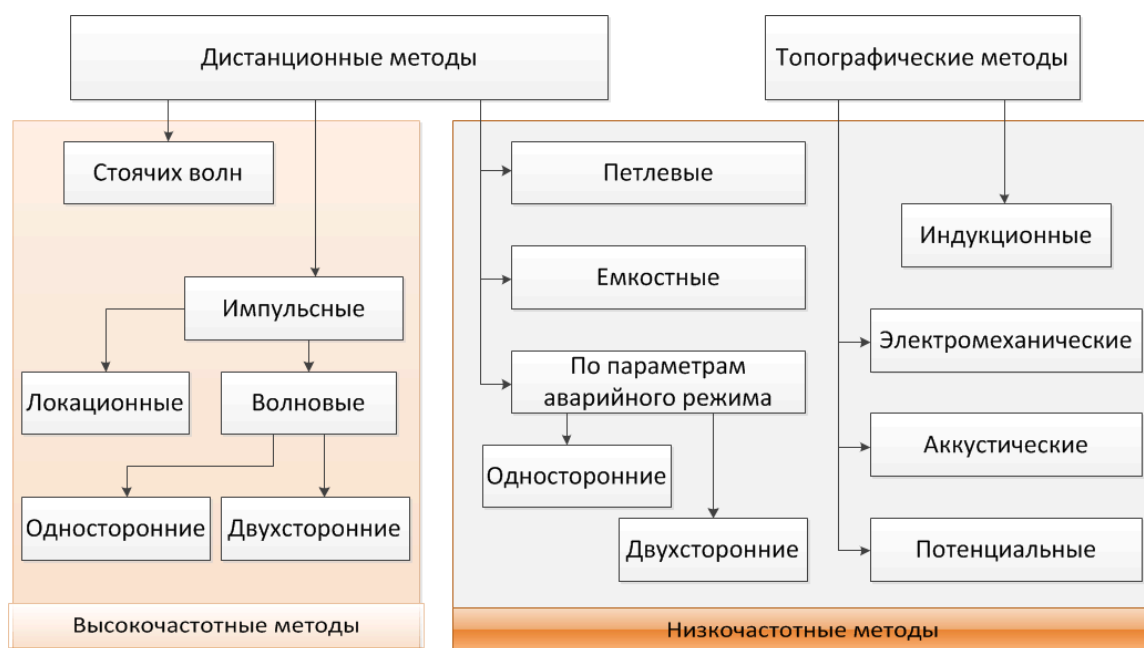


Рис. 3.1. Классификация методов ОМП

Волновые методы делятся на методы односторонних и двусторонних измерений (рис. 3.1). Волновые методы односторонних измерений используют измерение времени между приходами волн первого и второго отражений от места повреждения в точки контроля (концы ВЛ). Волновые методы двусторонних измерений основаны на синхронном измерении времени между моментами достижения концов ВЛ фронтами электромагнитных волн, возникшими в месте повреждения (разрядных волн). Зная длину  $L$  линии, скорость  $v$  распространения волны, разность времени  $\Delta t$  достижения фронтами

волн концов ВЛ, можно определить расстояние  $l$  от точки контроля до места повреждения

$$l = \frac{L}{2} - \frac{\Delta t}{2} \cdot v. \quad (3.1)$$

Волновые методы широко применяются [97-102] в США, Китае, Италии, Франции (табл. 3.1) и характеризуются высокой точностью (50 - 500 м) вследствие независимости контролируемых величин от режима работы электрической сети [96].

Таблица 3.1

Характеристики устройств ОМП, реализуемые волновым методом

№	Наименования	Способ ОМП	Погрешность ОМП, указанная производителем
1	Qualitrol IDM+ 9 (IDM+18, IDM+36) (США)	Метод измерений по параметрам аварийного режима, волновой метод двусторонних измерений	± 150 м
2	Qualitrol FL-1 (FL-8) (США)	Волновой метод двусторонних измерений	± 60 м
3	Qualitrol TWS Mk VI (США)	Волновой метод двусторонних измерений	± 150 м
4	ISA TFS 2100 (Италия)	Волновой метод двусторонних измерений, волновой метод односторонних измерений	± 50 м
5	Alstom Reason/RPV-310 (Франция)	Метод односторонних измерений по параметрам аварийного режима, волновой метод двусторонних измерений	-
6	Бреслер-0107.090 (Россия)	Метод односторонних и двусторонних измерений по параметрам аварийного режима, волновой метод двусторонних измерений	3 % (метод односторонних измерений по параметрам аварийного режима), 1 % (метод двусторонних измерений по параметрам аварийного режима), ± 150 – ± 450 м (волновой метод двусторонних измерений)
7	HPR-7000 (Китай)	Волновой метод двусторонних измерений, метод измерений по параметрам аварийного режима	-

На точность метода наибольшее влияние оказывают ошибки в синхронизации устройств, учете фактической длины ЛЭП и определении скорости распространения волны, а также электромагнитные помехи. Основная проблема волнового метода двусторонних измерений связана с особенностями синхронизации измерений по концам линии с помощью спутниковых радионавигационных систем (GPS и ГЛОНАСС), связанных со шкалой всемирного координированного времени UTC.

### **3.2. Предпосылки создания устройства ОМП волновым методом двусторонних измерений на основе регистрации синхронизированных измерений**

Развитие спутниковых радионавигационных систем и создание современных цифровых средств, решающих задачу мониторинга состояния объектов, позволило провести исследования по регистрации токов и напряжений в электрической сети с помощью устройств [103], обладающих следующими функциональными особенностями:

синхронизация измерений токов и напряжений по концам ВЛ;

автоматическое отображение и передача данных этих измерений с частотой преобразования аналоговой информации в цифровую 0,1 – 100 МГц;

порог срабатывания - не более  $\pm 1$  % от номинальной величины напряжения или тока;

длительность записи 600 мс аварийного события в автоматическом режиме, включая интервал, следующий за аварийным событием, с предварительной записью события в течение 60 мс.

Для определения возможности реализации волнового метода ОМП на основе этих устройств на ПС Пугачевская и Акбулакская (филиал ОАО «МРСК Волги» - «Оренбургэнерго»), соединенных подверженной частым аварийным отключениям ВЛ 110 кВ Пугачи-Акбулак (рис. 3.2), были установлены [103] макеты устройств регистрации переходных процессов

(регистраторы). На ПС Пугачевская регистратор № 1, установленный на панели общеподстанционного пункта управления (ОПУ) (Рис. 3.3), был подключен к ТТ ВЛ и ТН системы шин 110 кВ соответственно для измерения фазных токов и фазных напряжений, а также тока и напряжения нулевой последовательности ВЛ. На ПС Акбулакская регистратор № 4 установлен на панели № 3а ОПУ и подключен к ТТ ВЛ и ТН секции шин 110 кВ.

Одной из задач исследования эффективности действия регистраторов стало проведение сравнительного анализа использования наряду с ТН также и приспособлений для измерения напряжения (ПИН) [104] вводов масляных выключателей. В отличие от [104] выходной сигнал ПИН при опытной эксплуатации устройств регистрации снимался с внешней обкладки внутренней изоляции ввода. Эти устройства измерения значительно дешевле ТН и занимают существенно меньше места в распределительном устройстве ПС. Для проверки эффективности измерений, выполняемых с помощью ПИН, на ПС Пугачевская и Акбулакская были использованы регистраторы №2 и №3. Регистратор № 3 был смонтирован на площадке обслуживания масляного выключателя 110 кВ типа МКП в ОРУ 110 кВ ПС Пугачевская (рис. 3.3 а) и подключен к ПИН вводов этого выключателя для измерения фазных напряжений. Регистратор № 2 был установлен на площадке обслуживания масляного выключателя типа МКП в ОРУ 110 кВ ПС Акбулакская (рис. 3.3 б) и также подключен к ПИН вводов этого выключателя.

Характер изменения сигналов при импульсном воздействии на ТН приведен на рис. 3.4. На верхнем графике изображен исходный сигнал, а на нижнем графике – реакция ТН на указанное воздействие. Наблюдаемые во вторичной обмотке колебания обусловлены частотными характеристиками ТН. При импульсном воздействии на ПИН указанных колебаний не отмечено.

На рис. 3.5 приведены результаты измерения напряжения фаз В и С линии с помощью регистратора № 3, при включении ВЛ 110 кВ Пугачи - Акбулак со стороны ПС Пугачевская. Из анализа результатов следует,

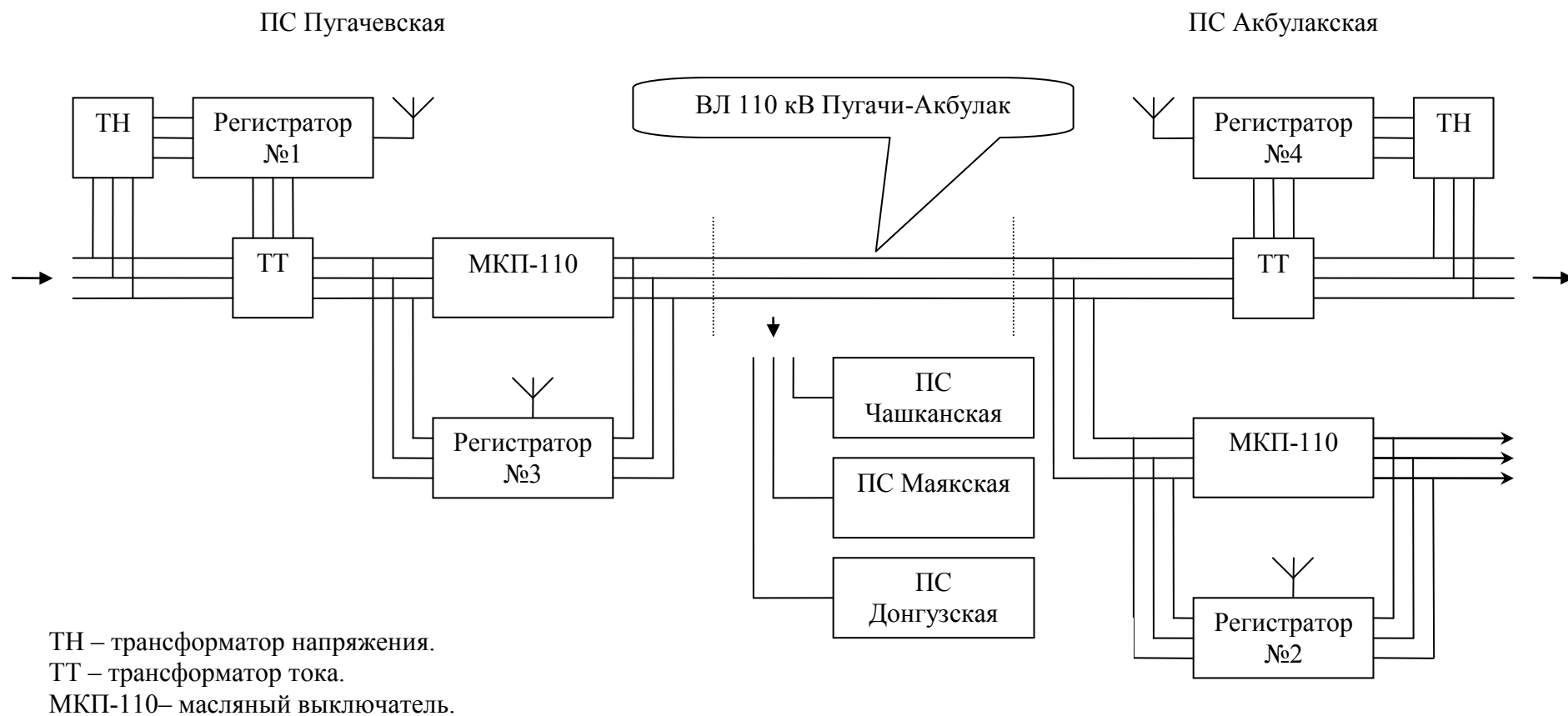


Рис. 3.2. Схема подключения регистраторов при проведении опытно-промышленной эксплуатации на ВЛ 110 кВ Пугачи-Акбулак



Рис. 3.3. ПС Пугачевская. Регистратор № 1 в панели № 9р ОПУ (а)  
и регистратор № 3 на площадке обслуживания масляного выключателя МКП-110 в ОРУ 110 кВ (б)



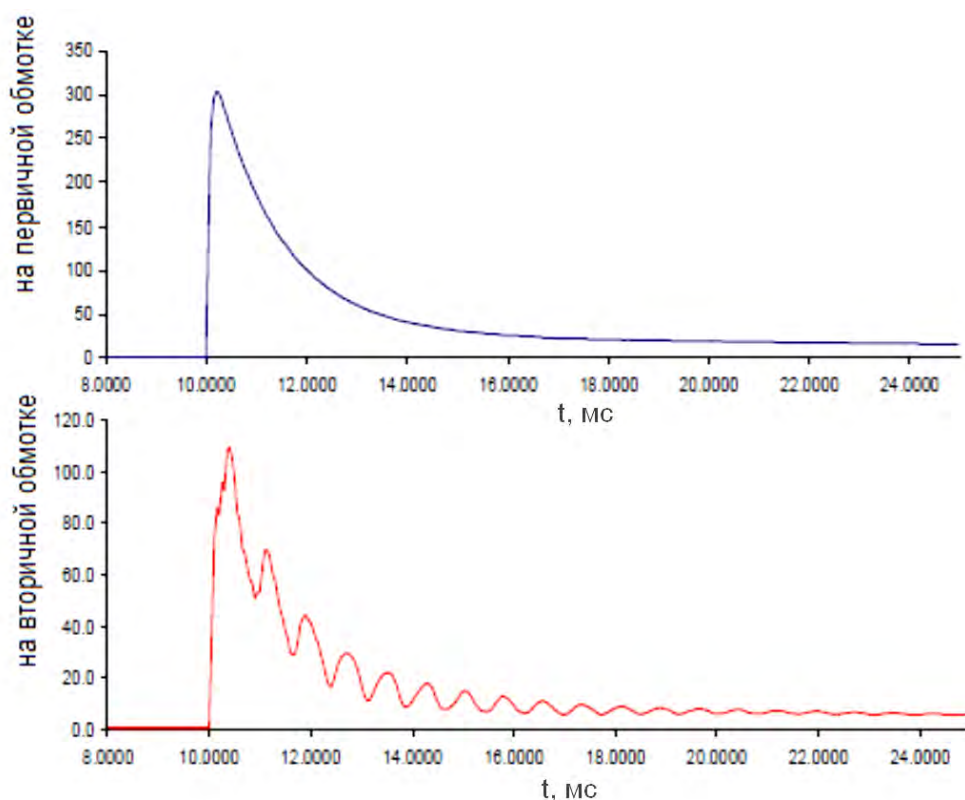


Рис. 3.4. Характеристики сигналов при импульсном воздействии на ТН

что мгновенные значения напряжения с разных сторон выключателя существенно различаются. Только через 35 мс скачок напряжения, сопровождающийся броском тока с 30 до 230 А, привел к совпадению мгновенных значений напряжений с обеих сторон выключателя. Это объясняется тем, что при подаче напряжения на ВЛ контактная система масляного выключателя оказывается замкнутой на последовательно соединенные два шунтирующих сопротивления камер полюсов выключателя (по 750 Ом каждое [104]) с шунтированием их контактами выключателя через 35 мс после начала их движения.

Осциллограммы токов, полученные с ТТ этой ВЛ (рис. 3.6), фиксируют одновременность включения фаз масляного выключателя 110 кВ ПС Пугачевская (через 1 мс после включения фазы С включается фаза В), в соответствии с его техническими характеристиками, а также - характерные броски тока намагничивания силовых трансформаторов на ПС Акбулакская и на ответвлениях ВЛ.

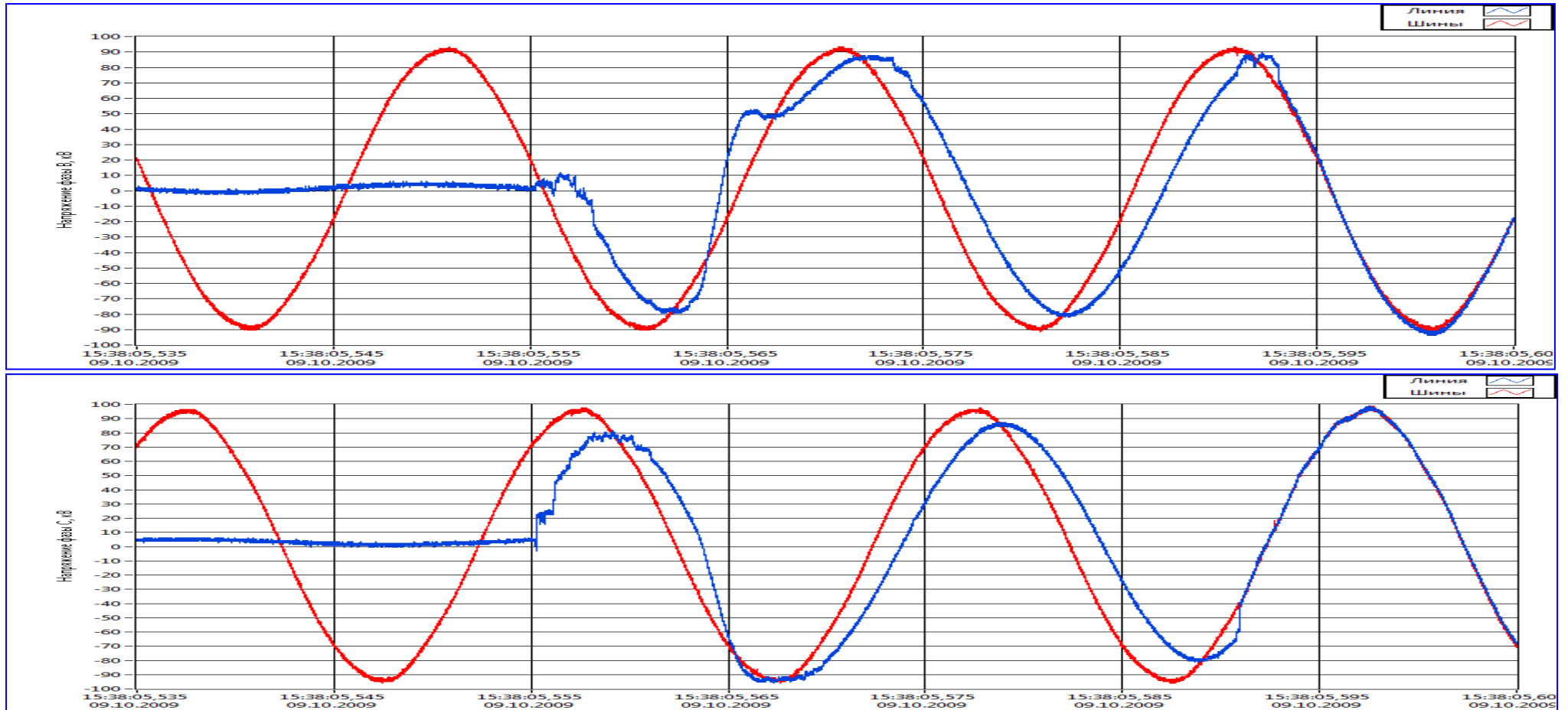


Рис. 3.5. ПС Пугачевская. Регистратор № 3 (ПИН).

Графики напряжения фазы В (верхний) и С (нижний) линии и шин при включении линии. 1 – Шины (красный), 2 – Линия (синий)

Результаты измерения напряжений с помощью регистраторов, подключенных к ПИН на вводах масляных выключателей 110 кВ и к ТН на шинах 110 кВ ПС, характеризуются (рис. 3.7 - 3.9) четкой фиксацией разновременности отключения выключателя 110 кВ на ПС Пугачевская (сначала фаз С и В, а затем - фазы А), а также - длительности отключения выключателя (в пределах нормированных 80 мс).

### 3.3. Разработка способа построения ОМП волновым методом двусторонних измерений на ВЛ 110-220 кВ

В учетом положительных результатов исследования работы устройств регистрации синхронизированных измерений на ВЛ 110 кВ Пугачи – Акбулак при коммутационных процессах выполнена разработка многофункционального устройства (МФУ), выполняющего функции ОМП, регистрации аварийных процессов и измерения показателей качества в ВЛ 110-220 кВ. При разработке способа ОМП также, как и для устройства РЗ (глава 1), использованы преимущества преобразования фазных токов и напряжений ВЛ в токи и напряжения волновых каналов [44] по выражениям

$$U_m = T_u^{-1} \times U_{ph}, \quad (3.2)$$

$$I_m = T_i^{-1} \times I_{ph}, \quad (3.3)$$

где  $U_m$  и  $I_m$  - матрицы-столбцы модальных напряжений и токов ВЛ,  $U_{ph}$  и  $I_{ph}$  - матрицы-столбцы фазных напряжений и токов ВЛ.

Матрицы преобразований напряжений  $T_u$  (3.2) и токов  $T_i$  (3.3) зависят от марки проводов ВЛ, их формы расположения и удаленности от поверхности земли, а также от удельной проводимости земли. В общем виде матрицы  $T_u$  и  $T_i$  – комплексные и частотно-зависимые, но величина мнимой части элементов этих матриц не превышает 3 % от их действительной части. Места нарушения однородности ВЛ, такие как транспозиция и в большей степени – ответвления от линии, оказывают влияние на распространение волн. Однако они

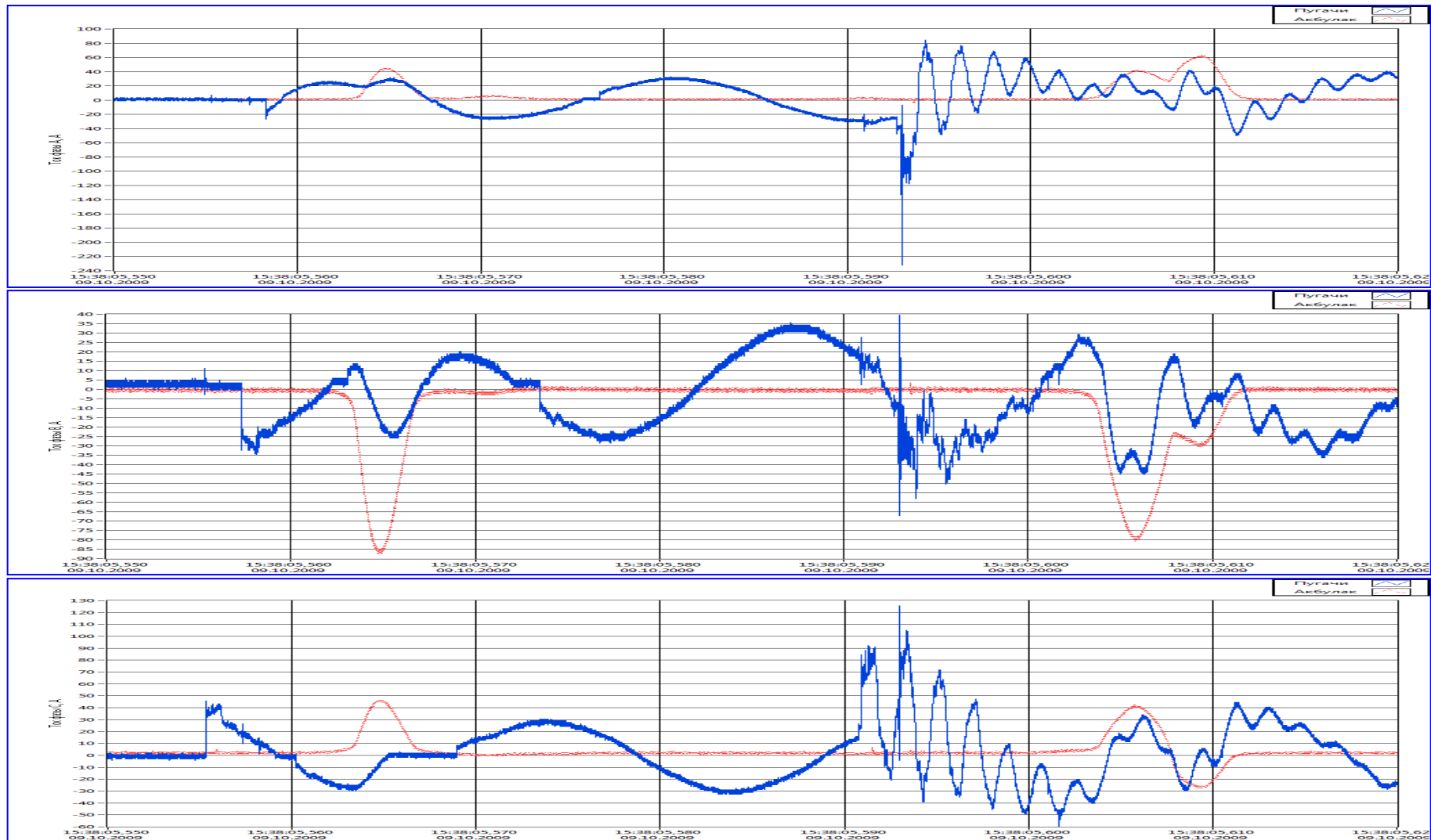


Рис. 3.6. Графики токов фаз А (верхний), В (средний) и С (нижний) при включении линии со стороны ПС Пугачевская (синий) и ПС Акбулак (красный)

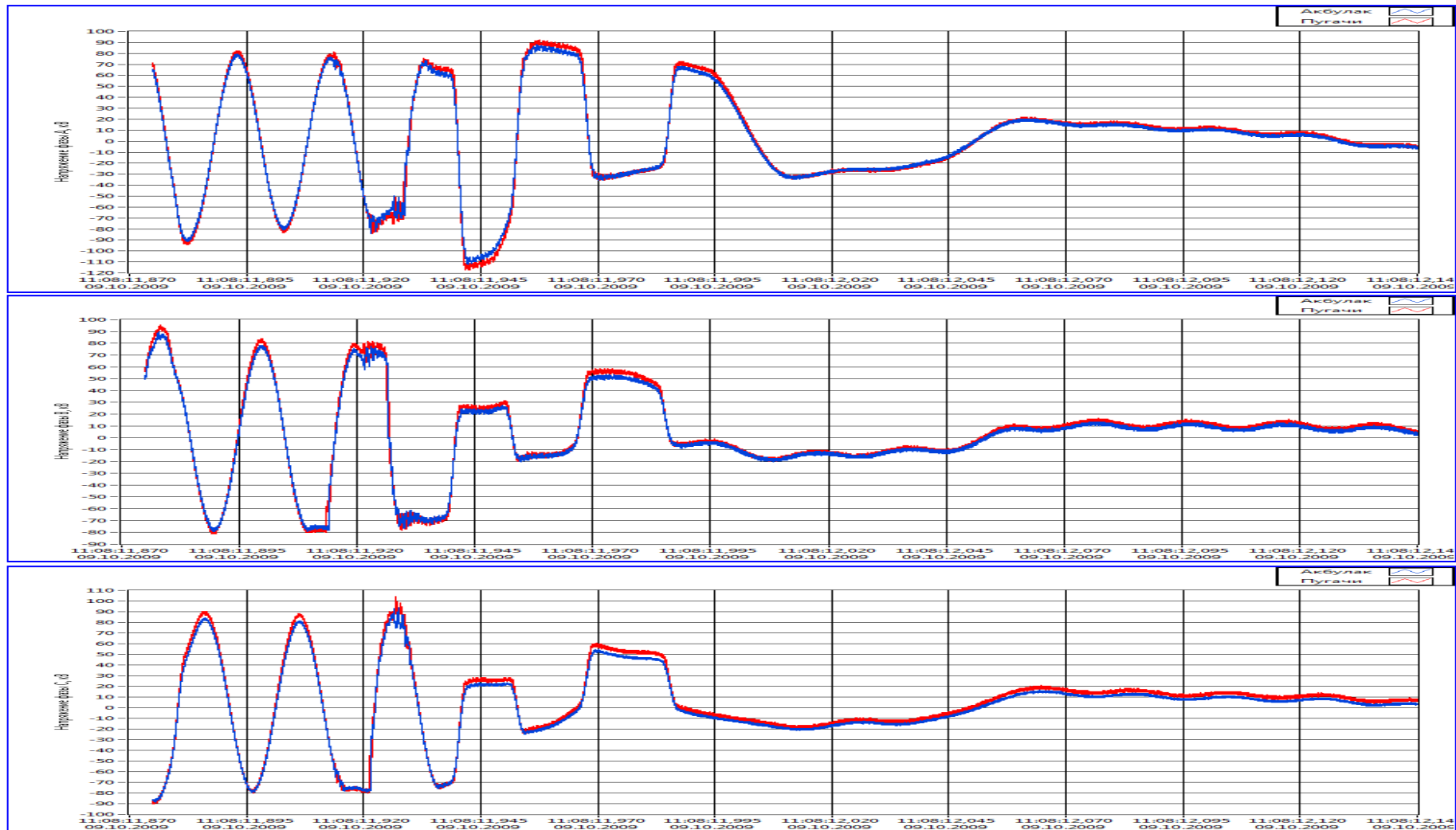


Рис. 3.7. Графики напряжений фаз А (верхний), В (средний) и С (нижний), измеренные с помощью ПИН регистраторами № 2 на ПС Акбулакская (синий) и № 3 на ПС Пугачевская (красный) при отключении линии.

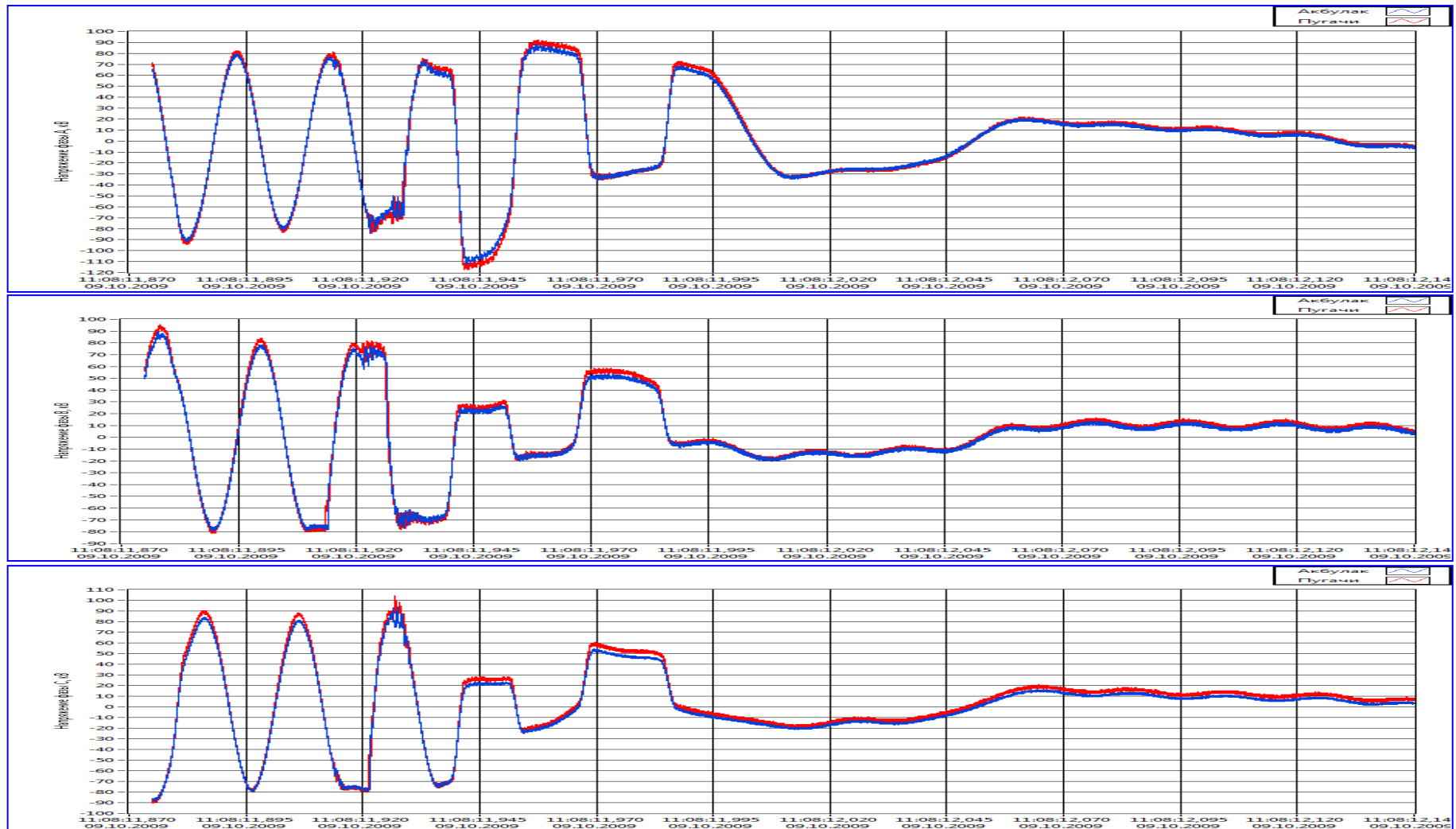


Рис. 3.8. Графики напряжений фаз А (верхний), В (средний) и С (нижний), измеренные с помощью ТН регистраторами № 2 на ПС Акбулакская (синий) и № 3 на ПС Пугачевская (красный) при отключении линии

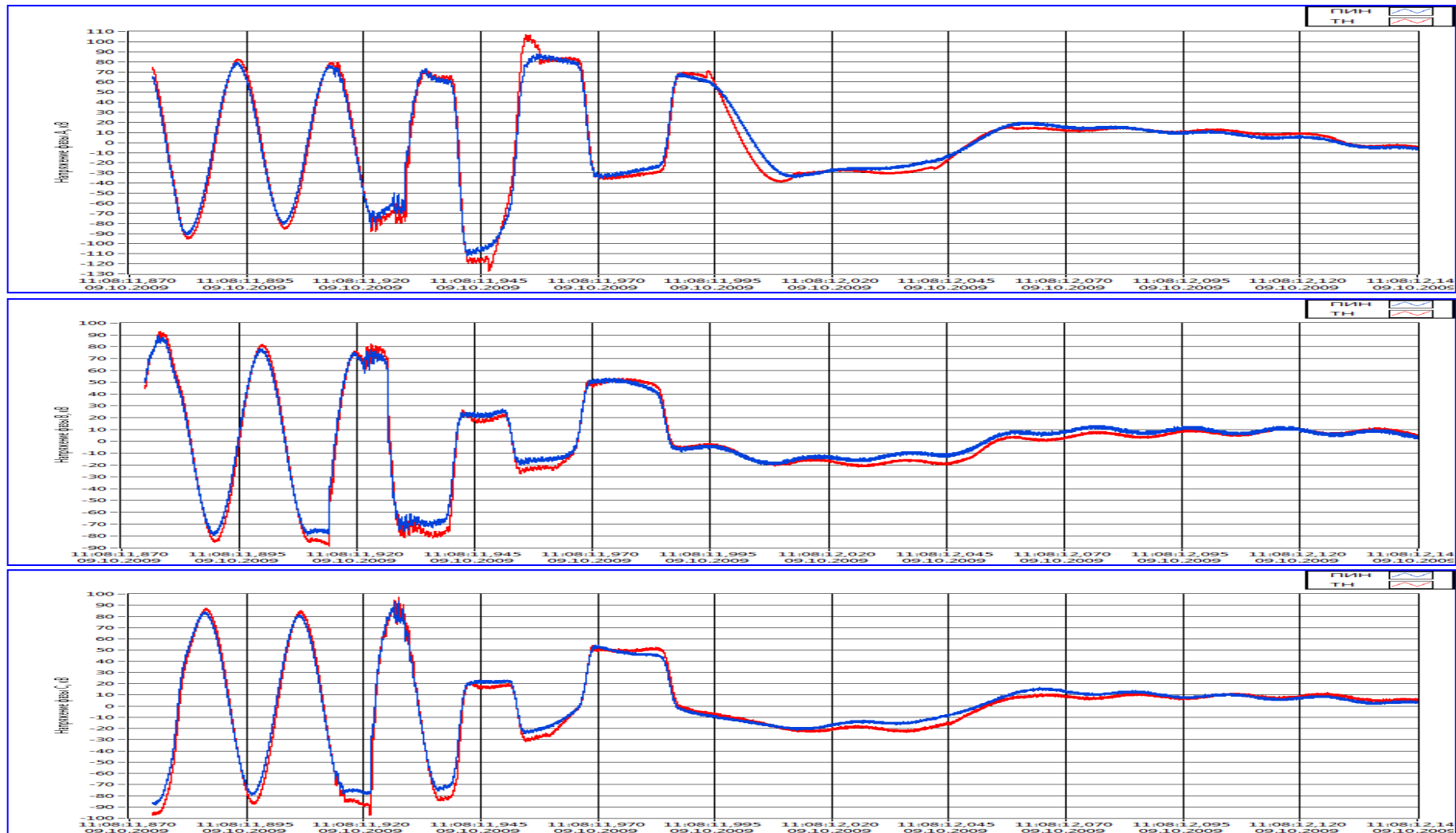


Рис. 3.9. Графики напряжений фаз А (верхний), В (средний) и С (нижний), измеренные с помощью ТН регистратором № 1(красный) и с помощью ПИН регистратором № 3 (синий) на ПС Пугачевская при отключении линии

не вносят существенного воздействия на форму фронта волны [5], что позволяет эффективно использовать волновые каналы при практической реализации ОМП. Вследствие того, что нулевой канал имеет более высокую степень затухания, приводящую к существенным искажениям фронта волны, для формирования сигнала в волновом методе ОМП целесообразно применение междуфазных волновых каналов [5], в которых форма сигнала в наибольшей степени приближена к форме волны в месте повреждения.

Применение высокой частоты дискретизации входных сигналов токов и напряжений ВЛ требует весьма широкой полосы пропускания частот для более точного определения фронта волны с минимальными искажениями. Применяемые ТН и ТТ проектируются для измерения сигналов промышленной частоты и, как показали исследования [105], ТТ имеют погрешности по АЧХ не более 5% и по ФЧХ не более 10 градусов в диапазоне до 500 кГц, а метрологические погрешности ТН существенно возрастают в полосе частот, превышающих 5 кГц. Эти данные необходимо учитывать при разработке ОМП волновым методом как при отдельном использовании токов и напряжений, так и при совместном их использовании.

Для уменьшения влияния отраженных волн в точке контроля производится определение напряжения падающей волны для волновых каналов [5,106] по выражению

$$U_{над} = \frac{U_m + Z_m \times I_m}{2}, \quad (3.4)$$

где  $Z_m$  – величина, характеризующая сопротивление волнового канала,  $U_m$  и  $I_m$  – напряжение и ток в точке контроля. Контроль напряжения (3.4) падающей волны позволяет, как указано в главе 1 диссертации, ограничить зависимость ОМП от изменения сопротивления электрической сети в энергосистеме, примыкающей к ВЛ, и отрицательного воздействия отраженных волн, способных исказить достоверность процесса измерения.

Составляющие токов и напряжений волновых каналов при повреждениях отстраиваются от токов и напряжений режима, предшествующего



повреждению, путем, например, вычисления в темпе процесса разности значений электрических величин, разделенных интервалом, кратным периоду промышленной частоты  $T$ , в соответствии с выражением

$$U_{ac}(t) = U_{nao}(t) - U_{nao}(t - T),$$

где  $t$  – текущее время, либо с использованием режекторных фильтров промышленной частоты и высших гармонических составляющих тока и напряжения, эффективность которых проанализирована в разделе 1.4.4 диссертации.

Точность определения фронта волны во многом зависит от используемого математического аппарата. В последние годы за счет внедрения микропроцессоров в практику создания устройств РЗ и ОМП созданы возможности для регистрации и обработки переходного процесса с интервалами дискретизации порядка единиц и десятков микросекунд. При этом особое внимание уделяется алгоритмическому обеспечению функционирования этих устройств с помощью современных математических методов. Наиболее распространенным среди них является метод прямого преобразования Фурье. Однако этот метод не приспособлен для анализа высокочастотных переходных процессов из-за того [107], что гармонические базисные функции, в принципе, не могут отображать перепады сигналов с бесконечной крутизной типа прямоугольных импульсов, так это требует бесконечно большого числа членов ряда. Так, например, преобразование Фурье не различает сигнал с суммой двух синусоид от сигнала с двумя последовательно следующими синусоидами с теми же частотами и поэтому не имеет возможности анализировать частотные характеристики сигнала в произвольные моменты времени [108].

Вследствие того, что современные математические методы определения фронта волны имеют ограничения при низком отношении сигнал/помеха определение фронта волны целесообразно производить на основе анализа сигналов во временной области с помощью методов математической статистики [109]. Использование этих методов позволит уменьшить влияние

помех на вычисление времени прихода фронта волны к концам ЛЭП и, тем самым, повысить точность ОМП [110].

Для фиксации времени прихода фронта волны с помощью методов математической статистики использован расчет коэффициента эксцесса для составляющих падающих волн междуфазных волновых каналов. Коэффициент эксцесса является мерой остроты пика распределения случайной величины и рассчитывается по выражению [109]

$$K_E = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3, \quad (3.5)$$

где  $\mu_4$  и  $\sigma$  — четвертый и второй центральные моменты статистического распределения соответственно, определяемые как

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

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

где  $x_i$  — исследуемый сигнал,  $n$  — число точек,  $\bar{x}$  — среднее арифметическое значение.

При отсутствии переходного процесса измеряемый сигнал определяется уровнем помех в токах и напряжениях ЛЭП и подчиняется закону нормального распределения. Как видно из рис. 3.10, сигнал, полученный с вторичных обмоток ТТ путем фильтрации частот, превышающих 3 кГц, имеет нормальное Гауссово распределение. Поэтому значение коэффициента эксцесса для данного сигнала в соответствие с (3.5) – (3.7) будет находиться в точках контроля (по концам ВЛ) на уровне нуля. При возникновении повреждения электромагнитные волны распространяются от места повреждения в точки контроля, нарушая в них нормальный закон распределения токов и напряжений. При этом коэффициент эксцесса резко возрастает и в момент превышения им величины заданного порогового значения фиксируется появление фронта волны. Чувствительность коэффициента эксцесса к отклонению распределения функции от закона нормального распределения

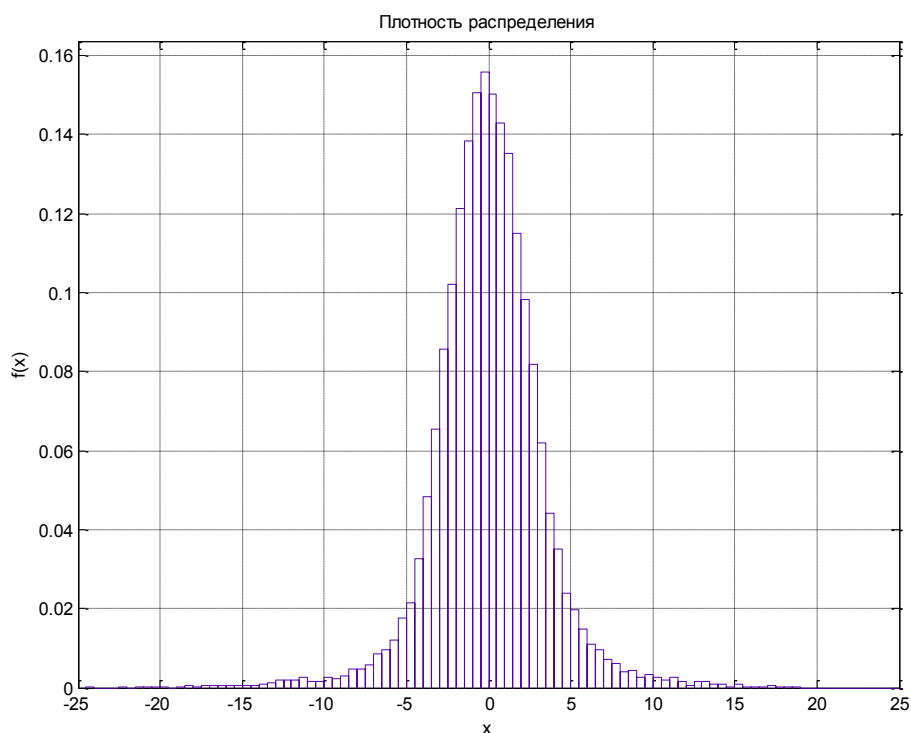


Рис. 3.10. Плотность распределения случайных величин в токе фазы А

очень высока, что позволяет повысить достоверность определения начала формирования фронта волны (рис. 3.11).

Для анализа волновых переходных процессов, возникающих при повреждениях в ВЛ, на основе аналитических расчетов производилась верификация модели ВЛ при имитационном моделировании с помощью программ ATP/EMTP и Matlab/Simulink. При этом ВЛ рассматривалась в виде частотно - зависимой модели с распределенными параметрами.

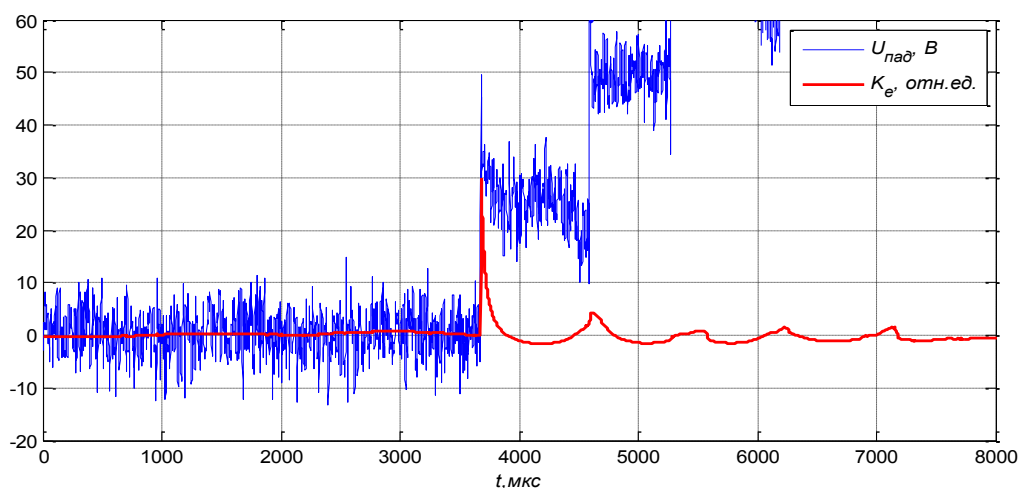


Рис. 3.11. Определения фронта волны с помощью коэффициента эксцесса

Так [111], для ВЛ 220 кВ длиной 100 км с треугольным расположением проводов АС 240/32 моделирование проводилось при варьировании расстояния до места повреждения от 10 км до 90 км с шагом расчета, равным 10 км, для всех видов КЗ (при значении переходного сопротивления в месте КЗ, равном 10 Ом). На рис. 3.12 представлены осциллограммы токов и напряжений в точке контроля при КЗ фазы А на землю на расстоянии до места КЗ, равном 50 км. На рис. 3.13 зафиксировано появление волны при КЗ фазы А на землю. При этом коэффициент эксцесса в момент появления волны резко возрастает.

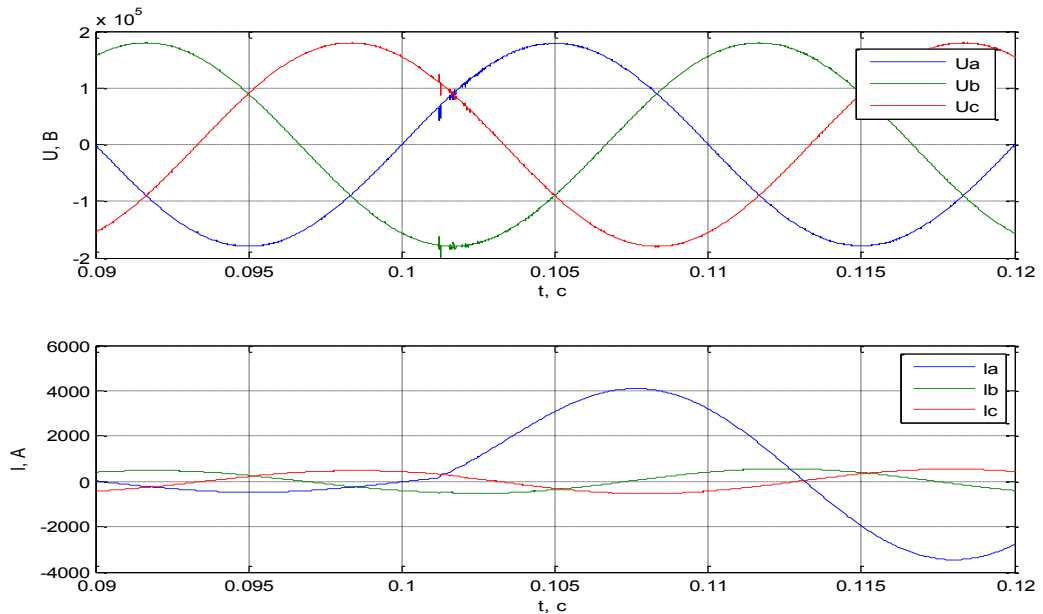


Рис. 3.12. Осциллограммы напряжений и токов при КЗ фазы А на землю

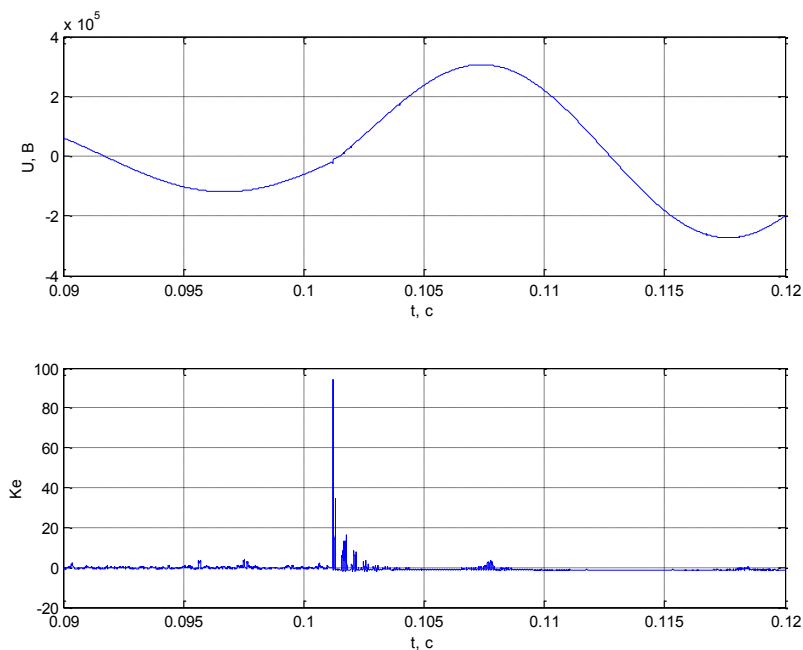


Рис. 3.13. Напряжение падающей волны первого волнового канала и коэффициент эксцесса по аварийным составляющим при КЗ фазы А на землю

Оценка способа также проводилась и по результатам измерения токов и напряжений на действующей ВЛ 110кВ Пугачи – Акбулак [103], а также на ВЛ 220 кВ Тамбовская – Давыдовская1 [111]. На рис. 3.14 изображен результат измерения напряжения при КЗ на ВЛ 110 кВ Пугачи – Акбулак.

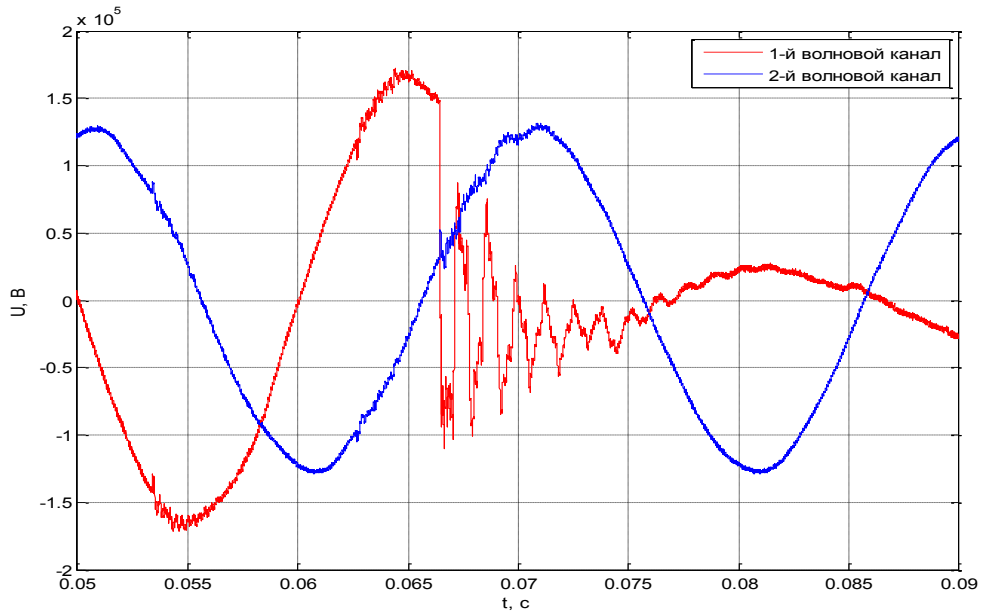


Рис. 3.14. Осциллограмма напряжения в первом и во втором волновых каналах со стороны ПС Пугачевская при КЗ в ВЛ 110 кВ Пугачи – Акбулак

Из рис. 3.15 видно, что резкое увеличение коэффициента эксцесса начинается в момент скачка напряжения первого волнового канала.

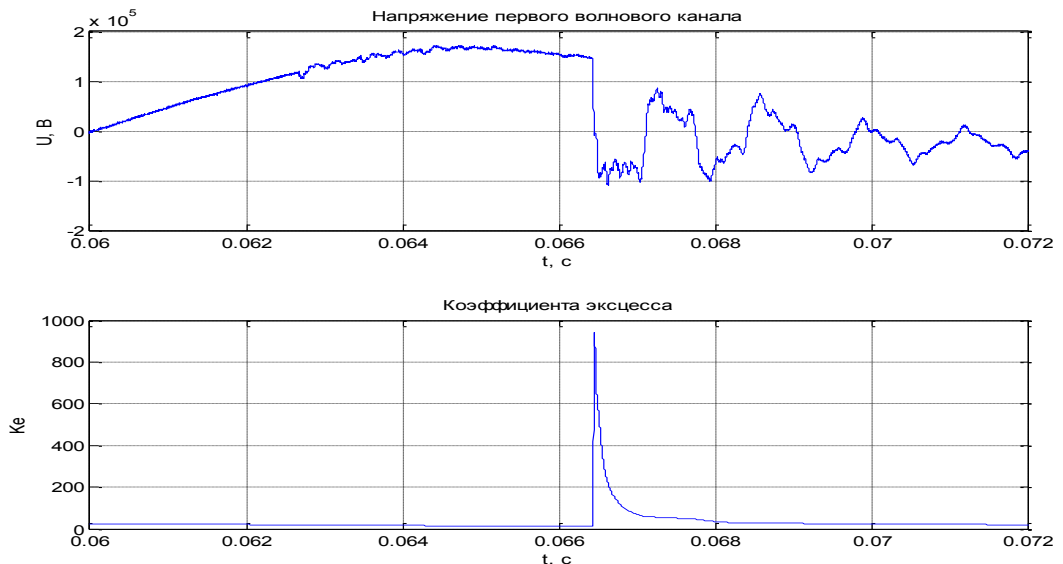


Рис. 3.15. Напряжение первого волнового канала и коэффициент эксцесса по аварийным составляющим при КЗ в ВЛ 110 кВ Пугачи – Акбулак

### 3.4. Структура и основные параметры устройства

В настоящее время выпускается ряд МФУ, позволяющих выполнять векторные измерения электрических величин, анализировать показатели качества электроэнергии, а также осуществлять телеуправление и телесигнализацию (например, ЭНИП-2 [112] и КИПП-2М [113]). МФУ, способные выполнять функции измерения, диагностики и регистрации процессов, а также передавать цифровую информацию через сеть Интернет и обрабатывать ее с использованием специальных алгоритмов, позволяют реализовать функцию цифрового синхронизированного регистратора аварийных процессов и измерителя векторных значений на одной аппаратной платформе, включающей источник синхронизации и модуль аналого-цифрового преобразования.

На рис. 3.16 приведена структурная схема МФУ, содержащего модули аналого-цифрового преобразования (АЦП), цифровой обработки сигналов (ЦОС), синхронизации и интерфейсный преобразователь. Модуль АЦП способен обеспечить требуемые метрологические характеристики для измерителя ПКЭ с минимальными нелинейными искажениями и широкой частотной полосой для волнового ОМП. В задачу модуля ЦОС входит математическое обеспечение выполняемых функций. В связи с большим объемом вычислений, связанных с преобразованием цифровых сигналов в темпе процесса, он выполнен на основе цифрового сигнального процессора. Устройство синхронизации могло бы неявно входить в состав модуля ЦОС в виде встроенных часов реального времени при условии, что точность синхронизации не критична 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 синхронизацию с погрешностью не более 1 мкс с учетом характеристик спутниковых радионавигационных систем GPS/ГЛОНАСС, либо

внешние источники синхронизации на основе стандартов IRIG-B или IEEE 1588 [114].

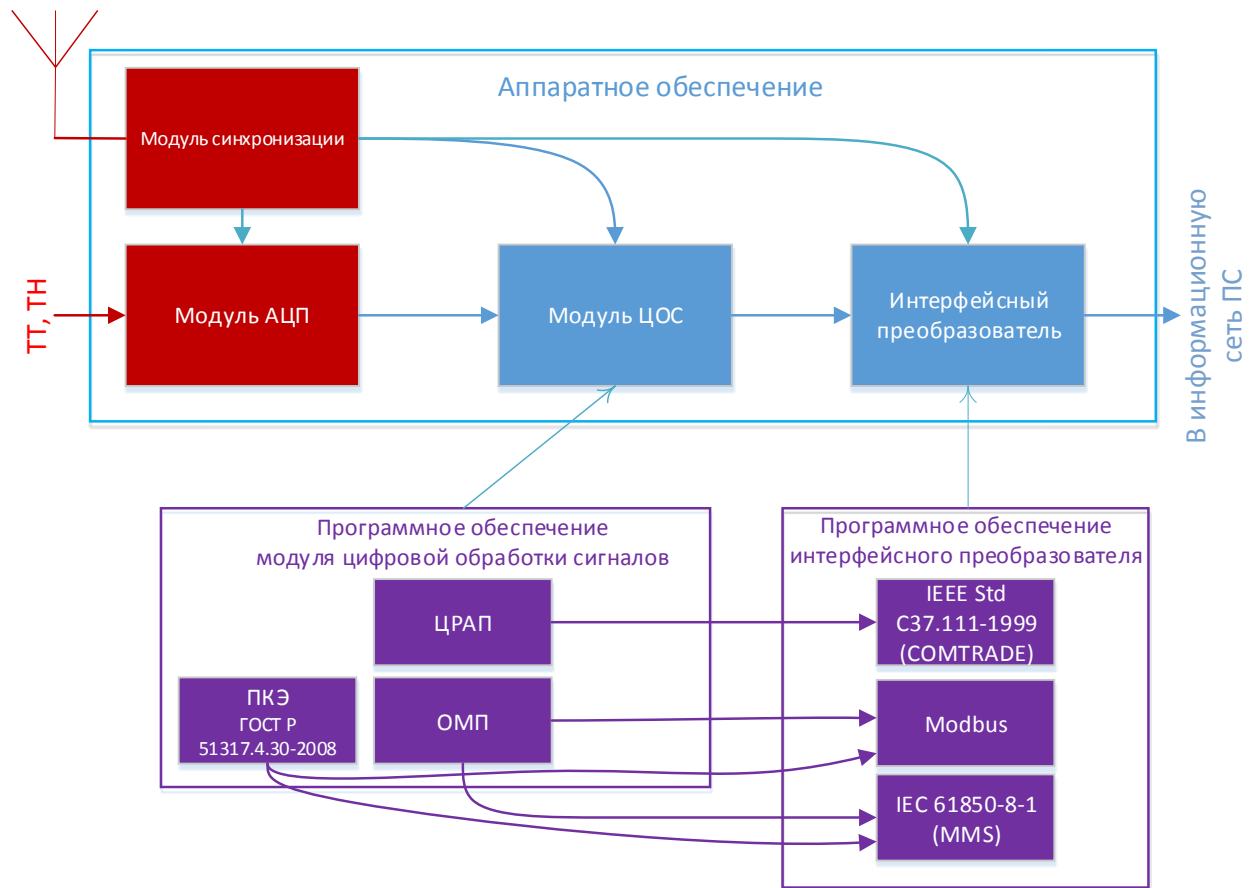


Рис. 3.16. Структурная схема МФУ

Интерфейсный преобразователь, предназначенный для интеграции устройства в информационную сеть ПС, способен поддерживать максимально возможное количество интерфейсов и протоколов, применяемых в электроэнергетике. Несмотря на то, что 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.

Согласно [93], в качестве основного для ВЛ 110 - 750 кВ рекомендуется использовать программное обеспечение WinBres [115] и АРМ-СРЗА [116] для ОМП по данным аварийных осциллограмм. Частота дискретизации позволяет

проводить ОМП по осциллограммам как методами по ПАР (автоматически, с помощью внешних программ), так и волновыми односторонними и двухсторонними методами (ручное выставление маркера появления фронта волны).

Предложенные методы определения расстояния до места повреждения с применением статистического анализа реализованы в многофункциональном устройстве (МФУ) ЭНИС [117-120], разработанном в ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского» по заказу ОАО «ФСК ЕЭС». Это устройство помимо ОМП позволяет проводить измерения мгновенных значений напряжения и тока каждой фазы ЛЭП, синхронизируемые во времени с помощью глобальной системы позиционирования GPS, регистрировать процессы в ЛЭП и измерять показатели качества электроэнергии в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51317.4.30-2008.

Экспериментальный образец МФУ ЭНИС (рис. 3.17) для регистрации процессов в ВЛ и определения мест повреждения, выполненный на основе измерительных и функциональных блоков фирмы National Instruments, являлся прототипом для проведения синхронизированных измерений процессов в ВЛ, а также обработки большого объема цифровой информации. Принцип построения устройства позволяет гибко изменять структуру и характеристики информационно - измерительного тракта, а также проводить реализацию алгоритмов обработки информации как на математических моделях (в среде моделирования и отладки программно-аппаратного обеспечения), так и на самом устройстве. Это позволяет оптимизировать его структуру и технико-экономические показатели (табл. 3.2) с целью создания современного конкурентноспособного микропроцессорного устройства.

Основные элементы экспериментального образца представлены на рис. 3.18.



Основные параметры экспериментального образца МФУ ЭНИС

Параметр	Значение			Единица измерения
	мин.	ном.	макс.	
<b>Изолирующие преобразователи напряжения</b>				
количество измерительных каналов по напряжению	4			ед.
входной импеданс	10,0			МОм
частотный диапазон	0		20	кГц
коэффициент трансформации		1:50		ед.
<b>Изолирующие преобразователи тока</b>				
количество измерительных каналов по току	4			ед.
входной импеданс			2,5	мОм
частотный диапазон	0		150	кГц
коэффициент трансформации		3:1000		ед.
<b>Высокоскоростной измерительный блок</b>				
количество измерительных каналов	8			ед.
разрядность	16			разрядов
частота дискретизации	1 000 000			выборок / с
линейность			±2	МЗР
входное напряжение	0		42	В
<b>Низкоскоростной измерительный блок</b>				
количество измерительных каналов	8			ед.
разрядность	16			разрядов
частота дискретизации	25 000			выборок / с
линейность			±2	МЗР
входное напряжение	0		42	В
<b>Параметры регистратора аварийных событий</b>				
количество регистрируемых каналов тока	4			ед.
количество регистрируемых каналов напряжения	4			ед.
разрядность	16			разрядов
частота дискретизации	1000000			выборок / с
длительность доаварийной записи	200			мкс
длительность аварийной записи	200			мкс



измерительных ТТ и ТН, в уровни, допустимые для работы измерительных блоков.

Методика испытаний МФУ в функции ОМП заключалась в воспроизведении осциллограмм КЗ генератором сигналов [121], например, LeCroy ArbStudio 1104. Сигналы по концам ВЛ при различных параметрах повреждений моделируются в программе ATP/EMTP, преобразуются в формат CSV и загружаются в генератор. Предавальный процесс длительностью 100 мс циклически воспроизводится генератором. Через 40 мс после начала воспроизведения аварийного процесса (после подачи команды) генератор подает сигнал пуска ОМП, имитируя сигнал от РЗ. По окончании аварийного процесса начинается воспроизведение сигнала послеаварийного процесса длительностью 100 мс. При испытаниях с помощью лабораторной установки (рис. 3.19) проводилась оценка погрешности контроля фронта волны. Генераторы синхронизировались между собой и с всемирным координированным временем с помощью приемника сигналов СРНС.

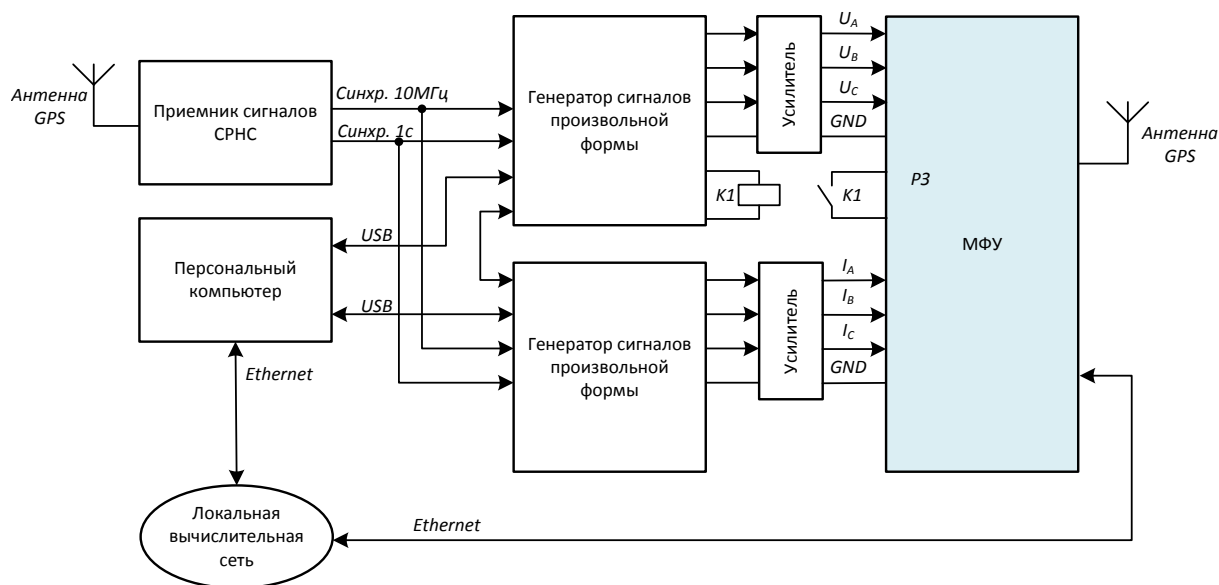


Рис. 3.19. Лабораторная установка для испытания ОМП

Лабораторные испытания на установке показали, что суммарная погрешность определения времени появления волны не превышает 2 мкс. Это указывает на то, что волновой метод двусторонних измерений можно отнести к достаточно точным средствам ОМП.

Экспериментальные (рис. 3.17) и опытные (рис. 3.20) образцы устройства ЭНИС, аппаратно-программное обеспечение которых было разработано в ОАО «ЭНИН», в 2012 году были введены сотрудниками лаборатории информационно-измерительных и управляющих систем в электроэнергетике ОАО «ЭНИН» и Верхне - Донского ПМЭС МЭС Центра ОАО «ФСК ЕЭС» в опытно-промышленную эксплуатацию (Приложения 5 и 6) на ВЛ 220 кВ Тамбовская 500 – Давыдовская1 с размещением на релейных щитах ПС Тамбовская 500 и ПС Давыдовская [122]. По цепям измерения устройства подключены к вторичным цепям ТТ ВЛ 220 кВ Тамбовская - Давыдовская1 и к вторичным цепям ТН системы шин 220 кВ указанных ПС.

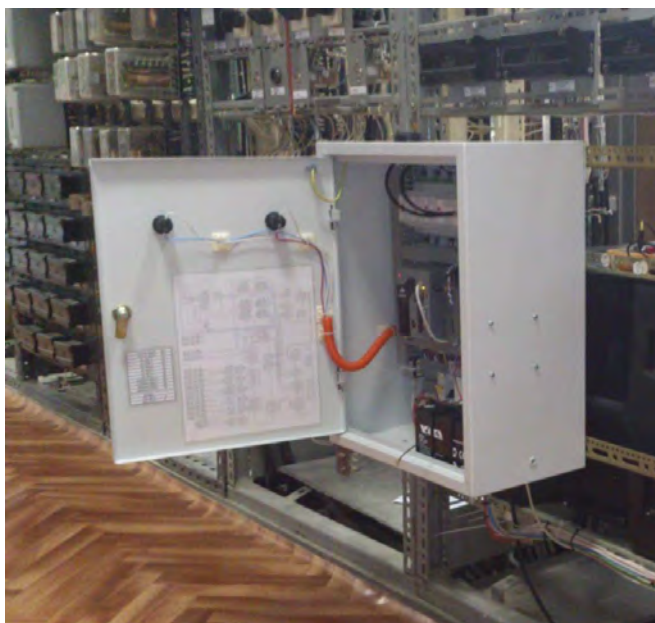


Рис. 3.20. Опытный образец МФУ ЭНИС, установленный на ПС Давыдовская

По цепям синхронизации устройства подключались к вновь смонтированным антеннам GPS, которые устанавливались на внешней части релейных щитов (рис. 3.21). Функции опытных образцов устройств дублировались экспериментальными образцами. Результаты измерения токов и напряжений на ВЛ приведены на рис. 3.22 и 3.23.

### 3.5. Анализ экспериментальных данных

Для проверки функциональных свойств образцов устройства ЭНИС в реальных условиях выполнены исследования с передачей информации по каналам связи в лабораторию информационно-измерительных и управляющих систем в электроэнергетике ОАО «ЭНИН».



Рис. 3.21. Антенны GPS, установленные с южной стороны релейного щита ПС Тамбовская 500

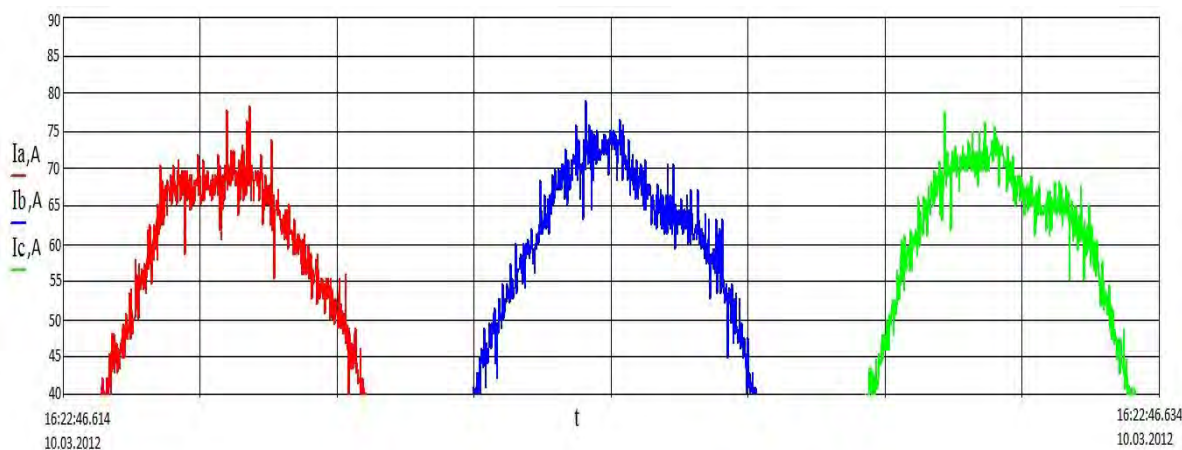


Рис. 3.22. Фрагмент осциллограммы токов фаз А, В и С ЛЭП 220 кВ Тамбовская 500 – Давыдовская1, измеренных на ПС Давыдовская



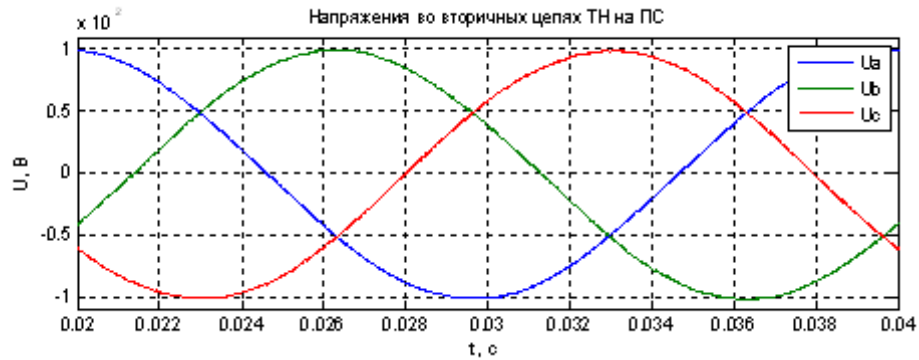


Рис. 3.23. Осциллограммы напряжений фаз А, В и С ЛЭП 220 кВ Тамбовская 500 – Давыдовская, измеренных на ПС Давыдовская

На рис. 3.24 представлены графики напряжений всех фаз, а также - напряжения нулевой последовательности, зафиксированные устройством ЭНИС на ВЛ 220 кВ Тамбовская - Давыдовская со стороны ПС Давыдовская.

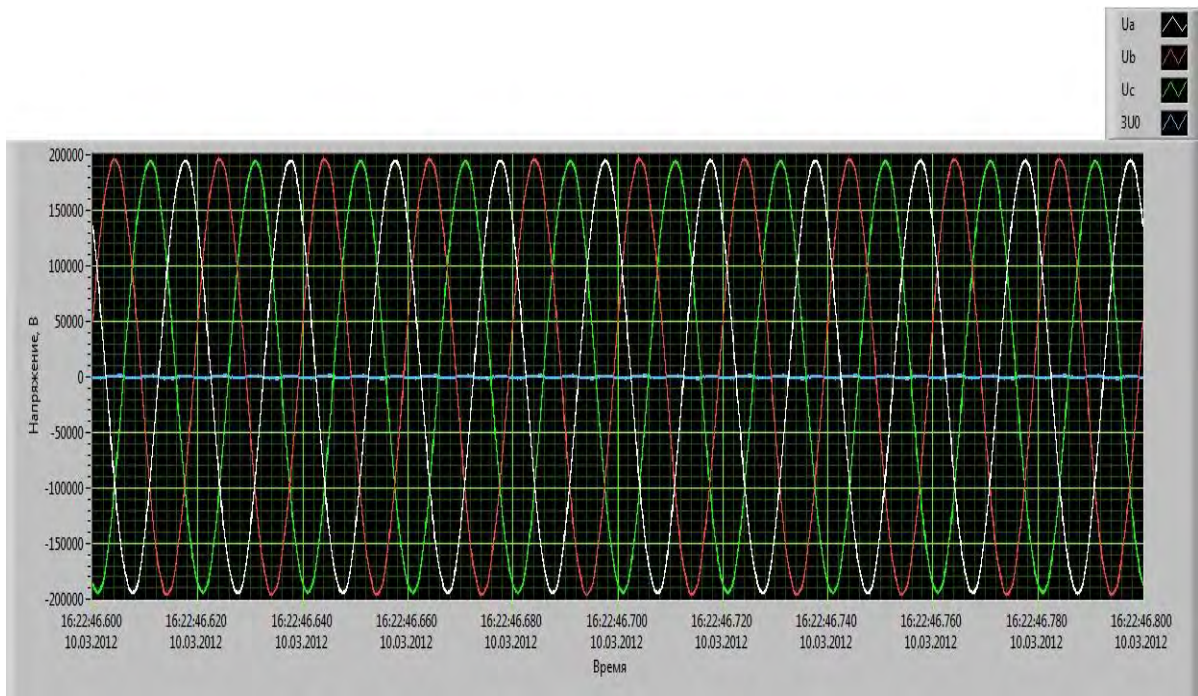


Рис. 3.24. Напряжения фаз А, В и С и напряжение нулевой последовательности  $3U_0$  на ВЛ 220 кВ Тамбовская - Давыдовская со стороны ПС Давыдовская

Более детальная развертка осциллограмм позволяет зафиксировать несимметрию мгновенных значений напряжений  $U_a$ ,  $U_b$  и  $U_c$  (рис. 3.25), среднее значение которой составляет 1,33 кВ.

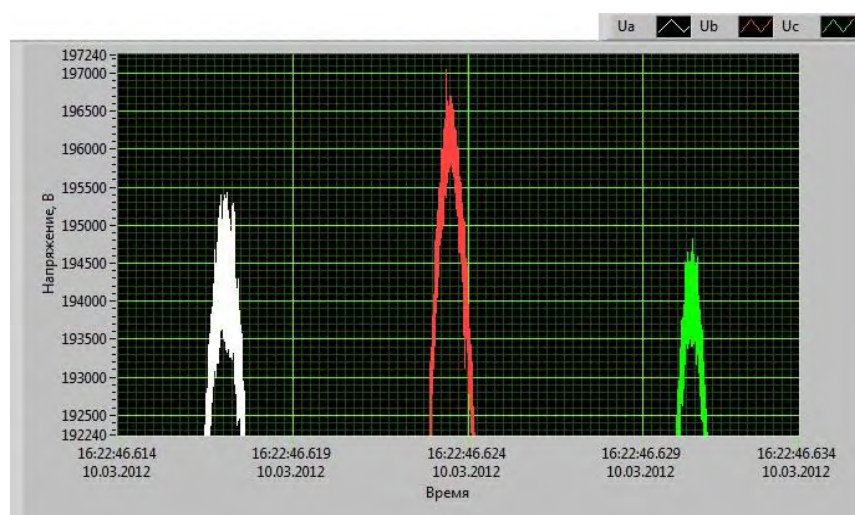


Рис. 3.25. Фрагмент осциллограммы напряжений  $U_a$ ,  $U_b$  и  $U_c$

Для подтверждения соответствия измерений реальным данным проведено сравнение напряжения нулевой последовательности, измеренного с выхода обмотки  $3U_0$ , соединенной в разомкнутый треугольник, трансформатора напряжения (ТН), с суммой фазных напряжений, полученной сложением напряжений трех фаз, снятых с соответствующих фазных вторичных обмоток этого ТН (рис. 3.26). Как видно, эти напряжения на выбранном интервале времени 200 мс практически совпадают.

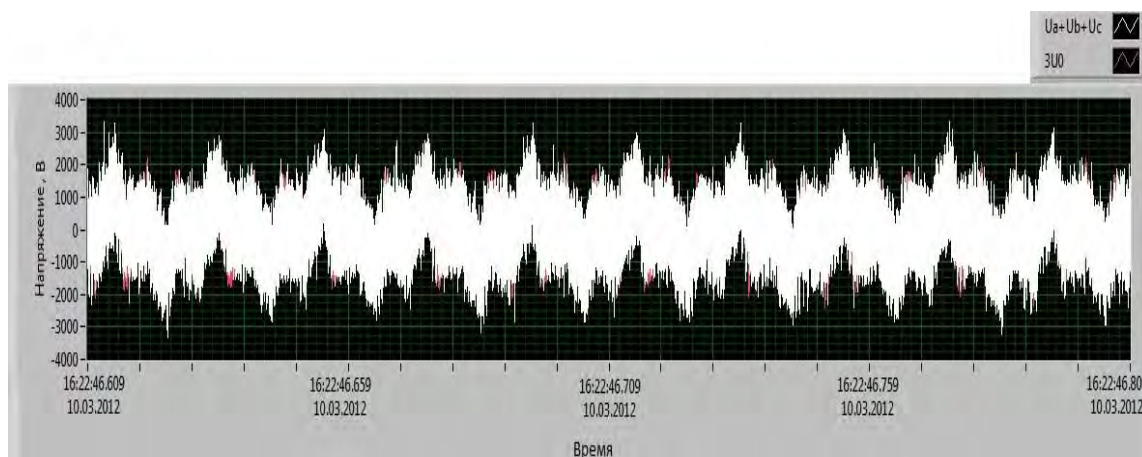


Рис. 3.26. Напряжение нулевой последовательности, измеренное в обмотке ТН, соединенной в разомкнутый треугольник, и сумма фазных напряжений вторичных обмоток этого же трансформатора

Однако результаты более детальных исследований на выделенном из осциллограммы рис. 3.26 временном интервале 1 мс (рис. 3.27) указывают, что рассматриваемые напряжения характеризуются наличием 36-ой гармоники и совокупностью частот, превышающих 100 кГц. В осциллограммах

расхождение величин напряжения на частоте 1800 Гц (тридцать шестая гармоника) и в диапазоне высокочастотных составляющих равно примерно двум. При этом сумма фазных напряжений содержит более четко выраженную структуру высокочастотных составляющих, чем напряжение на обмотке 3Uo. Следует отметить, что общий уровень сигналов в контуре 3Uo составляет около 2 кВ (приблизительно 1% от номинального напряжения).

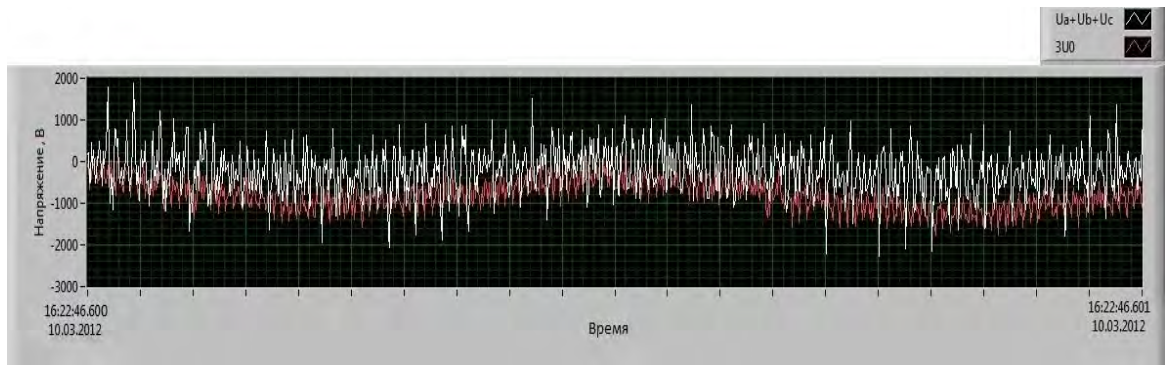


Рис. 3.27. Напряжение нулевой последовательности, измеренное в обмотке ТН, соединенной в разомкнутый треугольник, и сумма фазных напряжений вторичных обмоток этого же трансформатора на интервале 1 мс

Высокочастотные сигналы хорошо видны и на осциллограмме мгновенных значений напряжения фазы Ua со стороны ПС Давыдовская (рис. 3.28).

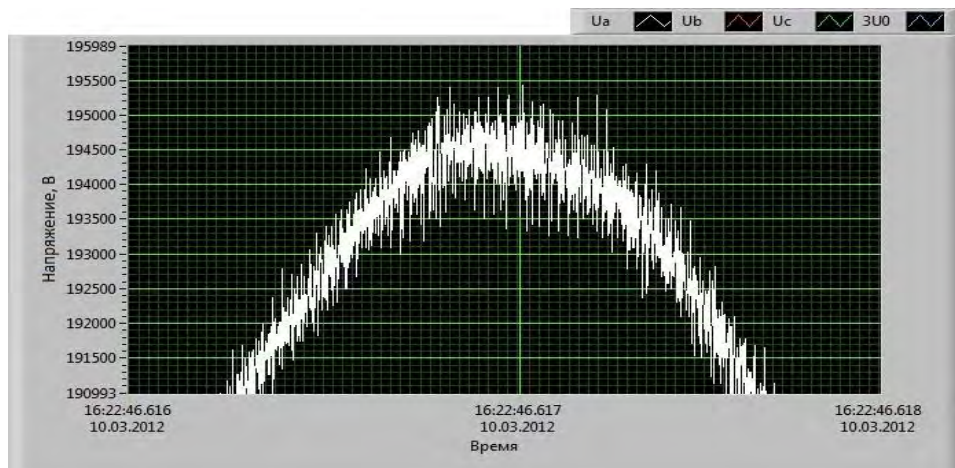


Рис. 3.28. Мгновенные значения напряжения фазы А со стороны ПС Давыдовская

На рис. 3.29 представлены осциллограммы токов фаз и тока нулевой последовательности 3Uo ВЛ 220 кВ Тамбовская – Давыдовская со стороны ПС Давыдовская.



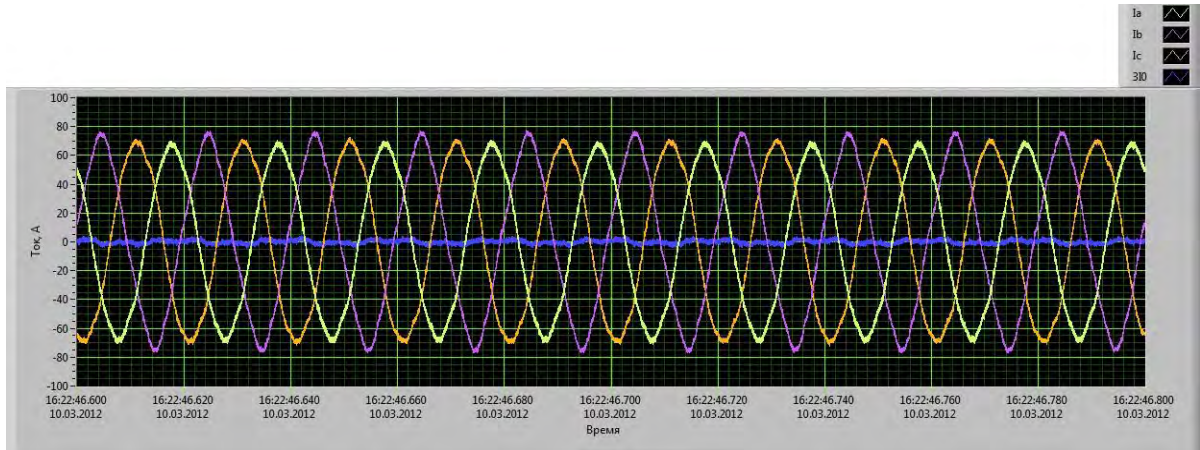


Рис. 3.29. Токи фаз (Ia, Ib, Ic) и ток нулевой последовательности 3Io ВЛ 220 кВ Тамбовская – Давыдовская со стороны ПС Давыдовская

По осциллограммам (рис. 3.30) несложно определить несимметрию токов фаз.

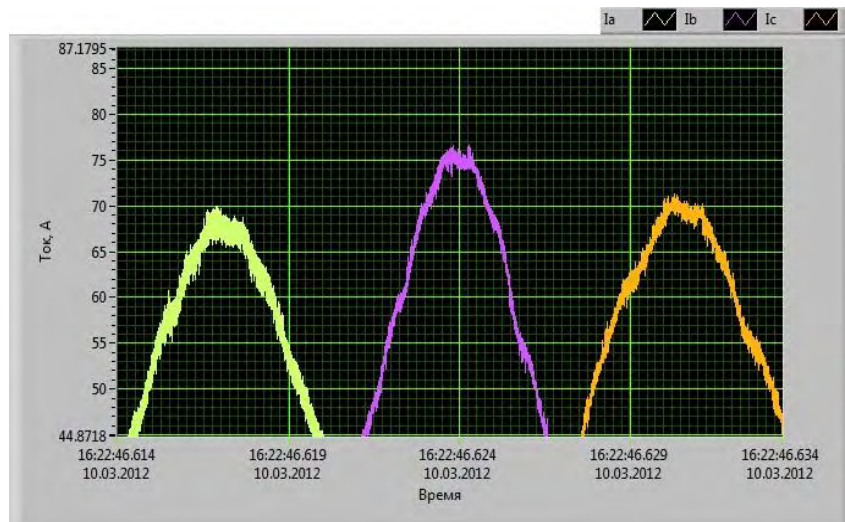


Рис. 3.30. Фрагмент осциллограммы токов фаз Ia, Ib, Ic

Амплитудные значения фазных токов составляют 70-76 А. Основной нагрузкой ПС Давыдовская является газокompрессорная станция с потребляемой мощностью на уровне 20 МВт. Исходя из этого значения, амплитудное значение тока составляет

$$I_{амп.} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{лин.}} \cdot \sqrt{2} = \frac{20 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 10^3} \sqrt{2} = 74.8 \text{ А.}$$

Таким образом, измеренное и рассчитанное значение тока практически совпадают, что свидетельствует о достоверности выполненных измерений. На

рис. 3.31 представлены результаты измерений тока нулевой последовательности  $3I_0$  трансформатора тока ВЛ и алгебраической суммы токов фаз ( $I_a+I_b+I_c$ ).

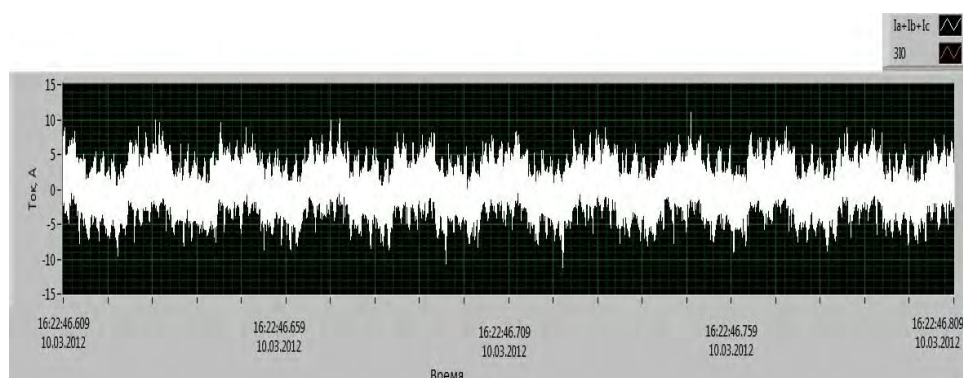


Рис. 3.31. Ток нулевой последовательности  $3I_0$  трансформатора тока ВЛ и алгебраическая сумма токов фаз ( $I_a+I_b+I_c$ ).

На интервале 1 мс (рис. 3.32) можно видеть, что обе осциллограммы содержат токи с частотами, превышающими 100 кГц, с различием величины тока нулевой последовательности  $3I_0$  и тока, рассчитанного как сумма всех фазных значений токов, в 2-4 раза.

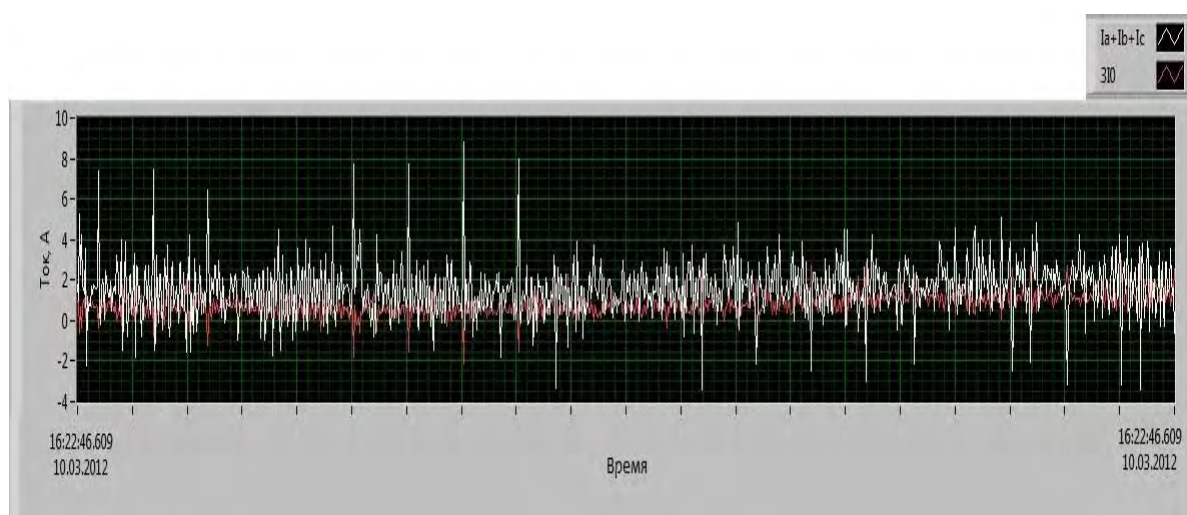


Рис. 3.32. Ток нулевой последовательности  $3I_0$  трансформатора тока ВЛ и алгебраическая сумма токов фаз ( $I_a+I_b+I_c$ ) на интервале 1 мс

Следует отметить также, что в токе нулевой последовательности, представленном как сумма фазных токов, наблюдаются всплески высокой частоты, которые составляют до 10 % от амплитуды тока фазы (рис. 3.33).

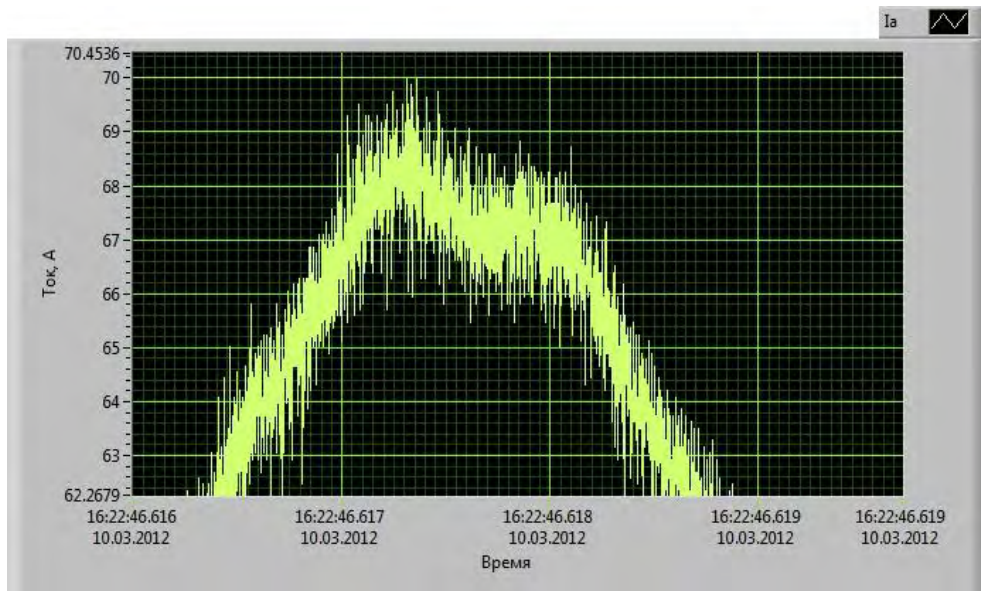
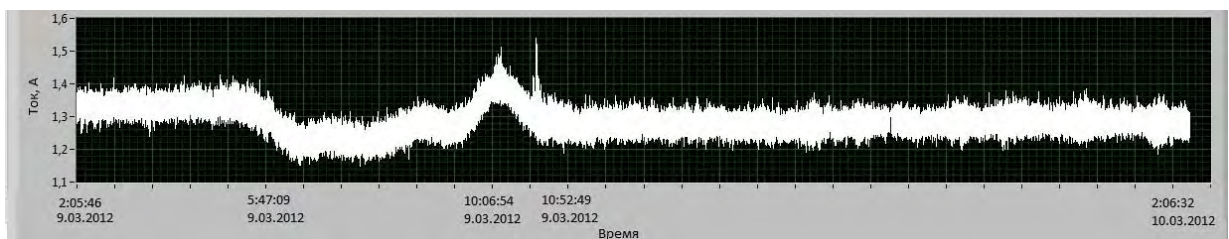


Рис. 3.33. Ток фазы

На рис. 3.34 представлена среднесуточная зависимость среднеквадратического значения тока нулевой последовательности  $3I_0$  ВЛ 220 кВ Тамбовская – Давыдовская со стороны ПС Давыдовская. Анализ графика указывает на стабильность среднеквадратического значения тока  $3I_0$  в период с 2 часов 6 минут 46 минут до 5 часов 47 минут. Наличие сигнала переходного процесса на интервале 5 часов 47 минут – 10 часов 52 минут свидетельствует о характерном изменении нагрузки ПС.

Рис. 3.34. Суточное распределение среднеквадратического значения тока  $3I_0$  ВЛ 220 кВ Тамбовская – Давыдовская со стороны ПС Давыдовская

Для контроля переходных процессов и ОМП была проведена обработка полученных данных с помощью выделения аварийных составляющих с последующим расчетом коэффициента эксцесса по (3.5) – (3.7).

На рис. 3.35 представлены временные диаграммы аварийной составляющей для напряжения  $U_a$ .



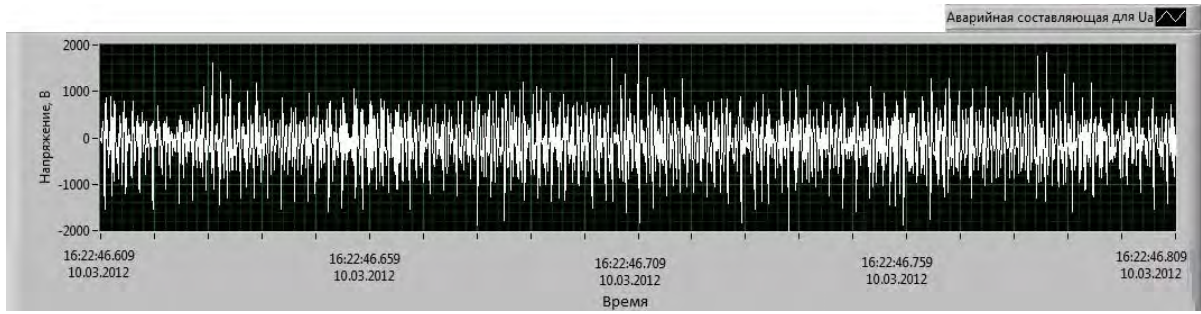


Рис. 3.35. Аварийная составляющая для напряжения  $U_a$

Сигнал аварийной составляющей подчиняется нормальному закону распределения в связи с отсутствием аварии в линии. Коэффициент эксцесса для напряжения  $U_a$  (рис. 3.36) изменяется в пределах от -1 до +1, что также подтверждает отсутствие переходного процесса в линии.

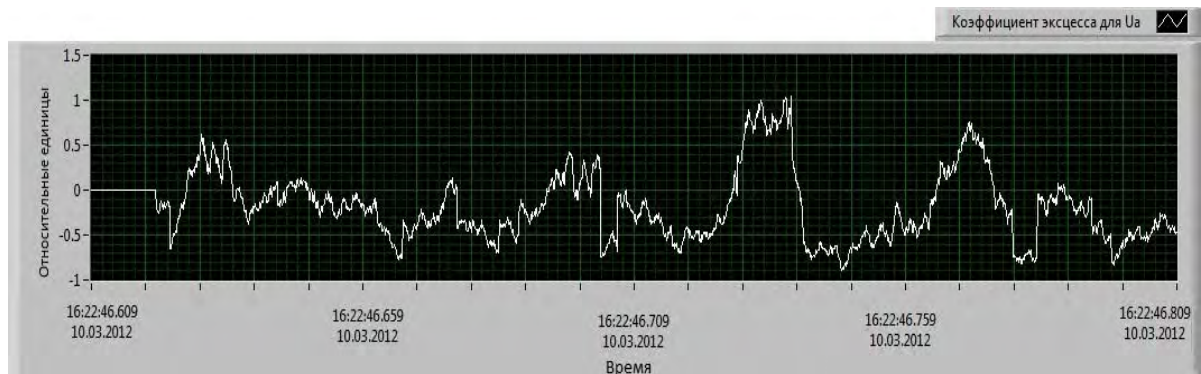


Рис. 3.36. Коэффициент эксцесса для напряжения  $U_a$

Аналогичными свойствами обладают графики аварийных составляющих и коэффициента эксцесса для напряжений  $U_b$  и  $U_c$  (рис. 3.37 – 3.40).

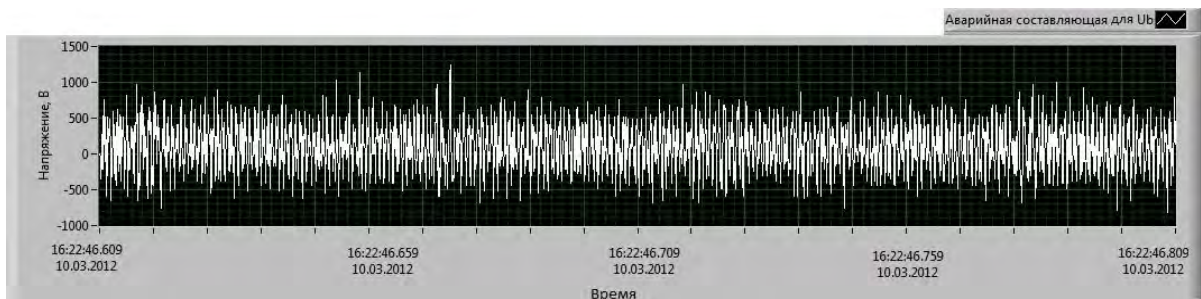
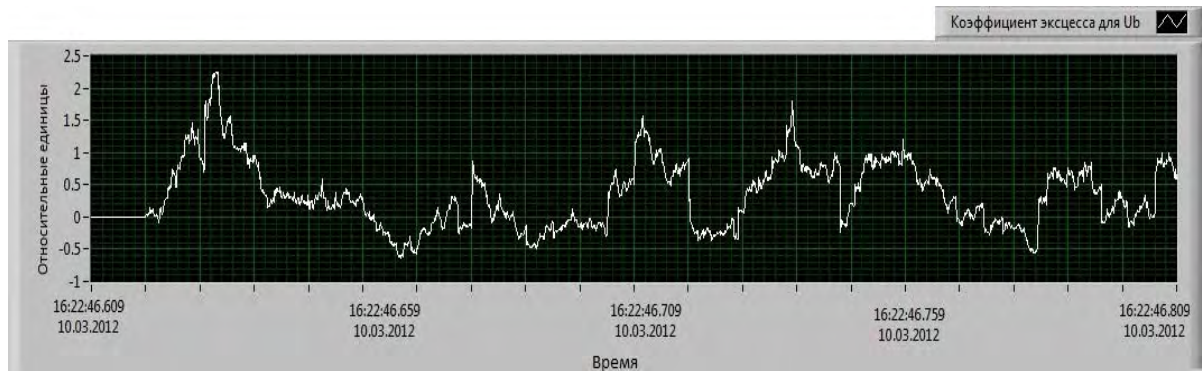
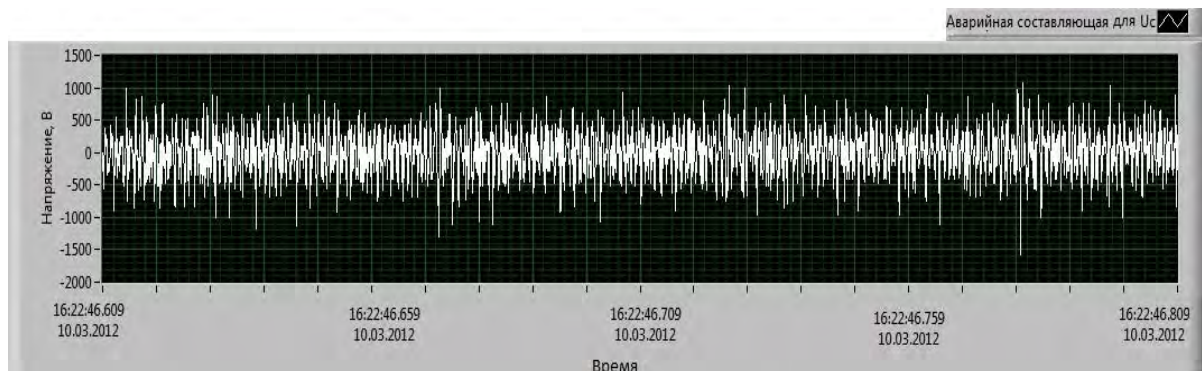
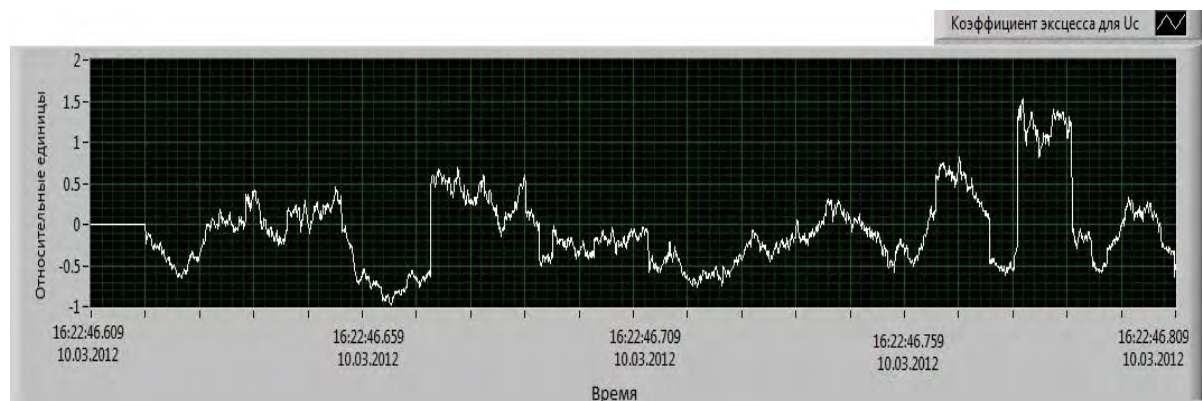


Рис. 3.37. Аварийная составляющая для напряжения  $U_b$

Рис. 3.38. Коэффициент эксцесса для напряжения  $U_b$ Рис. 3.39. Аварийная составляющая для напряжения  $U_c$ Рис. 3.40. Коэффициент эксцесса для напряжения  $U_c$ 

Величины коэффициентов, соответствующие волновым сопротивлениям линии в первом и во втором волновых каналах, вычисляются с учетом значений коэффициентов трансформации ТН и ТТ линии, к которым подключается устройство. На рис. 3.41 – 3.44 представлены диаграммы аварийных составляющих и эксцесса для напряжений падающих волн первого Упад(1) и второго Упад(2) волновых каналов соответственно.



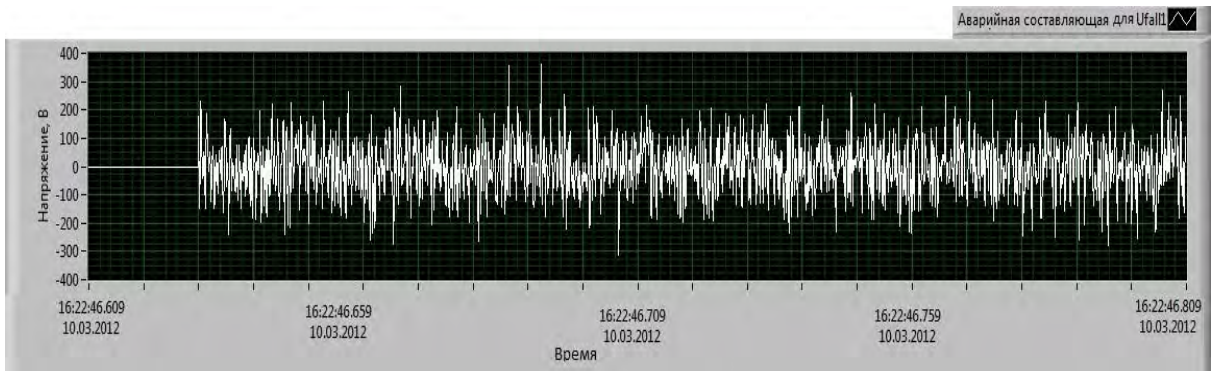


Рис. 3.41. Аварийная составляющая для напряжения Упад(1)

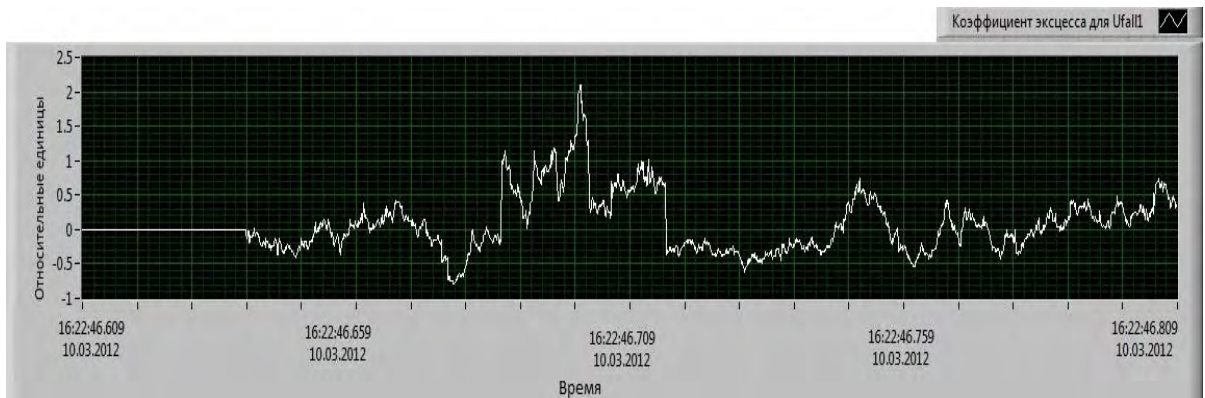


Рис. 3.42. Коэффициент эксцесса для напряжения Упад(1)

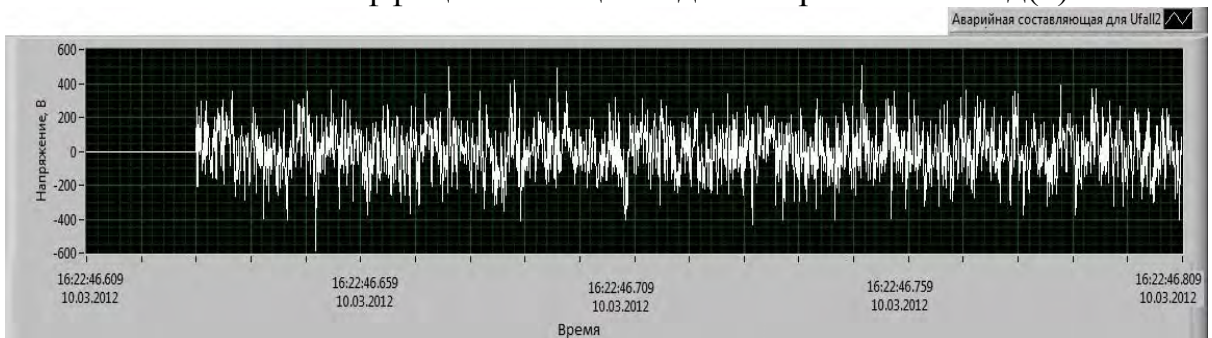


Рис. 3.43. Аварийная составляющая для напряжения Упад(2)

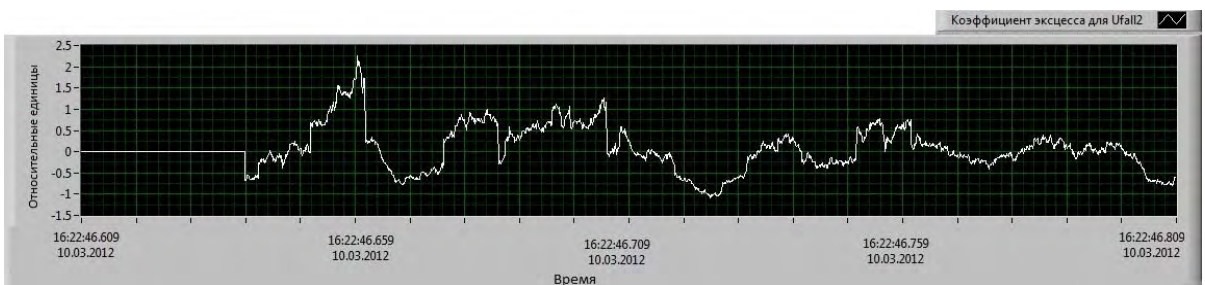


Рис. 3.44. Коэффициент эксцесса для напряжения Упад(2)

Построенные зависимости подчиняются нормальному закону распределения. На рис. 3.45 представлены осциллограммы напряжений установившегося режима в первом и во втором волновых каналах ВЛ 220 кВ Тамбовская-500 – Давыдовская-1 со стороны ПС Тамбовская-500. Расчет коэффициента эксцесса показал (рис. 3.46), что способ не чувствителен к шумам, имеющим нормальное распределение.

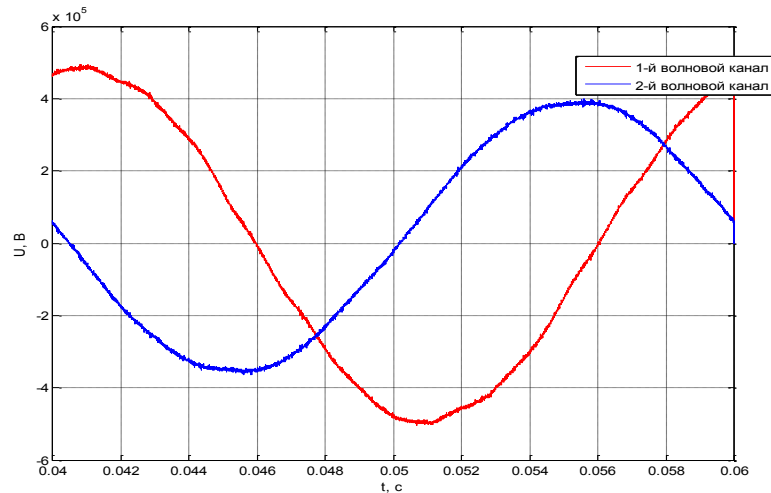


Рис. 3.45. Осциллограммы напряжений в первом и во втором волновых каналах ВЛ 220 кВ Тамбовская-500 – Давыдовская-1 со стороны ПС Тамбовская-500 в установившемся режиме

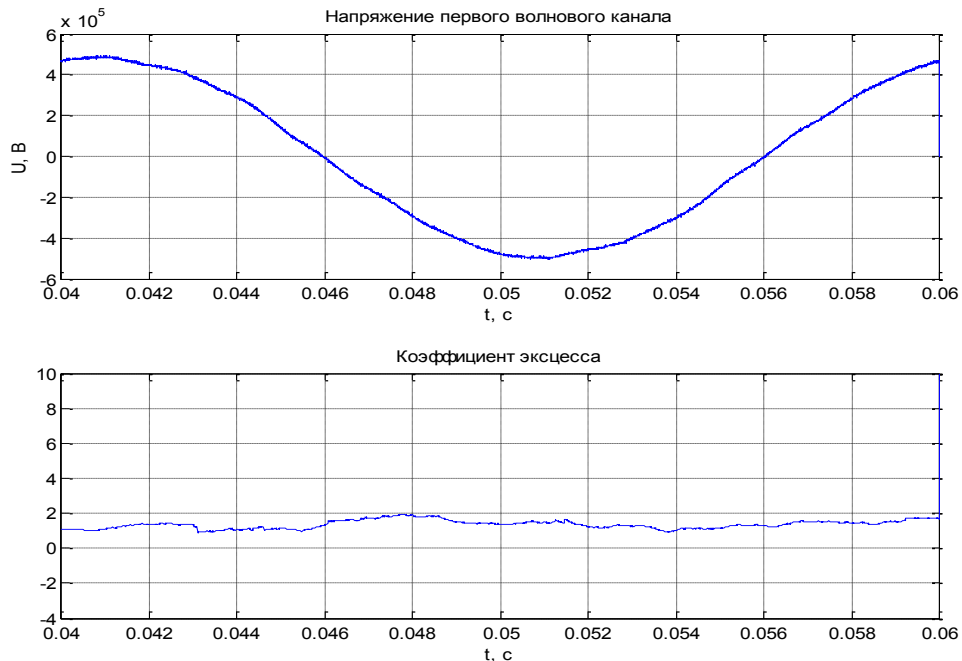


Рис. 3.46. Напряжение первого волнового канала и коэффициент эксцесса ВЛ 220 кВ Тамбовская-500 – Давыдовская-1 со стороны ПС Тамбовская-500 в установившемся режиме работы ВЛ

С помощью передаваемой по каналам связи в ОАО «ЭНИН» информации фиксировались данные о срабатываниях образцов устройства при различных переходных процессах, вызванных КЗ и переключениями в электрической сети, включающей ВЛ 220 кВ Тамбовская-Давыдовская 1. В качестве примера приведены осциллограммы переходного процесса при отключении ВЛ 220 кВ Тамбовская - Давыдовская 1 (рис. 3.47) и вводе ее в работу (рис. 3.48), а также при включении выключателей ВЛ 220 кВ Глебово – Давыдовская (рис. 3.49). Осциллограммы тока четко характеризуют последовательность коммутации выключателей по концам ВЛ, в том числе разновременность переключения их фаз. Как показывает практика, зона действия регистрации охватывает КЗ на ВЛ 500 кВ, примыкающих к ПС Тамбовская-500, в частности на ВЛ Тамбовская-Рязанская ГРЭС (рис. 3.50 и 3.51) и коммутации выключателей 500 кВ ПС Тамбовская-500, например, ВЛ 500 кВ Тамбовская-Пенза (рис. 3.52).

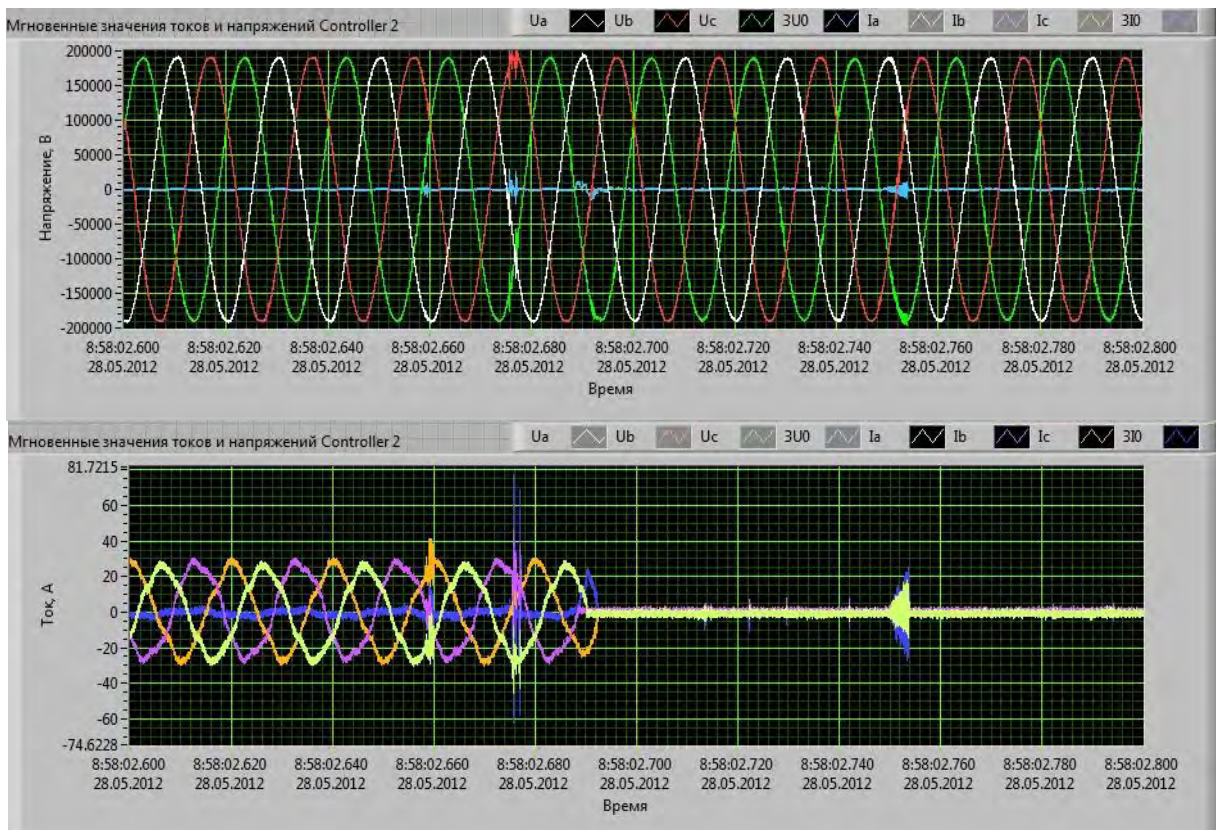


Рис. 3.47. Напряжения и токи при отключении ВМ-1, ВМ-2 ВЛ 220 кВ Давыдовская 1



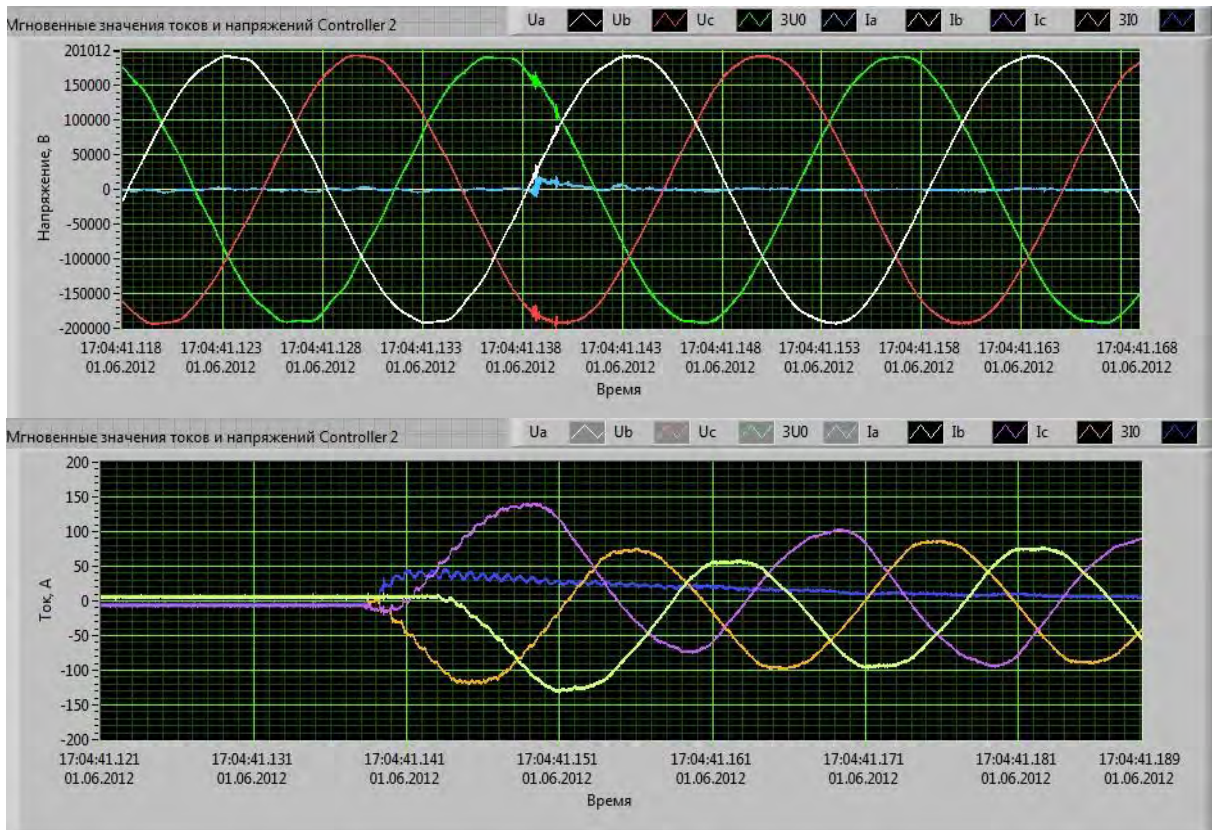


Рис. 3.48. Напряжения и токи при включении ВМ-1 и ВМ-2 в процессе ввода в работу ВЛ 220 кВ Давыдовская 1

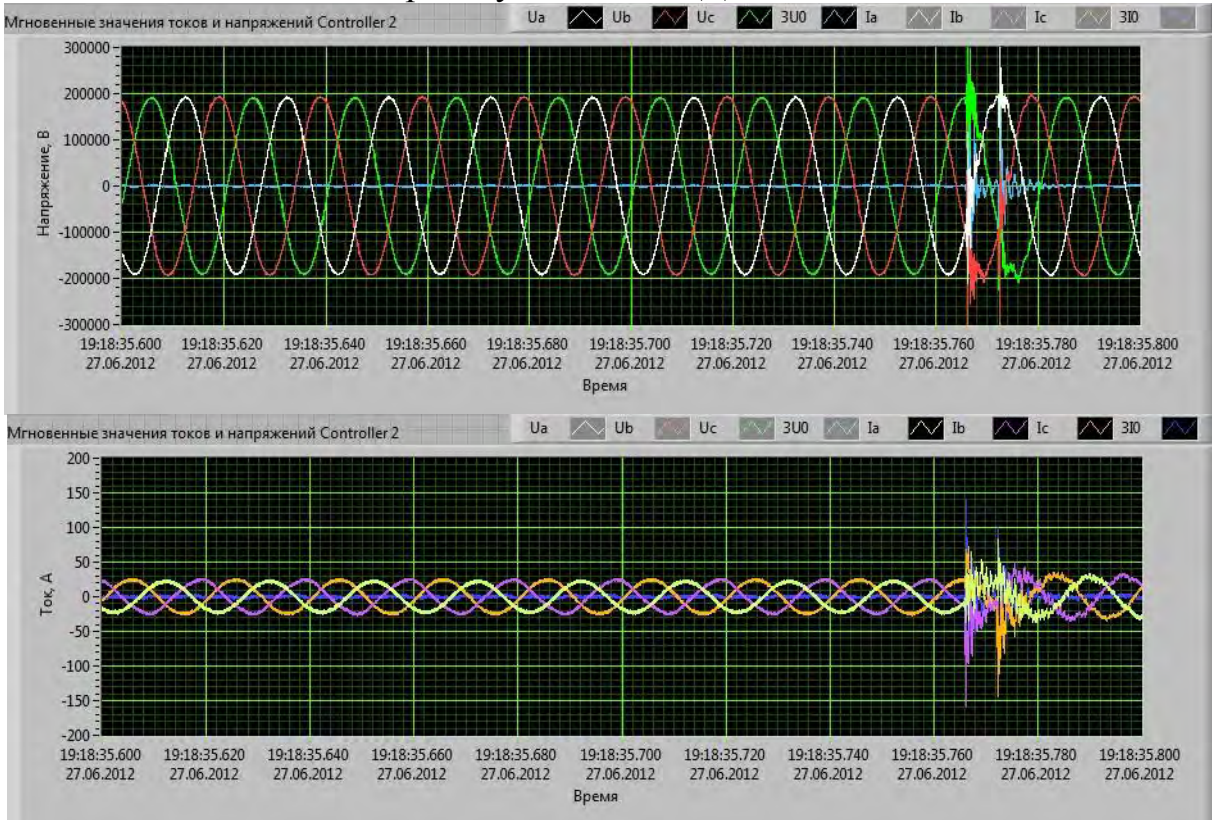


Рис. 3.49. Включение ВМ-5 и ВМ-6 ВЛ 220 кВ Глебово – Давыдовская



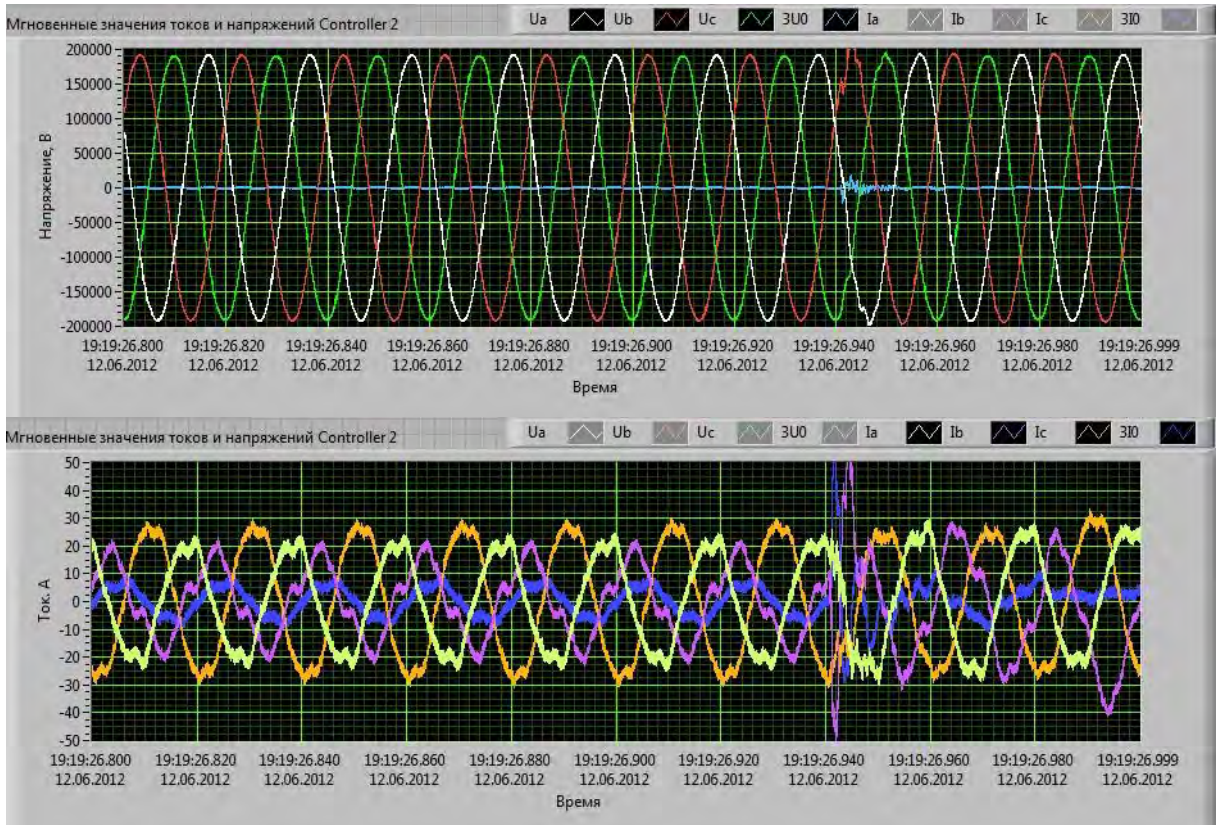


Рис. 3.50. КЗ ВЛ Рязанская ГРЭС – Тамбовская

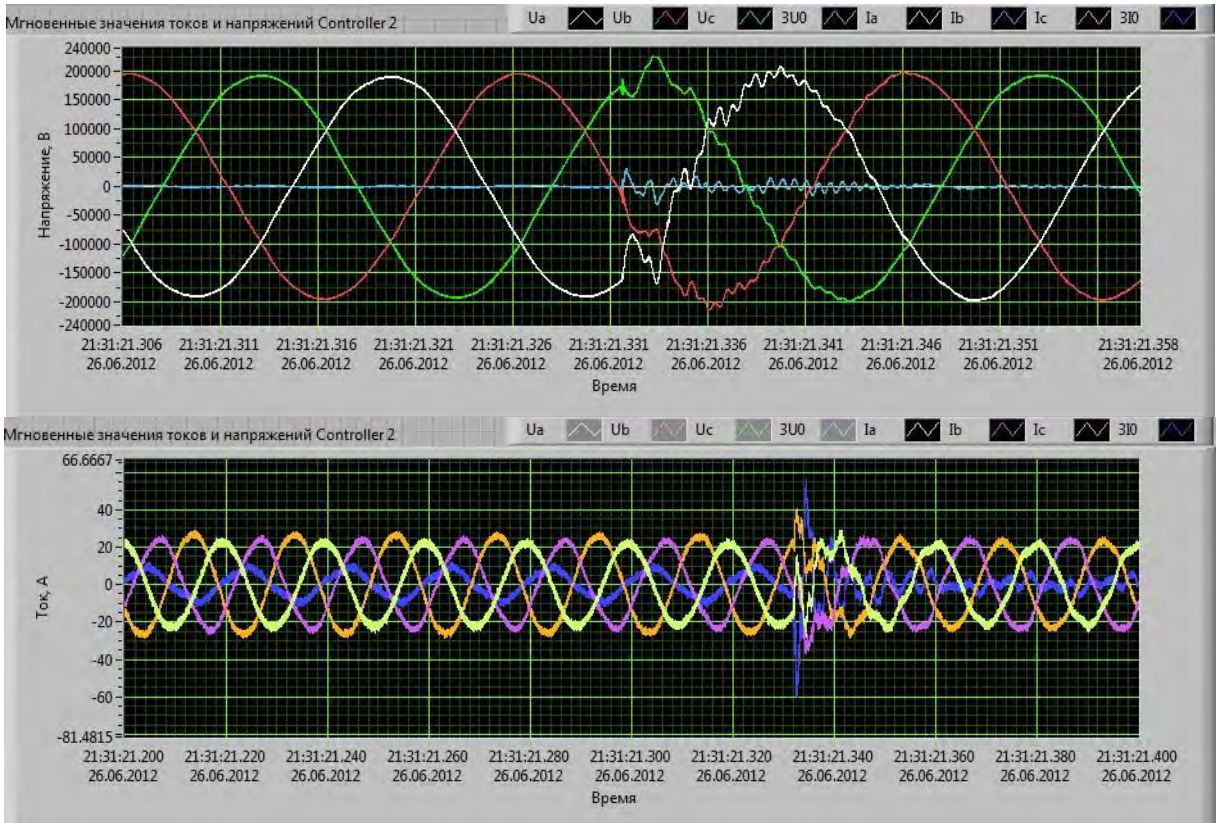


Рис. 3.51. КЗ ВЛ Рязанская ГРЭС – Тамбовская



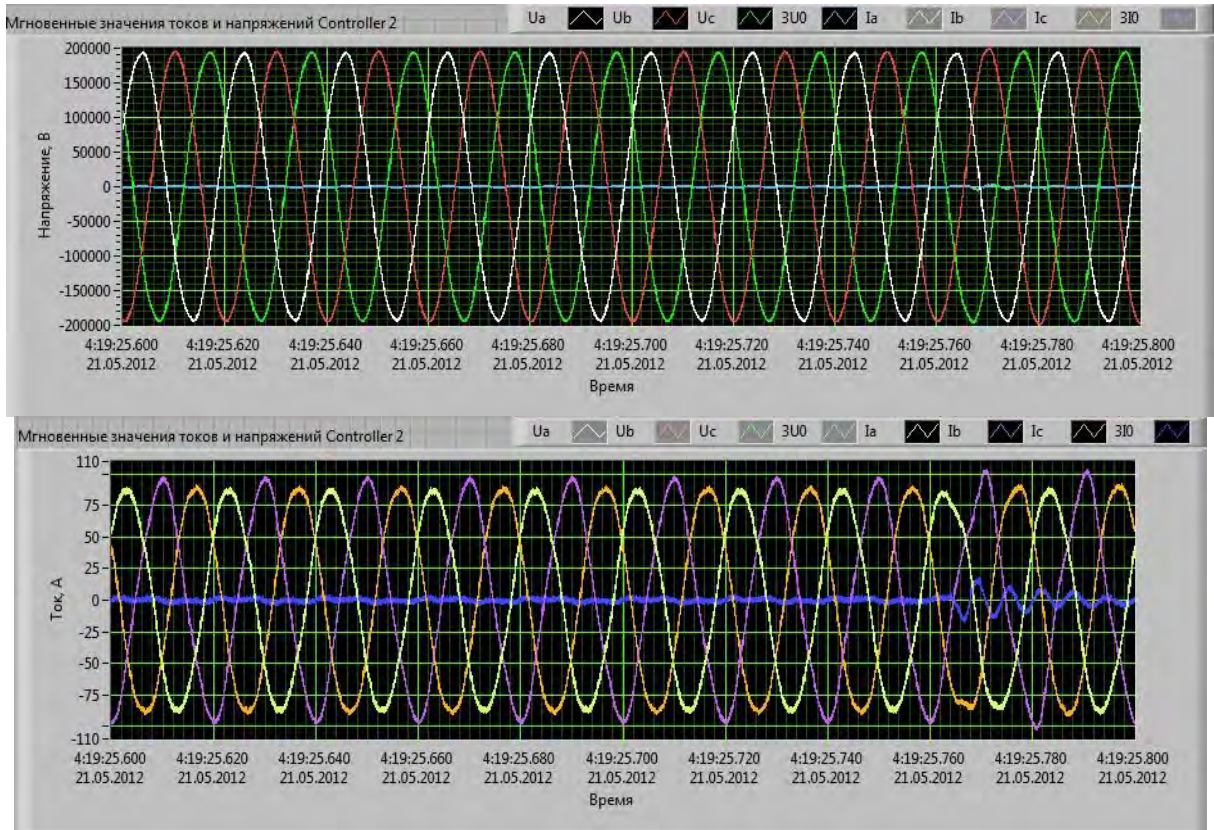


Рис. 3.52. Отключение ВЛ 500 кВ Тамбов – Пенза

Таким образом, образцы устройства обладают чувствительностью, необходимой для регистрации процессов в контролируемой ВЛ при коротких замыканиях и переключениях. После успешного завершения разработки, испытаний и исследований работы экспериментального и опытного образцов изготовлены опытно-промышленные образцы устройства ЭНИС (рис. 3.53 и 3.54).



Рис. 3.53. Внешний вид опытно-промышленного образца МФУ



Рис. 3.54. Опытно-промышленный образец МФУ при снятой верхней крышке

В соответствии с письмом № ДВ-160 от 20.01.2015 г., подписанным главным инженером ОАО «ФСК ЕЭС» В.П. Диким, 25 июня 2015 года на ВЛ 220 кВ Парская – Сасово МЭС Центр ОАО «ФСК ЕЭС» были введены в опытную-промышленную эксплуатацию опытно-промышленные образцы разработанного ОАО «ЭНИН» многофункционального устройства ЭНИС, осуществляющего ОМП волновым методом двусторонних измерений с подключением устройства ЭНИС к цепям измерительных трансформаторов тока и напряжения ВЛ 220 кВ Парская – Сасово, к каналам передачи информации и к спутниковой радионавигационной системе GPS, антенны которой установлены на наружной стене щитов релейной защиты и автоматики ПС Сасово и ПС Парская.

### 3.6. Выводы

1. На основе анализа основных особенностей методов определения мест повреждения на ВЛ и опыта работы регистраторов аварийных событий, использующих синхронные измерения тока и напряжения по концам ВЛ при включениях и отключениях ВЛ и при КЗ на ВЛ, рекомендовано их использовать для построения многофункционального устройства регистрации

процессов в ВЛ и определения мест повреждения двусторонним измерением токов и напряжений по концам ВЛ с синхронизацией результатов измерений с помощью спутниковых радионавигационных систем.

2. Предложен способ определения расстояния до места повреждения на ВЛ с помощью метода волновых каналов и выделения напряжения падающей волны, в наибольшей степени приближенного к форме волны в месте повреждения, с определением фронта контролируемого сигнала с помощью статистического анализа (вычисления функции эксцесса).

3. Предложенные методы определения расстояния до места повреждения успешно реализованы в образцах многофункционального устройства ЭНИС, включенных в эксплуатацию на ВЛ 220 кВ Тамбовская 500 – Давыдовская 1 и ВЛ 220 кВ Сасово-Парская.

4. Результаты моделирования, а также лабораторных испытаний и исследований на ВЛ 220 кВ образцов разработанного многофункционального устройства ЭНИС подтвердили его эффективность в части удовлетворительного контроля измеряемых сигналов тока и напряжения в широком диапазоне частот в нормальных, аварийных и ремонтных режимах.

## **Глава 4. Принципы выполнения защит распределительных сетей 6-35 кВ от однофазных замыканий на землю с использованием переходных процессов**

### **4.1. Анализ проблемы защиты электрических сетей 6-35 кВ от однофазных замыканий на землю**

Функционирование электрических сетей 6-35 кВ с учетом особенностей конструктивного выполнения ЛЭП и режимов заземления нейтрали обуславливает ряд специфических требований, вытекающих из анализа характера процессов при ОЗЗ, которые могут носить характер однократного импульсного перекрытия или пробоя с последующим восстановлением прочности изоляции, устойчивого металлического или дугового замыкания и многократно повторяющегося импульсного перекрытия изоляции или дугового замыкания.

Повторные кратковременные импульсные перекрытия могут появляться в течение нескольких секунд после начального перекрытия. В этих условиях установившийся режим повреждения не наступает. Кратковременные дуговые разряды сопровождаются импульсами тока переходного процесса, в котором преобладают свободные составляющие, обусловленные собственными колебаниями сети. Возможность повторения импульсных перекрытий с кратковременными дугами определяется условиями деионизации и степенью восстановления изоляции. Например, в кабельных компенсированных сетях повторные импульсные перекрытия могут возникать через интервалы времени в 25 мс [123].

Дуговые замыкания формируются в результате одного или нескольких импульсных перекрытий при значительном повреждении изоляции и сопровождаются переходными процессами с последующим установлением тока дугового замыкания промышленной частоты. Существует, однако, вероятность возникновения повторных дуговых замыканий. Длительность горения дуги и интервалы, через которые она повторяется, определяются временем действия и

режимом настройки дугогасящего реактора, а также интенсивностью процессов ионизации и деионизации поврежденной изоляции. Эта длительность по данным [124,125] включает время горения дуги (20—40 мс) с бестоковыми паузами от 40—50 мс до нескольких часов. В сетях с изолированной нейтралью вероятность повторных дуговых замыканий возрастает, а минимальные бестоковые паузы сокращаются до 10 мс. В воздушных сетях 6-35 кВ грозовые перенапряжения могут вызывать импульсные перекрытия изоляции, устраняющиеся через несколько периодов промышленной частоты [87]. Следует отметить, что ОЗЗ грозового происхождения может произойти в любой момент времени изменения фазного напряжения, в том числе и при его переходе через нулевое значение.

В связи с указанным, актуальными являются следующие требования, предъявляемые к принципам выполнения устройств защиты от ОЗЗ сетей 6—35 кВ:

обеспечение высокой чувствительности и селективности независимо от режима заземления нейтрали в воздушных и кабельных сетях простой и сложной конфигурации;

выполнение селективного контроля устойчивых и неустойчивых замыканий;

надежное функционирование при многократно повторяющихся (перемежающихся) замыканиях.

В настоящее время около 80% объектов электрических сетей 6-35 кВ вообще не оснащены устройствами селективной защиты от ОЗЗ и имеют лишь общую неселективную сигнализацию ОЗЗ по напряжению нулевой последовательности - контроль изоляции. При этом поиск поврежденных ЛЭП осуществляется методом их поочередных отключений.

Там, где устройства защиты от ОЗЗ применяются, они в той или иной степени удовлетворяют указанным выше требованиям в зависимости от назначения. К этим устройствам относятся:

реагирующие на установившиеся токи ОЗЗ промышленной частоты реле - РТ-40, РТ-140, ЭТД-551, а также реле РТЗ-51, представляющее собой микроэлектронное высокочувствительное реле тока, специально разработанное для выполнения защиты от ОЗЗ в сетях с малыми токами замыкания на землю [126-129];

направленные защиты высокой чувствительности, реагирующие на установившиеся токи и напряжения при ОЗЗ промышленной частоты [130-133] (ЗЗП, ЗЗП-1, ЗЗН и др.);

реагирующие на высшие гармоники установившихся токов ОЗЗ защиты радиальных компенсированных сетей [134-144] (УСЗ 2/2, УСЗ 3, УСЗ 3М, ПАУК);

защиты, реагирующие на переходные токи ОЗЗ в присоединениях электрических сетей [139,145-161];

реагирующие на напряжения и токи переходного процесса при ОЗЗ направленные защиты [134, 147-149,154-159, 162 -173];

защиты с вспомогательными (наложенными) токами с частотой, например, 25 или 100 Гц, формируемые вспомогательными источниками [174-178].

Анализ [179] данных опроса ряда эксплуатирующих организаций о показателях работы устройств защиты от ОЗЗ (несмотря на весьма ограниченный охват числа объектов) с достаточной очевидностью показывает, что ситуация с надежным определением поврежденной линии в сетях 6 — 35 кВ при ОЗЗ остается достаточно сложной. К сожалению, ситуация усугубляется тем, что до настоящего времени в эксплуатации отсутствуют обязательные требования по ведению учета работы защит от ОЗЗ. Поэтому получение объективных статических данных, в том числе о правильной работе контроля изоляции, весьма усложнено и запутано. Например, в процессе проведения опытов ОЗЗ в сети 35 кВ ОАО «Мосэнерго» [180] в одном из опытов дугового ОЗЗ уровень напряжения оказался недостаточным для срабатывания устройства контроля изоляции, и это свидетельствует о том, что



с такими ОЗЗ надо считаться. Повышение чувствительности контроля изоляции с целью охвата этих ОЗЗ вряд ли возможно из-за необходимости отстройки от напряжения, обусловленного реальной несимметрией сети, в нормальном режиме способной достигать 10-20 В [5]. Поэтому имеющиеся случаи срабатывания максимальных токовых защит при переходе ОЗЗ в более сложные виды повреждений в сетях 6-35 кВ без предшествующего или одновременного с ними срабатывания устройств контроля изоляции указывают на неспособность данных устройств определять ОЗЗ в ряде случаев.

В качестве примера рассмотрена информация об устройствах защиты от ОЗЗ в сетях 6-35 кВ филиала ОАО «МРСК Юга» - «Ростовэнерго», полученная автором диссертации в 2012 году и содержащая (табл. 4.1) данные об установленных селективных устройствах от ОЗЗ, а также об оборудованных на всех трансформаторах напряжения устройствах сигнализации замыканий на землю (контроля изоляции) с применением реле напряжения РН 53 [1]. Общее количество селективных устройств составляет 227. Из них 44 % (100 устройств) - индивидуальные электромеханические устройства, выполненные с применением реле тока РТ 40 и осуществляющие защиту от ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью. 4,4 % (10 устройств) - индивидуальные устройства направленной защиты от ОЗЗ типа ЗЗП-1[131] на электронной элементной базе, также предназначенные для применения в сетях с изолированной нейтралью. 11 устройств, т.е. около 5 %, являются устройствами централизованной сигнализации типа УСЗ 3 и УСЗ 3М [140], реагирующими на высшие гармоники тока. В этих электрических сетях установлено также 40 устройств (17,6 %) направленной защиты ПЗЗМ [173] производства Екатеринбургского предприятия НТБЭ, осуществляющих раздельную фиксацию начальных знаков тока и напряжения переходного процесса в нулевом канале защищаемой ЛЭП.

В этих сетях также установлено 58 устройств (25,5 %) защиты от ОЗЗ по разработкам Южнороссийского государственного технического университета. Это – РНМ (микропроцессорное устройство защиты от замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью, основанное на контроле аргументов и

модулей первых и высших гармонических составляющих тока и напряжения нулевой последовательности) - 50 устройств, РЕНОМ – 04 (микропроцессорное

Таблица 4.1

Информация об устройствах защиты от ОЗЗ в сетях 6-35 кВ филиала ОАО «МРСК Юга» – «Ростовэнерго»		
Наименование	Количество	Примечания
устройство сигнализации замыкания на землю с использованием РН 53	оборудованы все ТН	замечаний не выявлено
устройство сигнализации замыкания на землю с использованием РТ 40	100	замечаний не выявлено
Сириус ОЗЗ	8	замечаний не выявлено
Сириус 21Л (при наличии ТТНП)		замечаний не выявлено
ПЗЗМ	40	замечаний не выявлено
РЕНОМ 4	7	не совместимы с УАРК
РНМ	50	дугогасящих реакторов
УСЗ	10	замечаний не выявлено
УСЗ ЗМ	1	замечаний не выявлено
ЗЗП 1	10	замечаний не выявлено
ЗАЛП	1	выведена из работы – по принципу действия не соответствует технической политике МРСК
Итого	227	

устройство защиты от ОЗЗ в сетях с любым режимом заземления нейтрали) – 7 устройств и ЗАЛП (микропроцессорное устройство автоматической ликвидации ОЗЗ, осуществляющее последовательное переключение присоединений с проверкой наличия  $3U_0$ ) [181].

По информации эксплуатации, ни к одному из устройств контроля изоляции и устройств сигнализации ОЗЗ на основе РТ 40, ЗЗП-1, УСЗ и ПЗЗМ замечаний не предъявлено, также как и к централизованному устройству защиты от ОЗЗ «Сириус» [143]. Однако из проведенного автором диссертации анализа записей в оперативных журналах подстанции Р8 следует, что для трех

установленных на первой и второй секциях шин (С Ш) 6 и 10 кВ одной из подстанций устройств Сириус (табл. 4.2) такие утверждения не совсем точны. Так, у устройства, установленного на 1 СШ 6 кВ из 7 срабатываний отмечено 6 правильных (85,7 %), на 2 СШ 6 кВ - из 3 срабатываний 2 правильных (66,7 %), а на СШ 10 кВ из 6 срабатываний – 4 правильных (66,7 %), что свидетельствует о том, что замечания к работе устройств сигнализации ОЗЗ все-таки могут быть предъявлены.

Из указанных 227 селективных устройств от ОЗЗ почти 90 % - индивидуальные, устанавливаемые на отдельных линиях. Селективными защитами от ОЗЗ оснащены не более 10 % ЛЭП данных классов напряжения. Все остальные ЛЭП находятся в зоне защиты от ОЗЗ, осуществляемой неселективными устройствами контроля изоляции. Необходимость в селективной защите от ОЗЗ крайне важна, поскольку можно отметить, что из 130 ОЗЗ (в отдельные дни их количество доходило до 10 в сутки), существенная часть перешла в КЗ, отключенные токовыми защитами.

Представленные данные по защитам от ОЗЗ в сетях 6 – 35 кВ двух других филиалов ОАО «МРСК Юга» - «Волгоградэнерго» и «Астраханьэнерго» (табл. 4.3 – 4.4) коррелируются с вышеприведенными данными. Действительно, устройствами неселективной сигнализации от ОЗЗ с применением реле напряжения РН 53 оснащены также все ТН секций шин 6-35 кВ. Однако судить о правильности функционирования устройств от ОЗЗ, установленных в этих сетях (например, РТ 40, Сириус 21Л и др.) также сложно, поскольку к этим устройствам не предъявляются требования об обязательном учете их работы.

Следовательно, для обеспечения объективной информации о работе устройств от ОЗЗ (как селективных, так и неселективных) необходимо разработать и ввести нормативные требования об обязательном учете статистических данных, касающихся эффективности функционирования устройств защиты от ОЗЗ, эксплуатируемых в электрических сетях 6 -35 кВ РФ.

Таблица 4.2

Функционирование устройства Сириус ОЗЗ на ПС Р 8			
	1 с.ш. 6 кВ	2 с.ш. 6 кВ	с.ш. 10 кВ
21.01.10			2с.ш.-ф.856- правильно
29.01.10		ф. 816 – правильно	
14.02.10	ф. 815 - правильно		
17.05.10	ф. 815 – правильно		
24.09.10			2с.ш.-ф.860- правильно
27.11.10		одновременно определяются ф. 818 и ф.802 – неправильно (далее произошло аварийное отключение ф. 802 от МТЗ)	
14.04.11	определяются разные фидера - неправильно		
15.05.11			2с.ш.-ф.856- правильно
13.06.11	ф. 809 – правильно		
05.07.11	ф. 811- правильно		
10.07.11			1с.ш.-первое показание ф. 853 – неправильно, после переключений второе показание ф.851 – неправильно и только после следующего переключения ф. 861 – правильно
07.02.12	ф. 815 - правильно		
22.06.12		ф. 823 - правильно	
25.06.12	ф. 823 - правильно		

Таблица 4.3

Информация об устройствах защиты от ОЗЗ в сетях 6-35кВ филиала ОАО «МРСК Юга» – «Волгоградэнерго»		
наименование	количество	примечания
устройство сигнализации замыкания на землю с использованием РН 53	оборудованы все ТН	замечаний нет
ШЗН/ТЕЛ - подключение нейтрали к земле с помощью реклоузера	1	замечаний нет
автоматика отключения выключателей ВЛ-35 кВ ПС Зелёная при замыкании одной из фаз линии на "Землю" на базе реле контроля изоляции сети 35 кВ	1	замечаний нет
защита от ОЗЗ в составе МП блоков защит	более 200	как правило, ОЗЗ введена с независимым минимальным параметром срабатывания, учет эффективности не ведется

Таблица 4.4

Информация об устройствах защиты от ОЗЗ в сетях 6-35кВ филиала ОАО «МРСК Юга – «Астраханьэнерго»		
наименование	количество	примечания
устройство сигнализации замыкания на землю с использованием РН 53	оборудованы все ТН	замечаний не выявлено
устройство сигнализации замыкания на землю с использованием РТ 40	40	замечаний не выявлено
Сириус ОЗЗ	3	замечаний не выявлено
Сириус 21Л (при наличии ТТНП)	80	замечаний не выявлено
Итого	123	

Несмотря на то, что в течение последних десятилетий рядом организаций (ВНИИЭ, ЭНИН, ИЭИ-ИГЭУ, ЮРГТУ (НПИ) и др.) накоплен большой опыт

разработки и внедрения различных принципов выполнения и устройств защиты от ОЗЗ, многие из которых внедрены в эксплуатацию, практически ни одно из известных технических решений не может быть признано достаточно полно удовлетворяющим требованиям эксплуатации. Так, компенсация тока замыкания на землю ставит преграду для селективного использования тока промышленной частоты в этих защитах. Низкий уровень токов замыкания на землю в воздушных некомпенсированных сетях определяет необходимость выполнения устройств с высокой чувствительностью, отстроенных от бросков емкостных токов неповрежденных линий. Наличие замкнутых сетей и параллельных ЛЭП обуславливает необходимость перехода от токовых защит к устройствам с относительным измерением токов и к направленным защитам.

Вместе с тем выполнение устройств, реагирующих только на устойчивые замыкания, особенно централизованных с поиском поврежденного присоединения, связано с трудностями обеспечения их действия при многократно повторяющихся перемежающихся замыканиях. В этих условиях установившийся режим повреждения может и не наступить, а длительности кратковременных замыканий могут оказаться недостаточными для срабатывания защиты или не совпадать с интервалами измерения на поврежденном присоединении централизованным устройством при последовательном его действии. Необходимость контролировать устойчивые ОЗЗ наряду с неустойчивыми замыканиями (предшествующими, как правило, устойчивым) требует применения быстродействующих устройств, реагирующих на переходные токи и напряжения.

#### **4.2. Переходные процессы при однофазных замыканиях на землю и формирование сигналов для целей защиты**

Возможностями более универсального использования обладают защиты, реагирующие на переходный процесс при повреждении и контролирующие направление распространения волн по знаку мгновенной мощности, что делает

проведение исследований и разработок в данном направлении весьма актуальным. Переходные процессы при ОЗЗ в сетях 6-35 кВ характеризуется рядом последовательных стадий [4]:

формирование начального фронта в месте повреждения — появление разрядных волн по фазам;

распространение разрядных волн в пределах поврежденной линии;

распространение волн в сети с отражениями и преломлениями в точках нарушения однородности волновых сопротивлений;

дополнительный заряд емкостей неповрежденных фаз через обмотки генераторов и трансформаторов;

распространение зарядных волн;

установление нового режима промышленной частоты.

Начальные стадии переходного процесса протекает одинаково в сети с изолированной нейтралью и в компенсированной сети, так как действие дугогасящих реакторов еще не успевают сказаться.

При ОЗЗ на ЛЭП в месте повреждения происходят скачкообразные изменения напряжений фаз линии относительно земли:

в поврежденной фазе напряжение снижается на некоторую величину  $\Delta u$ , а при переходном сопротивлении  $R_{\text{п}}$ , равном нулю, на величину  $u_{\text{ф}}$ , принимая значение  $u_{\text{п}} = 0$ ;

в неповрежденных фазах напряжение повышается за счет электромагнитных связей.

Возникшее перераспределение напряжений распространяется с конечной скоростью от места ОЗЗ по ЛЭП в виде электромагнитных волн.

Токи и напряжения волн разрядной стадии переходного процесса при ОЗЗ определяются предшествующим повреждению мгновенным значением напряжения на поврежденной фазе линии, а также волновым сопротивлением линии, коэффициентами отражения и преломления.

Основные соотношения для переходных процессов при ОЗЗ могут быть рассмотрены на основании волновых уравнений трёхфазной линии [4, 5]

$$\begin{cases} u_A = z_{AA} i_A + z_{AB} i_B + z_{AC} i_C ; \\ u_B = z_{BA} i_A + z_{BB} i_B + z_{BC} i_C ; \\ u_C = z_{CA} i_A + z_{CB} i_B + z_{CC} i_C , \end{cases} \quad (4.1)$$

где  $u_A, u_B, u_C$  и  $i_A, i_B, i_C$  — соответственно мгновенные напряжения и токи в фазах трехфазной линии при волновом переходном процессе;  $z_{AA}, z_{BB}, z_{CC}$  — собственные фазные волновые сопротивления линий;  $z_{AB}, z_{BC}, z_{AC}$  — взаимные волновые сопротивления фаз линии.

В многопроводных ЛЭП распространение волн связано с разложением напряжений и токов волн на независимые системы составляющих в волновых каналах [44, 87, 182, 183]. В трехфазной ЛЭП 6-35 кВ образуется три волновых канала (два междуфазных канала и канал «фазы — земля»). Поскольку расстояния между фазными проводами ЛЭП в рассматриваемых сетях относительно малы и провода могут быть транспонированы, ЛЭП принимаются симметричными:

$$z_{AA} = z_{BB} = z_{CC} = z, \quad z_{AB} = z_{BC} = z_{AC} = z'.$$

Тогда [4,5]

$$\begin{cases} u_A = z i_A + z' (i_B + i_C); \\ u_B = z i_B + z' (i_C + i_A); \\ u_C = z i_C + z' (i_A + i_B). \end{cases} \quad (4.2)$$

В симметричной трехфазной ЛЭП коэффициенты распространения в междуфазных волновых каналах принимаются одинаковыми. Это определяет возможность разложения напряжений и токов волн такой ЛЭП на две независимые составляющие (междуфазный канал и в канал «фазы—земля» (нулевой)) [182,183].

Уравнения при разложении фазных величин на составляющие имеют вид



$$\begin{cases} u_A = u_a + u_{a0}; & i_A = i_a + i_{a0}; \\ u_B = u_a + u_{b0}; & i_B = i_a + i_{b0}; \\ u_C = u_c + u_{c0}; & i_C = i_c + i_{c0}; \end{cases} \quad (4.3)$$

где  $u_a, u_b, u_c$  и  $i_a, i_b, i_c$  — составляющие междуфазного волнового канала,  $u_{a0}, u_{b0}, u_{c0}$  и  $i_{a0}, i_{b0}, i_{c0}$  — составляющие нулевого волнового канала.

Следовательно, при принятой симметрии проводов относительно земли

$$u_{a0} = u_{b0} = u_{c0} = u_0; \quad i_{a0} = i_{b0} = i_{c0} = i_0. \quad (4.4a)$$

Сумма фазных величин

$$u_A + u_B + u_C = 3u_0; \quad i_A + i_B + i_C = 3i_0. \quad (4.4б)$$

С учетом (4.2) - (4.4a), (4.4б) соотношения напряжений и токов для составляющих волновых каналов:

$$u_0 = (z + 2z')i_0 = z_0 i_0; \quad z_0 = z + 2z';$$

$$u_a = (z - z')i_a = z_\phi i_a; \quad z_\phi = z - z',$$

где  $z_0$  и  $z_\phi$  - волновые сопротивления нулевого и междуфазного волновых каналов соответственно.

Граничные условия при ОЗЗ фазы  $A$  и переходном сопротивлении  $R_n=0$

$$u_n + u_A = 0; \quad i_B = i_C = 0,$$

где  $u_n$  — напряжение фазы, предшествующее ОЗЗ;  $u_A$  — напряжение волны фазы  $A$ , являющееся переходным аварийным напряжением, рассматриваемым как напряжение эквивалентного источника, включаемого в месте ОЗЗ в момент его появления.

Отсюда фазные величины с учетом (4.2) для каждой из двух формирующихся волн

$$u_A = -u_n; \quad i_A = \frac{u_A}{z_B} = 3i_0; \quad u_B = u_C = u_A \frac{z'}{z} = -u_n \frac{z'}{z}. \quad (4.5)$$

Собственные ( $z$ ) и взаимные ( $z'$ ) фазные волновые сопротивления определяются через волновые сопротивления междуфазного и нулевого каналов

$$z = \frac{2z_\phi + z_0}{3}; \quad z' = \frac{z_0 - z_\phi}{3}.$$

При преобразовании фазных величин согласно (4.3), (4.4а), (4.4б) определяются составляющие волновых каналов по фазам в месте ОЗЗ:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_a = -\frac{2u_n z_\phi}{2z_\phi + z_0}; \quad i_a = -\frac{2u_n}{3z_\phi + z_0}; \\ u_b = u_c = -\frac{u_a}{2} = \frac{u_n z_\phi}{2z_\phi + z_0}; \quad i_b = i_c = -\frac{i_a}{2} = \frac{u_n}{2z_\phi + z_0}; \\ u_0 = -\frac{u_n z_0}{2z_\phi + z_0}; \quad i_0 = -\frac{u_n}{2z_\phi + z_0}. \end{array} \right. \quad (4.6)$$

Выражения (4.5) и (4.6) представляют системы падающих волн, распространяющихся от места замыкания к концам поврежденной линии. При распространении независимых составляющих падающих волн в волновых каналах и их отражениях от симметричных по фазам неоднородностей волнового сопротивления, например от узла сети, в котором соединено несколько линий, появляются независимые системы отраженных волн. При этом соотношения для отраженных волн в волновых каналах остаются такими же, как и для падающих волн:

$$\begin{aligned} u_{отраa} + u_{отрb} + u_{отрс} &= 0; \\ u_{отра0} &= u_{отрb0} = u_{отрс0}. \end{aligned}$$

Это позволяет выразить составляющие отраженных волн в рассматриваемом случае через коэффициенты отражения:

$$\begin{aligned} u_{отра} &= K_{отр,\phi} u_{пада}; \quad u_{отр0} = K_{отр0} u_{пад0}; \\ K_{отр,\phi} &= \frac{z_{\phi,эк} - z_\phi}{z_{\phi,эк} + z_\phi}; \quad K_{отр,0} = \frac{z_{0эк} - z_0}{z_{0эк} + z_0}, \end{aligned}$$

где  $z_{\phi,эк}$ ,  $z_{0эк}$  — эквивалентные волновые сопротивления каналов в узловой точке.

Поскольку  $\frac{z_0}{z_\phi} = \frac{z_{0эк}}{z_{\phi,эк}} = const$ , можно считать, что  $K_{отр,\phi} = K_{отр0} = K_{отр}$ .

Напряжение волны при ОЗЗ на фазе  $A$  после первого отражения падающих волн от узловой точки симметричной системы выражается с учетом (4.3) следующим образом:

$$u_{отрA} = u_{отра} + u_{отр0} = K_{отр} (u_{пада} + u_{пад0}) = K_{отр} u_{падA}.$$

Для других фаз выражения аналогичны. Приходящие к месту ОЗЗ после отражения от конца линии волны вновь отражаются. При этом энергия пришедших к месту ОЗЗ составляющих волн, в отличие от случая отражения от симметричной неоднородности, перераспределяется между фазами за счет несимметрии в месте ОЗЗ. Каждая из составляющих волн  $u_{отра}$ ,  $u_{отр0}$ , приходящих к месту ОЗЗ, отражается, образуя в соответствии с (1.6) новые составляющие в междуфазном и нулевом волновых каналах, распространяющиеся от места ОЗЗ. В точке ОЗЗ вновь образуются волны

$$\begin{array}{c} u_a', i_a', u_b', i_b', u_c', i_c'; \\ u_{отр a}, i_{отр a} \begin{array}{l} \nearrow \\ \searrow \end{array} \\ u_0', i_0'; \\ \\ u_a'', i_a'', u_b'', i_b'', u_c'', i_c''; \\ u_{отр 0}, i_{отр 0} \begin{array}{l} \nearrow \\ \searrow \end{array} \\ u_0', i_0'; \end{array}$$

где штрихи соответствуют новым составляющим волн междуфазного и нулевого каналов.

Условиями отражения и преломления междуфазной

$$u_{отр a} = -K_{отр} \frac{2u_n z_\phi}{2z_\phi + z_0}; \quad i_{отр a} = K_{отр} \frac{2u_n}{2z_\phi + z_0}$$

и нулевой

$$u_{отр 0} = -K_{отр} \frac{u_n z_0}{2z_\phi + z_0}; \quad i_{отр 0} = K_{отр} \frac{u_n}{2z_\phi + z_0}$$

волн, приходящих к месту ОЗЗ, являются

$$\begin{aligned}
u_{\text{отр } a} + u'_{\text{отр } A} &= u'_{\text{пр } A} = 0 ; \\
u_{\text{отр } 0} + u''_{\text{отр } A} &= u''_{\text{пр } A} = 0 ; \\
u_{\text{отр } b(c)} + u'_{\text{отр } B(C)} &= u'_{\text{пр } B(C)} ; \\
u_{\text{отр } 0} + u''_{\text{отр } B(C)} &= u''_{\text{пр } B(C)} ; \\
i_{\text{отр } a} + i'_{\text{отр } A} &= i'_{\text{пр } A} ; \\
i_{\text{отр } 0} + i''_{\text{отр } A} &= i''_{\text{пр } A} ; \\
i_{\text{отр } b(c)} + i'_{\text{отр } B(C)} &= i'_{\text{пр } B(C)} ; \\
i_{\text{отр } 0} + i''_{\text{отр } B(C)} &= i''_{\text{пр } B(C)} ,
\end{aligned} \tag{4.7}$$

где  $u'_{\text{отр } A(B,C)}$ ,  $u'_{\text{пр } A(B,C)}$ ,  $i'_{\text{отр } A(B,C)}$ ,  $i'_{\text{пр } A(B,C)}$  – напряжения и токи отраженных и преломленных волн в месте ОЗЗ в результате прихода волн междуфазного канала;  $u''_{\text{отр } A(B,C)}$ ,  $u''_{\text{пр } A(B,C)}$ ,  $i''_{\text{отр } A(B,C)}$ ,  $i''_{\text{пр } A(B,C)}$  – напряжения и токи отраженных и преломленных волн в месте ОЗЗ в результате прихода волн нулевого канала.

Напряжения и токи фазных отраженных от места ОЗЗ волн и их новые составляющие, а также преломленных волн с учетом приведенных граничных условий:

$$\begin{aligned}
u'_{\text{отр } A} &= u'_a + u'_0 = -K_{\text{отр}} \frac{2u_n z_\phi}{2z_\phi + z_0} ; \\
u'_{\text{отр } A} &= 0 ; \\
i'_{\text{отр } A} &= i'_a + i'_0 = -K_{\text{отр}} \frac{6u_n z_\phi}{(2z_\phi + z_0)^2} ; \\
i'_{\text{пр } A} &= K_{\text{отр}} \frac{2u_n (z_\phi - z_0)}{(2z_\phi + z_0)^2} ; \\
u'_{\text{отр } B(C)} &= u'_{b(c)} + u'_0 = \frac{2u_n z_\phi (z_\phi - z_0)}{(2z_\phi + z_0)^2} ; \\
u'_{\text{пр } B(C)} &= -K_{\text{отр}} \frac{3u_n z_\phi z_0}{(2z_\phi + z_0)^2} ; \\
i'_{\text{отр } B(C)} &= 0 ; \\
i'_{\text{пр } B(C)} &= K_{\text{отр}} \frac{u_n}{2z_\phi + z_0} ;
\end{aligned}$$

$$u''_{\text{отр}A} = u''_a + u''_0 = -K_{\text{отр}} \frac{u_n z_0}{2z_\phi + z_0}; \quad (4.8)$$

$$u''_{\text{пр}A} = 0;$$

$$i''_{\text{отр}A} = i''_a + i''_0 = K_{\text{отр}} \frac{3u_n z_0}{2z_\phi + z_0};$$

$$i''_{\text{пр}A} = K_{\text{отр}} \frac{2u_n (z_\phi - z_0)}{(2z_\phi + z_0)^2};$$

$$u''_{\text{отр}B(C)} = u''_{b(c)} + u''_0 = K_{\text{отр}} \frac{u_n z_0 (z_\phi - z_0)}{(2z_\phi + z_0)^2};$$

$$u''_{\text{пр}B(C)} = -K_{\text{отр}} \frac{3u_n z_\phi z_0}{(2z_\phi + z_0)^2};$$

$$i''_{\text{отр}B(C)} = 0;$$

$$i''_{\text{пр}B(C)} = K_{\text{отр}} \frac{u_n}{2z_\phi + z_0}.$$

Для устройств защиты от ОЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, эти величины являются входными информационными сигналами. К преимуществам использования для действия защиты от ОЗЗ электрических величин переходного процесса, относятся:

независимость функционирования от режима заземления нейтрали сети;  
отстройка от токов небаланса фильтров тока нулевой последовательности;

возможность фиксации кратковременных самоустраняющихся пробоев изоляции и использовании информации о них в диагностических целях для контроля состояния изоляции сети.

Создание эффективных защит, основанных на использовании электрических величин переходного процесса, стало возможным только после широкого внедрения микроэлектронной технологии в РЗ. Современная микропроцессорная база открывает новые возможности для совершенствования принципов выполнения и создания многофункциональных исполнений устройств защиты от ОЗЗ, основанных на использовании

электрических величин как переходных процессов, так установившегося режима ОЗЗ.

#### **4.3. Защиты от ОЗЗ, основанные на использовании электрических величин переходного процесса**

##### **4.3.1. Классификация устройств защиты от ОЗЗ, основанных на использовании электрических величин переходного процесса**

Устройства защиты и сигнализации ОЗЗ, основанные на использовании электрических величин переходного процесса, разрабатывались в России и других странах, прежде всего для решения проблемы селективной сигнализации ОЗЗ в компенсированных сетях. По принципу действия устройства подобного типа могут быть использованы также в сетях с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали через резистор. Исследования и опыт применения защит от ОЗЗ, реагирующих на переходный процесс, показали, что наибольшую универсальность могут обеспечить устройства, в которых определение поврежденного присоединения осуществляется с использованием следующих способов:

сравнения амплитуд переходных токов в присоединениях защищаемого объекта [139,145-161 и др.];

определения знака мгновенной мощности нулевой последовательности в начальной стадии переходного процесса [134, 147-149,154-159, 162 -173 и др.].

На основе первого из указанных способов выполняются централизованные токовые устройства относительного замера. По второму способу могут быть получены направленные централизованные и автономные (индивидуальные) устройства защиты от ОЗЗ.

#### **4.3.2. Токовые защиты относительного замера, основанные на сравнении значений переходных токов в присоединениях защищаемого объекта**

Централизованные токовые устройства относительного замера амплитуд переходных токов («Земля» [145,146], УЦСЗ (разработчик ОРГРЭС), СЗВИ (разработчик УПИ), «Феррит» (разработчик ИЭИ-ИГЭУ) и др. [145-154 и др.]), разрабатывались и использовались в кабельных сетях 6-10 кВ. Область их применения, как и других устройств защиты от ОЗЗ, выполненных с помощью относительного замера значений токов установившегося режима ОЗЗ в присоединениях защищаемого объекта, ограничивается, главным образом, погрешностями трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП). Погрешности преобразования амплитуд переходных токов кабельными ТТНП в сравниваемые величины (как правило, напряжения) на входах измерительного органа централизованного устройства защиты, выполненного по рассматриваемому способу, зависят от множества факторов (типа ТТНП, числа и схемы соединения их вторичных обмоток, частоты переходного тока и др). Для устранения влияния указанных погрешностей в некоторых случаях (например, на объектах с небольшими кратностями емкостных токов присоединений, при наличии на присоединениях разнотипных или неодинаковом числе однотипных ТТНП) возникает необходимость в применении вторичных преобразователей входных величин с регулируемыми коэффициентами преобразования и выборе оптимальных (по условиям устойчивости несрабатывания при внешних ОЗЗ и чувствительности при внутренних повреждениях) параметров их настройки [139]. Это приводит к усложнению проектирования и эксплуатации защит от ОЗЗ, сравнивающих значения переходных токов.

Более эффективные решения создаются при использовании направленных устройств защиты, основанные на контроле соотношений электрических величин переходного процесса [5]. Свойство направленности позволяет

применять их в сетях любой конфигурации, с различными характеристиками ТНП исключает необходимость в выборе параметров срабатывания. Последнее значительно упрощает проектирование, наладку и эксплуатацию устройств защиты от ОЗЗ.

#### **4.3.3. Направленные устройства защиты от ОЗЗ, основанные на использовании электрических величин переходного процесса**

По способу контроля фазных соотношений электрических величин переходного процесса все направленные устройства защиты от ОЗЗ можно разделить на две группы:

направленные устройства защиты абсолютного замера, основанные на контроле фазных соотношений переходного напряжения и тока нулевой последовательности;

направленные устройства защиты относительного замера, основанные на контроле фазных соотношений переходных токов в присоединениях защищаемого объекта.

Устройства защиты по первому способу могут иметь как индивидуальное (на одно присоединение), так и централизованное исполнение. Применение второго способа допускает только централизованное исполнение. По этой причине наиболее широкое применение как у нас в стране, так и за рубежом получили направленные устройства защиты, выполненные по первому способу.

К наиболее известным отечественным разработкам направленных защит от ОЗЗ, получившим практическое применение в сетях 6-35 кВ, относятся:

централизованное направленное устройство сигнализации (ЦНУСЗ) ОЗЗ «Импульс», разработанное ИЭИ-ИГЭУ [149, 157 - 159, 184];

индивидуальное устройство направленной защиты типа КЗЗП, разработанное в Донецком политехнической институте и выполненное на электронной базе [170 - 172];



индивидуальное устройство типа ПЗЗМ-1, разработанное предприятием НТБЭ (Екатеринбург) [173];

индивидуальные устройства направленной волновой защиты, разработанные ЭНИН (устройство ИЗС-1 на электронной базе и микроэлектронное устройство УЗС-01) [167-169, 185-186];

индивидуальное микропроцессорное устройство направленной волновой защиты ИЗН-01, разработанное совместно ОАО «ЭНИН» и ООО «ИЦ «Бреслер» [187, 188].

Из зарубежных разработок направленных импульсных защит от ОЗЗ, основанных на использовании переходных процессов, необходимо особенно отметить электронное реле типа TRER для сетей среднего напряжения с изолированной и компенсированной нейтралью [189, 190], выпускавшееся предприятием Elektro-Apparate Werke (ГДР).

В основу ЦНУСЗ «Импульс» (рис. 4.1) положены следующие основные принципы [149, 157 - 159, 184]:

контроль направления мгновенной мощности нулевой последовательности с использованием в качестве поляризующей величины производной  $du_0/dt$ ;

использование для действия ЦНУСЗ диапазона частот, ограниченного верхней частотой 2 –3 кГц; и нижней частотой 20 Гц;

синхронная фиксация начальных знаков контролируемых величин  $du_0/dt$  и  $i_0$  во всех присоединениях защищаемого объекта в момент возникновения ОЗЗ, фиксируемый быстродействующим пусковым органом, включенным на сумму переходных токов  $\sum|i_0|$  всех подключенных к ЦНУСЗ присоединений;

согласование частотных характеристик и чувствительности каналов тока  $i_0$  и канала  $du_0/dt$ ;

отстройка от возможных в компенсированных сетях нарушений начальных фазных соотношений между  $du_0/dt$  и  $i_0$ , обусловленных начальным значением тока в ДГР  $i_{ДГР}(0)$  в момент, предшествующий пробоем изоляции, по току и по времени срабатывания;

отстройка от режимов, не связанных с ОЗЗ в контролируемой сети (коммутационных переключений, внешних междуфазных КЗ и т.д.), с помощью пускового органа, включенного на напряжение  $3U_0$  и отстроенного от указанных режимов по порогу и по времени срабатывания;

блокировка элементов оперативной памяти ЦНУСЗ при каждом их срабатывании и синхронизация их возврата в исходное состояние с моментом возврата пускового органа по напряжению  $3U_0$ ;

обеспечение помехоустойчивости ЦНУСЗ с использованием комплекса мер, включающего автоматическое стирание любой информации, записанной в элементы оперативной памяти, перед каждой записью новой информации, при деблокировке элементов памяти после возврата пускового органа, при восстановлении напряжения оперативного тока после его глубокой посадки или полного исчезновения на длительное время, при квитировании показаний индикаторов ЦНУСЗ, ограничение верхней рабочей частоты устройства и др.;

возможность работы ЦНУСЗ в режимах с запоминанием всех поврежденных присоединений в интервале времени между срабатыванием устройства и квитированием световых индикаторов или с запоминанием только последнего поврежденного присоединения в указанном интервале времени;

возможность получения от контактного выхода устройства как общего неселективного сигнала о срабатывании устройства (по напряжению  $3U_0$ ), так и общего селективного сигнала только при возникновении ОЗЗ в зоне действия устройства (на подключенных к ЦНУСЗ присоединениях).

Устройство предназначено для селективной сигнализации ОЗЗ в сетях 3-10 кВ, работающих с изолированной нейтралью, резистивно-заземленной нейтралью или с компенсацией емкостных токов. Типовое исполнение устройства рассчитано на подключение до 16 присоединений. ЦНУСЗ включает вторичный преобразователь напряжения  $3U_0$  TVL, 16 вторичных преобразователей тока TAL1-TAL16, блок А1.1 формирования сигнала, пропорционального производной  $du_0/dt$ , 8 идентичных блоков А2.1-А2.08 формирования сигналов, пропорциональных току  $i_0$  (два канала тока  $i_0$  в

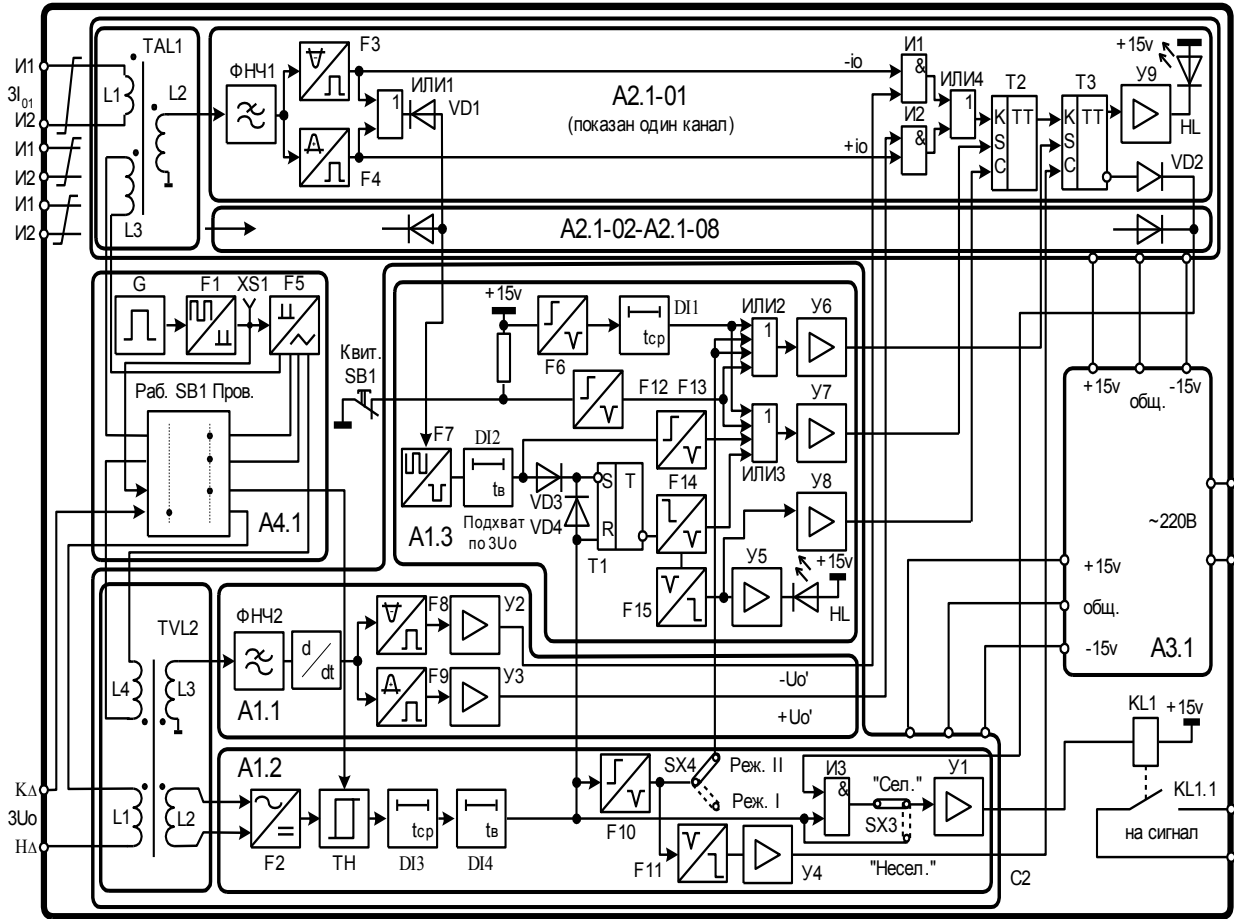


Рис. 4.1. Функционально-структурная схема ЦНУСЗ «Импульс»

каждом блоке), пусковой орган по напряжению  $3U_0$  А1.2, блок формирования синхронизирующих и стирающих импульсов А1.3, блок тестовых проверок А4.1 и блок питания А3.1. Блоки тока А2.1-А2.08 содержат фильтры ФНЧ1, ограничивающие рабочий диапазон частот ЦНУСЗ «сверху», формователи знака переходного тока F3 и F4, измерительную логику на элементах ИЛИ1, И1, И2, ИЛИ4, элементы оперативной и долговременной памяти на триггерах Т2 и Т3 и световой индикатор поврежденного присоединения – светодиод НЛ. В элементах оперативной памяти Т2 информация хранится только до срабатывания пускового органа по  $3U_0$ , в элементах долговременной памяти Т3 – до ручного или автоматического квитирования показаний устройства. Блок А1.1 содержит фильтр ФНЧ2, имеющий такую же частотную характеристику, как и фильтры в каналах тока ФНЧ1, дифференциатор, формователи знака

производной  $du_0/dt$  F8, F9 и усилители У2, У3. Чувствительность ЦНУСЗ по первичному току в рабочем диапазоне частот с ТТНП типа ТЗ, ТЗЛ, ТЗЛМ, ТЗРЛ составляет 2-4 А, чувствительность по напряжению  $3U_0 \sim 1В$  (вторичное напряжение). Время срабатывания измерительных элементов (включая время срабатывания измерительной логики и элементов оперативной памяти) не более 35-45 мкс, напряжение срабатывания пускового органа по  $3U_0$  15-30 В, время срабатывания 8-12 мс. Блок тестовых проверок обеспечивает возможность проверки в режиме срабатывания или несрабатывания всех элементов ЦНУСЗ за исключением первичных обмоток ТАЛ и TVL. Питание устройства осуществляется от переменного напряжения 220 В.

Одной из особенностей ЦНУСЗ «Импульс» является использование в качестве поляризующей величины производной  $\frac{du_0}{dt}$  [156], что обеспечивает отстройку устройства от искажений начальных фазовых соотношений между током и напряжением нулевой последовательности, обусловленных смещением нейтрали сети при перемежающихся дуговых ОЗЗ, а также высокую устойчивость функционирования при пробое изоляции в момент прохождения напряжения фазы вблизи нуля. Эффективность указанного способа определения поврежденного присоединения подтверждена многолетним опытом эксплуатации ЦНУСЗ «Импульс». За период с начала 1980-х до конца 1990-х годов ИЭИ – ИГЭУ внедрено в сетях 6-10 кВ Ивэнерго, Нижновэнерго, Костромаэнерго, Башкирэнерго и на предприятиях различных отраслей промышленности более 30 экземпляров устройств типа «Импульс» на 16 присоединений каждое.

Функционально-структурная схема индивидуального направленного устройства защиты от ОЗЗ типа КЗЗП [173] приведена на рис. 4.2.

Устройство включает схему формирования сравниваемых величин СФ, логическую часть ЛЧ, дуговой орган ДО и выходные цепи ВЦ. Схему формирования образуют дифференциальный делитель напряжения ДН в канале напряжения  $u_0$  и пик трансформатор ПТ в канале тока  $i_0$ . Использование

дифференциального делителя напряжения и пик-трансформатора имеет основной целью повышение чувствительности устройства к высшим гармоническим составляющим в спектрах тока  $i_0$  и напряжения  $u_0$ . Логическая часть устройства защиты КЗЗП включает элементы памяти начальных знаков тока « $+i_0$ » и « $-i_0$ » и напряжения « $+u_0$ » и « $-u_0$ », логические схемы «И1» и «И2», устройство блокировки УБ и устройство возврата УБ элементов памяти. Выходные цепи устройства включают два выходных промежуточных реле Р1 и Р2 и счетчик импульсов СИ.

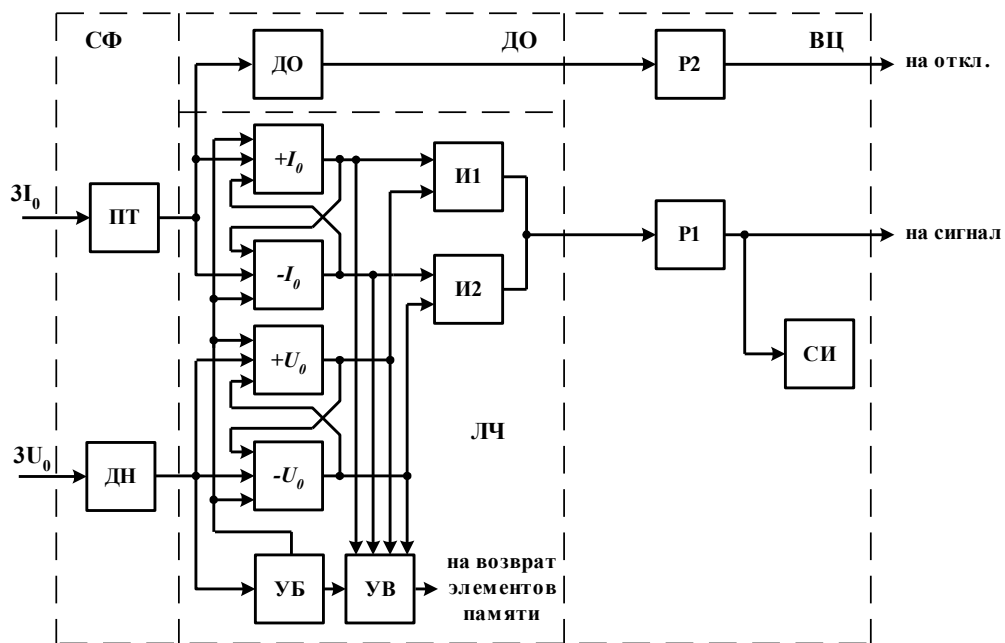


Рис. 4.2. Функционально-структурная схема устройства КЗЗП

В КЗЗП для определения направления мгновенной мощности нулевой последовательности используется так называемая раздельная фиксация начальных знаков  $i_0$  и  $u_0$  с последующим их логическим сравнением и взаимной блокировкой элементов памяти. Блокировка от УБ по цепи напряжения исключает излишние срабатывания устройства за счет искажений начальных фазных соотношений между  $i_0$  и  $u_0$  при дуговых перемежающихся ОЗЗ. Устройство возврата УВ обеспечивает возврат элементов памяти с заданным временем. Дуговой орган ДО реагирует на наличие высокочастотных составляющих в напряжении  $3U_0$ . Отличительной особенностью устройства КЗЗП является возможность действия на отключение только при наиболее

опасных дуговых перемежающихся ОЗЗ (реле Р2) и на сигнал при менее опасных устойчивых замыканиях и кратковременных пробоях изоляции (реле Р1).

Рабочий диапазон частот устройства ~200-5000 Гц. Первичный ток срабатывания КЗЗП с кабельным ТТП типа ТЗЛ в рабочем диапазоне частот менее 1 А, напряжение срабатывания (вторичное) 2-3 В. Время возврата элементов памяти (после отключения или самоустранения ОЗЗ) 0,25-0,3 с. Питание устройства осуществляется от источника переменного оперативного тока напряжением 100 В. Устройство выполнено на электронной элементной базе.

На близком к КЗЗП принципе (раздельная фиксация начальных знаков переходного тока и напряжения нулевой последовательности с последующим их логическим сравнением) выполнено выпускаемое предприятием НТБЭ (г. Екатеринбург) устройство типа ПЗЗМ-1, выполненное на микроэлектронной элементной базе. В отличие от КЗЗП в ПЗЗМ-1 не предусмотрен специальный дуговой орган. Опыт эксплуатации примерно 60 комплектов КЗЗП в электрических сетях Волжского автомобильного завода и 30 комплектов ПЗЗМ-1 в Челябэнерго дал положительные результаты.

В устройстве направленной импульсной защиты от ОЗЗ защиты типа TRER [189, 190], как и в устройствах КЗЗП и ПЗЗМ-1, используется принцип раздельной фиксации начальных знаков переходного тока и напряжения нулевой последовательности с последующим их сравнением логической частью защиты.

#### **4.3.4. Индивидуальное устройство направленной волновой защиты ИЗС**

Из-за возможности излишних срабатываний устройств от ОЗЗ при малых значениях подведенных величин принцип раздельной фиксации, реализованный в КЗЗП и ПЗЗМ-1, менее эффективен, чем используемый в устройствах ИЗС (по разработке ЭНИН) принцип сравнения начальных знаков

указанных величин непосредственно в переходном процессе при ОЗЗ с запоминанием факта их совпадения или несовпадения [164]. Экспериментальные исследования переходных процессов при ОЗЗ в воздушных и кабельных ЛЭП 6-35 кВ, проведенные ЭНИН [4, 5] (рис. 4.3 - 4.5), позволили

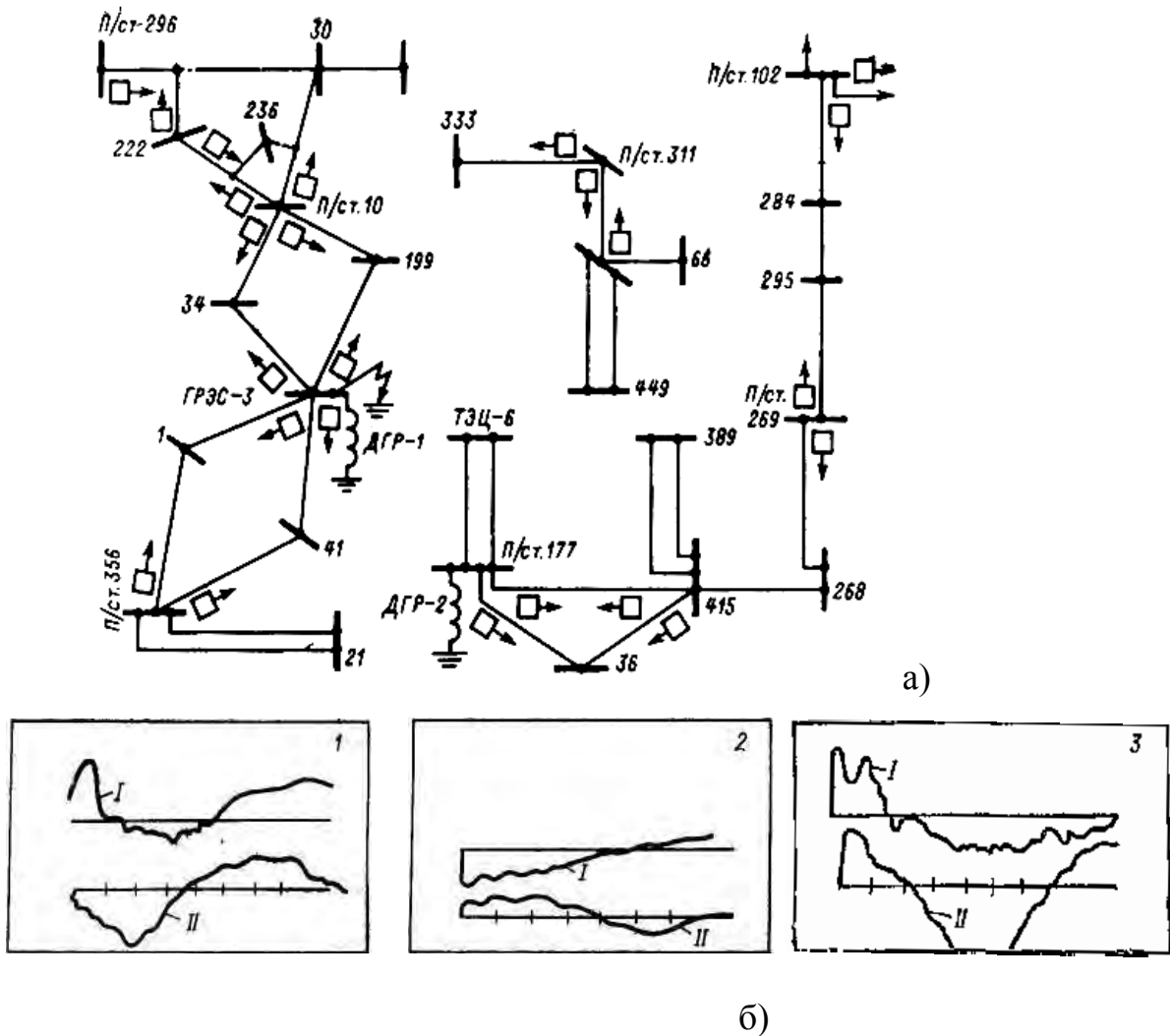


Рис. 4.3. Схема воздушной сети 35 кВ с размещением импульсной защиты от ОЗЗ (а) и осциллограммы 1-3 переходного процесса в цепях импульсного ОИМ при внешнем ОЗЗ (б) (метки через 200 мкс): I — напряжение на входе цепи тока ОИМ, установленного на ГРЭС-3 на ВЛ ГРЭС-3 –ПС 199; II – напряжение на входе цепи напряжения того же ОИМ

проанализировать процесс формирования сигналов на входах защиты и проверить основной принцип защиты - контроль направления распространения волн в ЛЭП по знаку мгновенной мощности. Токи и напряжения в цепях фильтров нулевой последовательности, а также фильтров напряжения на выходе ОИМ, характеризующее соотношение знаков тока и напряжения при

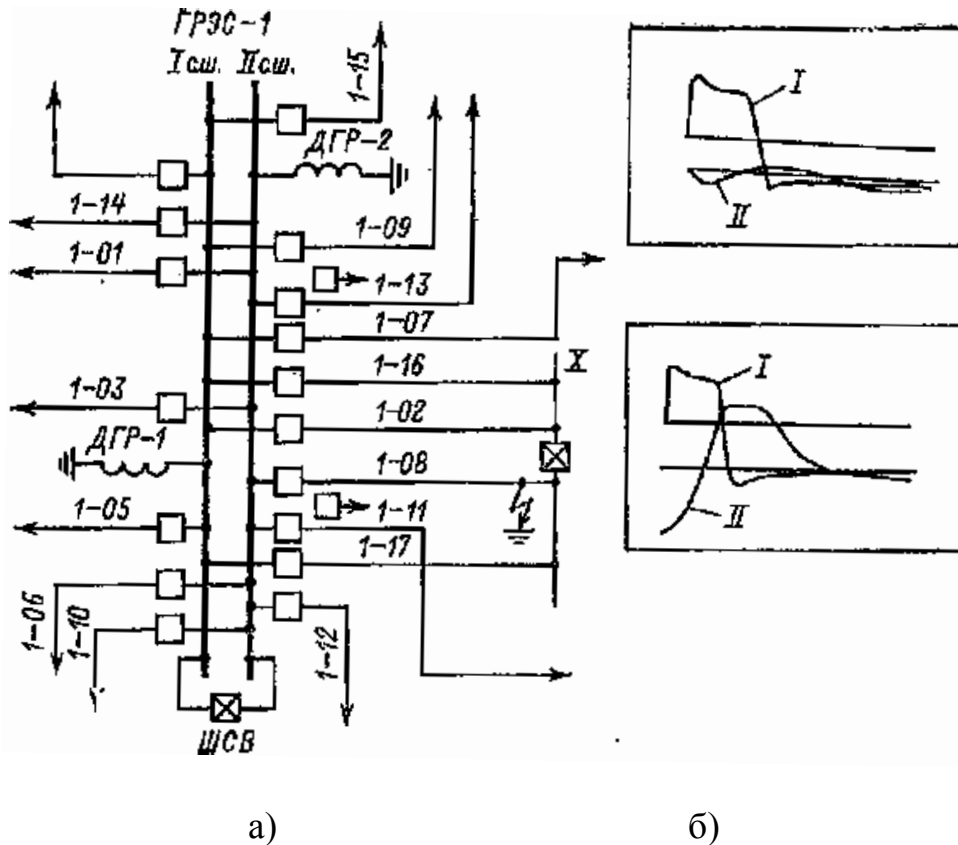


Рис. 4.4. Схема кабельной сети 6 кВ ГРЭС-1 (а) и осциллограммы переходного процесса при ОЗЗ в конце ВЛ 1-08 (б) (развертка — 2,5 мс): I — напряжение  $3u_0$  с ТН шин ГРЭС-1; II — ток в нулевом проводе ТТ ВЛ 1-11 (осциллограмма 1), ТТ ВЛ 1-08 (осциллограмма 2) на ГРЭС-1

ОЗЗ в электрических сетях фиксировались осциллографом с применением  $RC$ -фильтров, подавляющих сигналы промышленной частоты.

Анализ этих осциллограмм указывает на различие первоначальных знаков тока и напряжения переходного процесса при внешних и внутренних ОЗЗ и достаточную для надежной фиксации ОНМ защиты длительность начальной стадии переходного процесса до изменения знака (от сотен микросекунд до одной миллисекунды).

На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований ЭНИН было разработано устройство импульсной защиты (ИЗС) от ОЗЗ для сетей 6-35 кВ [5, 167-169, 186], серийно выпускавшееся рижским заводом «Энергоавтоматика» с 1976 по 1989 год. Устройство предназначалось для селективной сигнализации устойчивых и неустойчивых ОЗЗ ЛЭП в сетях 6-35 кВ - радиальных и замкнутых, с одним или несколькими источниками



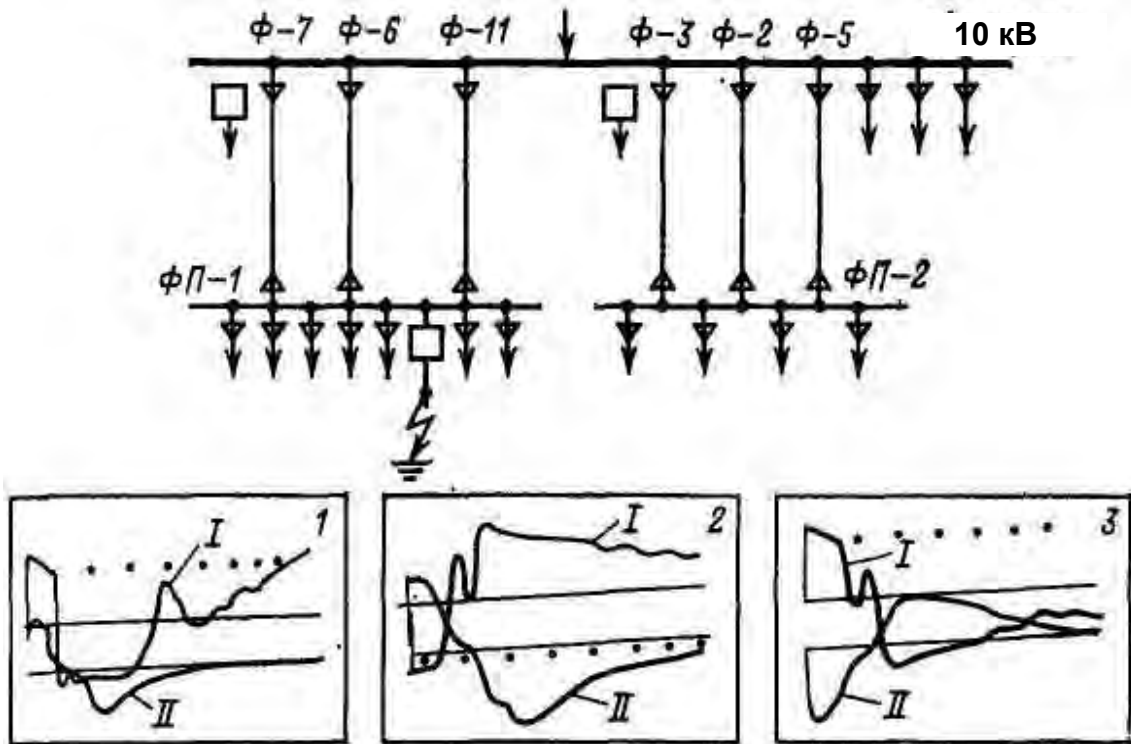


Рис. 4.5. Схема участка кабельной сети 10 кВ (а) и осциллограммы переходного процесса при ОЗЗ в защищаемом направлении на шинах  $\Phi\Pi-1$  (б) (метки через 500 мкс):

$I$  — напряжение  $3u_0$  с ТН шин подстанции 10 кВ;  $II$  — ток нулевой последовательности линии  $\Phi-11$  (осциллограмма 1) и суммарный ток  $3i_0$  линий  $\Phi-6$ ,  $\Phi-7$  и  $\Phi-11$  (осциллограммы 2 и 3) при измененной полярности подключения цепи тока

питания. Структурная схема защиты ИЗС приведена на рис. 4.6 [5]. Основной орган ИЗС — ОНМ  $KW$ , реагирующий на начальный знак мгновенной мощности переходного процесса. Для реализации защиты от ОЗЗ в электрических сетях с учетом их реальной протяженности, а также для обеспечения помехоустойчивости защиты минимальное время фиксации ОНМ  $KW$  выбрано на уровне 15 мкс. Действие реле  $KW$  на выходные устройства контролируется пусковым органом  $KV$ , включающим выпрямитель  $U2$  и триггер  $D4$ , реагирующий на напряжение нулевой последовательности  $3U_0$  промышленной частоты. Применение пускового органа  $KV$  необходимо для предотвращения действия защиты при переходных процессах, не обусловленных ОЗЗ.

В состав ОНМ  $KW$  входят

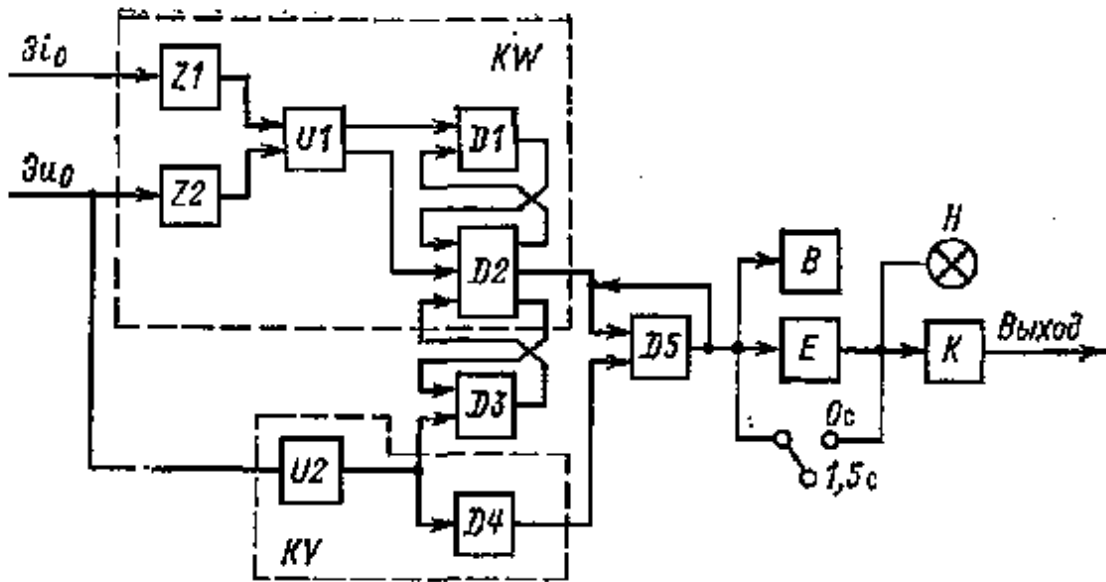


Рис. 4.6. Структурная схема устройства ИЗС

$Z1$ ,  $Z2$  – ТТ - образные  $RC$ -фильтры с согласующими входными трансформаторами каналов тока  $3i_0$  и напряжения  $3u_0$ , подавляющие величины промышленной частоты (на частоте 500 Гц — затухание фильтра на уровне около 3 дБ, на частоте 50 Гц — на уровне около 40 дБ);

$U1$  - кольцевая диодная фазочувствительная схема, контролирующая знак мощности переходного процесса;

$D2$  - исполнительный одновибратор, срабатывающий при ОЗЗ в зоне защиты и подающий сигнал от ОНМ  $KW$  на элемент И ( $D5$ );

$D1$ - блокирующий одновибратор, осуществляющий кратковременное блокирование ОНМ  $KW$  при внешних ОЗЗ.

Одновибраторы  $D1$  и  $D2$  взаимно блокируют друг друга в целях устойчивой фиксации первого знака мощности переходного процесса.

Триггер дополнительного блокирования  $D3$  осуществляет дополнительное блокирование ОНМ  $KW$  на время существования ОЗЗ для предотвращения срабатывания защиты при коммутациях в условиях устойчивого ОЗЗ. Срабатывание триггера  $D3$  осуществляется выпрямленным

напряжением  $3U_0$  с задержкой, позволяющей ОНМ  $KW$  зафиксировать знак мощности.

Элемент  $D5$  выполняет логическую операцию И при срабатывании измерительных органов  $KW$  и  $KV$ . Лампа  $H$  сигнализирует о наличии ОЗЗ в защищаемом направлении. Счетчик  $B$  фиксирует число ОЗЗ (неустойчивых и устойчивых) в защищаемом направлении. Выходное реле  $K$  обеспечивает возможность действия защиты на устройства центральной сигнализации и телемеханики, а также (при необходимости) на отключение поврежденной ЛЭП. Реле времени  $E$  позволяет действовать на выходное реле с задержкой, если это целесообразно для отстройки от кратковременных ОЗЗ.

Устройство ИЗС обеспечивает:

срабатывание при возникновении неустойчивого или устойчивого ОЗЗ в зоне защиты;

автоматический возврат после исчезновения ОЗЗ;

световую сигнализацию при ОЗЗ в зоне защиты;

фиксацию суммарного числа кратковременных (длительностью от единиц миллисекунд) и длительных ОЗЗ в зоне защиты;

возможность действия на отключение поврежденной линии без выдержки времени или с одной фиксированной выдержкой времени.

В устройстве предусмотрен блок контроля исправности цепей ИЗС, позволяющий проверить работоспособность защиты в условиях эксплуатации без вывода устройства из работы.

В электрические сети страны поступило несколько тысяч этих устройств. Положительный опыт эксплуатации ИЗС в сетях 6-35 кВ Ленэнерго, Куйбышевэнерго и др. выявил ряд случаев недостаточной эффективности функционирования ИЗС. По полученным данным в ряде сетей были зафиксированы неправильные действия ИЗС при ОЗЗ в схемах сборных шин 6-35 кВ, к которым были подключены только две линии. Анализ этих данных позволил установить в качестве основной причины неправильных действий ИЗС рекомендованный в [5] выбор параметров срабатывания измерительных

органов защиты по критерию ограничения излишних действий при внешних ОЗЗ в направлении срабатывания ОНМ путем выбора наибольших значений тока срабатывания ОНМ ИЗС. Это приводило к снижению чувствительности защиты на срабатывание, вызывая в ряде случаев ее действие на блокировку по каналу ОНМ (обладающему в два раза большей чувствительностью по сравнению с каналом на отключение) при наличии переходных сопротивлений в месте ОЗЗ. При этом создавались условия для произвольного срабатывания ИЗС на отключение на других линиях при изменениях полярностей тока и напряжения в процессе развития переходного процесса при ОЗЗ, особенно при наличии относительно коротких смежных линий (например, длиной не свыше 1-2 км).

С учетом проведенных расчетных исследований для повышения эффективности функционирования ИЗС было рекомендовано использовать самый низкий порог срабатывания ОНМ по току, а также уменьшить полосу пропускания частот ОНМ с целью увеличения длительности входного сигнала, на который должны реагировать ОНМ для повышения селективности ИЗС [5]. Это требование было реализовано при выполнении разработки модернизированного устройства импульсной защиты от ОЗЗ, осуществленной в 1990 -1991 годах ЭНИН совместно с рижским заводом «Энергоавтоматика». Устройство, получившее название ИЗС-М, было выполнено с использованием микроэлектронной технологии, в отличие от ИЗС, имевшей полупроводниковую элементную базу. Наряду с некоторым уменьшением габаритов и веса устройства удалось модернизировать блок тестового контроля, выполнив его в отдельной конструкции с действием на несколько устройств. В феврале 1992 года 10 устройств ИЗС-М были установлены на кабельных линиях (КЛ) 35 кВ Невинномысской ГРЭС, где успешно функционировали в дальнейшем [186].

### 4.3.5. Индивидуальное микроэлектронное устройство направленной волновой защиты УЗС

В середине 1990-х годов ЭНИН начал разработку нового устройства импульсной защиты типа УЗС совместно с казанским предприятием «Энергосоюз». Устройство направленной волновой защиты от ОЗЗ типа УЗС [185, 191] являлось развитием устройств ИЗС и ИЗС-М. Структурная схема УЗС приведена на рис. 4.7.

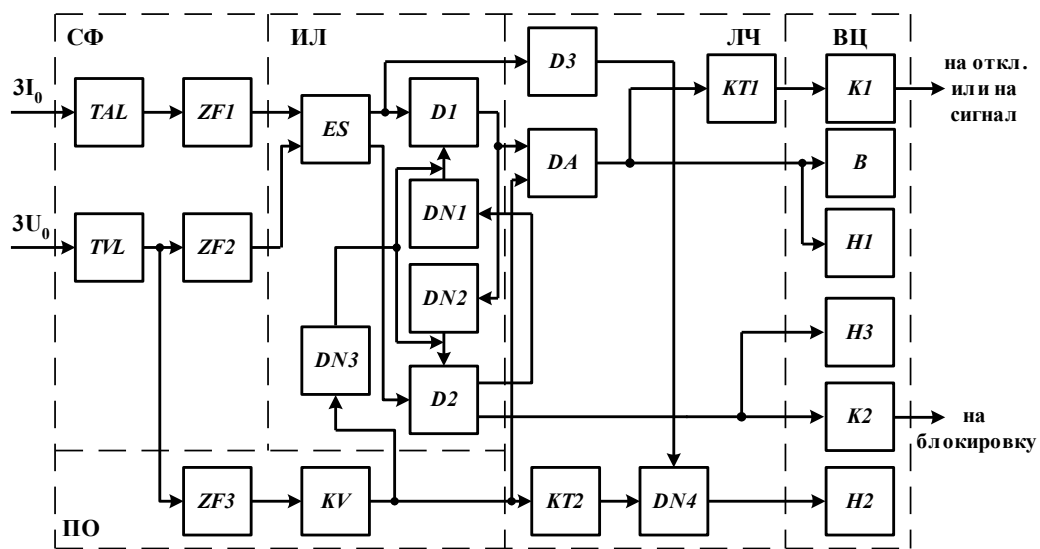


Рис. 4.7. Структурная схема устройства УЗС

Устройство состоит из схемы формирования сравниваемых величин СФ, измерительной логики ИЛ, пускового органа по напряжению  $3U_0$  (реле  $KV$ ), логической части ЛЧ и выходных цепей ВЦ. Схема формирования СФ включает вторичные преобразователи тока и напряжения нулевой последовательности  $TAL$  и  $TVL$ , частотные фильтры  $ZF1$ ,  $ZF2$  и  $ZF3$ . Частотные фильтры каналов тока и напряжения нулевой последовательности  $ZF1$  и  $ZF2$  подавляют составляющие с частотами выше 1 кГц, фильтр пускового органа  $ZF3$  – выделяет составляющую промышленной частоты. Измерительная логика ИЛ состоит из схемы сравнения знаков  $ES$ , элементов памяти (одновибраторов)  $D1$ ,  $D2$  и  $D3$  и элементов запрета  $DN1$ ,  $DN2$ ,  $DN3$  и  $DN4$ . ИЛ обеспечивает сравнение начальных знаков тока и напряжения (схема сравнения  $ES$ ) и фиксацию начального знака мощности нулевой последовательности в элементе

памяти  $D1$  (внутреннее) или  $D2$  (внешнее ОЗЗ). Для исключения излишних срабатываний защиты при развитии переходного процесса и изменении соотношений мгновенных значений сравниваемых величин в ИЛ применена взаимная блокировка элементов памяти  $D1$  и  $D2$  через элементы запрета  $DN1$  и  $DN2$ . Пусковой орган  $KV$  обеспечивает отстройку устройства защиты (по порогу и по времени срабатывания) от коммутационных переключений в сети и других режимов, не связанных с ОЗЗ. Блокировка элементов памяти  $D1$  и  $D2$  при срабатывании пускового органа через элемент запрета  $DN3$  предотвращает возможность излишних срабатываний УЗС-01 при дуговых перемежающихся ОЗЗ. Логическую часть устройства образуют элемент  $DA$  («И»), элемент памяти  $D3$ , элемент запрета  $DN4$  и реле времени  $KT1$  и  $KT2$ . Выходные цепи устройства включают промежуточные реле  $K1$  и  $K2$ , счетчик числа срабатываний  $B$ , световые индикаторы действия устройства на срабатывание  $H1$  и на блокировку  $H2$  и индикатор срабатывания пускового органа  $H3$ .

Минимальный ток срабатывания (вторичный) УЗС равен 0,1 А, напряжение срабатывания 1 В. Длительность совпадения или несовпадения начальных знаков  $i_0$  и  $u_0$ , достаточная для срабатывания устройства, должна быть не менее 15 мкс. Минимальное время срабатывания защиты, определяемое временем срабатывания пускового органа, составляет 60 мс. Питание устройства осуществляется от источника переменного оперативного тока напряжением 100 или 220 В.

Новая разработка импульсной защиты сети 6-35 кВ позволила не только устранить отмеченные выше недостатки, но и повысить ее техническое совершенство за счет разработки блока защиты, реагирующего на ОЗЗ в линии, без наличия других ЛЭП на секции шин, а также уменьшить габариты и вес защиты. Пилотный образец УЗС был установлен на секции шин сети 6 кВ собственных нужд Казанской ТЭЦ-1. Образец находилось в опытной эксплуатации с 1996 года и действовал правильно.

В мае 1998 года были проведены испытания (Приложение 7) образца УЗС на физической модели трехфазной электрической сети кафедры

Автоматическое управление электроэнергетическими системами Ивановского государственного энергетического университета. Целью испытаний являлось проведение экспериментальных исследований устройства защиты в условиях, приближенных к реальным в электрических сетях 6-10 кВ [185, 191].

Физическая модель, на которой проводились испытания устройства, имитировала кабельно-воздушную сеть напряжением 6 кВ в режимах с изолированной или с компенсированной нейтралью. Схема сети обеспечивала моделирование нескольких КЛ (длиной от 100 до 500 м) и ВЛ (длиной до 10 км), с изменением суммарного емкостного ток  $I_{c\Sigma}$  сети, удаленности  $l_3$  точки ОЗЗ от места установки защиты, начальной фазы  $\varphi$  мгновенного значения напряжения, интервалов времени между повторными пробоями и переходного сопротивления  $R_n$  в месте повреждения. Кабельные и воздушные линии имитировались трехфазными цепными схемами, удаленные участки сети - сосредоточенными трехфазными емкостями.

Испытания включали проверку эффективности функционирования устройства защиты УЗС при внешних и внутренних ОЗЗ всех разновидностей (кратковременных, самоустраняющихся, устойчивых и прерывистых). Параметры, определяющие условия экспериментов, изменялись в следующих пределах:  $I_{c\Sigma}$  от 10 до 30 А,  $l_3$  от 0 до 10 км,  $\varphi$  от 0 до 360° и  $R_n$  от 0 до 1000 Ом. Интервалы времени между повторными пробоями изоляции изменялись от долей до 10 и более периодов промышленной частоты. Общее число внутренних и внешних ОЗЗ, имитированных на модели, составило более 1000.

В результате испытаний были получены следующие результаты:

при всех внешних ОЗЗ устройство УЗС срабатывало правильно (на блокировку);

при внутренних ОЗЗ устройство УЗС срабатывало правильно во всех случаях, когда уровень переходного тока ОЗЗ превышал заданный порог срабатывания, а длительность напряжения  $3U_0$  в сети - время срабатывания пускового органа защиты. Если уровень входных сигналов по току и

напряжению нулевой последовательности оказывался меньше пороговых значений, устройство действовало на блокировку.

Таким образом, излишних и ложных срабатываний защиты при испытаниях отмечено не было. Срабатывания при внутренних ОЗЗ на блокировку имели место только в тех случаях, когда уровни входных сигналов по току и напряжению оказывался ниже установленных техническими требованиями на устройство защиты УЗС.

#### **4.4. Экспериментальные исследования импульсной защиты от замыканий на землю**

С целью оценки влияния переходных сопротивлений и протяженности защищаемых линий на чувствительность импульсной защиты от ОЗЗ были проведены экспериментальные исследования УЗС в сети 35 кВ Мосэнерго с характерной структурой сетей 35 кВ с ВЛ. Результаты исследований должны были позволить определить функциональные возможности устройства при дуговых замыканиях, обусловленных расположением поврежденного провода ЛЭП относительно близко расположенных объектов и поверхности земли. Это особенно важно для быстрого распознавания ОЗЗ при вероятном касании провода ЛЭП в сети 6-35 кВ людьми или животными, поскольку эффективность функционирования устройств импульсной защиты сетей типа ИЗС (ИЗС-М) с параметрами срабатывания ОНМ, равными 0,2-0,4 А по току и 2 В по напряжению [5], детально не исследовалась при переходных сопротивлениях в месте ОЗЗ.

Экспериментальные исследования УЗС проводились в Октябрьских электрических сетях ОАО «Мосэнерго» на ПС Солнечногорск с выполнением металлических и дуговых ОЗЗ на ВЛ 35 кВ Солнечногорск-Волково или на смежной ВЛ 35 кВ Волково - Васькино. Защита подключалась по токовым цепям в нулевой провод трансформаторов тока ТВД-35 (с коэффициентом трансформации 300/5) ВЛ Солнечногорск-Волково со стороны ПС



Солнечногорск, а по цепям напряжения - к емкостному фильтру [5] нулевой последовательности, подключенному к вторичным обмоткам трансформатора напряжения системы шин 35 кВ ПС Солнечногорск.

Предварительные испытания позволили проверить технические возможности УЗС при ОЗЗ в конце защищаемой линии, отключенной от шин 35 кВ ПС Волково. ОЗЗ осуществлялось включением одной из фаз ВЛ 35 кВ на землю через пробивной промежутки (дуговые ОЗЗ) или же через переносное заземление (металлические ОЗЗ). При этом обеспечивалась связь ВЛ 35 кВ Солнечногорск-Волково с сетью 35 кВ Мосэнерго посредством замкнутого положения шиносоединительного выключателя (ШСВ) 35 кВ ПС Солнечногорск. Действие защиты фиксировалось по изменению показаний счетчика срабатываний устройства и состояния индикаторов срабатывания и блокирования защиты.

Осциллографирование процессов на выходах частотных фильтров ОНМ, выделяющих ток и напряжение переходного процесса при ОЗЗ, проводилось двухлучевым электронным осциллографом и микропроцессорным компьютерным устройством Blackbox, подключенным к вторичным цепям ТН второй секции шин 35 кВ ПС Солнечногорск. Основное назначение компьютерного устройства заключалось в определении мгновенного значения поврежденной фазы в момент ОЗЗ.

Испытания проводились при исходных параметрах срабатывания устройства (ток срабатывания ОНМ - 0,1 А, напряжение срабатывания - 1 В, напряжение срабатывания ПО - 22 В).

В первой серии испытаний были проведены три дуговых и одно металлическое ОЗЗ в конце ВЛ 35 кВ Солнечногорск-Волково. При одном из трех дуговых ОЗЗ устройство сработало на блокировку, а при остальных дуговых и металлическом ОЗЗ - правильно на отключение. По итогам этих испытаний было принято решение повысить чувствительность ОНМ, уменьшив его ток срабатывания с 0,1 А до 0,05 А. Результаты повторных испытаний показали, что при всех ОЗЗ в конце защищаемой ВЛ УЗС правильно

срабатывало на отключение. При этом начальные соотношения знаков (полярностей) контролируемых ОНМ токов и напряжений совпадали в течение времени, достаточного для надежного срабатывания схемы сравнения ОНМ, а напряжение  $3U_0$  длительно превышало время срабатывания пускового органа.

Испытания при близких ОЗЗ на ВЛ 35 кВ Солнечногорск-Волково включали пять металлическими ОЗЗ стороны ПС Солнечногорск в тупиковом режиме ВЛ. Следующие десять ОЗЗ - в транзитном режиме со стороны ПС Солнечногорск, причем три из них - металлические, а семь - дуговые. Четыре последних - вновь в тупиковом режиме (все дуговые).

При металлических ОЗЗ, как при замкнутом, так и при разомкнутом транзите, устройство правильно срабатывало на отключение. ОЗЗ возникали при этом либо вблизи максимальных значений напряжения повреждаемой фазы, либо при прохождении его через нулевое значение. При дуговых замыканиях, вызванных соединением переносного заземления с покрытой травой поверхностью земли на ОРУ 35 кВ ПС Солнечногорск, УЗС срабатывало правильно на отключение как при непосредственном соединении провода заземления с порослями травы, так и при расположении его в том же ОРУ на деревянной платформе (доске, ящике) высотой до 10 см. Однако при увеличении высоты расположения провода заземления на платформе до 40 см результаты действий УЗС на срабатывание при дуговых перекрытиях травы в зоне действия УЗС стали перемежаться с действиями на блокировку, что оказывалось особенно частым в режимах с разомкнутым ШСВ.

Следующий этап испытаний проводился при установке второго комплекта УЗС, полярность входных цепей ОНМ которого в отличие от первого комплекта была направлена в сторону шин. ОЗЗ организовывались в начале ВЛ 35 кВ Солнечногорск – Волково. При первых двух ОЗЗ (металлических) переносное заземление было соединено с контуром заземления ПС Солнечногорск в режиме с разомкнутым ШСВ. Первый комплект УЗС (с прямой полярностью по току) действовал правильно на срабатывание, а второй (с обратной полярностью по току) действовал правильно на блокировку. При

этом первое ОЗЗ произошло при переходе напряжения замыкаемой фазы через нуль (с отрицательных значений на положительные), а второе при отрицательном значении напряжения этой же фазы на уровне половины от его амплитудного значения.

Опыты с третьего по шестой относились к дуговым ОЗЗ, проводившимся также при отключенном ШСВ. Третье замыкание с начальной фазой -  $133^\circ$  происходило при расположении переносного заземления на доске в ОРУ 35 кВ, четвертый опыт - при расположении провода на сидении стула, ножки которого соприкасались с сухой травяной порослью в ОРУ, пятый и шестой - при расположении провода на том же стуле, но после смачивания водой стеблей травы рядом со стулом.

При третьем, пятом и шестом опытах ОЗЗ оба комплекта УЗС срабатывали на блокировку. При четвертом опыте, несмотря на видимое, но весьма слабое свечение дуги, ОЗЗ не было зафиксировано устройствами защиты. При этом оба комплекта УЗС и устройство контроля изоляции в сети 35 кВ ПС Солнечногорск не работали.

Седьмой опыт проходил при включенном ШСВ 35 кВ ПС Солнечногорск в условиях образования цепи ОЗЗ аналогично пятому и шестому опытам. ОЗЗ сопровождалось ярко выраженным переходным процессом с уровнями  $3U_0$ ,  $3i_0$ , достаточными для правильного действия обоих комплектов УЗС.

Также было выполнено 9 опытов ОЗЗ в зоне между ВЛ 35 кВ Солнечногорск – Волково и шинами 35 кВ ПС Солнечногорск. Эти ОЗЗ являлись внешними по отношению к месту установки комплекта УЗС с прямой полярностью подключения входных цепей ОНМ и – внутренними для второго комплекта, цепи ОНМ которого включались с обратной полярностью.

Четыре первых опыта проводились при включенном ШСВ, пять последующих – при отключенном ШСВ. Эти опыты характеризовались широким разбросом начальных фаз замыкания ОЗЗ вариаций металлических и

дуговых ОЗЗ на поверхности земли и сопровождались правильным срабатыванием обоих комплектов УЗС.

Кроме того, было выполнено семь опытов при ОЗЗ в конце ВЛ 35 кВ Волково-Васькино, смежной ВЛ 35 кВ Солнечногорск – Волково, на которой были установлены оба комплекта УЗС в режиме включения ШСВ 35 кВ ПС Солнечногорск. Металлические ОЗЗ и ОЗЗ с проводом, расположенном на поверхности земли в ОРУ 35 кВ, сопровождались устойчивой работой УЗС. Однако при последующем расположении провода на ящик, поверхность которого соприкасалась с порослью травы, некоторые ОЗЗ не вызвали требуемого срабатывания первого комплекта УЗС в сторону отключения.

Результаты испытаний, выполненных после снижения порога срабатывания ОНМ по току с 0,1 А до 0,05 А, приведены в табл. 4.5 и 4.6 [180].

Таблица 4.5

№ пп	Опыты ОЗЗ	ШСВ включен		ШСВ отключен		
		Начало ВЛ	Конец ВЛ	Начало ВЛ	Конец ВЛ	Конец смежной ВЛ
1	Металлические ОЗЗ на контур заземления ОРУ	7	6	6	2	2
2	ОЗЗ провода, расположенного на поверхности земли в ОРУ	3	2	5		2
3	Дуговое ОЗЗ провода, расположенного на доске из древесно-стружечной плиты в ОРУ (высота 2 см)	3		1		
4	Дуговое ОЗЗ провода, расположенного на деревянном ящике в ОРУ (высота 10 см)	1				3

5	Дуговое ОЗЗ провода, расположенного на сидении деревянного стула (высота 40 см)	3		7		
---	--	---	--	---	--	--

Таблица 4.6

Опыты ОЗЗ	Расположение провода	УЗС				Контроль изоляции	
		Требуе мые срабат ывания	Факти ческие срабат ывания	Блокир овка	Отказ	Срабат ывания	Отказ
Метал лическ ие	на контуре заземления	23	23	-	-	23	-
Контак тные	на поверхности земли	11	11	-	-	11	-
Дугов ые	на высоте 1 см над поверхностью земли	4	3	1	-	4	-
	на высоте 10 см над поверхностью земли	4	2	2	-	4	-
	на высоте 40 см над поверхностью земли	10	2	5	3	7	3
	Итого	52	41	8	3	49	3

Для оценки уровня чувствительности УЗС, ОНМ которого реагирует на токи и напряжения переходного процесса ОЗЗ, проанализирован характер изменения значений знаменателя расчетного выражения для определения этих токов и напряжений ([5, 192, 193]), соответствующего

$$2 Z_{\phi} + Z_0 + 3 R_n \quad (4.9)$$

Как видно из (4.9), отличие параметров процесса определяется наличием в знаменателе тройного значения переходного сопротивления ( $3R_n$ ), суммируемого с сопротивлениями междуфазного ( $Z_\phi$ ) и нулевого ( $Z_o$ ) каналов.

С учетом условия  $2 Z_\phi \approx Z_o$  [193] (4.9) преобразуется к виду:

$$2Z_\phi + Z_o(1 + 3 R_n/Z_o) = Z_o(2 + 3 R_n/Z_o). \quad (4.10)$$

Принимая расчетное значение  $Z_o$  для сетей 6-35 кВ равным 725-750 Ом [193], получим, что пороги срабатывания ОНМ для обеспечения срабатывания УЗС при  $R_n = Z_o$ , должны быть снижены в 3,5 раза, а при  $R_n = 2 Z_o$  – в 5 раз. Следовательно, для успешного отключения линии при прикосновении человека [194] с  $R_n$ , равном 1000 Ом, к проводу сети необходимо обеспечить повышение чувствительности защиты в 4 раза.

Приняв по аналогии с [195] максимально возможное значение переходного сопротивления, на которое УЗС следует реагировать, равным (с запасом) 5000 Ом, получим, что уровень расчетных величин для оценки чувствительности защиты от ОЗЗ в воздушных сетях 6-35 кВ должен быть, по крайней мере, в 10-12 раз ниже. Поэтому для обеспечения достаточной чувствительности защиты целесообразно внести в расчетные выражения по выбору параметров срабатывания импульсной защиты от замыкания на землю [5] поправочный множитель, примерно в 10 раз снижающий пороги срабатывания ОНМ.

#### **4.5. Индивидуальное микропроцессорное устройство направленной волновой защиты ИЗН**

В течение ряда лет выполнение устройства импульсной защиты от ОЗЗ на микропроцессорной базе с учетом направления развития современной техники РЗ не представлялось возможным из-за высокой стоимости комплектующих элементов на основе микропроцессорной техники. Появление доступных по цене для массового производства микропроцессоров с шагом дискретизации порядка десятков и сотен

микросекунд и накопление опыта работы позволило ОАО «ЭНИН» совместно с ООО «ИЦ Бреслер» (г. Чебоксары) приступить в 2009 году к разработке микропроцессорного устройства релейной защиты от ОЗЗ в электрических сетях 6-35 кВ, получившего название ИЗН (рис. 4.8) [196]. Основные технические характеристики устройства приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

## Основные технические характеристики ИЗН

Наименование параметра	Значение
Порог срабатывания импульсного органа направления мощности: - по току $3i_0$ - по напряжению $3u_0$	$0,01 \pm 0,002$ А $1,0 \pm 0,2$ В
Порог срабатывания пускового органа напряжения $3U_0$	$15 \pm 2$ В
Собственное время срабатывания защиты (предусмотрена дополнительная задержка для отстройки от кратковременных замыканий на 1-2 с)	не более 60 мс
Рабочий диапазон температур устройства	от $-40^\circ$ С до $+60^\circ$ С

Цепи тока устройства ИЗН подключаются к ТТНП или в нулевой провод трансформаторов тока защищаемой ЛЭП. Цепи напряжения подключаются к соединенным в разомкнутый треугольник вторичным обмоткам трансформатора напряжения секции шин, к которой подключена ЛЭП. Особое внимание при разработке ИЗН было уделено моделированию работы микропроцессорного устройства в радиальной и кольцевой сети с изолированной или компенсированной нейтралью и с заземлением нейтрали через резистор [187, 188], с учетом сопротивления дуги в месте ОЗЗ, принятого равным 1000 - 1250 Ом – для сети с изолированной нейтралью, 1000 – 2300 Ом – для сети с компенсированной нейтралью и 500 – 800 Ом - для сети с резистивно – заземленной нейтралью.



Рис. 4.8. Внешний вид устройства ИЗН

Результаты моделирования позволили сформировать из полученных напряжений и токов рабочие сигналы для испытательного комплекса РЕТОМ-51, подаваемые на соответствующие входы измерительных органов устройства защиты. Испытания на модели включали ОЗЗ в начале, в конце и в средней части ЛЭП. На рис. 4.9 и 4.10 приведены расчетные осциллограммы, в которых при ОЗЗ на защищаемой ЛЭП (рис.4.9) знаки тока и напряжения отличаются, а при внешнем ОЗЗ (рис. 4.10) – совпадают.

В отличие от устройств типа ИЗС и УЗС в ОНМ микропроцессорного устройства ИЗН время фиксации указанных знаков увеличено с 15-20 мкс до нескольких сотен микросекунд. Испытания показали, что при порогах срабатывания ОНМ защиты 0,01 А по току и 1 В по напряжению устройство ИЗН обладало требуемыми чувствительностью и селективностью при ОЗЗ в



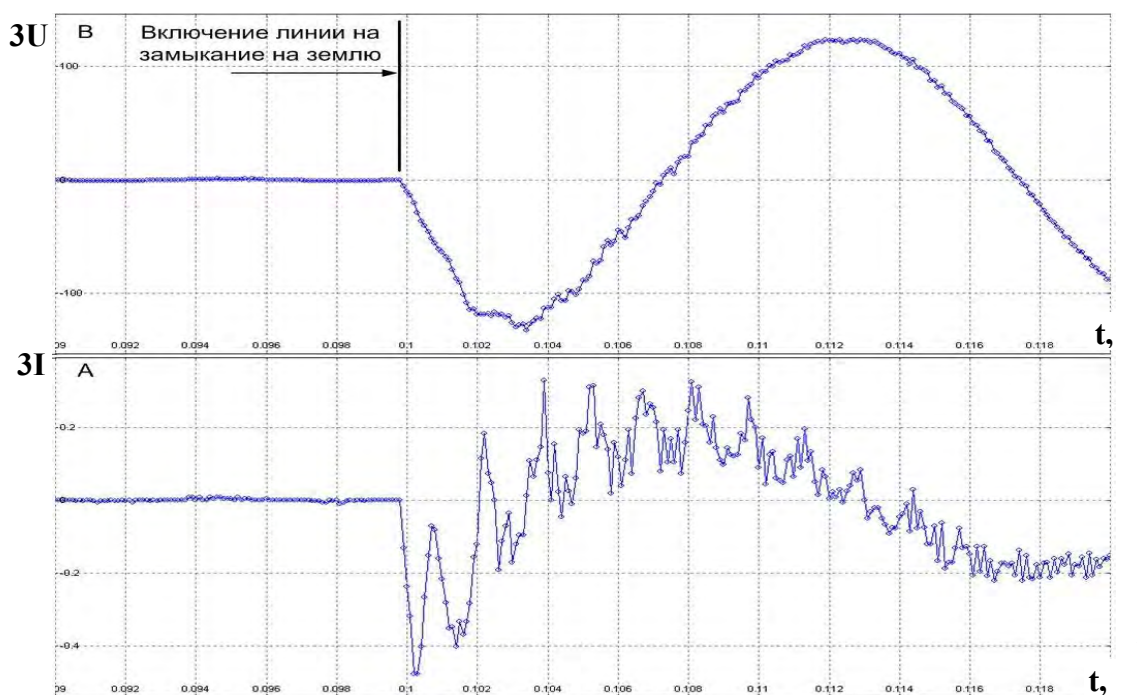


Рис. 4.9. Расчетные осциллограммы на входе органа направления мощности ИЗН при ОЗЗ на защищаемой ЛЭП

зоне и вне зоны защиты. Помимо основной функции (селективной защиты от замыканий на землю воздушных и кабельных линий 6-35кВ) ИЗН обеспечивает контроль фазировки ОНМ и обрыва цепей разомкнутого треугольника ТН, а также осциллографирование и регистрацию ОЗЗ с интеграцией в автоматизированную систему управления по протоколу IEC 60870-103. Устройство, обладающее малыми габаритами, может устанавливаться на дверь релейного отсека (рис. 4.11). Для контроля фазировки ОНМ ИЗН предусмотрен тестовый режим, ввод которого осуществляется при возникновении кратковременного переходного процесса в напряжении и токе нулевой последовательности (рис. 4.12) за счет одновременности замыкания контактов выключателя ЛЭП при его включении. По направлению мгновенной мощности этого переходного процесса определяется правильность фазировки ОНМ.

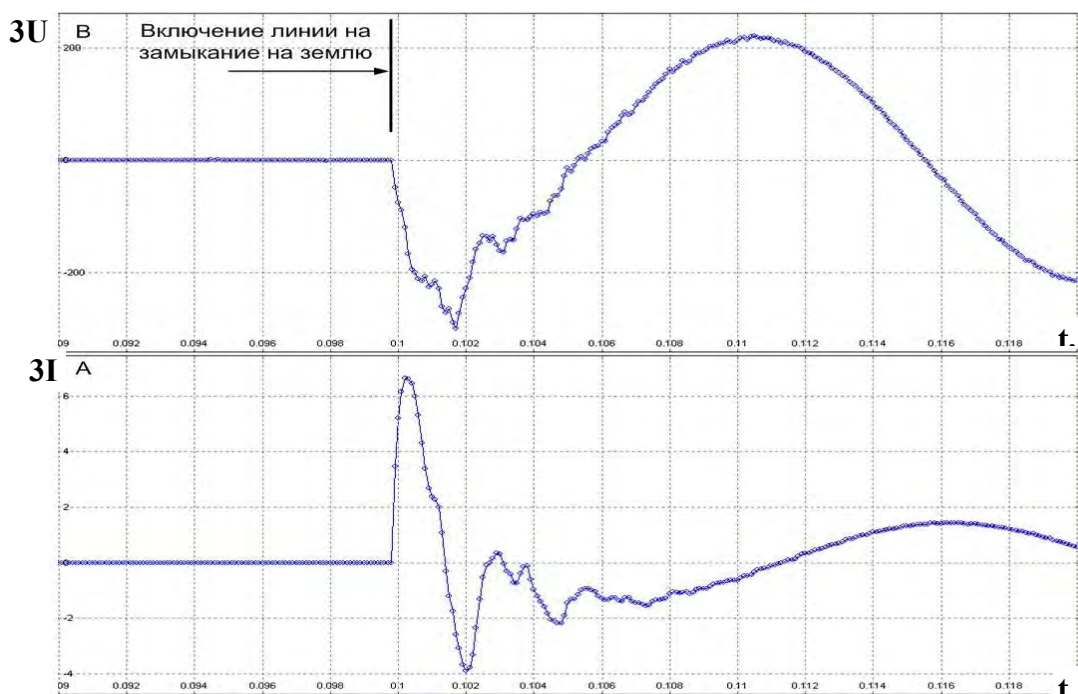


Рис. 4.10. Расчетные осциллограммы на входе органа направления мощности ИЗН при внешнем ОЗЗ



Рис. 4.11. Установленное устройство ИЗН

На основании результатов испытаний на модели сделан вывод о достаточной устойчивости функционирования устройства при возрастании величины сопротивления в месте замыкания на землю от нуля до нескольких сотен и тысяч ом, как при внутренних, так и при внешних ОЗЗ на кабельных и воздушных линиях при различных режимах работы нейтрали сети

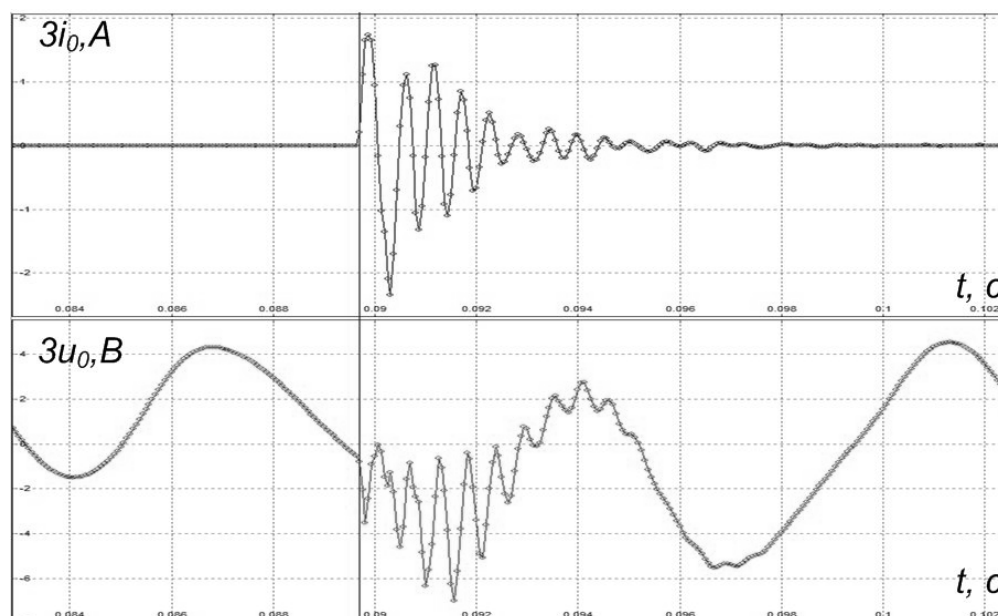


Рис. 4.12. Осциллограмма тока и напряжения нулевой последовательности при включении выключателя ЛЭП

(изолированная, компенсированная и резистивно заземленная). Важным результатом испытаний стало установление факта о существенно меньшем потреблении мощности микропроцессорным устройством по цепям  $3U_0$  и  $3I_0$  (соответственно 0,0676 ВА и 0,03 ВА) по сравнению с устройствами импульсной защиты от ОЗЗ, выполненными на микроинтегральной основе (соответственно 5 ВА и 6 ВА).

В октябре 2010 года три пилотных микропроцессорных устройства импульсной защиты от ОЗЗ были установлены в опытную эксплуатацию на ПС Ханты - Мансийская Нефтеюганских электрических сетей ОАО «Тюменьэнерго». Сеть 10 кВ ПС с изолированной нейтралью (рис.4.13) состоит преимущественно из воздушных линий, подключение которых к сборным шинам осуществлено через кабельные вставки. Секции 1 и 3 сборных шин 10 кВ работают параллельно. Также параллельно работают секции 2 и 4 этих шин.

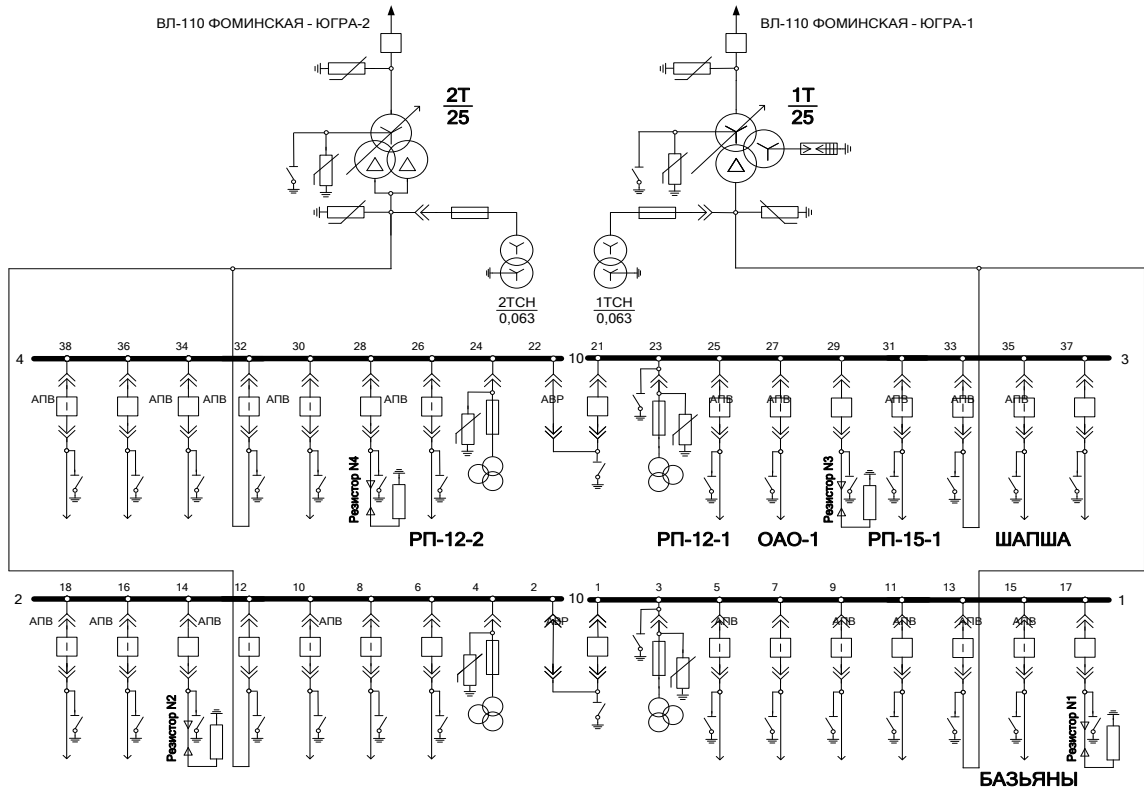


Рис. 4.13. Схема распределительного устройства ПС Ханты - Мансийская

Натурные испытания трех опытных образцов ИЗН были проведены на ЛЭП 10 кВ. По измерительным цепям  $3U_0$  устройства были подключены к обмоткам секционных трансформаторов напряжения, соединенным в разомкнутый треугольник, а по измерительным цепям  $3I_0$  - к трансформаторам тока нулевой последовательности соответственно ЛЭП 10 кВ Ханты - Мансийская – Шапша, Ханты - Мансийская – Базьяны и Ханты - Мансийская – ЭХЗ. Опыты ОЗЗ на ЛЭП 10 кВ Ханты - Мансийская – Шапша, Ханты - Мансийская – Базьяны, Ханты -Мансийская – ЭХЗ и Ханты - Мансийская – Югра-1 осуществлялись путем включения вакуумного выключателя соответствующей ЛЭП на предварительно установленное переносное устройство заземления. При включении каждой из испытываемых ЛЭП орган проверки правильности фазировки цепей тока и напряжения устройства ИЗН четко определял полярность подключения указанных цепей в соответствии с требованиями селективности.

По результатам испытаний устойчивость функционирования устройств ИЗН вполне обеспечивалась при варьировании расположения места ОЗЗ,

согласно программе испытаний, от сотен метров до 20 км по длине ЛЭП. При этом переход в ОНМ на время фиксации в несколько сотен микросекунд не привел к нарушениям надежности работы устройств.

В мае 2012 года на ПС Ханты - Мансийская проводились натурные испытания промышленных образцов устройств ИЗН на ЛЭП 10 кВ Ханты - Мансийская - РП-12-1, Ханты - Мансийская - РП-12-2, Ханты - Мансийская - РП-15-1 и Ханты - Мансийская - Базьяны. Во время натурных испытаний было проведено 21 искусственное ОЗЗ, а также было зафиксировано одно реальное ОЗЗ. Во всех случаях устройства работали правильно. Осциллограммы ОЗЗ на ЛЭП РП-12-1 приведены на рис. 4.14. На рис. 4.14 а – осциллограмма, записанная устройством, установленным на ЛЭП РП-12-1, а на рис. 4.14 б – на ЛЭП «Базьяны». Значительные искажения напряжения ТН, вызванные неправильным соединением его антирезонансной обмотки, не приводили к неселективной работе устройства.

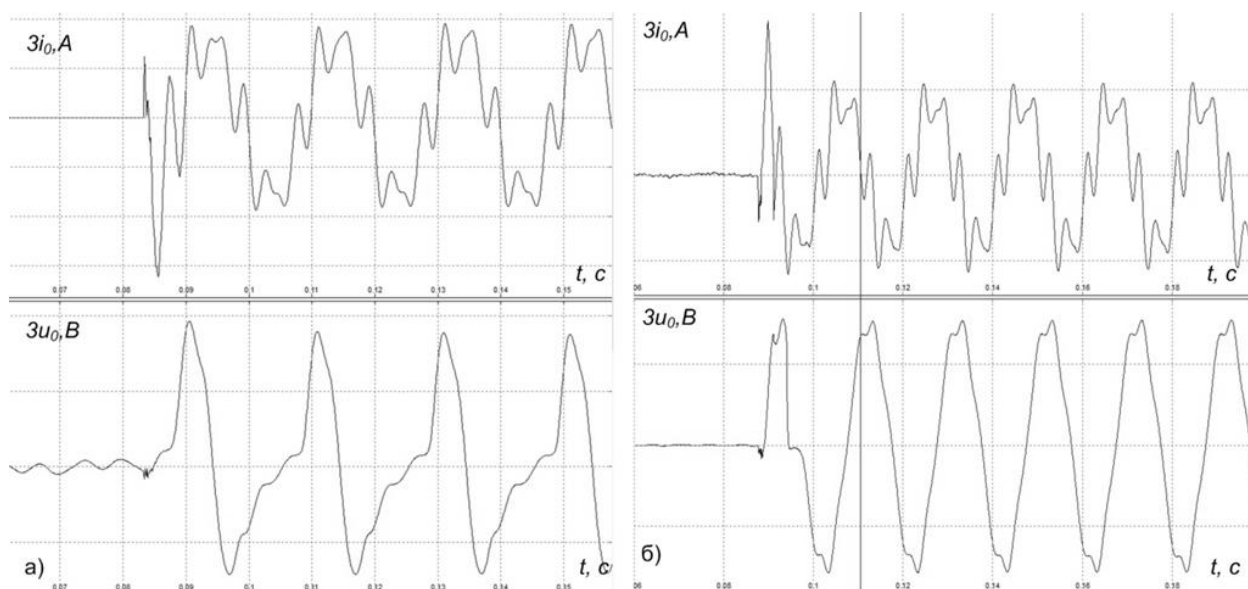


Рис. 4.14. Осциллограммы искусственных ОЗЗ а) ЛЭП РП-12-1, б) ЛЭП Базьяны

На рис. 4.15 приведена осциллограмма реального ОЗЗ на ЛЭП ОАО-1, зафиксированного устройством ИЗН, установленным на ЛЭП Ханты -

Мансийская – Базьяны. Устройство сработало на блокировку, поскольку для него это ОЗЗ являлось внешним. При этом уровень вторичного напряжения  $3U_0$  составил 80,8 В, что указывает на наличие переходного сопротивления в месте ОЗЗ.

После завершения натуральных испытаний защиты ИЗН на ЛЭП 10 кВ, отходящих от шин ПС Ханты – Мансийская, подтвердивших требуемую эффективность устройства, промышленные образцы были включены в эксплуатацию на ПС Ханты – Мансийская.

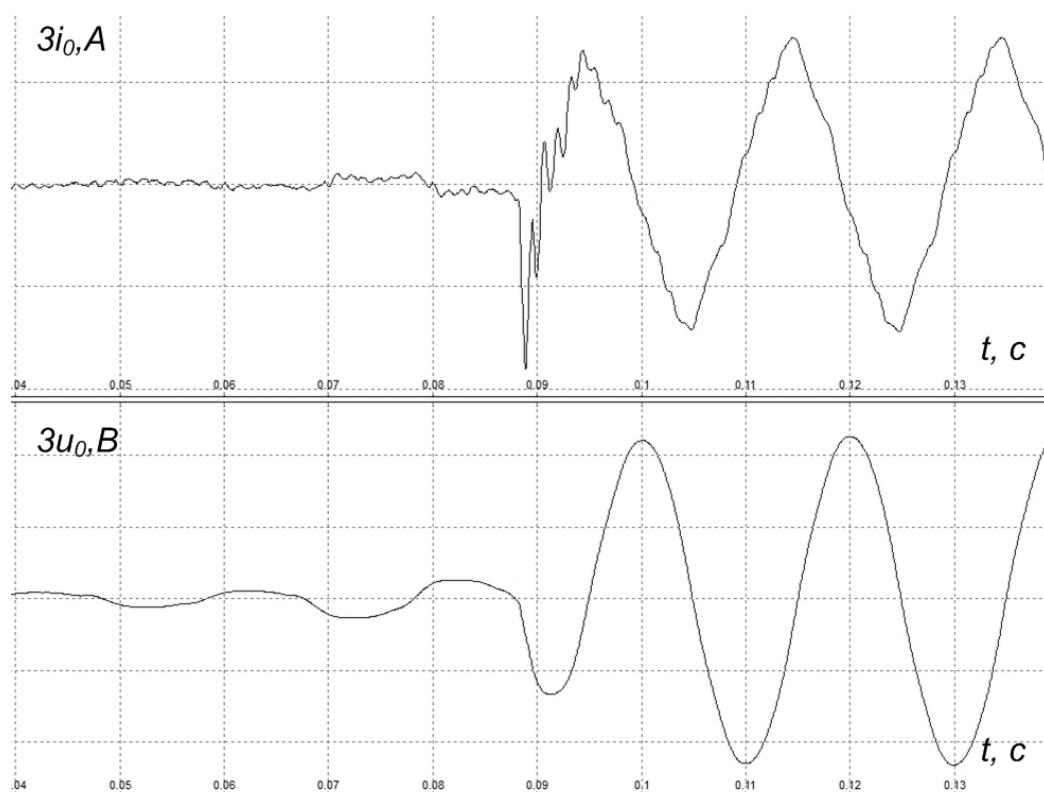


Рис. 4.15. Осциллограмма замыкания на ЛЭП ОАО-1

#### **4.6. Комбинированное устройство защиты от ОЗЗ, основанное на использовании электрических величин переходного и установившегося режимов ОЗЗ**

Дальнейшее совершенствование устройств защиты от ОЗЗ сетей 6-35 кВ вполне может быть достигнуто при разработке и внедрении комбинированных микропроцессорных устройств, выходная информация которых являлась бы результатом анализа процессов при ОЗЗ по нескольким факторам. Обеспечить

реализацию высокой эффективности функционирования защиты от ОЗЗ при различных режимах заземления нейтрали сети и при всех возможных разновидностях ОЗЗ можно только при параллельном использовании для каждого из режимов нейтрали не одной, а нескольких функций защиты на различных принципах. В этом аспекте разрабатываемое индивидуальное устройство защиты должно быть многофункциональным, т.е. обеспечивать реализацию для всех учитываемых режимов заземления нейтрали наиболее эффективный набор защитных функций при всех видах ОЗЗ.

В соответствии с требованиями и результатами проведенных испытаний для индивидуального устройства защиты от ОЗЗ в сетях 6-35 кВ, работающих с изолированной нейтралью или с высокоомным заземлением нейтрали, наиболее целесообразно использовать следующие функционально-структурные схемы и алгоритмы

направленной защиты абсолютного замера, реагирующей на фазные соотношения тока и напряжения нулевой последовательности переходного процесса при ОЗЗ;

направленной защиты абсолютного замера, реагирующей на фазные соотношения тока и напряжения нулевой последовательности промышленной частоты установившегося режима ОЗЗ;

токовой защиты абсолютного замера, основанной на сравнении значения тока нулевой последовательности установившегося режима ОЗЗ с заданным значением.

Для исключения срабатывания защиты в режимах без ОЗЗ (коммутационные переключения в сети, КЗ и др.) предусматривается использование пускового органа максимального напряжения нулевой последовательности.

Функционально-структурная схема индивидуальной направленной импульсной защиты от ОЗЗ приведена на рис. 4.16. Фиксация знака мгновенной мощности нулевой последовательности присоединения в элементах оперативной памяти производится в заданный момент времени. Передача

информации из элементов оперативной памяти в соответствующие элементы долговременной памяти производится только при срабатывании пускового органа максимального напряжения нулевой последовательности.

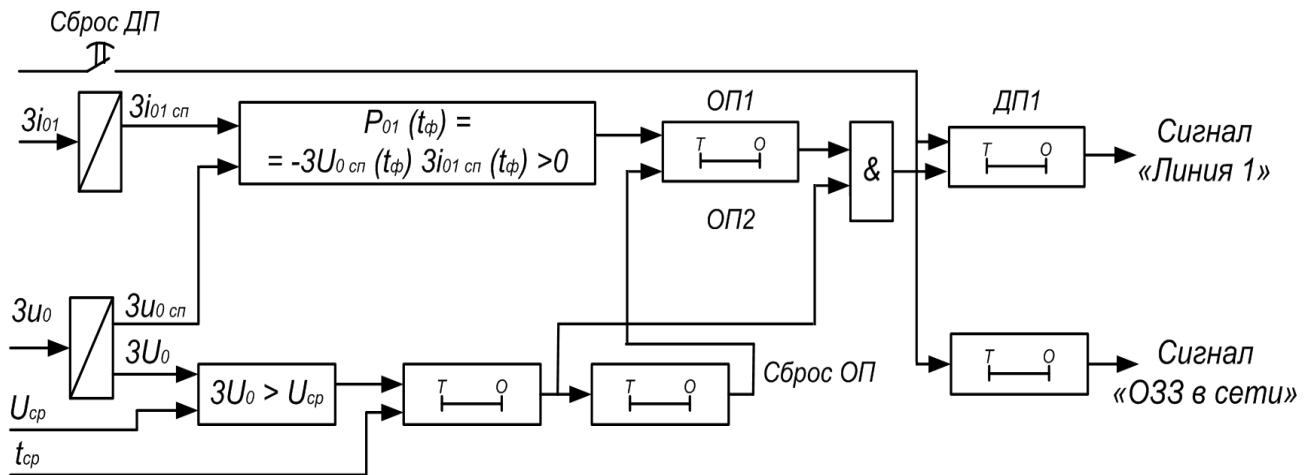


Рис. 4.16. Функционально-структурная схема индивидуальной направленной импульсной защиты от ОЗЗ

Измеряя фазу тока  $3I_0$  по отношению к напряжению  $3U_0$  (т.е. определяя знак и соответственно направление передачи мощности нулевой последовательности в защищаемом присоединении при выбранных положительных направлениях тока  $3I_0$  в линиях), можно определить направление к месту с ОЗЗ. Учитывая низкое значение активной составляющей токов  $3I_0$  (несколько процентов от емкостной составляющей) в сети с изолированной нейтралью, токовую направленную защиту целесообразно выполнять, как правило, реагирующей на полную мощность нулевой последовательности.

Функционально-структурная схема и алгоритм направленной защиты абсолютного замера, реагирующей на фазные соотношения тока и напряжения нулевой последовательности промышленной частоты установившегося режима, приведены на рис. 4.17. В алгоритме предусматривается регулировка угла максимальной чувствительности в зависимости от режима заземления нейтрали сети.



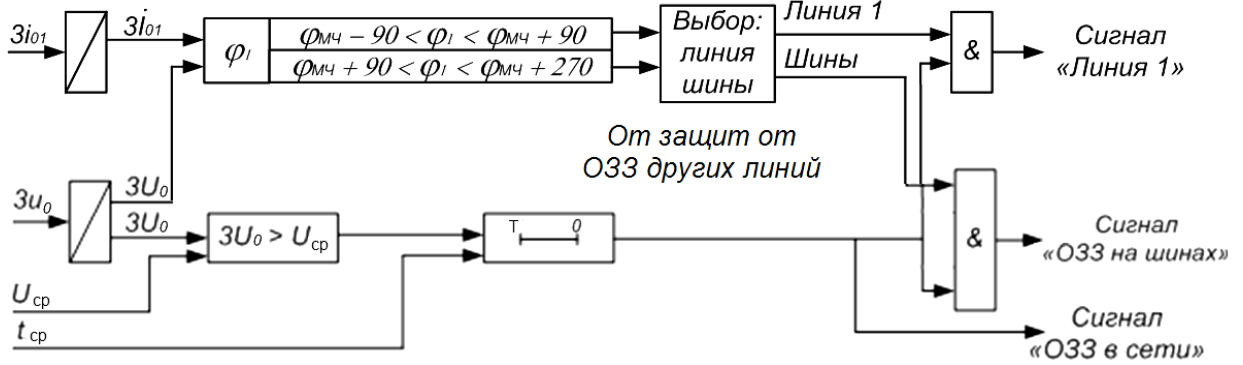


Рис. 4.17. Функционально-структурная схема направленной защиты нулевой последовательности абсолютного замера индивидуального устройства

Функционально-структурная схема токовой защиты абсолютного замера приведена на рис. 4.18.

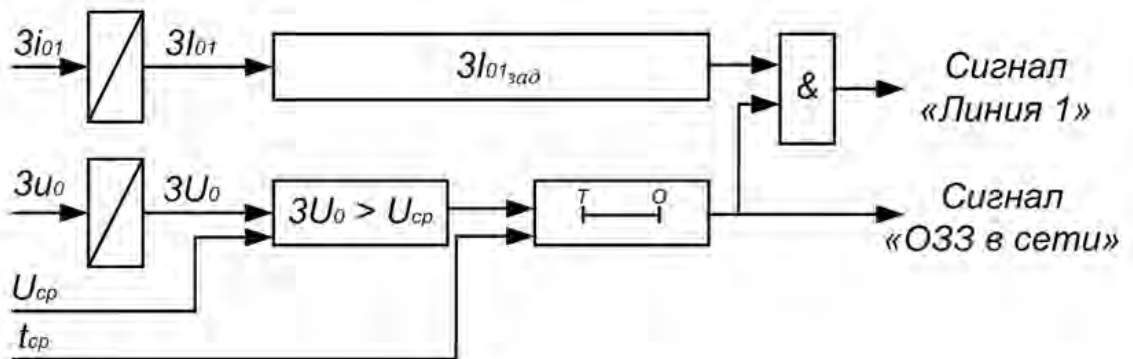


Рис. 4.18. Функционально-структурная схема токовой защиты абсолютного замера с пуском максимального напряжения нулевой последовательности

#### 4.7. Направленная защита от замыканий на землю

Разработанное ОАО «ЭНИН» совместно с ООО «ИЦ Бреслер» индивидуальное устройство защиты от ОЗЗ ТОР 110-ОЗЗ предназначено для применения в сетях напряжением 6-35 кВ, работающих с изолированной нейтралью, с высокоомным заземлением нейтрали через резистор, с резонансным заземлением нейтрали через ДГР (компенсацией емкостного тока ОЗЗ), с комбинированным заземлением нейтрали через ДГР и высокоомный резистор. Разработанные алгоритмы функционирования устройства ТОР 110-

ОЗЗ обеспечивают реализацию функций защиты от ОЗЗ в сети 6-35 кВ, описанных в разделе 4.6.

Направленная защита абсолютного замера, реагирующая на фазные соотношения тока и напряжения нулевой последовательности переходного процесса при ОЗЗ, реализована в функциональном блоке волнового модуля направленности, представленном на рис. 4.19. Модуль реагирует на направление распространения волн, возникающих при ОЗЗ.

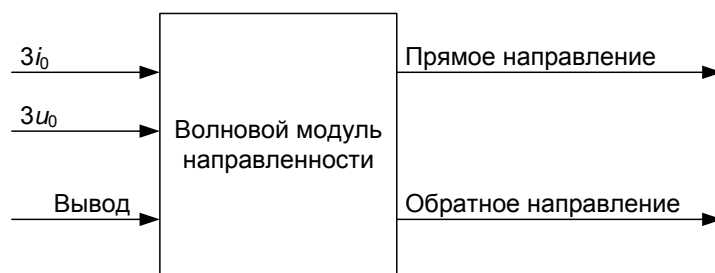


Рис. 4.19. Функциональный блок волнового модуля направленности

На рис. 4.20 и 4.21 приведены осциллограммы токов и напряжений нулевой последовательности при ОЗЗ на ЛЭП в обратном и в прямом направлениях относительно места установки защиты. При замыкании в обратном направлении мощность ОЗЗ имеет положительный знак, а при замыкании в прямом направлении – отрицательный.

В режиме работы сети с изолированной нейтралью рекомендуется использование направленной защиты абсолютного замера, реагирующей на фазные соотношения (рис. 4.22) тока и напряжения нулевой последовательности промышленной частоты установившегося режима ОЗЗ, выполненной в виде модуля РНМНП (рис. 4.23).

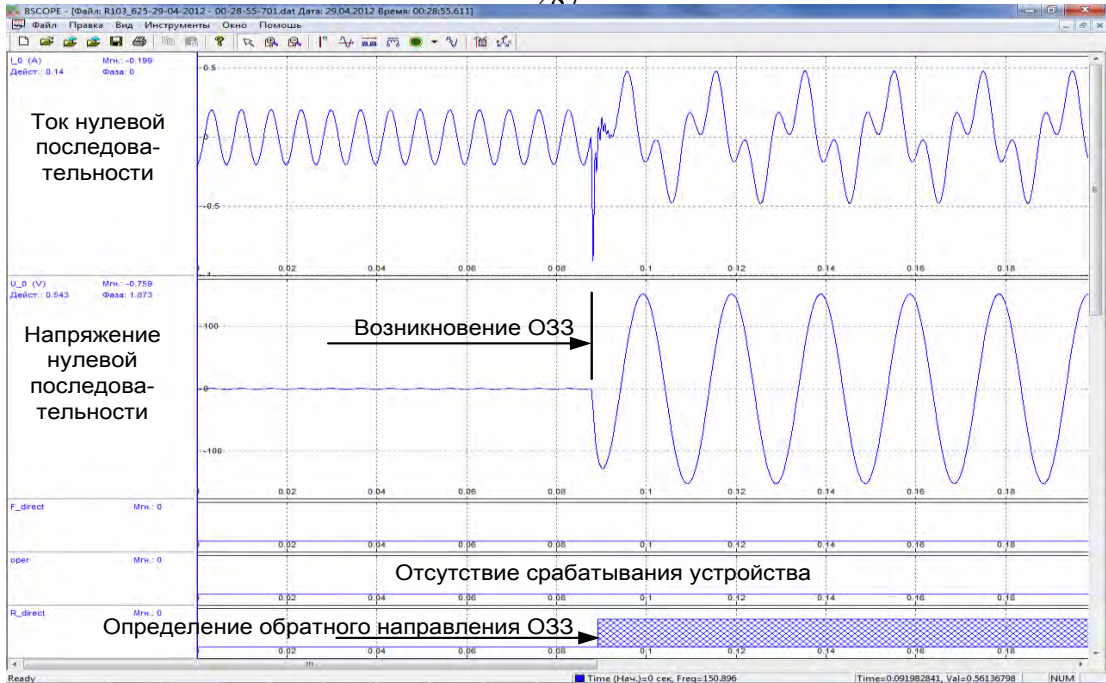


Рис. 4.20. ОЗЗ в обратном направлении

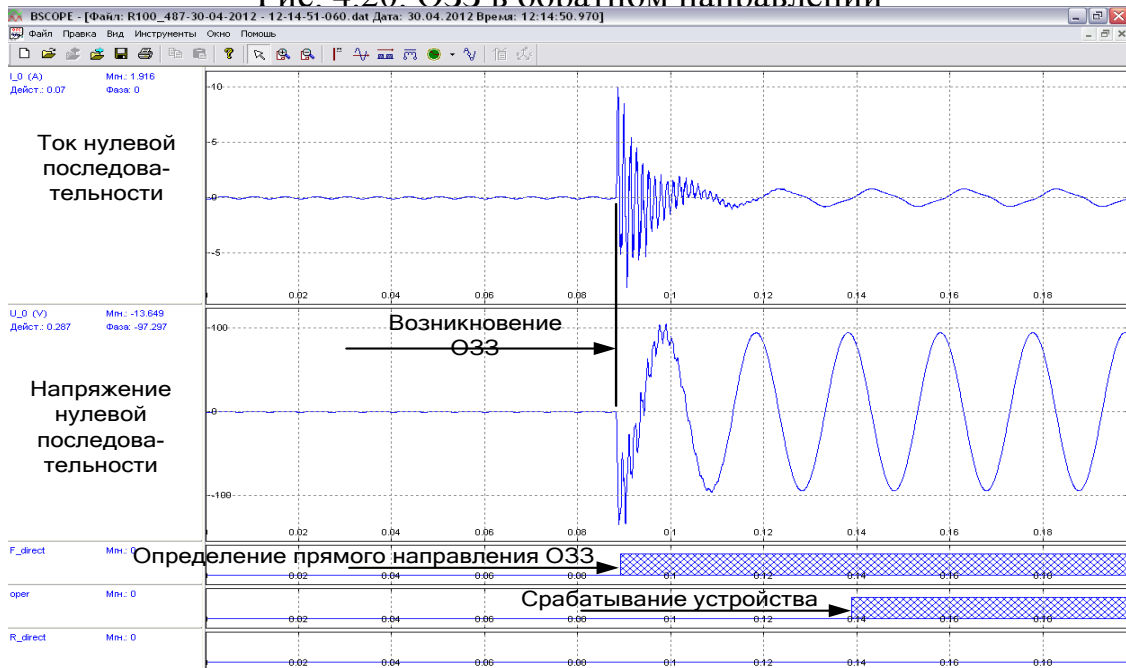


Рис. 4.21. ОЗЗ в прямом направлении

Фиксация установления ОЗЗ осуществляется пусковым органом максимального напряжения нулевой последовательности, реагирующим на действующее значение напряжения нулевой последовательности с порогом срабатывания 15 В, коэффициентом возврата 0,9 и временем возврата - не менее 20 мс, необходимым для обеспечения устойчивости работы защиты при перемежающейся дуге ОЗЗ.

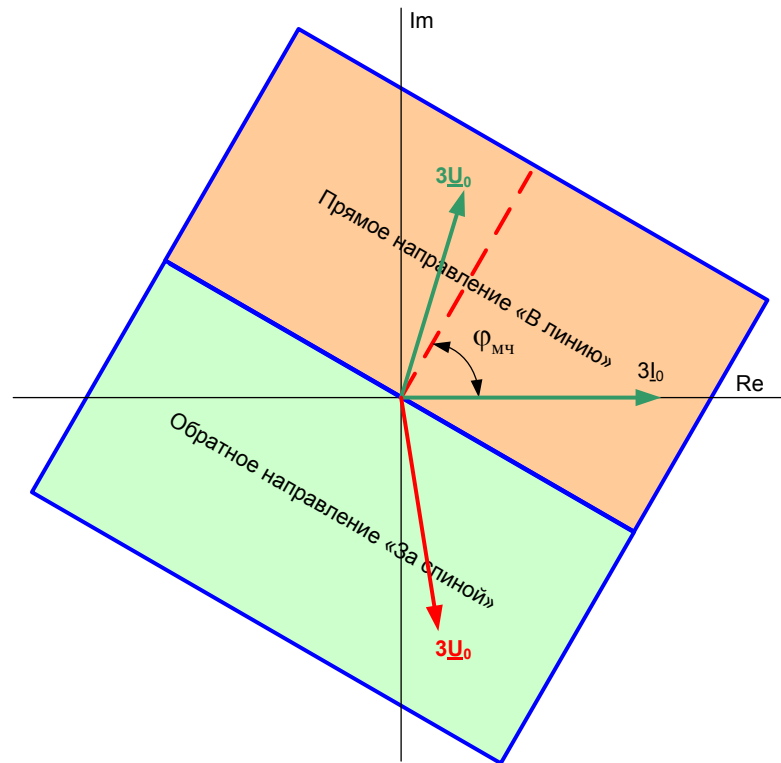


Рис. 4.22. Характеристика модуля РНМНП

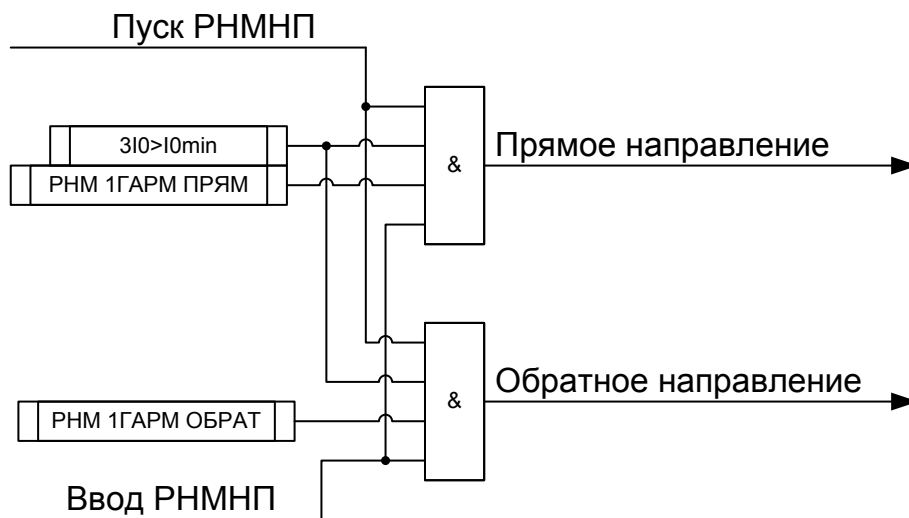


Рис. 4.23. Логическая схема модуля РНМНП

Токовая защита абсолютного замера, основанная на сравнении значения тока нулевой последовательности установившегося режима ОЗЗ с заданным значением, обеспечивается измерительным органом, реагирующим на действующее значение тока нулевой последовательности, с порогом срабатывания 50 А, коэффициентом возврата 0,9 и временем срабатывания 50 мс.

При отсутствии измерительных цепей напряжения в устройстве рекомендуется использовать функцию групповой защиты с зависимой от тока выдержкой времени. Основу защиты составляют измерительные органы с обратозависимой от тока временной характеристикой, подключенные к цепям  $3I_0$  различных присоединений одной из секций шин. Логика защиты предусматривает одновременный пуск этих органов при возникновении ОЗЗ и их последующий возврат при получении сигнала блокировки по факту срабатывания первого из них. Первым сработает измерительный орган повреждённого присоединения.

Микропроцессорные устройства направленной защиты от замыканий на землю в ЛЭП распределительных сетей 6-35 кВ при любом режиме заземления нейтрали, разработанные совместно ОАО «ЭНИН» с ООО «ИЦ «Бреслер» под руководством автора диссертации, установлены в промышленную эксплуатацию в мае 2013 года в ОАО «МРСК Юга» на ЛЭП 6 кВ ПС Олимпийская (Волгоград).

#### 4.8 Выводы

1. Возможностями универсального использования обладают защиты от ОЗЗ, реагирующие на переходный процесс при повреждении и контролирующие направление распространения волн по знаку мгновенной мощности. Использование этого принципа определяет независимость функционирования защиты от режимов заземления нейтрали, селективность в радиальных и замкнутых сетях во всех режимах ОЗЗ, а также возможность фиксации как устойчивых, так и неустойчивых замыканий.

2. Для обеспечения объективной информации о работе устройств от ОЗЗ необходимо разработать требования об обязательном учете статистических данных, касающихся эффективности функционирования устройств защиты от ОЗЗ, эксплуатируемых в электрических сетях 6 -35 кВ РФ.

3. Для повышения эффективности функционирования защит от замыканий на землю требуется обеспечить увеличение чувствительности этих устройств в сетях 6 - 35 кВ с учетом дуговых замыканий через переходные сопротивления, особенно с учетом опасности для людей или животных последствий ОЗЗ в сети.

4. Наиболее эффективное решение проблемы селективной защиты от ОЗЗ в электрических сетях 6-35 кВ может быть получено на основе комбинации способов определения поврежденного присоединения, основанных на использовании составляющих тока и напряжения нулевой последовательности установившегося режима ОЗЗ и способов, основанных на использовании электрических величин переходного процесса.

5. На современном этапе развития микропроцессорной техники появилась возможность развить достоинства разных типов защит от однофазных замыканий на землю с целью создания унифицированного устройства, обеспечивающего максимальную независимость функционирования защиты от режима заземления нейтрали и конфигурации сети.

## **Глава 5. Селективная защита от однофазных замыканий на землю в обмотках статора гидрогенератора, действующая на основе волновых методов**

### **5.1. Особенности переходного процесса при однофазных замыканиях на землю в обмотках статора гидрогенераторов укрупненных блоков ГЭС**

Опыт разработки защиты от ОЗЗ для ЛЭП 6-35 кВ распределительных сетей, реагирующей на знак мощности переходного процесса, позволил обратиться к исследованиям возможности использования принципа контроля переходного процесса при ОЗЗ и для выполнения селективной защиты статорных обмоток гидрогенераторов в схемах укрупненных блоков ГЭС, в которых два и более генераторов работают на общую обмотку повышающего трансформатора. Было проведено рассмотрение ряда дополнительных вопросов, в частности статистики повреждаемости ГГ, характера пробоев корпусной изоляции и волновых параметров элементов таких схем [5]. На статорные обмотки приходится около 50% всех повреждений гидрогенераторов, причем на долю ОЗЗ приходится 50—60 % всех повреждений статорных обмоток. Частичные разряды в изоляции обмоток не представляют опасности с точки зрения быстрого развития повреждения, а так называемые «незавершенные» пробои [197] в изоляции могут предшествовать полным дуговым или металлическим и сопровождаться сериями импульсов тока 15—20 А, приводящими к необратимым изменениям в изоляции [198]. Весьма вероятны ОЗЗ перемежающегося вида в различных точках обмотки статора, особенно вблизи нейтрали, где уровень напряжения недостаточен для поддержания устойчивых ОЗЗ.

Импульсный характер процессов, сопровождающих большинство ОЗЗ в генераторе, а также применяемая на укрупненных блоках ГЭС компенсация токов замыкания на землю промышленной частоты указывают на целесообразность использования переходных процессов для целей

селективной защиты при ОЗЗ. В отличие от распределительных сетей распространение волновых явлений в схеме блока характеризуется слабостью междофазовых связей, что обусловлено конструкцией и схемой расположения обмоток статора генератора. Поэтому движение волн при пробоях на корпус осуществляется в основном в контуре «фазы — земля». В силу того, что обмотка статора генератора уложена в пазы, в распространении электромагнитного поля волны существенную роль играет сталь статора как среда с большой магнитной проницаемостью. В результате скорость волны оказывается значительно меньше скорости света. По данным измерений [182] средняя скорость распространения волны вдоль обмотки гидрогенератора изменяется от 15 до 80 м/мкс и уменьшается с увеличением мощности генератора, а декремент затухания волны  $\delta$  составляет от 0,003 до 0,015 1/мкс.

Измерения волновых параметров ГГ [5] были проведены СибНИИЭ путем посылки в обмотку ГГ импульсов с длиной фронта, меньшей времени пробега по этой обмотке [199]. Измеряемое волновое сопротивление  $Z_{\text{в}}$  определялось по сопоставлению амплитуд посылаемого и преломленного импульсов при пробеге волны к месту подключения сопротивления  $R$ . Экспериментально определены волновые параметры обмоток ГГ типа СВ-1190/250-48 ( $z_{\text{в,г}} \approx 15$  Ом и время пробега волны по одной фазе  $t_{\text{п,г}} \approx 13$  мкс) мощностью  $P_{\text{ном}} = 225$  МВт при частоте вращения  $125 \text{ мин}^{-1}$  и типа СВ-1340/150-96 ( $z_{\text{в,г}} \approx 35$  Ом,  $t_{\text{п,г}} \approx 15$  мкс), мощностью 57,2 МВт при частоте вращения  $62,0 \text{ мин}^{-1}$ . Для ГГ укрупненных блоков мощностью  $S_{\text{ном}} = 30 \div 90 \text{ МВ} \cdot \text{А}$  расчетным путем установлены  $z_{\text{в,г}} = 20 \div 50$  Ом ( $z_{\text{в,г}} = 30 \div 50$  Ом при пробеге по одной фазе и  $z_{\text{в,г}0} = 20 \div 40$  Ом при пробеге по трем фазам) [5]. На модели укрупненного блока ГЭС исследовался переходный процесс при металлических и дуговых ОЗЗ в зоне и вне зоны действия защиты. Параметры схемы модели блока определялись на основании критериев подобия, соответствующих равенству волновых скоростей, коэффициентов преломления и отражения и электрических длин соответствующих элементов.

Трансформатор блока из-за значительных емкостных и магнитных связей между элементами обмотки не может быть представлен простой схемой с



распределенными параметрами [200]. Вместе с тем о поведении трансформатора при волновых процессах можно судить по результатам измерения входных параметров обмоток низшего напряжения, соединенных в треугольник.

## 5.2. Технические требования и структурная схема защиты

Качественное рассмотрение характера распространения электромагнитных волн при ОЗЗ в различных точках фазной обмотки статора генератора (от нейтрали до главных выводов) в схеме укрупненного блока ГЭС позволило сделать вывод о необходимости контроля волновых процессов на главных выводах генератора с помощью фильтров тока нулевой последовательности (ФТНП) и фильтров напряжения нулевой последовательности (ФННП) [5]. При данном знаке напряжения волны знаки тока волны для поврежденного и неповрежденного ГГ будут различны при ОЗЗ по всей фазовой обмотке, что определяет различные начальные знаки мощности переходного процесса для указанных ГГ.

Анализ переходного процесса в канале «фаза — земля» показывает, что фиксация знака мощности, характеризующего направление распространения преломленных волн, должна осуществляться путем контроля  $u(t)$  и  $i(t)$  до изменения их знаков. Наименьшая длительность времени контроля наблюдается в переходном токе при ОЗЗ у нейтрали при  $m_r = 2$  и составляет

$$t_{iprac} = 2 \left( \frac{l}{v} \right)_{\min} = 2_{п,г \min} = 20 \text{ мкс.}$$

По условиям надежной фиксации первого знака и отстройки от наводок, в том числе от собственных переходных процессов в ТТ и ТН при воздействии сигналов с большой крутизной фронта, выбрано  $15 \text{ мкс} \leq t_{\phi} \leq 20 \text{ мкс}$  [5].

Уровни напряжений, предшествующих пробой изоляции, определяются распределением напряжения 50 Гц и высших гармоник вдоль обмотки статора генератора. Имеющиеся сведения о значениях волновых сопротивлений и конструктивном исполнении обмоток статора генератора схем укрупненных блоков, а также о значениях коэффициентов трансформации измерительных ТТ

и ТН позволяют оценить уровни сигналов и требуемую максимальную чувствительность защиты. На основании рассмотренного, ОЗЗ у нейтрали гидрогенератора может быть принято за расчетный случай [5].

Амплитуды напряжений третьей и кратных ей частот в нейтрали при нормальном режиме ГГ, как показали измерения на действующих ГЭС, находятся в пределах  $(350—1400) V_{max}$ , что соответствует уровням минимальных пробивных напряжений воздушных промежутков [87, 182].

Напряжения и токи волны в месте ОЗЗ [5]

$$u_{\text{пад } min} = -u_{min \text{ проб}};$$

$$i_{\text{пад } min} = 3 \frac{u_{\text{ПАД}}}{z_{B, \Gamma 0}}. \quad (5.1)$$

При  $u_{\text{пад } min} = 350 \text{ В}$  и  $z_{B, \Gamma 0} = (20 \div 40) \text{ Ом}$   $i_{\text{пад } min} = 3 \frac{350}{40} = 26,25 \text{ А}$ .

В качестве расчетного  $i_{\text{расч}}$  принимается 15 А [5].

Функциональная схема импульсной направленной защиты от замыканий на землю гидрогенератора типа ИЗГ, удовлетворяющая приведенным выше основным техническим требованиям [5, 201, 202], приведена на рис. 5.1. Трансформатор напряжения  $TV$  имеет две вторичные обмотки с отводами для изменения чувствительности: с одной подается напряжение на фильтр  $ZF3$  реле  $KV$ , с другой — на фильтр  $ZF1$  реле  $KW$ . Трансформатор тока  $TA$  имеет первичную обмотку с отводами для изменения чувствительности и две вторичные, одна из которых подключается к входу фильтра  $ZF2$  реле  $KW$ , другая — к устройству тестового контроля.

Импульсное реле направления мощности  $KW$ , реагирующее на начальный знак мгновенной мощности  $p=ui$  переходного процесса, обеспечивает селективность действия защиты при ОЗЗ в любой точке обмотки статора защищаемого генератора, включая нейтраль, при параллельно работающем генераторе или генераторах блока. Оно содержит в цепях напряжения  $3U_0$  и

тока  $3i_0$  идентичные частотные фильтры  $ZF1$  и  $ZF2$ , пороговые органы  $EA1$

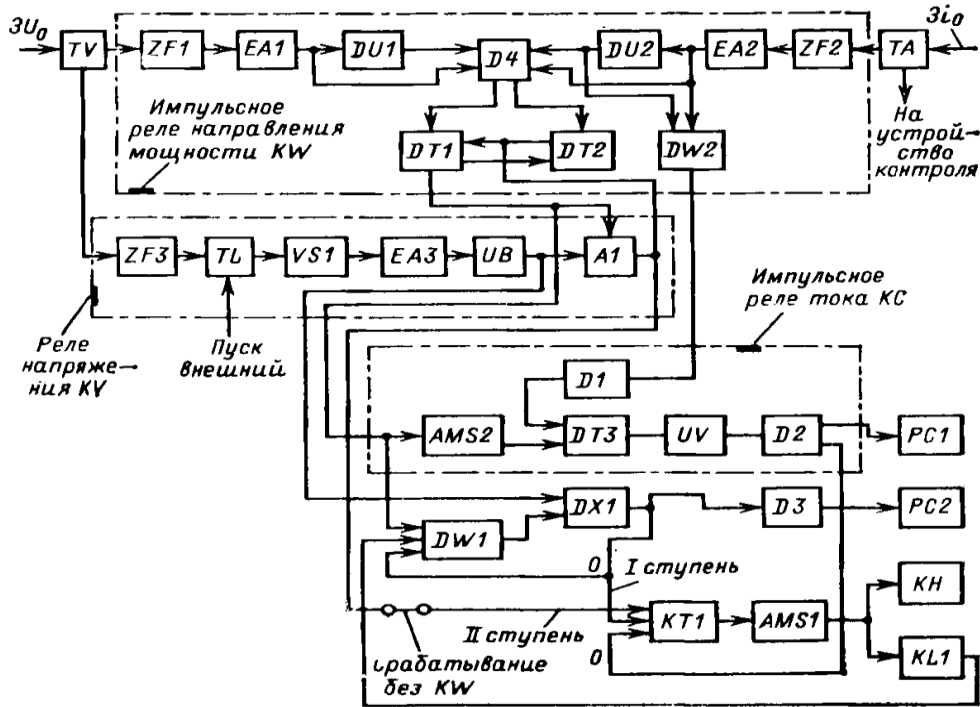


Рис. 5.1. Функциональная схема защиты ИЗГ

и  $EA2$ , инверторы  $DU1$  и  $DU2$ , а также схему совпадения  $D4$ , одновибраторы  $DT1$  и  $DT2$  и логический элемент ИЛИ  $DW2$ . Пассивные LC-фильтры  $ZF1$  и  $ZF2$  пропускают без затухания частоты выше 2 кГц. Пороговый орган, включаемый на выход фильтра и построенный на операционном усилителе, имеет два порога срабатывания, расположенных симметрично относительно среднего потенциала операционного усилителя  $U_{ср}$ . Пороги срабатывания составляют от  $\pm 0,1$  до  $\pm 0,15$  В. Пороговый орган содержит RC-элемент фильтра низких частот, обеспечивающий спад частотной характеристики в области частот выше 25 кГц. Чувствительности пороговых органов  $EA1$  и  $EA2$  взаимозависимы. Если сработал орган  $EA2$  от отрицательного сигнала, а на входе  $EA1$  появился положительный сигнал, то порог срабатывания органа  $EA1$  увеличится. То же будет, если полярность сигналов на входе обоих пороговых органов изменится на обратную. Если же на вход органа  $EA1$  поступит сигнал той же полярности, что привел к срабатыванию органа  $EA2$ , то чувствительность  $EA1$  увеличится. Таким путем обеспечивается более высокая чувствительность к однополярным входным сигналам на блокирование по сравнению с чувствительностью к

разнополярным сигналам на срабатывание. Сигнал на срабатывание с выхода схемы совпадения — формирователя импульсов  $D4$  — появляется при одновременном срабатывании пороговых органов  $EA1$  и  $EA2$  от разнополярных входных сигналов. Сигнал на блокирование возникнет, если органы  $EA1$  и  $EA2$  срабатывают от однополярных входных сигналов. Сигнал на срабатывание поступает на вход рабочего одновибратора  $DT1$ , сигнал на блокирование — на вход  $DT2$ . Одновибраторы  $DT1$  и  $DT2$  взаимно блокируются, принимая устойчивое состояние на время 0,22—0,27 с, после чего возвращается в исходное состояние. Во время удержания в состоянии срабатывания одного одновибраторов ( $DT1$  или  $DT2$ ) другой сработать не сможет. Логический элемент ИЛИ  $DW2$  служит для подачи положительных импульсов на вход реле тока  $KC$  при срабатывании порогового органа  $EA2$ .

При появлении напряжения  $3U_0$  промышленной частоты реле  $KV$  срабатывает с задержкой не менее 20 мс, необходимой для отстройки от возмущений, связанных с действием коммутационной аппаратуры, и разрешает действие защиты. Оно срабатывает также при замыкании выводов защиты *Пуск внешний*, в частности, контактами устройства защиты типа ЗЗГ-12 (с одним устройством на укрупненный блок) [203]. Такой комбинированный контроль обеспечивает действие защиты в целом при ОЗЗ в любой точке обмотки статора, включая нейтраль. Сработав, реле  $KV$  заблокирует реле  $KW$ , исключив его повторные срабатывания в условиях ОЗЗ. Возврат реле  $KV$  и  $KW$  осуществляется после исчезновения напряжения  $3u_0$ . Реле напряжения  $KV$  включает в себя активный полосовой фильтр  $ZF3$  низкой частоты (40—75 Гц), промежуточный трансформатор  $TL$ , выпрямительный мост  $VSI$ , пороговый орган  $EA3$ , расширитель импульсов  $UB$ , усилитель  $A1$ . Снимаемое с выхода трансформатора  $TV$  напряжение через фильтр  $ZF3$  и трансформатор  $TL$  поступает на вход моста  $VSI$ , к выходу которого подключен пороговый орган  $EA3$ . Пуск реле  $KV$  от внешних контактов осуществляется подачей переменного напряжения на вторую первичную обмотку трансформатора  $TL$ , достаточного для срабатывания органа  $EA3$ . Расширитель импульсов  $UB$  превращает сигнал с

выхода *EA3* в непрерывный, осуществляет задержку срабатывания реле *KV* на 20— 35 мс (при внешнем пуске *KV* задержка отсутствует), а также удерживает реле *KV* в состоянии срабатывания после снятия входного сигнала на время не менее 0,27 с. Через усилитель *A1* реле *KV* блокирует срабатывание реле *KW* после окончания времени самоудерживания одновибраторов *DT1* и *DT2* и пускает элемент времени *KT1* с выдержкой времени  $t_{II}$  при установленной перемычке *Срабатывание без KW*.

При срабатывании элемента *I DX1* срабатывает формирователь импульсов *D3*, и показание счетчика *PC2* увеличивается на единицу. Для работы счетчика *PC2* в условиях срабатывания защиты без *KW* выход реле *KL1* соединен с одним из входов элемента *DW1*. Элемент *DX1* при своем срабатывании через элемент *KT1* воздействует также на выходную схему *AMS1*.

Импульсное реле тока *KC* реагирует на амплитуду и число импульсов тока переходного процесса, повторяющихся не реже, чем каждый период промышленной частоты. Реле *KC* действует при ОЗЗ в любой точке обмотки статора защищаемого генератора, включая нейтраль, при наличии хотя бы одного параллельно работающего генератора, только при условии срабатывания реле *KW* и автоматически возвращается после срабатывания. В реле тока *KC* каскад запрета *AMS2* запрещает срабатывание одновибратора *DT3*, если не сработал рабочий одновибратор *DT1*, т. е. срабатывание одновибратора *DT3* возможно лишь при условии срабатывания реле *KW*. Формирователь импульсов *D1*, подключенный к выходу элемента *DW2*, обеспечивает необходимый уровень положительного импульса на входе одновибратора *DT3*. Импульсно-потенциальный преобразователь *UV* контролирует число импульсов длительностью около 3 мс на выходе *DT3* и срабатывает при четырех переключениях одновибратора *DT3*, повторяемых не реже, чем каждый период промышленной частоты. Формирователь импульсов *D2* формирует сигналы для управления счетчиком *PC1* и обеспечивает пуск цепи без выдержки времени блока *KT1*, воздействующего на выходное реле *KL1* и световую сигнализацию *KH* в течение времени нахождения реле *KV* в со-

стоянии срабатывания, но не менее чем 0,4 с. Защита может срабатывать без выдержки времени по каналу с *KС* и по каналу с *KV*, с выдержкой времени I ступени 0,5— 0,7 с по каналу с *KV* и с выдержкой времени II ступени 2—2,8 с по каналу *Срабатывание без KW* (резервная ступень реализуется только при действии защиты на отключение).

Применение защиты ИЗГ на генераторах укрупненного блока в комбинации с общим на блок устройством защиты типа ЗЗГ-12 [203], реагирующим на гармонические составляющие тока при ОЗЗ, позволяет обеспечить 100%-ную селективную защиту обмотки статора генератора. Возможно использование защиты ИЗГ без ЗЗГ-12, однако, при действии по каналу с *KV* она будет иметь зону нечувствительности в пределах 5 %.

С целью обеспечения требуемой направленности действия защиты необходимо снять векторную диаграмму нормального режима генератора под нагрузкой по известной методике в цепях измерительных ТТ и ТН, используемых для ФТНП и ФННП защиты ИЗГ. Сориентировать реле *KW* в направлении из защищаемого генератора в шины можно на основании этой векторной диаграммы, подключив измерительные цепи защиты таким образом, чтобы направление активной фазной мощности к шинам соответствовало условиям срабатывания защиты. Этому условию соответствует схема рис. 5.2, на которой одноименные выводы ФТНП и ФННП присоединены к разноименным входам защиты ИЗГ, размещенной в двух блоках: основном *UB* и дополнительном *AK*.

Технические данные устройства ИЗГ приведены в Приложении 8.

### 5.3. Результаты экспериментальных исследований

В связи со сложностью расчетов переходных процессов при ОЗЗ в обмотках статора ГГ, вследствие различия их конструкций и схем, для дальнейшего анализа функционирования ИЗГ также был избран путь экспериментальных исследований в соответствии с [5].

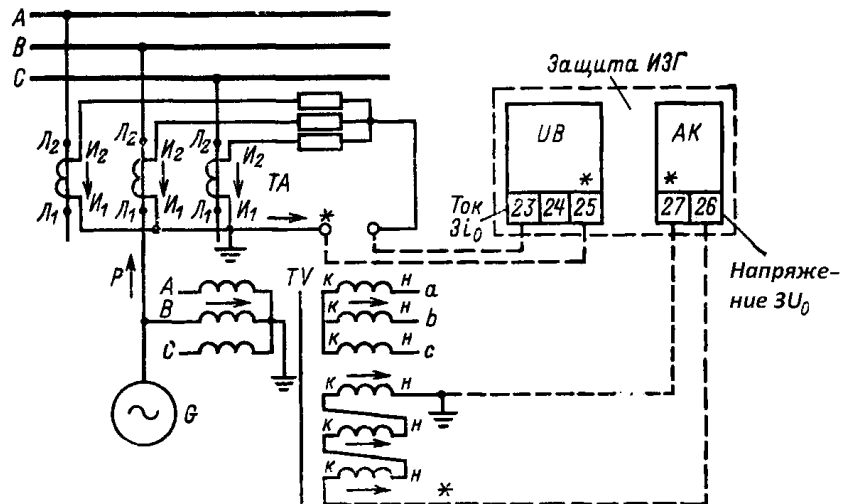


Рис. 5.2. Включение защиты ИЗГ на измерительные трансформаторы тока и напряжения

В частности, экспериментальные исследования защиты от ОЗЗ в цепи обмотки статора гидрогенераторов были проведены на Нижнекамской ГЭС, на которой используется электрическая схема четырех укрупненных блоков с подключением к блочному трансформатору двух пар ГГ через индивидуальные выключатели каждого из генераторов. Целью испытаний являлась проверка действия защиты ИЗГ в условиях внешних и внутренних ОЗЗ, а также однофазных и неполнофазных коммутаций выключателей генераторов. Исследования проводились на попарно подключенных к первому из четырех указанных блоков ГГ № 1 и 2 и ГГ № 3 и № 4.

Опыты ОЗЗ выполнялись в нейтрали и на выводах ГГ № 3 с помощью коммутации выключателя ВМП-10 К на землю при работе ГГ № 3 на холостом ходу и в сети под нагрузкой, а также при работе ГГ № № 1-3 и ГГ № № 1-4 в сети под нагрузкой. При опытах коммутаций предусматривались неполнофазные коммутации ГГ № 3 с сетью при различном числе включенных и отключенных ГГ блока.

### 5.3.1. Опыты однофазных замыканий на землю

Результаты опытов ОЗЗ приведены в табл. 5.1. Опыты 1-5, соответствующие ОЗЗ в нейтрали ГГ № 3 при параллельной работе на

холостом ходу ГГ № 3 и ГГ № 4 практически не привели к изменениям тока и напряжения фаз и формированию токов и напряжений нулевой последовательности ( $3i_0$  и  $3U_0$ ) на выводах ГГ № 3, но сопровождались срабатыванием органа защиты ЗЗГ «вблизи нейтрали» ГГ № 3.

Опыты 6-8 и 23-25 замыкания на землю на выводах фазы А ГГ № 3 в том же режиме работы ГГ № 3 и № 4 характеризовались достаточно четкими начальными бросками  $3U_0$  вблизи максимума мгновенного значения. В этих опытах зафиксировано срабатывание ИЗГ ГГ № 3 при ОЗЗ в зоне и несрабатывание ИЗГ ГГ № 4 при ОЗЗ вне зоны, а также срабатывание органов ЗЗГ «вдали нейтрали» и несрабатывание органов ЗЗГ «вблизи нейтрали» на обоих генераторах.

Опыты 9-14 по проверке действия защиты ИЗГ при ОЗЗ в нейтрали и на выводах ГГ № 3 при работе его на холостом ходу подтвердили невозможность срабатывания ИЗГ при ОЗЗ генератора в этом режиме, независимо от возникновения ОЗЗ до или после подачи возбуждения, что объясняется отсутствием тока  $3i_0$ . Уровень напряжения  $3U_0$  оказался достаточным для срабатывания органа ЗЗГ «вдали нейтрали» ГГ № 3 при ОЗЗ на его выводах и органа ЗЗГ «вблизи нейтрали» ГГ № 3 при ОЗЗ в нейтрали генератора.

В опытах 19-22 была проведена проверка действия защиты от замыкания на землю при ОЗЗ в нейтрали и на выводах ГГ № 3 при работе его в сети под нагрузкой при отключенных от сети ГГ № 1, №2 и №4. Во всех опытах устройство ИЗГ не срабатывало вследствие практического отсутствия тока  $3i_0$ .

И, наконец, в опытах 15-18 и 26-29 проверялось действие защиты при параллельной работе ГГ № 1, № 2 и № 3, а также ГГ № 1, № 2, № 3 и № 4 под нагрузкой. Результаты этих опытов совпадают с данными, полученными при ОЗЗ в режиме параллельной работы двух генераторов № 3 и № 4 (опыты 6-8 и 23-25). Уровни  $3U_0$  и  $3i_0$  достаточны для селективного срабатывания ИЗГ при ОЗЗ на выводах, в том числе при пробоях изоляции при начальных мгновенных значениях, отличающихся от максимальных. Правильно определяется и поврежденный ГГ при замыкании нейтрали с помощью органа



ЗЗГ «вблизи нейтрали». Причем срабатывают органы ЗЗГ «вдали нейтрали» всех ГГ данной секции независимо от повреждения конкретного ГГ. В этих опытах по сравнению с опытами 19-22 на одиночно работающим с сетью генератором ясно проявляется увеличение тока  $3i_0$  при ОЗЗ, что связано с увеличением числа параллельно работающих в сети генераторов.

### 5.3.2. Опыты неполнофазных коммутаций

Результаты опытов неполнофазных коммутаций приведены в табл. 5.2. Наиболее интересными и по-своему оригинальными с целью выявления работоспособности защиты являлись опыты неполнофазных коммутаций выключателя ГГ, заключающиеся во включении или отключении одной или двух фаз ГГ в режимах как одиночной работы ГГ с сетью, так и при параллельном включении других генераторов.

При этом требовалось определить влияние указанных коммутаций на вероятность ложных срабатываний устройства ИЗГ, так как за время его эксплуатации произошло несколько случаев непредусмотренного отключения одного из ГГ одной пары генераторов блока от совместного действия ЗЗГ и ИЗГ при недоотключении одной фазы выключателя ГГ другой пары того же блока. Данные эксплуатации указывают, что в сети с дугогасящим реактором в нейтрали ГГ при однофазной несимметрии происходит смещение нейтрали, вполне достаточное по уровню для срабатывания органа ЗЗГ «вдали нейтрали», а также для срабатывания ОНМ и реле напряжения (РН) ИЗГ. Следовательно, если при неполнофазной коммутации генератора сформируются токи и напряжения, достаточные для срабатывания ОНМ и РН ИЗГ, то ИЗГ сможет подействовать на отключение ГГ.

Эти результаты подтвердилось при проведении опытов. Так, при подключении к сети только фазы А ГГ № 3 (без подключения фаз В и С) в режиме с отключенным ГГ № 4 и включенными в сеть ГГ № 1 и № 2 (опыт 34) произошло срабатывание не только органа ЗЗГ "вдали нейтрали" всех трех ГГ

(№ 1, № 2 и № 3), но и действие на отключение ИЗГ этих же ГГ. При этом произошло резкое увеличение  $3U_0$  в цепи ГГ № 3, вызванное увеличением напряжения на фазе А после ее включения.

При отключении фаз А и В (опыт 36) в этом же схемном режиме наблюдается существенный рост напряжения  $3U_0$  и напряжения фазы С на ГГ № 3, сопровождающийся биениями в фазных и  $3U_0$  напряжениях подобно опыту 34. Однако срабатывание органа ЗЗГ "вдали нейтрали" на всех трех генераторах уже не сопровождалось срабатыванием каких-либо комплектов ИЗГ. Отсутствие срабатывания ИЗГ в опыте 36 объясняется меньшей скоростью роста  $3U_0$  по сравнению с опытом 34.

По сравнению с опытами 34 и 36 опыты 38 и 40, характеризующиеся включением одной и отключением двух фаз ГГ № 3 совместно с ГГ № 4 при включенных в сеть ГГ №1 и №2, сопровождались меньшими уровнями  $3U_0$ . При этом так же, как и в опытах 34 и 36 величины  $3U_0$  при включении одной фазы были больше, чем при отключении двух фаз. Но ток  $3i_0$  практически отсутствовал. В обоих опытах срабатывали органы ЗЗГ «вдали нейтрали», но ни разу не срабатывали устройства ИЗГ.

Также меньшими, чем в опытах 34 и 36, но несколько большими, чем в опытах 38 и 40 зафиксированы уровни  $3U_0$  в опытах 30 и 32, в которых к секции шин коммутировался лишь один генератор при отключенных ГГ № 1, № 2 и № 4. Опыты сопровождались срабатыванием органа ЗЗГ "вдали нейтрали" ГГ № 3 и несрабатыванием ИЗГ этого ГГ. Еще меньше уровни  $3U_0$  при указанных коммутациях в режиме параллельной работы ГГ № 3 и ГГ № 4 без подключения ГГ № 1 и ГГ № 2 (опыты 42 и 44). При этом срабатывают органы ЗЗГ "вдали нейтрали" ГГ № 3 и ГГ № 4 и не срабатывает ИЗГ этих ГГ.

Другая группа опытов неполнофазных коммутаций моделировала двухфазные режимы работы ГГ № 3, когда происходит либо включение двух фаз генераторного выключателя, либо отключение только одной его фазы. Все эти опыты (31, 33, 35, 37, 39, 41 и 43) характеризуются отсутствием каких-либо практических изменений фазных напряжений при коммутациях и,

следовательно, отсутствием условий, достаточных для срабатывания ЗЗГ и ИЗГ. Процесс включения двух фаз (опыты 31, 35, 39 и 43) сопровождался биениями фазных токов коммутируемых генераторов, затухающих по мере сближения частот сети и генераторов. Отключения одной фазы генераторов (опыты 33, 37, 41) также сопровождалось биениями токов, но существенно меньшей интенсивности.

Таким образом, анализ результатов опытов с неполнофазными коммутациями генераторных выключателей показал следующее:

режимы двухфазных включений и однофазных отключений при любом числе параллельно работающих с сетью генераторов не приводит к формированию  $3U_0$  и  $3i_0$ , могущих привести к срабатыванию защиты от замыканий на землю в цепи обмотки статора генератора - ЗЗГ и ИЗГ.

режимы однофазных включений и двухфазных отключений приводили к смещению нейтрали и формированию  $3U_0$  на уровне 10-15 В, достаточного для ложного срабатывания органа ЗЗГ "вдали нейтрали".

Срабатывание ИЗГ в этих режимах оказывалось возможным при наиболее существенном изменении напряжения  $U_s$  биения в соответствии с выражением [204]

$$U_s = 2U \sin 0,5 (\omega_r - \omega_c) t, \quad (5.2)$$

где  $\omega_r$  и  $\omega_c$  - угловые скорости вращения соответственно коммутируемого генератора и генераторов сети,  $U$  – напряжение коммутируемого генератора и сети.

Из выражения (5.2) следует, что чем больше различие в угловых скоростях напряжений сети и генератора, тем больше небаланс  $3U_0$  в несимметричной схеме коммутации ГГ и тем больше вероятность срабатывания ОНМ ИЗ на отключение. РН ИЗГ, как и орган ЗЗГ "вдали нейтрали" находятся при этом в состоянии срабатывания, но с задержкой не менее, чем на 20 мс по сравнению с моментом срабатывания ОНМ.

С вероятностью однофазного включения ГГ можно практически не считаться, так как за все время эксплуатации подобных коммутаций ни разу не

было зафиксировано. Что же касается однофазных режимов работы при неотключении фазы генераторного выключателя, которые становились систематическими на ряде ГЭС с укрупненными блоками (например, Нижнекамская и Чебоксарская ГЭС), то для предотвращения в этих случаях неправильного срабатывания ИЗГ целесообразно сократить время срабатывания РН ИЗГ для сокращения времени начала блокировки ОНМ от РН и уменьшения интервала времени, в котором вероятно ложное срабатывание ИЗГ. Исключение указанной задержки времени срабатывания РН не должно ухудшить надежность функционирования ИЗГ, поскольку в зоне срабатывания этого устройства отсутствуют дополнительные коммутационные элементы, которые могли бы привести к соотношениям токов и напряжений характерным для ОЗЗ. Напротив, увеличение времени задержки срабатывания РН на время, которое могло бы перекрыть интенсивные биения, явно, недопустимо, так как это приведет к увеличению времени срабатывания защиты.

#### **5.4. Повышение эффективности функционирования ИЗГ при ОЗЗ в обмотках статора гидрогенератора, работающего в блоке с повышающим трансформатором**

##### **5.4.1. Исходные условия и параметры**

Устройством защиты ИЗГ не обеспечивалось селективное отключение однофазных замыканий на землю (ОЗЗ) в цепи обмотки статора, если по условиям режимов в схеме блока отсутствуют другие ГГ [5]. Это было подтверждено и при проведении опытов ОЗЗ в 1993г. на Нижнекамской ГЭС (см. табл. 5.1). Защита от ОЗЗ в этих режимах могла бы осуществляться непосредственным переводом защиты ЗЗГ на отключение генератора, минуя ИЗГ. Однако осуществление этого мероприятия усложняет обслуживание

защит, не решая вопрос о селективном определении ОЗЗ - в ГГ или на сборных шинах, к которым этот ГГ подключен.

Анализ процессов в блоке генератор - трансформатор с целью определения эффективности функционирования защиты ИЗГ при переводе блока ГЭС в рассматриваемый режим потребовал проведения расчетов переходных процессов в цепи гидрогенератор - трансформатор связи с использованием волнового [5] и операторного [65] методов. Результаты расчетов сопоставлялись с экспериментальными данными опытов ОЗЗ в блоке гидрогенератор - трансформатор связи, проведенных СибНИИЭ и ЭНИН на Братской и Новосибирской ГЭС в 1960-х годах.

В качестве исходных данных для расчетов взяты номинальные параметры гидрогенераторов и трансформатора связи Нижнекамской ГЭС. Дополнительные данные принимались с учетом результатов испытаний, полученных при опытах на других ГЭС. В расчетных схемах генераторы и трансформаторы представлялись в виде индуктивно - емкостных элементов с собственными частотами  $f_c$  и волновыми сопротивлениями  $Z_{в}$ . За исходные принимались волновые сопротивления обмоток ГГ  $Z_{вг}$  и трансформатора  $Z_{втр}$  и время пробега волной по длине обмотки генератора  $\tau_g$  и трансформатора  $\tau_{тр}$ , с учетом экспериментальных данных [5, 199, 200]. На основании этих данных можно сделать вывод, что волновая длина фазной обмотки гидрогенератора примерно в 5 раз больше волновой длины фазной обмотки трансформатора, соединенной в треугольник, а волновое сопротивление фазной обмотки трансформатора на порядок превышает волновое сопротивление фазной обмотки гидрогенератора.

Измерения, проведенные на Нижнекамской ГЭС, помогли уточнить величины емкостей фазных обмоток гидрогенераторов  $C_{фг}$  и фазных обмоток низкого напряжения трансформаторов связи  $C_{ф.ннтр}$ . Так,  $C_{фг} = 0,911$  мкФ (вместо 0,610 мкФ по паспорту генератора), а  $C_{ф.ннтр} = 0,013$  мкФ. Последний результат близок к значению  $C_{ф.ннтр}$ , равному 0,018 мкФ, приведенному в [204].

Таблица 5.1

## Опыты ОЗЗ при проведении испытаний ИЗГ и ЗЗГ на Нижнекамской ГЭС

Первичная схема	Полярность включения ИЗГ (прямая или обратная)	Опыты	Поведение комплектов ЗЗГ и ИЗГ									
			ГГ №3		ГГ №4		ГГ №1		ГГ №2			
			ЗЗГ	ИЗГ	ЗЗГ	ИЗГ	ЗЗГ	ИЗГ	ЗЗГ	ИЗГ		
			В Н		В Н		В Н		В Н			
холостой ход ГГ №3 и №4 с замыканием в нейтрали ГГ №3 (ГГ №1 и №2 отключены)	на ГГ №3 прямая с пуском от ЗЗГ	1	-	+	+	-	-	-				
	на ГГ №3 прямая без пуска от ЗЗГ (далее с пуском от ЗЗГ)	2	-	+	-	-	-	-				
	на ГГ №3 обратная полярность	3	-	+	+	-	-	-				
	на ГГ №3 и №4 обратная полярность на ГГ №3 и №4	4	-	+	+	-	-	-				
	прямая полярность	5	-	+	-	-	-	-				
холостой ход ГГ №3 и №4 с замыканием на землю на выводах фазы А ГГ №3 (ГГ №1 и №2 отключены)	на ГГ №3 и №4 прямая полярность	6	+	-	+	+	-	-				
	на ГГ №4 обратная полярность	7	+	-	+	+	-	+				
	на ГГ №3 обратная, а на ГГ №4 прямая полярность	8	+	-	-	+	-	-				
холостой ход ГГ №3 с замыканием в нейтрали ГГ №3 (ГГ №1, №2 и №3 отключены)	на ГГ №3 прямая полярность	9	-	+	-							
	на ГГ №3 обратная полярность	10	-	+	-							
	на ГГ №3 обратная полярность с подачей возбуждения на ГГ №3 то же, но с прямой полярностью	11	-	+	-							
холостой ход ГГ №3 с замыканием на землю на выводах фазы А ГГ №3 (ГГ №1, №2 и №3 отключены)	на ГГ №3 прямая полярность	12	+	-	-							
	на ГГ №3 прямая полярность с подачей возбуждения.	13	+	-	-							
	на ГГ №3 обратная полярность	14	+	-	-							



## Опыты неполнофазных коммутаций при проведении испытаний ИЗГ и ЗЗГ на Нижнекамской ГЭС

Первичная схема с неполнофазными коммутациями генераторных выключателей ВГ 3 и ВГ 4	Полярность включения ИЗГ (прямая или обратная)	Опыты	Поведение комплектов ЗЗГ и ИЗГ									
			ГГ №3		ГГ №4		ГГ №1		ГГ №2			
			ЗЗГ	ИЗГ	ЗЗГ	ИЗГ	ЗЗГ	ИЗГ	ЗЗГ	ИЗГ		
			В Н		В Н		В Н		В Н			
ГГ №1, №2 и №4 отключены, ГГ №3 на холостом ходу	включение фазы А включение фазы А и В отключение фазы А и В отключение фазы А	30	+	-	-							
		31	-	-	-							
		32	+	-	-							
		33	-	-	-							
ГГ №4 отключен, ГГ №1 и №2 включены, ГГ №3 на холостом ходу	включение ф А включение ф А и В отключение ф А и В отключение ф А	34	+	-	+			+	-	+	+	
		35	-	-	-			-	-	-	-	
		36	+	-	-			+	-	-	+	-
		37	-	-	-			-	-	-	-	-
ГГ №1 и №2 включены, ГГ №3 и №4 на холостом ходу	включение ф А включение ф А и В отключение ф А и В отключение ф А	38	+	-	-	+	-	-	+	-	-	
		39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		40	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-
		41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ГГ №1 и №2 отключены, ГГ №3 и №4 на холостом ходу	включение ф А включение ф А и В отключение ф А и В	42	+	-	-	+	-	-				
		43	-	-	-	-	-	-				
		44	+	-	-	+	-	-				



Индуктивность нулевой последовательности (по паспортным данным) гидрогенератора типа СВ мощностью 91.8 МВА

$$L_{го} = \frac{X_0}{\omega} = \frac{0,095 * 2,07}{2\pi * 50} = 0,627 * 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Волновое сопротивление ГГ при емкости его фазы  $C_{фz}$ , равной, по замерам эксплуатации, 0,911 мкФ, составляет

$$Z_{вг} = \sqrt{\frac{L_{го}}{C_{гф}}} = 26,2 \text{ Ом.}$$

Если же принять по паспортным данным емкость фазы  $C_{фг}$  равной 0,61 мкФ, то  $Z_{вг}=32$  Ом. Оба результата соизмеримы с данными [5], где для гидрогенератора мощностью 90 мВА принято значение  $Z_{вг}$ , примерно равное 30 Ом.

По данным [5],  $\tau_r$  для гидрогенератора мощностью 264,7 МВА составляет примерно 13 мкс, а для гидрогенератора мощностью 67 МВА - 15 мкс. Поэтому для гидрогенератора 91,8 МВА Нижнекамской ГЭС можно принять  $\tau_r$  равным 14,5 мкс.

Измерения волновых сопротивлений повышающих трансформаторов ГЭС со стороны обмоток НН, выполненные СибНИИЭ [199], дали следующие результаты: 400 - 430 Ом на фазу для трансформатора мощностью 60 МВА и 340 - 360 Ом на фазу для трансформатора мощностью 275 МВА. Экстраполируя эти значения для трансформатора мощностью 400 МВА на Нижнекамской ГЭС, можно принять его волновое сопротивление равным 300 Ом на фазу.

Исследования частотных характеристик входных сопротивлений генераторов и трансформаторов, выполненные СибНИИЭ [199], показали что в частотном диапазоне ОНМ ИЗГ волновое сопротивление гидрогенератора оказывается выше на 30 - 50% значений волновых сопротивлений гидрогенераторов, приведенных в [5, 199, 200]. Что касается трансформатора связи 275 мВА, то вычисленные значения  $Z_{em}$  в диапазоне частот от 2 до 30 кГц равномерно убывают со 169 до 128 Ом. Свыше 30 кГц  $Z_{вт}$  носит колебательный характера, и около 90-100 кГц резко возрастает, достигая на порядок больших

значений в диапазоне 100 - 150 кГц. Лишь приближаясь к частоте 200 кГц, значения  $Z_{вт}$  возвращаются к первоначальным.

При анализе распределения напряжений по фазам генератора в месте подключения источника к одной из фаз этого генератора исследователями СибНИИЭ был сделан вывод [199], что из-за междуфазных емкостных связей напряжение на неповрежденных фазах составляет около 10 % от напряжения в фазе с источником. Токи и напряжения фаз и функционально связанные с ними значения волновых сопротивлений разлагаются на междуфазные, междуобмоточные и нулевые составляющие. Это подтверждают и результаты анализа осциллограмм [199] напряжений и токов фаз гидрогенераторов Новосибирской и Братской ГЭС. На этих осциллограммах заметны импульсы с полярностью, противоположной по отношению к исходному импульсу, характеризующие "быстрые" междуфазные и междуобмоточные составляющие. После прихода более "медленных" составляющих полярность импульса восстанавливается. При этом на фазе генератора, подключенной к источнику, наблюдается плавное нарастание величины напряжения. При подключении источника ко всем трем фазам составляющие междуфазных и междуобмоточных каналов становятся равными нулю и поэтому напряжение характеризуется устойчивым характером, что позволяет более точно определить волновое сопротивление гидрогенератора.

#### **5.4.2. Расчеты переходных процессов в схеме блока гидрогенератор – трансформатор при ОЗЗ в обмотках статора гидрогенератора**

Расчетная точка ОЗЗ выбрана на фазных выводах гидрогенератора (например, на фазе А). Это связано с тем, что при этих ОЗЗ достигаются максимальные значения анализируемых токов и напряжений, влияющие на селективность и чувствительность ИЗГ.

Рассмотрим схему замещения рис. 5.3 для ОЗЗ на фазном выводе А гидрогенератора.

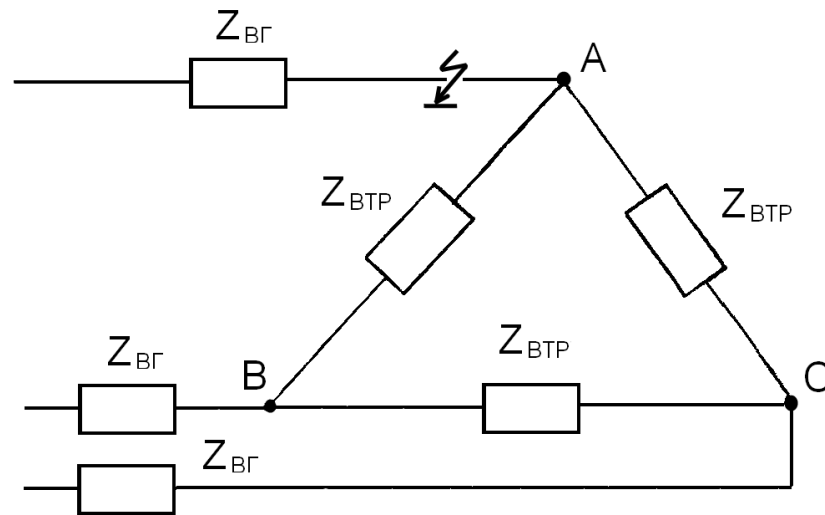


Рис. 5.3. Схема замещения для ОЗЗ на главных выводах ГГ

Токи в неповрежденной и поврежденной фазах можно определить волновым методом [205]. Если принять за единицу напряжение дополнительного режима в поврежденной фазе генератора, то тогда ток в поврежденной фазе А

$$i_A = \frac{1}{0,5Z_{\text{ВТР}}} = \frac{2}{Z_{\text{ВТР}}}.$$

С учетом значения коэффициента преломления волны (при переходе ее из обмотки НН трансформатора связи в фазную обмотку гидрогенератора) ток в неповрежденных фазах В и С

$$i_B = i_C = \frac{K_{np}U}{Z_{\text{ВГ}}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{Z_{\text{ВТР}}}{2Z_{\text{ВГ}}}\right) Z_{\text{ВГ}}} = \frac{1}{Z_{\text{ВГ}} + \frac{Z_{\text{ВТР}}}{2}}.$$

Тогда ток в ОНМ ИЗГ равен

$$i_a + i_B + i_C = \frac{2}{Z_{\text{ВТР}}} - \frac{2}{Z_{\text{ВГ}} + \frac{Z_{\text{ВТР}}}{2}}. \quad (5.3)$$

При этом ток в поврежденных фазах появляется только после прохождения волной фазной обмотки НН трансформатора. Поскольку для ГЭС типа Нижнекамской отношение  $Z_{\text{ВТР}}/Z_{\text{ВГ}}=10$  ( $Z_{\text{ВГ}}=30$  Ом;  $Z_{\text{ВТР}}=300$  Ом), то в схеме одиночного блока в моменты времени до перехода тока на неповрежденные фазы сумма токов фаз в ОНМ ИЗГ определяется током поврежденной фазы,

равным  $1/(5Z_{вг})$ , т.е. в 5 раз меньшим значением, чем при подключении двух генераторов. После перехода на неповрежденные фазы сумма токов фаз становится равной  $-\frac{1}{7,5Z_{вг}}$ , т.е. в 1,5 раза меньше, чем на первом интервале процесса.

Если сопоставить значения тока по выражению (5.3) для различных соотношений  $Z_{втр}$  и  $Z_{вг}$  (табл. 5.3), то можно видеть, что для интервала времени до первого перехода волны на неповрежденные фазы, характеризующегося наличием селективности ИЗГ, наилучшие условия по чувствительности обеспечиваются для ГЭС с более близкими значениями волновых сопротивлений повышающего трансформатора и гидрогенератора. Однако условия отстройки от процесса во втором интервале времени (после первого перехода волны на неповрежденные фазы), на котором нарушается селективность ИЗГ, не носят устойчивого характера в зависимости от соотношений указанных сопротивлений.

Таблица 5.3

$Z_{втр}/Z_{вг}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$3i_0 * Z_{вг}$ 1 инт.	1	0,67	0,5	0,4	0,33	0,285	0,25	0,222	0,2
$3i_0 * Z_{вг}$ 2 инт.	0	-0,133	-0,167	-0,171	-0,167	-0,159	-0,15	-0,142	-0,133

Выбор параметров срабатывания ОНМ ИЗГ в [5, 201] проводился по схеме блока с несколькими гидрогенераторами без учета влияния обмотки НН трансформатора, соединенной в треугольник. Учет обмотки трансформатора, соединенной в треугольник, как показали расчеты (Приложение 9) и анализ ряда осциллограмм [199], вносит существенные особенности в распределение волн по фазам генератора. Это выражается в появлении токов (при ОЗЗ) или напряжений (при отключениях фаз) по фазам, различающихся по знаку. Наибольшее влияние в схеме блока один генератор - трансформатор оказывает быстроменяющийся характер изменения тока нулевого канала при внутреннем ОЗЗ, контролируемом ОНМ ИЗГ. Это подтверждают осциллограммы тока и напряжения на главных выводах генератора Братской ГЭС, работающего в

режиме блока с трансформатором, при внешних и внутренних ОЗЗ (рис. 5.4 и 5.5).

На осциллограмме (рис. 5.4) в начале процесса четко видны высокочастотные колебания в токе ОЗЗ, что вполне соотносится с приведенными расчетными данными (Приложение 7). Иной характер носят колебания тока при внешних ОЗЗ (рис. 5.5).

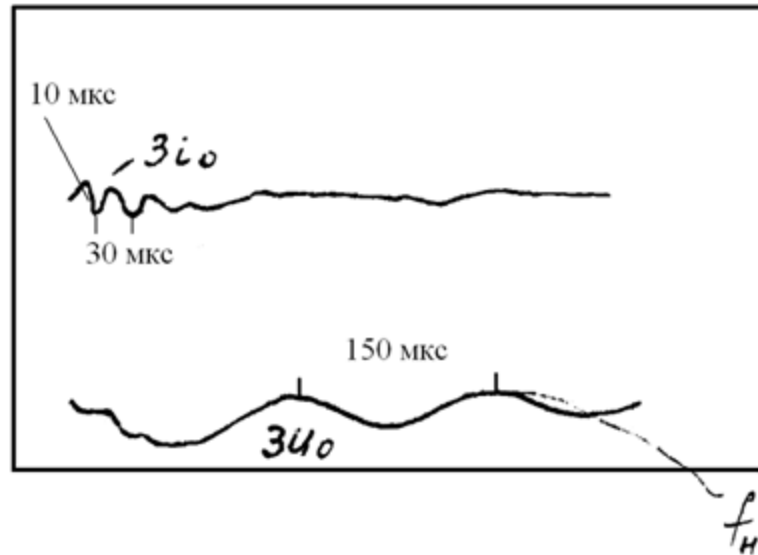


Рис. 5.4. Формирование тока и напряжения в нулевом канале в схеме блока один генератор – трансформатор при внутреннем ОЗЗ: развертка  $T=400$  мкс; период сигнала тока  $T_T \approx 30$  мкс; период сигнала напряжения  $T_H \approx 150$  мкс;

$$f_T = \frac{1}{T_T} = \frac{1}{30 \cdot 10^{-6}} = 33.3 \text{ кГц}; \quad f_H = \frac{1}{T_H} = \frac{1}{150 \cdot 10^{-6}} = 6.67 \text{ кГц}.$$

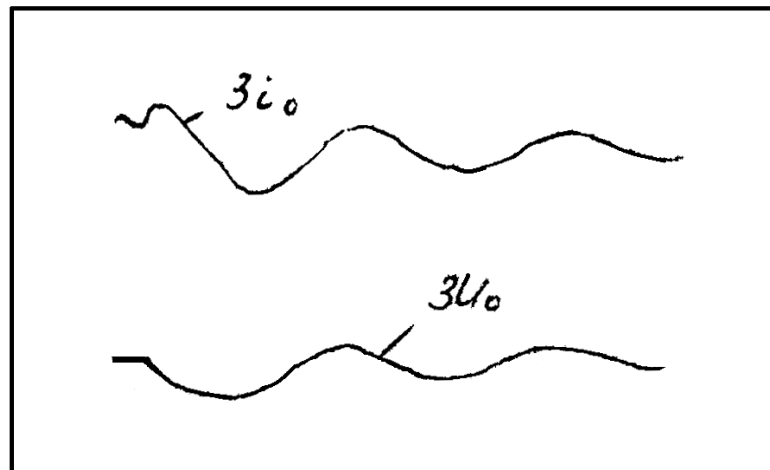


Рис. 5.5. Формирование тока и напряжения в нулевом канале в схеме блока один генератор – трансформатор при внешнем ОЗЗ: развертка  $T=400$  мкс

В Приложении 7 приведены результаты расчета ОЗЗ в той же расчетной точке операторным методом. Результаты расчета также указывают на знакопеременный характер переходного процесса в токе ОЗЗ, частота которого соответствует диапазону частот, используемых ОНМ ИЗГ.

#### **5.4.3. Модернизированная схема ИЗГ, повышающая селективность работы защиты при ОЗЗ в обмотках статора гидрогенератора, работающего в блоке с повышающим трансформатором**

Результаты экспериментальных исследований и расчетов, приведенные в разделах 5.3 и 5.4.2 диссертации, показали, что при ОЗЗ в зоне защиты ГГ, работающего в блоке с повышающим трансформатором или на холостом ходу, ИРМ не действовало на отключение поврежденного генератора из-за особенностей распространения сигналов в электрической цепи «фазы генератора, соединенные в звезду, - фазы повышающего трансформатора, соединенные в треугольник». Для отключения генератора в этом режиме в устройстве могла быть использована цепь *Срабатывание без КВ* (или без ИРМ) (рис. 5.1), представляющая собой выход реле напряжения *КВ* на отключение (через элемент времени) и предназначенная для выполнения резервной ступени устройства ИЗГ при отказах либо ИРМ данного устройства, либо ИЗГ смежных генераторов. Данная цепь, однако, в эксплуатации не использовалась во избежание неселективного отключения генераторов при весьма частых кратковременных ОЗЗ на шинах генераторного распределительного устройства.

Решение задачи обеспечения чувствительности и селективности ИЗГ в режимах работы генератора укрупненного блока при отключении других генераторов этого же блока основывалось на восстановлении работоспособности цепи *Срабатывание без КВ* при обязательном запрете действия по цепи *Срабатывание без КВ* при ОЗЗ вне зоны защиты генератора с целью селективного отключения поврежденного ГГ при кратковременном (в

течение примерно 15 мкс – рис. 5.4) формирования мощности переходного процесса при ОЗЗ в зоне ИЗГ. В случае ОЗЗ в обмотке статора ГГ из-за отсутствия сигнала с выхода  $D4$  блокировка цепи *срабатывание без КВ* не производится и, следовательно, нет препятствий для отключения поврежденного ГГ от  $KV$ .

На рис. 5.6 представлен фрагмент функциональной схемы устройства ИЗГ, в части которого произведена модернизация алгоритма его работы. Для повышения эффективности функционирования ИЗГ в схему устройства введены три дополнительных элемента - два одновибратора и один формирователь импульсов. Первый введенный одновибратор  $DT4$  выполняет функции согласования действий цепей срабатывания от  $KV$  и цепей блокирования от ИРМ. Длительность  $T_{уд1}$  временно устойчивого состояния одновибратора  $DT4$  должна (для надежного отключения) превышать время срабатывания выходного реле времени  $KT1$ , равное 2,8 с, выбранное по условию резервирования отключения поврежденных генераторов. В связи с этим  $T_{уд1}$  выбрана равной 3,5 с. Второй введенный одновибратор  $DT5$  выполняет функции блокирования цепи *Срабатывание без КВ* при замыкании вне зоны защиты ИЗГ. Длительность его временно устойчивого состояния  $T_{уд2}$  выбрана равной 7 с для обеспечения надежного блокирования действия одновибратора  $DT4$ .

Формирователь импульсов  $D7$  требуется для обеспечения однократного пуска РН по цепи *Срабатывание без КВ* при внешних ОЗЗ на ошиновке ГРУ, когда эксплуатацией не допускаются отключения генераторов в процессе поиска указанного замыкания. При этом обеспечивается надежная блокировка  $DT4$  от  $DT5$  независимо от продолжительности внешнего ОЗЗ. Длительность импульса  $D7$  (как и для других одновибраторов в схеме ИЗГ) выбрана равной 5 мс. Построение принципиальной схемы  $DT4$  и  $DT5$  выполнено аналогично с построением схем  $DT1$ ,  $DT2$  для обеспечения однотипности выбора рабочих элементов.

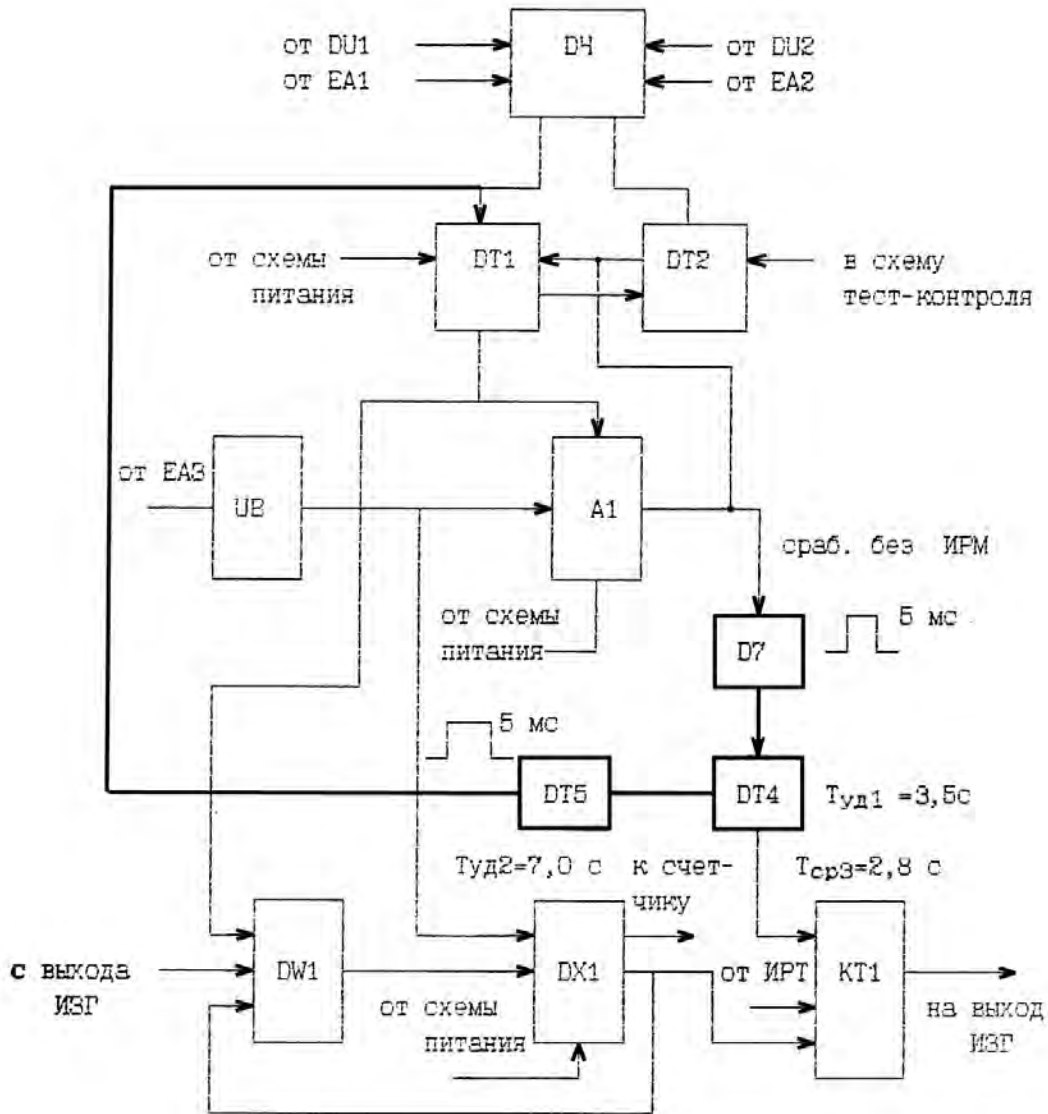


Рис. 5.6. Фрагмент функциональной схемы ИЗГ с введенными дополнительными элементами  $D7$ ,  $DT4$  и  $DT5$  и связями (выделено)

Испытания, проведенные на Нижнекамской ГЭС, результаты которых отражены в Техническом акте и Протоколе испытаний (Приложение 10), показали, что модернизированная схема ИЗГ вполне удовлетворяет предъявляемым требованиям по селективности и чувствительности защиты и может быть рекомендована для реализации на всех комплектах ИЗГ.

## 5.5. Выводы

1. Режимы двухфазных включений и однофазных отключений при любом числе параллельно работающих с сетью генераторов не приводит к



формированию  $3U_0$  и  $3i_0$ , способных привести к срабатыванию защиты от замыканий на землю в цепи обмотки статора генератора - ЗЗГ и ИЗГ.

2. Режимы однофазных включений и двухфазных отключений приводили к смещению нейтрали и формированию  $3U_0$  на уровне 10-15 В, достаточного для ложного срабатывания органа ЗЗГ "вдали нейтрали".

3. Анализ результатов расчетов показал, что при ОЗЗ в зоне ИЗГ на выводах генератора в схеме одиночного блока сумма фазных токов нулевого канала в отличие от суммы фазных напряжений носит высокочастотный знакопеременный характер. Эти данные хорошо соотносятся с экспериментальными данными, указывающими на знакопеременный характер тока в нулевом канале, определяемый собственными частотами цепи «фазы генератора, соединенные в звезду, - фазы повышающего трансформатора, соединенные в треугольник».

4. Выполнена модернизация функциональной схемы устройства ИЗГ, в части повышения надежности его работы защиты при ОЗЗ в обмотках статора гидрогенератора, работающего в блоке с повышающим трансформатором. Результаты испытаний, проведенные на Нижнекамской ГЭС показали, что модернизированная схема ИЗГ вполне удовлетворяет предъявляемым требованиям по селективности и чувствительности защиты и может быть рекомендована для реализации на всех комплектах ИЗГ.

## **ГЛАВА 6. ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ВОЛНОВЫЕ МЕТОДЫ**

### **6.1. Опыт эксплуатации волновой быстродействующей высокочастотной направленной релейной защиты ВЛ СВН**

#### **6.1.1. Анализ эксплуатации волновой быстродействующей высокочастотной направленной релейной защиты ВЛ СВН**

Панели волновой направленной высокочастотной защиты после завершения испытаний на ЭДМ (см. главу 1 диссертации) были включены на ВЛ 500 кВ Киндери – Заинская ГРЭС. Анализ работы защиты выполнялся с помощью устройств регистрации [206], фиксировавших с точностью до 10 мс состояние выходных цепей органов защиты и положение контактов выключателей различных присоединений ПС Киндери и Заинской ГРЭС. Исследованиям и сопоставлениям подвергнуто несколько тысяч данных [207], в том числе при различных КЗ, включая неуспешные АПВ. Эти данные сравнивались с оперативными данными по аварийным отключениям и ремонтным переключениям в электрических сетях. Действие органов блока контроля грозовых возмущений сопоставлялись, кроме того, с данными метеостанций.

Результаты функционирования волновой защиты на ВЛ Киндери – Заинская ГРЭС оказались весьма успешными. Так, при КЗ, вызванном замыканием фазы А защищаемой ВЛ на корпус землечерпалки на расстоянии 164 км от ПС Киндери, ОНМ защиты сработали на отключение, а избиратель поврежденных фаз указал на повреждение фазы А. При этом указанные органы защиты сработали на 20 мс быстрее, чем произошел пуск дифференциально-фазной защиты (ДФЗ), являющейся основной защитой ВЛ Киндери-Заинская ГРЭС, и на 30 мс быстрее, чем произошло действие ДФЗ на отключение. При другом КЗ, вызванном замыканием фазы В ВЛ Киндери –

Заинская ГРЭС на землю во время сильного ветра, на отключение сработали органы ОНМ, реагирующие на токи и напряжения первого волнового канала, а также сработал избиратель фазы В. Срабатывания органов ОНМ, реагирующих на токи и напряжения второго волнового канала, не произошло в силу естественного отсутствия в них аварийных токов и напряжений при повреждении фазы В (см. главу 1 диссертации). При этом измерительные органы волновой защиты сработали на 20-30 мс быстрее, чем произошел пуск ДФЗ.

Хронология срабатываний волновой защиты при КЗ позволила получить дополнительные сведения о способности ОНМ реагировать при некоторых аварийных режимах. Так, одно из неуспешных АПВ фазы В ВЛ Киндери – Заинская ГРЭС сопровождалось действием ОНМ защиты с обеих сторон на отключение, поскольку повторный пробой изоляции ВЛ возник спустя примерно 2 секунды после включения фазы, т.е. когда переходный процесс, вызванный коммутацией фазы В, завершился. Также работала защита при падении фазы А этой же ВЛ на заснеженную землю, сопровождавшимся ОАПВ и завершившимся устойчивым КЗ.

Наиболее интенсивным испытаниям подверглась защита во время одного из зимних буранов, когда в течение часа на защищаемой линии в 40 км от ПС Киндери произошло семь последовательных КЗ. Защита правильно срабатывала и при других КЗ на линии, среди которых были 8 однофазных КЗ, вызванных сильными порывами ветра, падением троса на одну из фаз линии, касанием порослей и передвижными транспортными средствами. Зафиксирован исключительный случай падения на провода защищаемой ВЛ легкомоторного самолета, вызвавшего двухфазное КЗ на этой ВЛ с переходом в трехфазное КЗ. ОНМ и ИПФ волновой защиты при этом четко сработали, причем на 40 мс быстрее, чем измерительные органы ДФЗ.

Преимущества волновой защиты ВЛ ВН и СВН по сравнению с традиционными защитами, действующими на этих линиях, многократно подтверждены данными автоматических регистраторов, указывающими (табл.

6.1), что время срабатывания волновой защиты на отключение на 20-40 мс меньше, чем время срабатывания самой быстродействующей защиты ДФЗ, использующей для своего функционирования токи и напряжения промышленной частоты.

Таблица 6.1

Срабатывание ОНМ волновой защиты и наиболее быстродействующих измерительных органов ДФЗ ВЛ 500 кВ Киндери-Заинская ГРЭС при внутренних и внешних КЗ

Расстояние от ПС Киндери до места КЗ, км	Вид повреждения	Работа ОНМ волновой защиты	Работа измерительных органов ДФЗ	Опережающее действие ОНМ мс
360	Неуспешное включение фазы	да	нет	
665	Падение троса на фазу	да	нет	
570	Повреждение фазы вблизи шин электростанции	да	да	60
215	Повреждение фазы вблизи шин подстанции	да	да	20
440	Низовой пожар	да	да	50
510	Дуговое перекрытие	да	нет	
530	Падение троса на фазу	да	нет	
715	Перекрытие изоляции фазы стрелой подъемного крана	да	нет	
750	Дуговое перекрытие	да	нет	
530	Перекрытие фазы металлической конструкцией	да	нет	
750	Дуговое междуфазное перекрытие	да	нет	
470	Дуговое перекрытие фазы на линию низшего напряжения	да	да	20
750	Дуговое перекрытие в грозу	да	нет	
300	Дуговое перекрытие	да	да	20
250	Дуговое перекрытие двух фаз на землю	да	да	20

550	Повреждение фазы вблизи шин электростанции	да	нет	
208	Повреждение фазы вблизи шин электростанции	да	да	20
470	Повреждение фазы ввода автотрансформатора у шин подстанции	да	нет	
500	Двукратное дуговое замыкание фазы	да	нет	
570	Повреждение фазы у шин атомной электростанции	да	нет	
580	Металлическое замыкание фазы на шинах подстанции	да	да	50
208	Замыкание фазы на шинах тепловой электростанции	да	да	20
208	Замыкание фазы на шинах тепловой электростанции	да	да	20
500	Дуговое замыкание фазы	да	да	60
570	Повреждение фазы на шинах ГЭС	да	нет	
580	Обрыв фазы с замыканием на землю на шинах подстанции	да	да	30
600	Два последовательных дуговых замыкания на параллельных линиях	да	нет	
550	Дуговое замыкание в грозу	да	нет	
520	Дуговое замыкание в грозу	да	нет	
600	Повреждение фазы линии с неуспешным АПВ	да	нет	
450	Перекрытие фазы линии стрелой подъемного крана	да	нет	
1000	Повреждение на шинах мощной тепловой электростанции	да	нет	
510	Повреждение фазы одной из параллельных линий	да	нет	
570	Дуговое замыкание в грозу	да	нет	
208	Повреждение фазы на шинах тепловой электростанции	да	да	20

770	Повреждение фазы у шин подстанции	да	нет	
260	Повреждение фазы на шинах ГЭС с неуспешным АПВ	Да	да	20
260	Неуспешное включение	да	да	20
260	Перекрытие фазы на шинах ГЭС	да	да	20
570	Повреждение фазы на шинах ГЭС	да	нет	
475	КЗ на шинах тепловой электростанции	да	нет	
370	КЗ у шин подстанции	да	да	20
490	Дуговое замыкание во время грозы на одной из параллельных линий вблизи шин подстанции	да	да	20
770	КЗ на шинах ГЭС	да	нет	
490	Дуговое замыкание фаз вблизи шин подстанции	да	нет	
	Неуспешное АПВ	да	да	30
500	Повреждение фазы на шинах подстанции	да	нет	
570	Перекрытие фазы на шинах подстанции	да	нет	
570	Перекрытие фазы на шинах подстанции	да	нет	
750	Повреждение фазы выключателя на шинах АЭС	да	нет	
470	Двукратное дуговое замыкание фазы на одной из параллельных линий во время грозы	да	нет	
410	Замыкание на шинах промежуточной подстанции	да	нет	
410	Неуспешное АПВ	да	да	60
475	Повреждение фазы на шинах тепловой электростанции	да	нет	
305	Дуговое замыкание на линии	да	да	30
310	Дуговое замыкание линии на землю через упавшее дерево	да	да	30

575	Повреждение фазы на шинах ГЭС	да	нет	
260	Дуговое замыкание на линии	да	да	30
750	Металлическое КЗ на шинах ГЭС	да	нет	
770	Дуговое замыкание во время грозы на линии вблизи шин АЭС	да	нет	
450	Дуговое замыкание	да	нет	
550	Многократное перекрытие фазы на землю	да	нет	
800	Падение троса на фазу линии	да	нет	
440	Дуговое замыкание на линии	да	нет	
250	Дуговое замыкание на линии	да	да	20

Основные измерительные органы ОНМ четко срабатывали на блокировку (в том числе при действии ВЧ блокировки защиты) при многочисленных коммутациях и внешних КЗ. Большая часть этих срабатываний относилась к КЗ на ЛЭП 110 - 500 кВ в сети, примыкающей к защищаемой линии. Волновая направленная высокочастотная защита ни разу не сработала ложно на отключение в различных режимах работы защищаемой ВЛ. Возможность сопоставления даты и времени срабатывания ОНМ защиты с данными повреждений и оперативных переключений ВЛ позволила определить дальности ее действия. Так, при пороговых уровнях ОНМ (5% от номинального напряжения на блокировку и 10% на отключение) удалось зафиксировать действие в защищаемом направлении при ряде КЗ на ВЛ 500-750 кВ, находящихся на расстоянии до 1000 км от защищаемой ВЛ. Сопоставление информации регистраторов с оперативными данными указывает, что ни один измерительный орган других защит сети не имел такой высокой чувствительности (см. табл. 6.1). Это указывает на существенные преимущества измерительных органов ОНМ волновой защиты ВЛ не только по быстрдействию, но и по чувствительности.

Наиболее активно запрещающий орган  $KV_0$  блока контроля грозовых возмущений срабатывал во время гроз в апреле - мае и в августе - октябре. В жаркое время года доля его срабатываний снижалась, несмотря на резкое возрастание числа гроз. Анализ климатических факторов в зоне прохождения трассы ВЛ Киндери – Заинская ГРЭС указывает, что в жаркий период лета погода в июне и июле характеризовалась высокой дневной температурой (до 30 градусов и выше), и поэтому грозы были преимущественно тепловыми, а не фронтальными, как весной и осенью. Тепловые грозы, как известно, характеризуются меньшими уровнями переносимых зарядов, а значит и меньшим уровнем наводимых на ВЛ потенциалов [87]. Опыт работы защиты в сезоны с меньшим различием температур характеризуется более равномерным числом срабатываний запрещающего органа. При этом за время наблюдений с февраля 1987 г. по июнь 1995 г. отмечен единственный случай, когда при грозовом ударе сработал ОНМ волновой защиты, однако его действие на отключение было заблокировано блоком контроля грозовых возмущений. Таким образом, практически удалось подтвердить, что при высоком быстродействии работы измерительных органов волновой защиты обеспечивалась надежность ее действия в режимах, когда грозовые удары не приводят к возникновению КЗ на ВЛ.

Действие избирателя поврежденных фаз волновой защиты также характеризовалось надежной работой. При этом в процессе эксплуатации выявилась особая функция избирателя, заключающаяся в способности контроля длительности сигналов переходного процесса, в отличие от ОНМ не требующая контроля соотношения знаков токов и напряжений на относительно коротком интервале в диапазоне в несколько сотен микросекунд. При введении в ИПФ функции контроля длительности сигналов существенно снижается вероятность срабатываний волновой направленной высокочастотной защиты при грозовых разрядах, не приводящих к КЗ.



### **6.1.2. Корректировка схемы волновой защиты по результатам опыта ее эксплуатации**

Положительный опыт работы волновой защиты ВЛ СВН на ВЛ 500 кВ Киндери – Заинская ГРЭС позволил внести ряд изменений в структуру измерительных органов и схемы защиты. Это в первую очередь коснулось выполнения органов направления мощности  $KW$  и избирателя поврежденных фаз АК1, а также блока контроля грозových возмущениях.

В находившемся в эксплуатации на ВЛ 500 кВ Киндери-Заинская ГРЭС устройстве волновой защиты действие ОНМ на отключение или блокировку (рис.1.37) дополнялось действием триггерного блока АВ2, предназначенного для контроля уровня тока в соответствующем волновом канале с целью повышения помехоустойчивости ОНМ. Опыт эксплуатации указал, что ОНМ работали вполне устойчиво, а действие триггерного блока принципиально не могло быть согласовано с действием ОНМ из-за различия характеристик. В связи с этим триггерный блок АВ2 был исключен из схемы защиты, что показано на рис. 6.1 линиями разрыва.

Составной частью волновой защиты является (рис. 1.42) собственный быстродействующий избиратель поврежденных фаз (ИПФ, АК1), необходимость в котором связана с обеспечением соизмеримости быстродействия ОНМ и ИПФ. Действие защиты на трехфазное отключение определялось при несрабатывании ИПФ. В процессе эксплуатации выявились важные свойства ИПФ (см. раздел 6.1.1), заключающиеся том, что ИПФ, являясь неотъемлемой частью волновой защиты, кроме выбора поврежденных фаз способен обеспечить повышение надежности работы защиты в условиях переходных процессов, выполняя по существу функции пускового органа защиты.

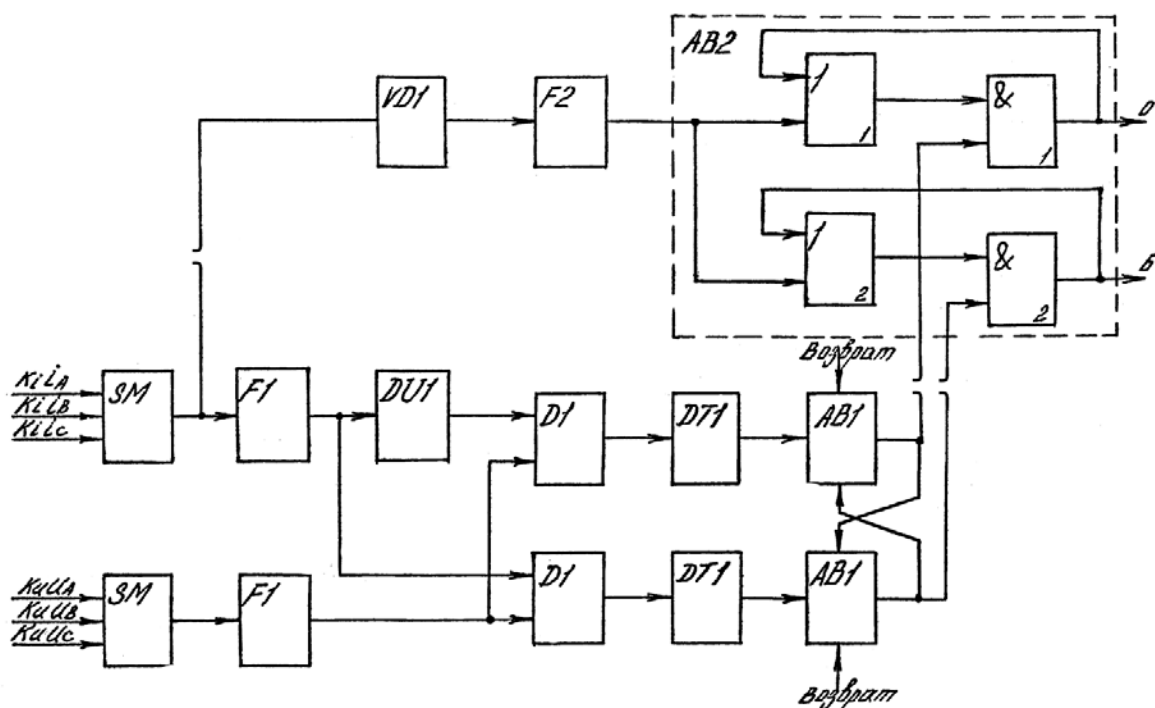


Рис. 6.1. Модернизированная функциональная схема органов направления мощности KW1, KW2

Использование принципа сравнения токов поврежденных фаз по величине позволяет выполнить ИПФ (в отличие от ОНМ) с охватом практически только защищаемой и части смежных линий. Тем самым ограничивается вероятность излишних или ложных срабатываний защиты на отключение при внешних удаленных КЗ и коммутациях линий.

Еще одной особенностью ИПФ, рассматриваемой в качестве неотъемлемой части волновой защиты, является (рис. 1.42) наличие в его дешифраторе элемента ИЛИ-НЕ, взаимодействующего с вышеуказанными тремя элементами И. При срабатывании одного из компараторов Е и несрабатывании элементов И выявляется однофазное КЗ или прорыв молнии сквозь тросовую защиту. При срабатывании двух компараторов Е и элементов И выявляется междуфазное КЗ.

Отстройка от грозовых возмущений, не связанных с КЗ, может производиться ИПФ путем регулирования времени заряда интеграторов DJ. В этом случае указанный элемент ИЛИ-НЕ может не потребоваться.

Следовательно, при такой логике работы дешифратора удастся выявить грозовые прорывы, не приводящие к КЗ

В блоке контроля защиты при грозовых возмущениях (рис. 1.38), функция отстройки от грозовых возмущений, вызванных прорывами, реализовалась запрещающим органом  $KV_0$ , который в первоначальной структуре защиты реагировал на уровень напряжения нулевого канала. Однако с учетом опыта эксплуатации функции запрета действия ОНМ в грозовой ситуации были заменены на функции разрешения, которые стал выполнять ИПФ (рис. 1.42), различающий междуфазные КЗ от прорывов молнии сквозь тросовую защиту и от индуктированных грозовых разрядов. Вследствие этого орган  $KV_0$  был исключен из схемы блок контроля защиты при грозовых возмущениях (рис. 6.2).

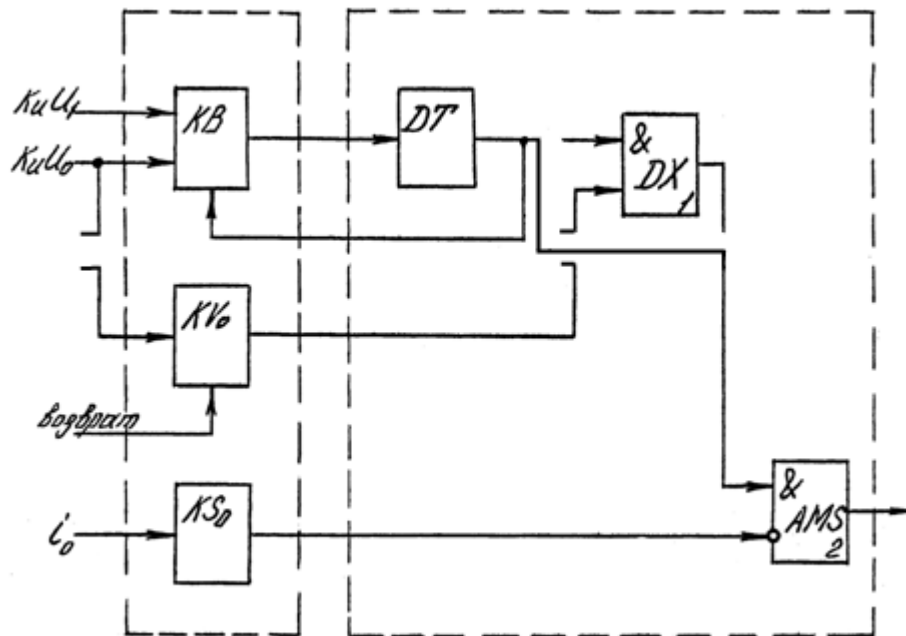


Рис. 6.2. Модернизированная функциональная схема блока контроля защиты при грозовых возмущениях

В целом подтвержден положительный опыт эксплуатации волновой защиты как в части селективности и быстродействия, так и дальности ее действия - порядка нескольких тысяч километров. Основными преимуществами отечественной разработки по сравнению с зарубежными является [5] более

полноценный учет влияния грозовых возмущений, не сопровождаемых повреждениями, на функционирование защит, а также более длительный и разнообразный опыт эксплуатации этой защиты, оказывающий влияние на дальнейшее совершенствование ее принципов.

### **6.1.3. Функционирование защиты в цикле ОАПВ**

Традиционный комплекс устройств РЗ и автоматики ВЛ 500 кВ и выше выполняется с учетом функционирования этих устройств как в полнофазных, так и в неполнофазных режимах [1, 208], в том числе при ОАПВ отключившейся фазы. Техническими решениями предусматривается ряд мероприятий, позволяющих обеспечить функционирование в цикле ОАПВ как защит с абсолютной селективностью (перевод ВЧ направленной защиты в дифференциально-фазный режим), так и неселективное действие релейной защиты (например, вывод на самостоятельное действие избирательных органов поврежденных фаз в цикле ОАПВ).

Волновая направленная защита по сравнению с традиционными устройствами обладает специфическими особенностями, заключающимися в необходимости контроля начальной стадии переходного процесса при возникновении КЗ, требующей фиксации срабатывания органов направления мощности, что при использовании ОАПВ приобретает принципиальное значение для ее функционирования. При этом действие на отключение разрешается в течение ограниченного времени, достаточного для отключения выключателей, а возврат защиты в исходное состояние осуществляется автоматически через заданное время, определяемое интенсивностью переходного процесса. Исходя из сложившейся практики и требований к РЗ ВЛ, рассматриваемая защита, как и традиционные устройства, при использовании ее в качестве основной быстродействующей защиты от всех видов КЗ должна правильно функционировать при возникновении повреждений в

неполнофазных режимах ВЛ, а также при повторном включении отключавшейся фазы.

В опытном образце защиты изначально была предусмотрена возможность установки одного из четырех значений времени возврата в исходное состояние (0,5 с, 1 с, 1,5 с и 2 с). Однако даже минимальное из них (0,5 с) составляет половину длительности бестоковой паузы ОАПВ. Поэтому в случае возникновения КЗ в течении времени возврата ОНМ волновая защита будет отказывать в действии. Следует отметить, что опыт эксплуатации волновой защиты на ВЛ Киндери – Заинская ГРЭС позволил оптимизировать время возврата ее ОНМ и, кроме того, уточнить реальные времена между КЗ на разных близко расположенных объектах. В течение всего периода эксплуатации зафиксировано минимальное время между двумя КЗ на смежных ВЛ 110 кВ, прилегающих к сети 110 кВ ПС Киндери, равное 0,4 с. В связи с этим время повторной готовности импульсных органов было снижено с 0,5 с до 0,1 с и, как показали данные регистраторов, без ухудшения надежности работы защиты при всех внешних КЗ, которые в период наблюдения оказались однофазными КЗ на землю. Для сравнения, при испытании защиты на ЭДМ длительность переходного процесса в цепях ОНМ и других органах защиты, фиксирующих волновые переходные процессы при однофазных КЗ на землю, не превышала 0,07 – 0,08 с.

Сокращение времени возврата ОНМ после отключения поврежденной фазы при однофазных КЗ может быть достигнуто при учете того, что свободные периодические составляющие при однофазных КЗ и коммутациях поврежденной фазы характеризуются (вследствие влияния поверхностного явления в земле) более высокой степенью затухания по сравнению с свободными периодическими составляющими при многофазных КЗ и коммутациях. Моделирование электромагнитных переходных процессов при однофазных КЗ показало, что постоянные времени затухания свободных периодических составляющих при отключениях фазы, определяемые входным сопротивлением  $2Z_{0\Sigma}(p)+Z_{1\Sigma}(p)$  комплексной схемы замещения, имели значения

порядка 0,03 – 0,05 с, снижающиеся с увеличением частоты и ростом переходного сопротивления в месте повреждения [5,47]. Следовательно, в неполнофазном режиме время возврата защиты в исходное состояние можно существенно сократить по сравнению с соответствующим временем при внешних КЗ или других возмущениях.

На рис. 6.3 приведена модернизированная функциональная схема быстродействующей направленной высокочастотной защиты ВЛ. Учитывая наличие на ВЛ других быстродействующих защит, работающих совместно с отдельным устройством ОАПВ, в рассматриваемой защите принят следующий алгоритм взаимодействия органов направления мощности и избирательных органов (см. Приложение 11). Цепь трехфазного отключения вводится только при фиксации избирательными органами многофазного КЗ. В случае однофазного КЗ защита действует на отключение одной фазы..

После отключения поврежденной фазы до возврата защиты в исходное состояние, когда ОНМ находятся в сработавшем состоянии, избирательные органы действуют самостоятельно в случае перехода КЗ в многофазное или возникновения КЗ на неотключенных фазах. При этом сигнал на отключение трех фаз будет формироваться блоком ОАПВ, так как прохождение сигнала на отключение трех фаз от органов направления мощности блокируется через 0,08 с после их срабатывания. Возврат органов направления мощности в исходное состояние означает, что при КЗ на неотключенных фазах защита становится селективной.

При повторном включении поврежденной фазы избирательный орган волновой защиты может сработать даже при одностороннем успешном включении под влиянием емкостного тока. Правильное действие защиты в этом режиме обеспечивается срабатыванием органов направления мощности на блокировку.

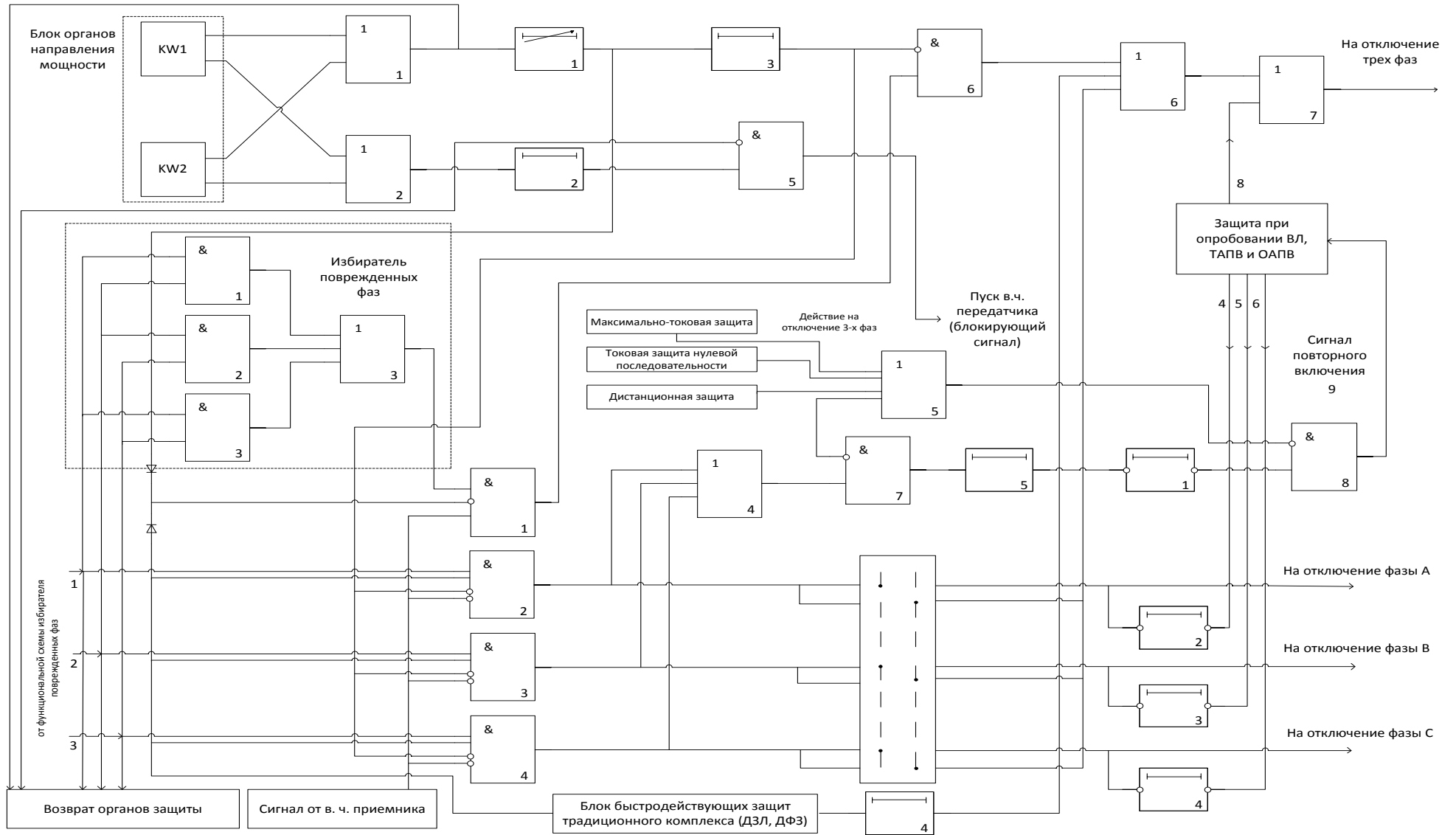


Рис.6.3. Модернизированная функциональная схема направленной высокочастотной защиты ВЛ

## 6.2. Опыт эксплуатации пускового органа на ВЛ СВН

Прошедший лабораторные испытания модуль органа КВ-1 (рис. 2.28) [91], предназначенный для выявления грозовых возмущений в устройствах ОМП для ППТ 1500 кВ Экибастуз-Центр, был включен в опытную эксплуатацию на линии 500 кВ Киндери – Заинская ГРЭС в составе панели волновой направленной ВЧ защиты (Приложение 12). Необходимость в такой установке была вызвана требованиями проверки функционирования ПО в условиях воздействия волновых переходных процессов, формирующихся при КЗ, грозовых возмущениях и других коммутациях на ВЛ СВН, характер развития которых имеет существенный ряд особенностей, присущих и ППТ при аналогичных явлениях. К ним можно отнести формирование систем волновых каналов по числу проводов и тросов ВЛ, наличие дискретного заземления тросов на опорах, сосредоточенных индуктивностей в узловых точках (местах установки ПО), которые позволяли бы использовать напряжения волн, распространяющихся по линиям СВН, как разновидность сигналов, моделирующих процессы в ППТ. Кроме того, благодаря наличию на ПС Киндери комплекса регистрации, контролирующего время срабатывания устройств релейной защиты и автоматики, а также многочисленными данными эксплуатации устройства волновой защиты, позволили автоматизировать процесс сбора информации о функционировании ПО, а также сопоставить эту информацию с реальными коммутациями в их последовательном развитии.

За время эксплуатации пускового органа КВ-1 на ВЛ Киндери - Заинская ГРЭС отмечено 19 его срабатываний (см. табл. 6.2). Причем лишь одно срабатывание было, по-видимому, связано с грозой (работал орган напряжения  $KV_0$  в блоке контроля грозовых возмущений волновой защиты). Все остальные действия КВ-1 сопряжены с коммутациями фаз выключателей 500 кВ защищаемой линии и линии Нижнекамская ГЭС - ПС Удмуртская. Так, три срабатывания приходится на пять включений фазы защищаемой линии при успешных ОАПВ, два - на три включения при неуспешных ОАПВ и одно - на



неуспешное трехфазное включение ВЛ (все со стороны ЗГРЭС). Кроме того, два срабатывания приходится на семь отключений фазы ВЛ Киндери – Заинская ГРЭС после КЗ и одно - на отключение выключателя на Заинской ГРЭС (с последующим его разрушением) при КЗ автотрансформатора. Остальные девять срабатываний КВ-1 связаны с коммутациями выключателей ВЛ 500 кВ Нижнекамская ГЭС - Удмуртская на Нижнекамской ГЭС. Причем одно срабатывание соответствует оперативному включению ВЛ, семь срабатываний определялись затянувшимся отключением линии после неуспешного ОАПВ, приведшего к повреждению выключателя, что подтвердило еще одно срабатывание КВ-1 при неуспешном опробовании ВЛ этим выключателем.

Следует отметить интересную деталь, касающуюся того, что два включения фазы ВЛ Киндери - ЗГРЭС при успешных ОАПВ, не сопровождавшиеся срабатыванием КВ-1, происходили с весьма малым интервалом от момента последующего КЗ с неуспешным АПВ (в одном случае интервал составил 17 минут, в другом - 5 секунд).

Не отмечено ни одного срабатывания КВ-1 при возникновении КЗ (а их было девять), что свидетельствует о достаточной отстройке пускового органа от переходных процессов, сопровождающих повреждения.

Следовательно, опыт эксплуатации КВ-1 позволяет сделать вывод о возможности использования пускового органа для выявления переходных процессов, не связанных с появлением КЗ, в частности, коммутаций выключателей. Практическое отсутствие срабатываний органа КВ-1 под воздействием грозовых возмущений объясняется малым числом гроз за период эксплуатации и низкой их интенсивностью, о чем свидетельствует снижение в несколько раз числа срабатываний  $KV_0$  в это же время по сравнению с предыдущими периодами наблюдения.

## Опыт эксплуатации пускового органа КВ-1 на ПС Киндери

1990 г.					
№ №	Дата	Время	Работа пускового органа	Причина	Примечания
1	2	3	4	5	6
1.	04.07	21.24.1. 650-670 610-720	КВ-1 KV <sub>0</sub>		Другие защиты не работали
2.	18.08	19.03.50. 400-410 390	КВ-1 01,02 ОНМ, KV <sub>0</sub>	Отключение ВЛ 500 кВ Нижекамская ГЭС- Удмуртская со стороны ГЭС	
3.	25.09	17.42.47. 200-220 190-200	КВ-1 KV <sub>0</sub> , 01,02 ОНМ	Отключение фазы В выключателя 500 кВ Заинской ГРЭС с его последующим разрушением	
4. 5. 6. 7. 8. 9. 10.	14.11	19.42.49. 760-790 800-810 820-830 850-870 870-910 960-980 990-010	КВ-1 КВ-1 КВ-1 КВ-1 КВ-1 КВ-1	Отключение ВЛ 500 кВ Нижекамская ГЭС- Удмуртская после неуспешного ОАПВ. Выявлена неисправность выключателя ГЭС	на ГЭС сработал УРОВ
11.	15.11	17.01.30. 0 - 010	КВ-1 01,02 ОНМ, KV <sub>0</sub>	Неуспешное АПВ ВЛ 500 кВ Нижекамская ГЭС-Удмуртская со стороны ГЭС	
12.	22.11	7.04.50. 220-230 210-310	КВ-1 KV <sub>0</sub>	Включение ВЛ 500 кВ Киндери-Заинская ГРЭС при ОАПВ со стороны Заинской ГРЭС после КЗ	
13.		7.19.24. 300-320 300-410	КВ-1 KV <sub>0</sub>	Включение ВЛ 500 кВ Киндери-Заинская ГРЭС при успешном ОАПВ со стороны Заинской ГРЭС после КЗ	
14.		7.24.47. 710-720	КВ-1	Отключение ВЛ 500 кВ Киндери-Заинская ГРЭС после КЗ со стороны ПС Киндери	

1991г.					
15.	6.01	7.21.31. 710-730	КВ-1	Отключение фазы А со стороны ПС Киндери ВЛ 500 кВ Киндери-ЗГРЭС при КЗ (обрыв троса)	
16.		7.21.32. 470-480 460-540	КВ-1 KV <sub>0</sub>	Включение фазы А со стороны ЗГРЭС при успешном ОАПВ	
17.	28.01	13.35.51. 370-390 370-440	КВ-1 ВиБ, Б1, KV <sub>0</sub>	Неуспешное ОАПВ фазы А ВЛ 500 кВ Киндери-Заинская ГРЭС со стороны ГРЭС	
18.		13.43.52. 040-060 040-110	КВ-1 KV <sub>0</sub>	Самопроизвольное включение выключателя 500 кВ Заинской ГРЭС из-за утечки воздуха при неуспешном ТАПВ со стороны ГРЭС	
19.	28.06	14.01.42. 650-850 650-750	КВ-1 Б1,Б2 ОНМ, KV <sub>0</sub>	Неуспешное ОАПВ фазы С ВЛ 500кВ Киндери-Заинская ГРЭС	

### 6.3. Опыт применения волнового метода определения места повреждения на ВЛ 110 и 220 кВ

В качестве примера реализации функциональных особенностей устройств ОМП рассмотрим опыт его применения на двух подстанциях Центральных электрических сетей филиала ОАО «МРСК Волги» - «Оренбургэнерго» (ПС Пугачевская и ПС Акбулакская), где были установлены и подключены четыре устройства (рис. 3.2) для измерения параметров режимов ВЛ 110 кВ Пугачи-Акбулак. При осуществлении регистрации процессов на ВЛ 110 кВ «Пугачи-Акбулак» были зафиксированы переходные процессы, связанные с оперативными переключением и КЗ. Эффективность рассматриваемых регистраторов синхронизированных измерений при их использовании для волнового метода ОМП двусторонних измерений анализируется при

междуфазном КЗ, произошедшим на ВЛ Пугачи-Акбулак. Разница во времени  $\Delta t$  прихода волн к ПС Пугачевская и к ПС Акбулакская, зафиксированная регистраторами, составляет 242 мкс (рис. 6.4). Время  $T$  продвижения фронта волны по длине междуфазного канала ВЛ от ПС Пугачевская до ПС Акбулакская составляет 438 мкс (рис. 6.5). Приняв скорость распространения фронта волны по междуфазному каналу близкой к скорости света [95], получим с учетом (3.1) значения расстояний до места повреждения

$$L_1 = \frac{(438 \times 10^{-6} - 242 \times 10^{-6})}{2} \times 299 \times 10^6 = 29,30 \text{ км}$$

от ПС Пугачевская и

$$L_2 = \frac{(438 \times 10^{-6} + 242 \times 10^{-6})}{2} \times 299 \times 10^6 = 101,66 \text{ км}$$

от ПС Акбулакская.

В табл. 6.3 приведены результаты ОМП при КЗ на ВЛ 110 кВ Пугачи-Акбулак по данным срабатывания регистраторов и устройства АУРА, установленного на этой ВЛ со стороны ПС Пугачевская.

Таблица 6.3

Результаты ОМП при КЗ на ВЛ 110 кВ Пугачи-Акбулак

Дата	Расстояние от ПС Пугачевская до места повреждения линии, км		Примечание
	АУРА	Регистраторы	
23.08.2009	16,87	29,30	КЗ на землю
25.10.2009	28,34	29,30	Междуфазное КЗ
1.11.2009	105,30	117,81	КЗ на землю
14.11.2009	106,00	117,81	КЗ на землю
3.12.2009	69,65	114,52	КЗ на землю

Обращает на себя внимание то, что устройство АУРА, осуществляющее функции ОМП по параметрам аварийного режима, и регистраторы синхронизированных измерений, использующие волновой метод двусторонних измерений, указали практически одно и то же место повреждения ЛЭП только при междуфазном КЗ, вызванном набросом ветки дерева на провода ВЛ. При

других КЗ, являвшихся однофазными КЗ на землю, показания устройства АУРА и регистраторов существенно отличались.

3 сентября 2015 года в 0 часов 40 минут на ВЛ 220 кВ Парская – Сасово, длина которой, по данным, предоставленным службой релейной защиты и автоматики (РЗА) Приокского ПМЭС МЭС Центра ОАО «ФСК ЕЭС», составляет 73,6 км, произошло КЗ фазы В на землю. При этом выключатели ВЛ отключились от защиты ДФЗ-504 с успешным автоматическим повторным включением. Осциллограммы этого КЗ, зафиксированные установленным на этой ВЛ опытно-промышленным устройством ЭНИС, приведены на рис. 6.6 и 6.7. Функции ОМП на ВЛ 220 кВ Парская – Сасово в течение длительного времени выполняются устройствами типа ИМФ-3Р, реагирующими на параметры аварийного режима и осуществляющими односторонние измерения, а также при помощи программных комплексов WinBres, АРМ СРЗА и Формула [209]. При этом устройство ИМФ, установленное со стороны ПС Парская, определило расстояние до места КЗ равное 41,7 км, а устройство ИМФ, установленное со стороны ПС Сасово – расстояние, равное 28,9 км.

Персонал службы РЗА Приокского ПМЭС в соответствии с методикой стандарта организации ОАО «ФСК ЕЭС» «Типовая инструкция по организации работ для определения мест повреждений воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше» (СТО 56947007-29.240.55.159-2013) рассчитал расстояние до места КЗ по осциллограммам токов и напряжений аварийного режима. Расстояние по ВЛ от ПС Парская до места КЗ, согласно этим расчетам, составило 45,2 км.

По данным осциллограммы (рис. 6.6 и 6.7) вычисленное ОАО «ЭНИН» расстояние по ВЛ от ПС Парская до места повреждения составило 44,85 км. Эта информация была передана в службу РЗА Приокского ПМЭС 3 сентября 2015 года непосредственно после получения по каналам передачи информации измеренных устройством ЭНИС токов и напряжений на ВЛ. Линейная бригада Приокского ПМЭС после проведения осмотра зоны повреждения обнаузила предположительные следы повреждения ВЛ 220 кВ Парская – Сасово на

гирлянде изоляторов опоры, расположенной на расстоянии 44,9 км от ПС Парская.

Таким образом, в соответствии с полученными результатами, погрешности ОМП составляют

по данным ИМФ с ПС Парская:  $44,9 - 41,7 = 3,2$  км (4,35%),

по данным ИМФ с ПС Сасово:  $44,9 - 44,7 = 0,2$  км (0,27%)

по осциллограммам службы РЗА Приокского ПМЭС  $44,9 - 45,2 = 0,3$  км (0,41%),

по осциллограммам ЭНИС  $44,9 - 44,85 = 0,05$  км (0,07%).

Как видно, погрешность устройства ЭНИС не превысило 0,1 % от длины ВЛ, что вполне удовлетворяет требованиям эксплуатации.

Следует отметить, что устройство ЭНИС при этом КЗ продемонстрировало не только наиболее высокую точность ОМП по сравнению с другими средствами ОМП, применяемыми на данной ВЛ, но и превысило точность устройств ОМП ведущей в этой области зарубежной фирмы Qualitrol (США) (см. табл. 3.1).

Учитывая полученный опыт эксплуатации волновых средств ОМП и волновой быстродействующей направленной релейной защиты ВЛ СВН [208], по-видимому, не следует предъявлять специальных требований к точности ТТ и ТН, применяемых на ВЛ 110-750 кВ, поскольку эти измерительные трансформаторы надежно передают информацию о переходе к режиму, обусловленному возникновением повреждения.

#### **6.4. Результаты опытной эксплуатации селективной защиты от ОЗЗ в сети 6-35 кВ**

ОАО «ЭНИН» и ООО «ИЦ Бреслер» под руководством автора диссертации разработано индивидуальное микропроцессорное устройство импульсной селективной защиты от ОЗЗ ИЗН (ТОР 110-ИЗН) [186-188, 196],

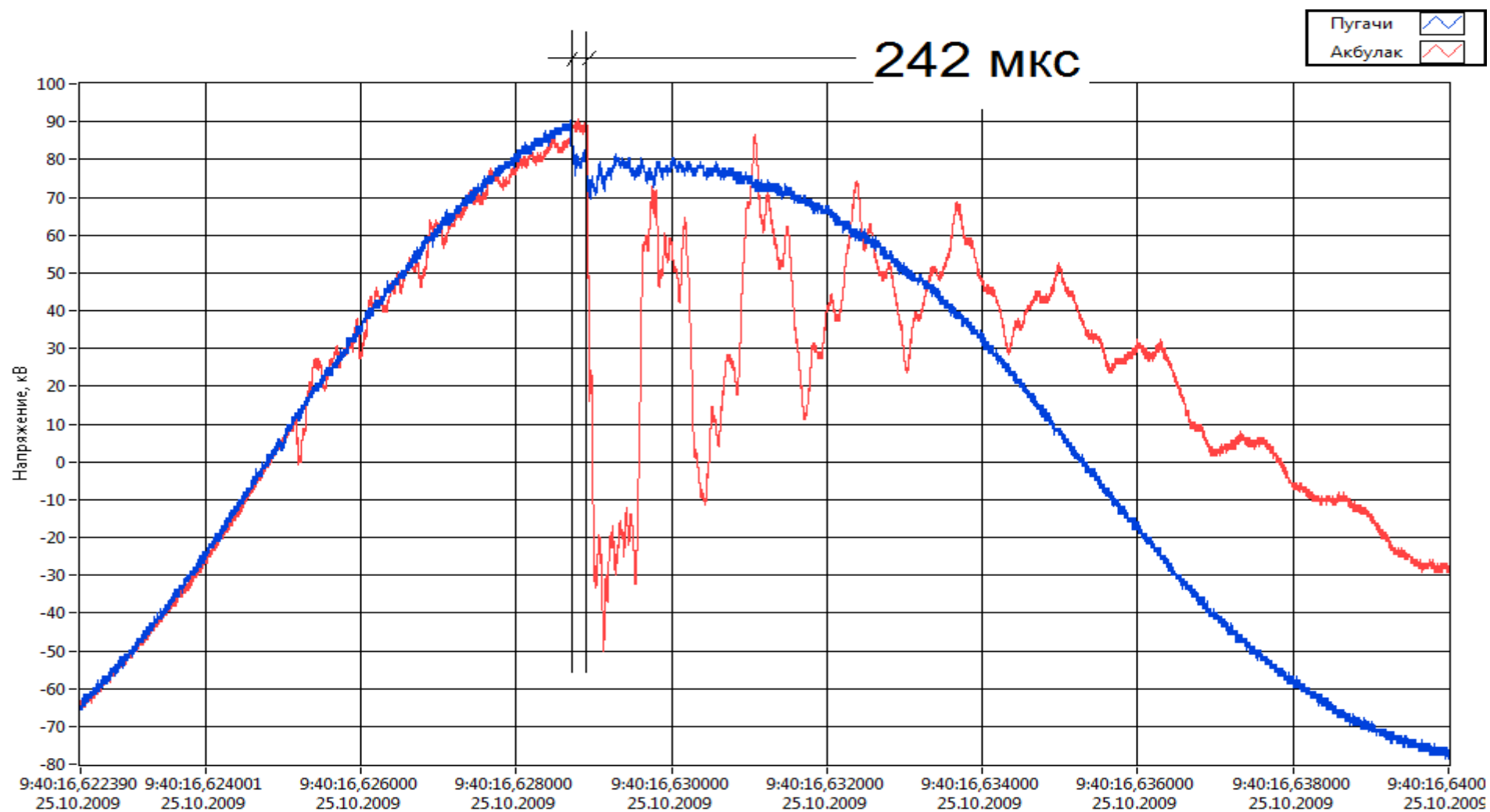


Рис. 6.4. Напряжение в фазе А (ПИН) при КЗ фаз А и В ВЛ.  
1 – Регистратор № 2 ПС Акбулакская (красный), 2 – Регистратор № 3 ПС Пугачевская (синий).

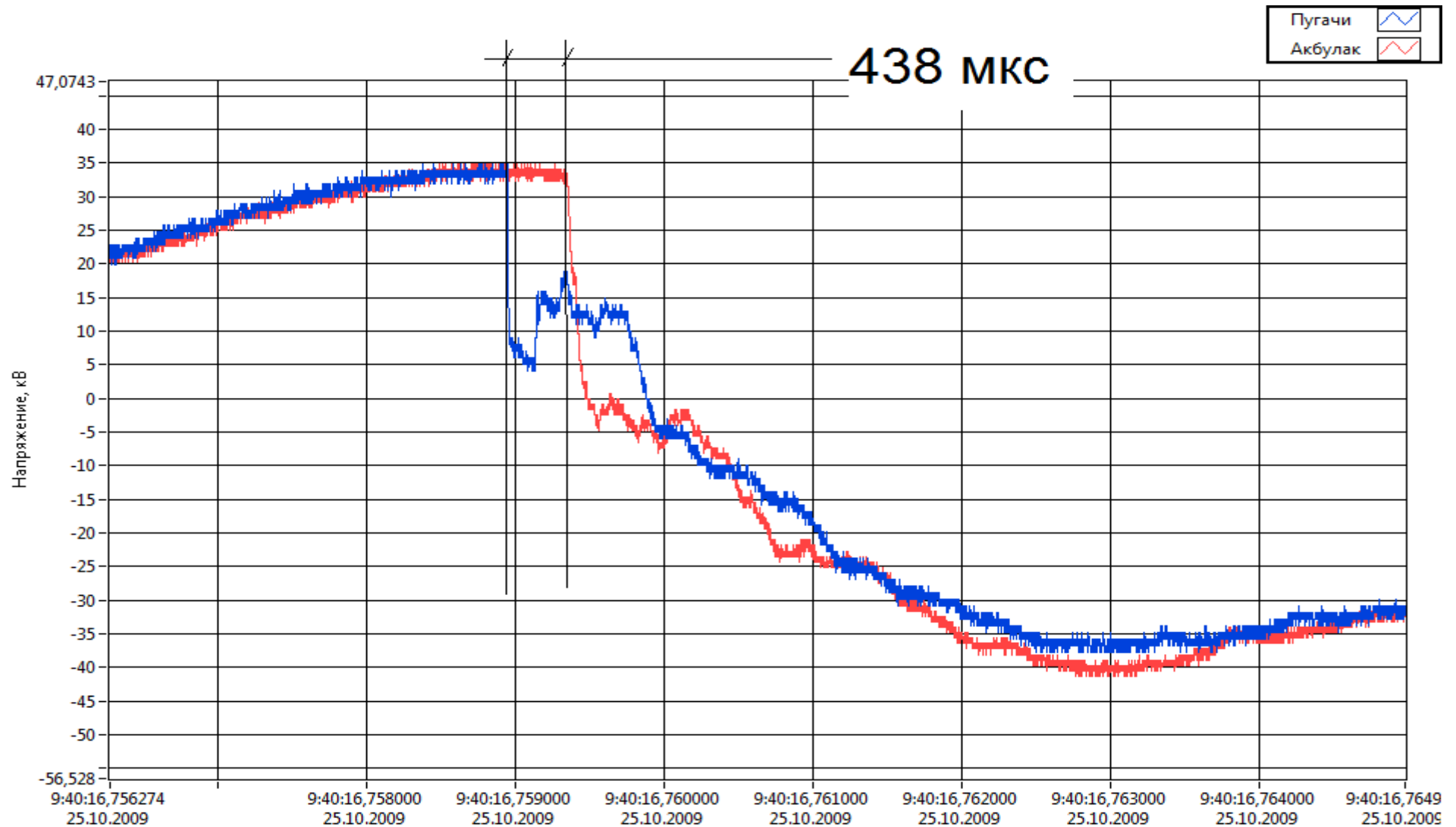


Рис. 6.5. Напряжение в фазе А (ПИН) при аварийном отключении ВЛ  
1 – Регистратор № 2 ПС Акбулакская (красный), 2 – Регистратор № 3 ПС Пугачевская (синий).



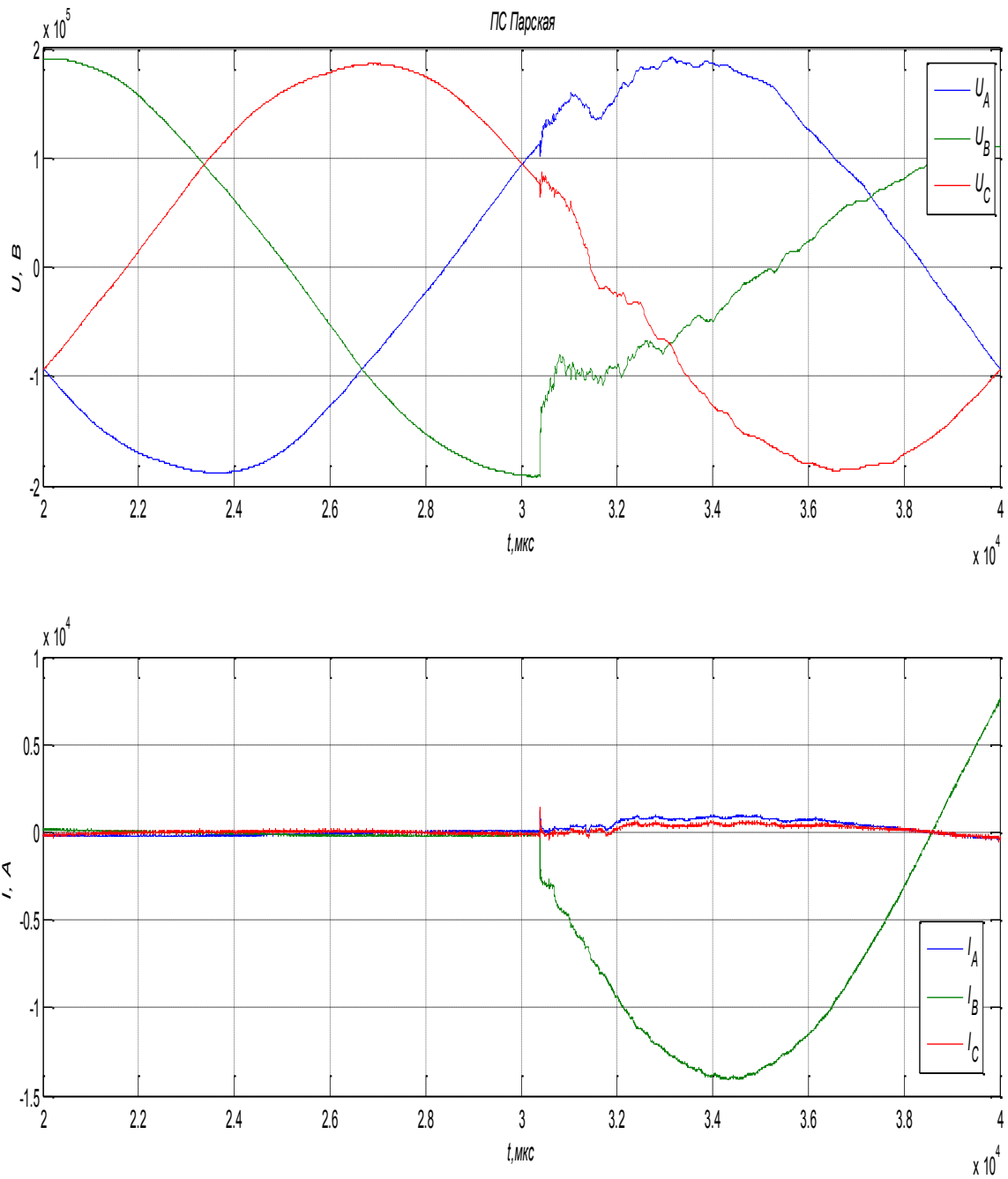


Рис. 6.6. Осциллограмма КЗ 3 сентября 2015 года, зафиксированная ЭНИС на ВЛ 220 кВ Парская – Сасово со стороны ПС Парская

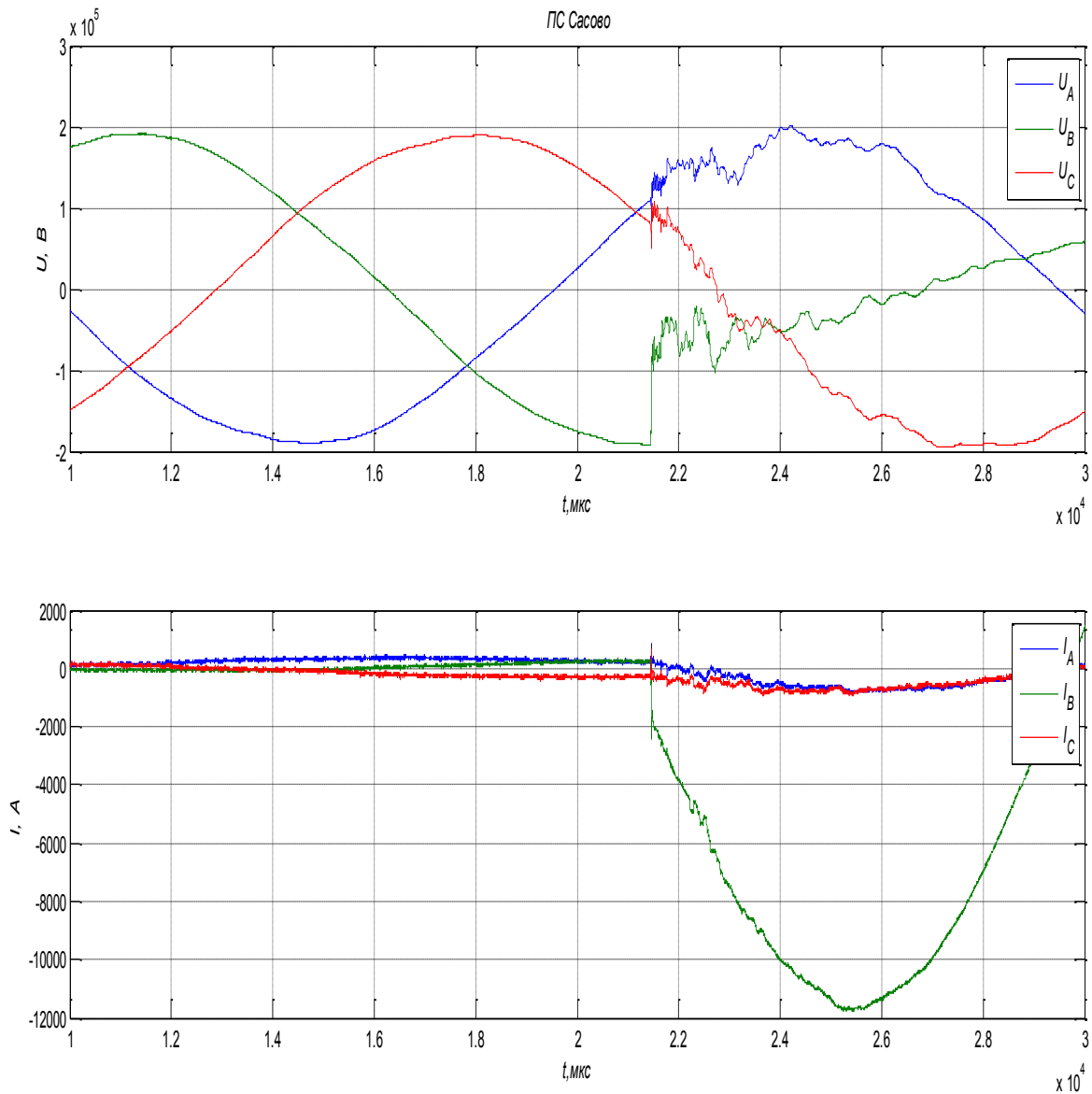


Рис. 6.7. Осциллограмма КЗ 3 сентября 2015 года, зафиксированная на ВЛ 220 кВ Парская – Сасово со стороны ПС Сасово

которое можно рассматривать в качестве определенного шага к выполнению универсального устройства защиты от ОЗЗ в сетях 6-35 кВ. В мае 2012 г. после успешных опытов ОЗЗ устройства были введены в опытную эксплуатацию на ПС Ханты – Мансийская. В период эксплуатации защиты ТОР 110-ИЗН устройствами, было зафиксировано более 1000 ОЗЗ, большая часть которых

носила самоустраняющийся характер, отличающийся достаточно быстрым пробоем изоляции с ее либо весьма непродолжительным временем восстановления (рис. 6.8 а), либо с существованием ОЗЗ в течение времени до нескольких сотен миллисекунд (рис. 6.8 б).

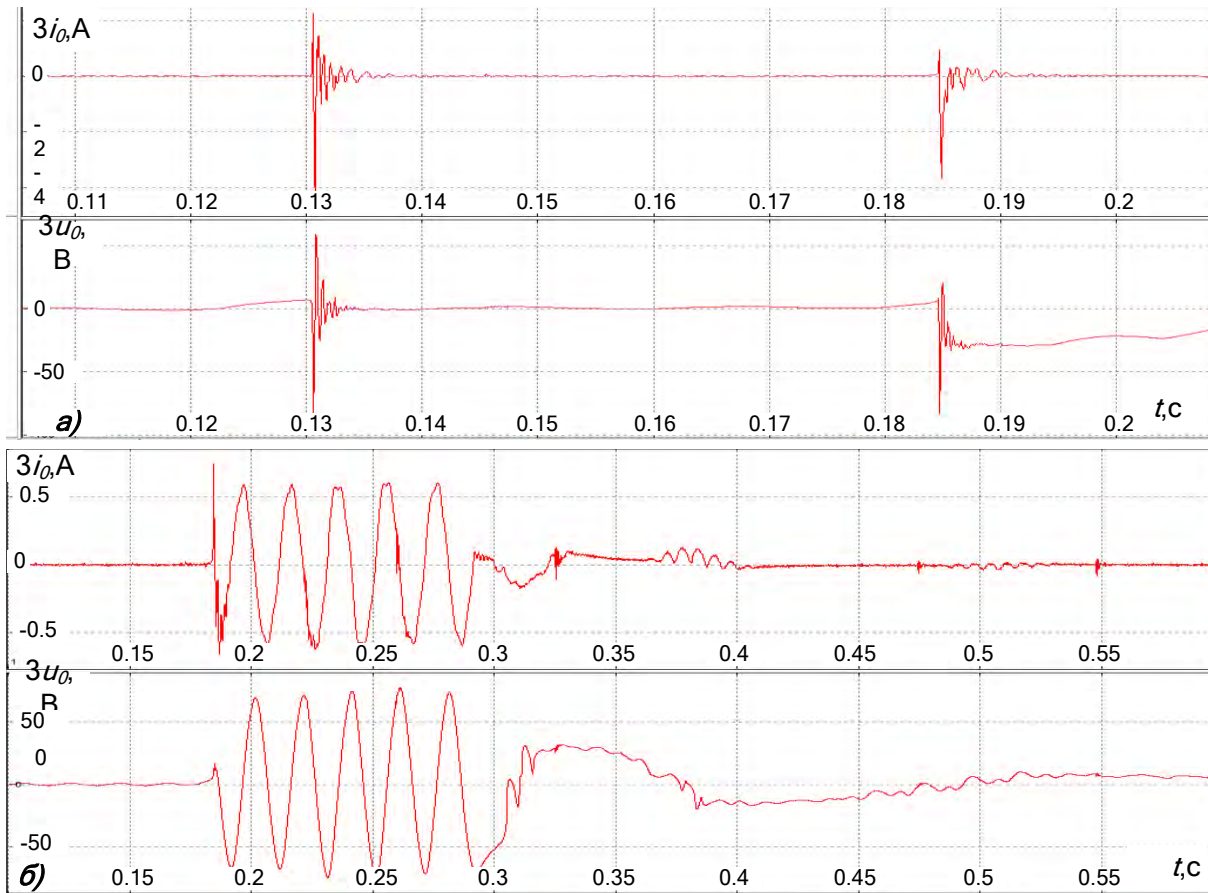


Рис. 6.8. Самоустраняющиеся однофазные замыкания

Менее частыми являются устойчивые замыкания, которые могут быть отнесены либо к медленно развивающимся замыканиям (рис. 6.9 а), вызванным пробоем воздушного промежутка с возникновением разряда, переходящего в устойчивый пробой, либо к быстрым установлениям ОЗЗ (рис. 6.9 б), в том числе с частичными пробоями изоляции, предшествующими устойчивым ОЗЗ.

Третьим из отмеченных видов ОЗЗ, являются перемежающиеся замыкания (рис. 6.10). Здесь фиксируется возникновение ОЗЗ каждые 5-10 мс. Процесс может носить длительный характер, постепенно переходя в устойчивое замыкание. Анализ обработанных осциллограмм показывает, что

наиболее частыми замыканиями являлись самоустраняющиеся ОЗЗ (около 90%). Далее следуют ОЗЗ, носившие устойчивый характер (примерно 9%). Перемежающиеся ОЗЗ происходили значительно реже (менее 1%). Также

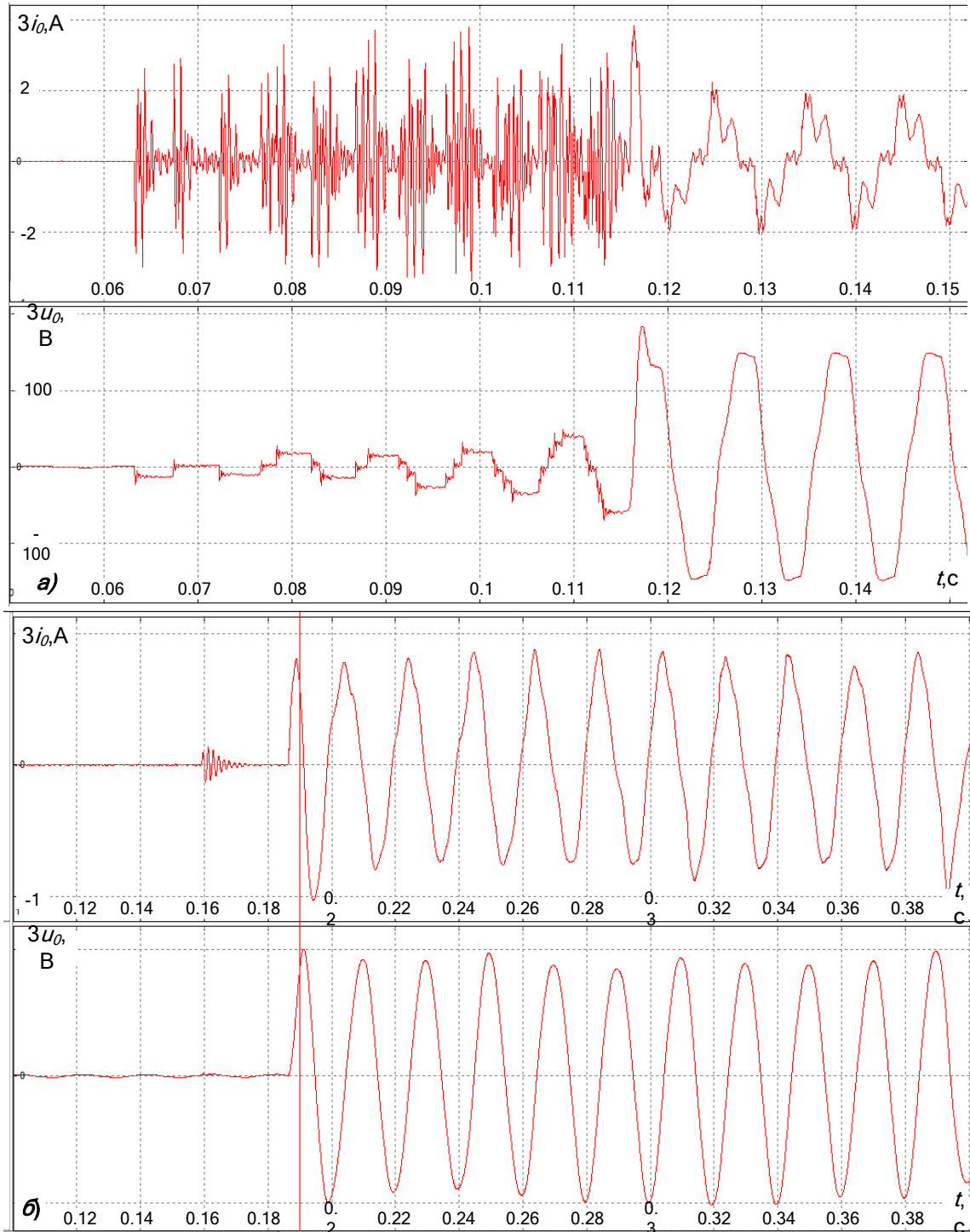


Рис. 6.9. Устойчивые однофазные замыкания



Рис. 6.10. Перемежающееся однофазное замыкание

зафиксировано, что около 10% устойчивых ОЗЗ переходит в двойные замыкания на землю.

За внедрение промышленных образцов устройства ИЗН ОАО «Тюменьэнерго» 25 июня 2013 года признано победителем в номинации «Инновационный проект года» третьего Всероссийского конкурса «Лучшие электрические сети России», в котором в общей сложности участвовали 54 сетевые компании из разных регионов России. Эта победа позволила ОАО «Тюменьэнерго» в итоге завоевать Гран-при третьего Всероссийского конкурса «Лучшие электрические сети России» 2012 года. Техническим советом ОАО «Тюменьэнерго» рекомендовано оснастить устройствами ИЗН свои электрические сети 6-35 кВ.

## 6.6. Выводы

1. Разработанное устройство релейной защиты ВЛ СВН, основанное на контроле направления распространения волн переходного процесса при повреждениях, позволяет более полно удовлетворить требованиям,

предъявляемым к релейной защите в условиях, в которых ее выполнение на основе контроля электрических величин промышленной частота имеет существенные ограничения.

2. Сверхбыстродействующая направленная высокочастотная защита от всех видов коротких замыканий ВЛ СВН обладает повышенным быстродействием и малой зависимостью функционирования от режимов, схем и протяженности линий передачи. Применение волновой защиты на ВЛ ВН и СВН будет способствовать повышению устойчивости и надежности работы энергосистем.

3. Опыт эксплуатации пускового органа на ВЛ СВН показал, что он четко отличает волны КЗ от волн других коммутаций, ни разу не сработав при КЗ. Предусмотренный в защите контроль грозовых возмущений способен предотвращать ложные срабатывания защит.

4. Информация от МФУ ЭНИС позволяет оперативно анализировать данные регистрации процессов в ВЛ, способствуя выработке рекомендаций по дальнейшему совершенствованию работы устройства. Результаты опытно-промышленную эксплуатации ЭНИС на ВЛ 220 кВ Сасово - Парская показали, что погрешность разработанного устройства в части ОМП на основе волнового метода двусторонних измерений не превышает 0,1 % от длины ВЛ, что вполне удовлетворяет требованиям эксплуатации.

5. Использование возможностей устройства микропроцессорных устройств защиты и ОМП по осциллографированию (с высокой разрешающей способностью) реальных ОЗЗ, включая их предаварийные стадии, позволяет дать более детальную оценку характеру возникновения и развития повреждений в электрических сетях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны принципы построения направленной высокочастотной защиты линий электропередачи сверхвысокого напряжения (ВЛ СВН) от всех видов коротких замыканий (КЗ), реагирующей на токи и напряжения переходных процессов, обладающей существенными преимуществами по сравнению с традиционными устройствами, реагирующими на электрические величины промышленной частоты, по быстродействию, чувствительности и селективности.

2. Выполнена оценка воздействия грозových возмущений на надежность функционирования устройств релейной защиты ВЛ СВН и методы отстройки защиты от указанных воздействий. Показано, что с увеличением протяженности электрической сети и длины защищаемых ЛЭП увеличивается вероятность ложного срабатывания защит, реагирующих на электрические составляющие промышленной частоты, при грозových возмущениях, не приводящих к КЗ.

3. Разработаны способ и устройство определения места повреждения на линиях электропередачи ВН и СВН волновым методом двусторонних синхронизированных измерений, обеспечивающий точность нахождения поврежденного элемента ЛЭП, не превышающей десятой доли процента от протяженности ЛЭП.

4. Разработаны принципы построения защиты распределительной сети 6-35 кВ от однофазных замыканий на землю при любом режиме заземления нейтрали сети, объединяющие все положительные свойства устройств указанной защиты.

5. Разработан алгоритм селективной защиты гидрогенераторов укрупненных блоков от однофазных замыканий на землю, позволяющий использовать волновой метод при любом количестве работающих генераторов блока.

6. Даны рекомендации по повышению эффективности устройств релейной защиты, основанных на контроле переходных процессов, в части использования

- методологического комплекса математических моделей, критериев, методов и алгоритмов синтеза устройств релейной защиты линий электропередачи, распределительных сетей и гидрогенераторов, что позволяет повысить быстродействие и чувствительность этих устройств по сравнению с устройствами, реагирующими на электрические величины промышленной частоты;

- алгоритмов и структурной схемы защиты ВЛ 500 -750 кВ на основе использования токов и напряжений переходных процессов с контролем поврежденных фаз ЛЭП, что позволяет обеспечить повышенную избирательность к повреждениям как на самих ЛЭП, так и на их фазах с целью сокращения паузы автоматического повторного включения и улучшения надежности работы энергосистемы;

- принципов отстройки защиты ВЛ СВН от отрицательного воздействия грозовых разрядов, не проводящих к повреждениям;

- комбинированных устройств ВЛ 220-750 кВ, сочетающих функции мониторинга установившихся и переходных процессов в электрической сети с волновым методом определения места повреждения с помощью двухсторонних измерений;

- индивидуальных устройств защиты распределительных сетей 6-35 кВ от однофазных замыканий на землю при любом режиме заземления нейтрали, сочетающих волновые методы и контроль электрических величин промышленной частоты;

- алгоритмов селективной защиты гидрогенераторов укрупненных блоков от однофазных замыканий на землю, надежно действующих при любом числе генераторов блока;



- оптимизации диапазона рабочих частот и параметров срабатывания по току и напряжению измерительных органов разработанных устройств защиты;
- мероприятий, направленных на повышение эффективности устройств релейной защиты, основанных на использовании переходных процессов.

7. Результаты выполненных исследований и разработок использованы в научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработках и внедрены на различных электроэнергетических объектах страны. В числе этих разработок микроэлектронные устройства направленной высокочастотной защиты линий электропередачи сверхвысокого напряжения (ВЛ СВН) от всех видов коротких замыканий (КЗ), реагирующей на токи и напряжения переходных процессов, выполнялись по договорам с Минэнерго СССР и ПЭО Татэнерго и были внедрены в опытно-промышленную эксплуатацию на ВЛ 500 кВ Киндери – Заинская ГРЭС в 1987- 1997 годах;

комбинированные устройства, сочетающие функции мониторинга установившихся и переходных процессов в электрической сети с волновым методом определения места повреждения на ВЛ ВН и СВН с помощью двусторонних измерений, испытывались и находились в опытной эксплуатации в 2009 году на ВЛ 110 кВ Пугачи – Акбулак «Оренбургэнерго», а также (по заказу ОАО «ФСК ЕЭС») – находятся в эксплуатации на ВЛ 220 кВ Тамбовская 500 – Давыдовская 1 с 2012 года. С 2015 года эти устройства успешно эксплуатируются на ВЛ 220 кВ Сасово-Парская МЭС Центра ОАО «ФСК ЕЭС»;

микроэлектронные устройства защиты распределительных сетей 6-35 кВ от однофазных замыканий на землю при любом режиме заземления нейтрали, реагирующие на полярность токов и напряжений переходных процессов, изготовлены на Рижском опытном заводе ПО «Союзэнергоавтоматика» (по заказу Невинномысской ГРЭС) и успешно эксплуатируются на кабельных линиях 35 кВ Невинномысская ГРЭС - ПО «Азот» с 1992 года; около 20 устройств, изготовленных на предприятии «Энергосоюз» (г. Казань) после

проведения опытно-промышленных испытаний включены в 1996 – 2000 годах в эксплуатацию на ВЛ 35 кВ ПС Солнечногорская (Мосэнерго), на секции шин 6 кВ Казанской ТЭЦ 1, а также в распределительном устройстве 10 кВ химического комбината ОАО «Славнефть» (г. Ярославль);

микропроцессорные устройства защиты распределительных сетей 6-35 кВ от однофазных замыканий на землю при любом режиме заземления нейтрали, реагирующие на полярность токов и напряжений переходных процессов, в результате совместной разработки с ООО «ИЦ «Бреслер», установлены в промышленную эксплуатацию на ЛЭП 10 кВ ПС Ханты-Мансийская в 2010 и в 2012 годах по заказу ОАО «Тюменьэнерго», а также на ЛЭП 6 кВ ПС Олимпийская – в «Волгоградэнерго» ОАО «МРСК Юга» в 2013 г.

микроэлектронные устройства селективной защиты гидрогенераторов укрупненных блоков от однофазных замыканий на землю, изготовленные на Рижском опытном заводе ПО «Союзэнергоавтоматика» эксплуатировались на 16 гидрогенераторах Нижнекамской ГРЭС с 1986 года с модернизацией в 1993 – 1997 годах.

### Список литературы

1. Федосеев А. М. Релейная защита электроэнергетических систем М.: Энергия, 1976.
2. Козлов В. И. Некоторые особенности релейной защиты протяженных линий электропередачи сверхвысокого напряжения. М.: Энергия, 1976. (Тр. Института Энергосетьпроект). - С. 70—88.
3. Левиуш А. И., Медведева Л. Н., Сапир Е. Д. Принципы выполнения однопериодной высокочастотной защиты ВЛ 750 кВ // Электричество. – 1973. - № 8. - С. 1 - 9.
4. Попов И. Н. Об использовании переходных процессов и внешних источников контроля для выполнения устройств релейной защиты// Вопросы оптимального развития энергосистем и новые технические средства их защиты. М.: Наука, 1970. - С. 43 - 73.
5. Попов И.Н., Лачугин В.Ф., Соколова Г.В. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
6. Королюк Ю.Ф., Лысенко Г.И. Учет волновых процессов в линии электропередачи при построении измерительных органов волновых защит // Изв. ВУЗов. Электромеханика. – 1978. - № 9. С. 35-44.
7. Королюк Ю.Ф., Лысенко Г.И. Орган сравнения фаз релейной защиты линий электропередачи // Изв. ВУЗов. Электромеханика. – 1982. - № 8. С. 16 - 25.
8. Королюк Ю.Ф., Бурянина Н.С., Райзвих Л.Х. К выбору схемы органа выделения аварийных составляющих параметров режима // Изв. ВУЗов. Электромеханика. – 1997. - № 1-2. С. 13-15.
9. А. С. СССР № 936163 Устройство для волновой направленной защиты линии электропередачи с высокочастотной блокировкой /Королюк Ю.Ф., Богрунов В.Г., Шибанов А.П. // 1982. - Б.И. № 22.

10. А. С. СССР № 1363362. Устройство для волновой направленной защиты линии электропередачи с высокочастотной блокировкой / Королюк Ю.Ф., Богрунов В.Г., Райзвих Л.Х. //1987. - Б.И. № 48.

11. Jochio Jakagi, Jun-ichi Boba, Katsuhiko Vemura, Joshiaki Sakaguchi. Fault protection based on travelling wave theory. - Part II sensitivity, analysis and laboratory test. IEEE PES, Winter meeting, 1978 Paper A78.220 - 6.

12. Akimoto Joshiakira, Joshida Jakashi, Nishida Shogo. Дэнки чаккай ромбунси, В. Trans. Inst. Elec. Eng. Jap. - 1978. 98. - № 8. - P. 711 – 718.

13. Chamia M., Liberman S. Ultra high speed relay for EHV/UHV transmission lines - development, design and application. IEEE Trans action on Power Apparatus and Systems. Nov/Dec. 1978. Vol. PAS - 97 A publication of the IEE Power Engineering Soc. - P. 2104 - 2116.

14. Yee M. T., Esztergalyos I. Ultra high speed relay for EHV/UHV transmission lines – installation - staged fault tests and operational experience. IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, 1978. 97. - № 5. - P. 1814 -1825.

15. Dommel Hermann W., Michels John M. High speed relaying using travelling wave transient analysis. IEEE Power Eng. Soc. Text A Paper Winter. Meet., New York., N. Y., 1978. - P. 1 - 7.

16. Джонс Э. Т. Новая сверхбыстродействующая фильтровая направленная защита линий электропередачи сверхвысокого напряжения. ВЦП, перевод № Г -33230. IEE Proceedings, 1980. - V. 127 Pt cN4. - P. 228 - 239.

17. Vitins M. A. Fundamental concept for high speed relaying. IEEE Trans Power Appar. and Syst., 1981. 100. № 1. - P. 163 -168. - Discuss P. 169 -173.

18. Bonk J. J. Trends in protective relaying. IEEE Reg. 6th (West USA) Conf., Tucson, Ariz, 1976. New York, 1976. - P. 99 -104.

19. Капитула Ю. В. Разработка алгоритма защиты неоднородной линии постоянного тока, основанного на волновом методе // Изв. НТЦ ЕЭС. – 2012. - № 1. - С. 92-100.

20. Капитула Ю. В. Разработка и исследование алгоритма дифференциальной защиты кабельно-воздушной линии постоянного тока // Изв. НТЦ ЕЭС. – 2012. - № 1. - С. 101-106.

21. Robertson D., Camps O., Mayer J. Wavelet and Power System Transient // SPIE Int. Sympos. Optical Engen. Aerospace Sensing. - 1994. - P. 474-487.

22. Ribeiro P.F. Wavelet transform: an advanced tool for analyzing non-stationary harmonic distortions in power systems // Proc. IEEE ICHPS VI, Bologna, 1994. Sep. 21-23.

23. Мисриханов А. М. Применение методов вейвлет - преобразования в электроэнергетике // Автоматика и телемеханика. – 2006. - Выпуск 5. - С. 5–23.

24. Shang L., Herold G., Jaeger J., Krebs R., Kumar A. High-Speed Fault Identification and Protection for HVDC Line Using Wavelet Technique. IEEE Porto Power Tech 2001, Porto. – 2001. - Tagungsband Bericht PST3-324.

25. Иванов М. А. Применение вейвлет - преобразований в кодировании изображений // Сборник статей «Новые информационные технологии в науке и образовании». ИСИ им. А.П. Ершова. Новосибирск. – 2003.

26. Обидин М.В., Серебровский А.П. Очистка сигнала от шумов с использованием вейвлет - преобразования и фильтра Калмана // Информационные процессы. – 2013. – Т. 13, № 3. - С. 198–205.

27. Shang L., Herold G., Jaeger J. A new approach to high-speed protection for transmission line based on transient signal analysis using wavelets. 7th Intern. Conf. on Developments in Power System Protection, Amsterdam, 9.-12. April 2001. – Proceedings. – P. 173-176.

28. Lee C. H. Wavelet-Based Transient Analysis // Ph. D. Dissertation, Georgia Institute of Technology. – 1998. - Atlanta, GA, USA.

29. Sharafi A., Sanaye-Pasand M., Jafarian P. Ultra-high-speed protection of parallel transmission lines using current travelling waves // IET Generation, Transmission and Distribution - 2011. - № 5. - P. 656-665.

30. Shu H., Tian X., Zhang G., Liu K., Sun S. Защита цепей передачи постоянного тока напряжением 800 кВ, использующая волновые переходные процессы // Zhongguo dianji gongcheng xuebao = Proc. Chin. Soc. Elec. Eng. - 2011. - 31, № 22. P. 96-104 (перевод).

31. Ngaopitakkul Atthapol. The combination of discrete wavelet transform and fuzzy logic algorithm for fault classification on transmission system // ISIC International. - 2012. - P. 7103-7115.

32. Santoso S., Powers E.J., Grady W.M., Parsons A.C. Power quality disturbance waveform recognition using wavelet-based neural classifier // I. Theoretical foundation. IEEE Trans. Power. Deliv. - 2002. - 15, № 1. - P. 222-235.

33. Eldin E., Tag M. A wavelet technique for directional protection for EHV transmission lines with series compensation // Int. J. Power and Energy Syst. - 2005. - 25, №2. - P. 135-139.

34. Fan Chun-ju, Yu Wei-yong, Li K. K. Быстродействующая защита линий электропередачи, использующая данные о переходных процессах // Dianwang jishu=Power Syst. Technol. - 2006. - 30, № 14. - P. 77-82 (перевод).

35. Ma Jing, Wang Zeng-ping, Xu Yan, Ma Lei. Устройство защиты линии электропередачи с односторонним контролем переходных процессов при помощи многофункционального морфологического градиента // Huabei dianli daxue xuebao=J. N. China Elec. Power Univ. - 2005. - 32, N 5. - P. 7-10 (перевод).

36. Xiao Xian-yong, Li Feng, Deng Wu-jun. Способы отстройки коротких замыканий на линиях электропередачи от разрядов молнии с помощью S-преобразований // Gaodianya jishu=High Voltage Eng. - 2009. - 35, № 4. - P. 817-822 (перевод).

37. Yang Mingyu, Yang Yukun. Защита линий электропередачи сверхвысокого напряжения, использующая переходные процессы и методы Прони // Dianli zidonghua shebei = Elec. Power Autom. Equip. - 2011. 31. - № 5. P. 28-33 (перевод).

38. Liu Hui, Wang Xin, Chi Weishuang. Применение усовершенствованного преобразования Гильберта - Хуанга для определения поврежденных линий электропередачи в кабельно-воздушных линиях // Shui dian nengyuan kexue = Water Resour. and Power. - 2013. 31. - № 10. - P. 192-194 (перевод).

39. Liu Xiaolei, Osman A. H., Malik O. P. Hybrid traveling wave/boundary protection for monopolar HVDC line // IEEE Trans. Power. Deliv. - 2009. 24. - № 2.- P. 569-578 (перевод).

40. Shi Shenxing, Ren Li, Liu Zeyu, Dong Xinzhou. Определение поврежденной линии электропередачи на основе использования бегущих волн в соответствии с требованиями стандарта МЭК 61850 // Dianli zidonghua shebei = Elec. Power Autom. Equip. - 2011. 31. - № 3. - P. 131-134 (перевод).

41. Yuan Z., Zhang C. Быстродействующая дифференциальная защита линий электропередачи сверхвысокого напряжения, использующая волновые составляющие переходного процесса // Dianli zidonghua shebei = Elec. Power Autom. Equip. - 2012. 32. - № 3. - P. 13-17.

42. Wang Shiyong, Dong Xinzhou, Shi Shenxing. A novel busbar protection scheme based on wavelet multi-resolution signal decomposition. 10 IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010), Managing the Change, Manchester, 29 March-1 Apr.. 2010. London: IET. 2010. - P. P34/1-P34/5. (IET Conf. Publ. Vol. 558).

43. Oiu Qi-wei, Хи Jia-kang, Cao Wei. Анализ работы дифференциальной защиты, реагирующей на волновые переходные процессы линии передачи постоянного тока // Huadong dianli = East China Elec. Power. - 2013.- 41, № 10. - P. 2103-2107.

44. Костенко М. В., Перельман Л. С., Шкарин Ю. П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. М.: Энергия, 1973.

45. Гершенгорн А. И. Целесообразность применения транспозиции на линиях высокого напряжения. М.: Энергия, 1970. (Тр. Ин-та Энергосетьпроект. Вып. 1). - С. 143 -154.

46. Чернин А. Б., Лосев С. Б. Основы вычисления электрических величин для релейной защиты при сложных повреждениях в электрических системах. М.: Энергия, 1971.

47. Лачугин В.Ф. Попов И.Н., Соколова Г.В., Зейналов А.Д. Исследование волновых процессов для релейной защиты линий сверхвысокого напряжения // Электричество. – 1983. - № 3. - С.1-7.

48. Костенко М. В. Деформация волны в многопроводной линии вследствие сопротивления земли и проводов // Электричество. – 1961. - № 6. - С. 5 -10.

49. Гинзбург С.Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических сетях. М.: Советское радио, 1959.

50. Трансформаторы тока/ В. В. Афанасьев, Н. М. Адоньев, Л. В. Жалалис и др. Л.: Энергия, 1980.

51. Соколова Р. Н. Исследование переходных процессов в измерительных трансформаторах 500—750 кВ и оценка их влияния на работу быстродействующей релейной защиты: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1975.

52. Карамзин А. П., Михайлов Ю. А., Халилов Ф. Х. Погрешности, вносимые ТН при регистрации внутренних перенапряжений// Электрические станции. - 1968. - № 12. - С. 51—52.

53. А. С. № 534824. Устройство для выбора поврежденной фазы в многофазной электрической сети переменного тока/ Л. С. Зисман, А. И. Левиуш// Б.И. № 41. - 1976.

54. Лосев С. Б., Чернин А. Б. Расчет электромагнитных переходных процессов для релейной защиты на линиях большой протяженности. М.: Энергия, 1972.



55. А. С. СССР № 526981. Измерительный орган дистанционной защиты/ В.Л. Карцев, Д.Р. Любарский // Б.И. №32.- 1976.

56. Бронштейн Э.Л. Электродинамическая модель ВНИИЭ. Теория подобия и физическое моделирование М.: МЭИ, 1970.

57. Федоров Э. К., Шнеерсон Э. М. Измерительные органы дистанционных защит на основе операционных усилителей // Электричество. - 1980. - № 8. - С. 8—15.

58. А.С. СССР № 1252858. Реле направления мощности/ Д.Р. Любарский, И.И. Плещенко// Б.И. № 31. - 1986.

59. А.С. СССР по заявке № 4083585. Способ распознавания индуктированных напряжений на линиях электропередачи / В.Ф. Лачугин, И.Н. Попов.

60. Патент Австралии № 589694. Identification of induced voltages in power transmission lines/ В.Ф.Лачугин, И.Н. Попов. - 1986.

61. А.С. СССР № 1229896. Устройство выбора поврежденной фазы для защиты воздушной линии электропередачи от короткого замыкания/ В.М. Ермоленко, Д.Р. Любарский, Е.И. Шмакова // Б.И. № 12. - 1985.

62. Вишняков Г. К., Смирнов Б. И. Электропередача 1150 кВ Экибастуз — Урал// Электрические станции. - 1982.- № 10.- С. 57—63.

63. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – М.:Л.: Энергия. 1965.

64. Berger K., Anderson R. B., Kroninger H. Parameters of lightning flashes //Electra. – 1975. - № 41. - P. 23 - 37.

65. Бронфман Л.И. Режимы работы вентильных разрядников при грозовых перенапряжениях. Л.: Гидрометеиздат, 1978.

66. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. Л.: Гидрометеиздат, 1978.

67. Майкопар А. С. Дуговые замыкания на линиях электропередачи. М. Л.: Энергия, 1965.

68. Базелян Э. М. Влияние рабочего напряжения на вероятность прорыва молнии к проводам воздушных линий // Электричество. - 1981. - № 5. - С. 24 - 27.

69. Udo T. Sparkover characteristics of large gap spaces and long insulation strings // IEEE Transactions on PAS. - 1964. - V. 84. № 5. - P. 471 - 483.

70. Левиуш А. И., Медведева Л. Н., Сапир Е. Д. Быстродействующее реле направления мощности обратной последовательности // Электричество.- 1972. - № 6.- С. 32 - 36.

71. Дони Н.А., Надель Л.А., Левиуш А.И. Основная высокочастотная защита высоковольтных линий электропередачи напряжением 500 – 750 кВ – ЭП. Аппараты низкого напряжения, 1977. - вып. 6(64).

72. Поссе А. Б., Герцик К. А., Петров С. Я., Смирнов В. И. Электропередача постоянного тока напряжением 1500 кВ Экибастуз-Центр// Электрические станции. – 1983. - № 2. - С.45-48.

73. Арайс Е. А. Модельный метод анализа радиоэлектронных схем. Сборник статей «Вопросы программирования и автоматизации проектирования». Вып. 2, Томск, 1972.

74. Комплекс программ МАЭС для расчета переходных процессов в сложных электроэнергетических схемах: отчет о НИР /Наумкин И. Е., Челазнов А. А. - Новосибирск, СибНИИЭ, 1981.

75. Костенко М. В., Гумерова Н. И., Зархи И. М., Ефимов В. В. Анализ надежности грозозащиты подстанций. Л.: Наука, 1981.

76. Итоги науки и техники. Серия: электрические станции и сети. т. 13. Грозозащита подстанций и электрических сетей высокого напряжения // М. В. Костенко, И. М. Богатенков, Ю. А. Михайлов, Ф. Х. Халилов. М., 1987 (ВИНИТИ, ГКНТ, АН СССР).

77. Костенко М. В., Кадомская К. П., Левинштейн М.Л., Ефимов И. А. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропередачах высокого напряжения. Л.: Наука, 1983.

78. Джуварлы Ч. М., Дмитриев Е. В. Математическое моделирование волновых процессов в электрических сетях. Баку: ЭЛМ, 1975.

79. Львов Ю. И., Левина Л.С., Ступель А.И. Учет автотрансформаторов при расчете переходных токов короткого замыкания волновым методом. // Электричество. – 1989. - № 2. - С.60-65.

80. Костенко М. В., Мессерман Д. Г. Деформация волн грозových перенапряжений в линиях передачи сверх- и ультравысокого напряжения при большой длине пробега // Изв. АН СССР, Энергетика и транспорт. – 1987. - № 3. - С. 158-164.

81. Самородов Г.И., Хорошев М. И. Алгоритм и программа расчетов переходных процессов в электропередачах с учетом поверхностного эффекта в земле. // Математическое обеспечение задач автоматизированных систем в энергетике: Сб. трудов СибНИИЭ/ Новосибирск. 1975. - Вып. 28.- С. 116-120.

82. Гусева Л. А., Ковалев В. И. Комплекс стандартных подпрограмм для расчетов электромагнитных переходных процессом в электрических системах на ЦЭВМ БЭСМ-4 // Тр. СибНИИЭ, Новосибирск. 1975. - Вып. 28. - С.73-85.

83. Ильиничнин В. В., Кочкин В. И., Никитин О.А. , Челазнов А.А. Применение тиристорных компенсаторов для снижения коммутационных перенапряжений в ЛЭП // Электрические станции. – 1990. - № 1.- С. 68 -72.

84. Базуткин В. В., Дмоховская Л. Ф. Расчеты переходных процессов и перенапряжений. М.: Энергоатомиздат, 1983.

85. Хаяси С. Волны в линиях электропередачи. М., Госэнергоатомиздат, 1960.

86. Хорошев М. И. Некоторые вопросы математического моделирования и эквивалентирования сложных систем при исследовании электромагнитных переходных процессов: дис. ... канд.техн.наук: Новосибирск, 1975.

87. Герцик К. А., Сахно О. И., Воскобойников С. М. Ограничение гармоник тока в линии электропередачи постоянного тока с помощью сглаживающих устройств в грозозащитных тросах // Исследования и

разработки мощных электропередач постоянного тока. Л.: Энергоатомиздат, 1983. - С. 54-61.

88. Быховский Я.Л. Основы теории высокочастотной связи по линиям электропередачи. М.: Госэнергоиздат, 1963.

89. Техника высоких напряжений.//Под ред. Д. В. Разевига. М.: Энергия, 1976.

90. Техника высоких напряжений.//Под ред. М.В.Костенко. М.: Высшая школа, 1973.

91. А.С. СССР № 1688204. Способ распознавания грозových, возмущений на линиях постоянного тока с компенсирующими реакторами / В.Ф. Лачугин, Г.В. Соколова, Л.И. Брауде, В.А. Лесник и Д.М. Чекарьков // Б.И. № 40. - 1991.

92. Правила устройства электроустановок. Правила устройства электроустановок. Издание 7-е. Утверждены приказом Минэнерго Российской Федерации от 08.07.2002 № 204.

93. 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.

94. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. Утверждены приказом Минэнерго Российской Федерации от 13.01.2003 № 6.

95. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. – М.: Энергоиздат, 1982.

96. Куликов А.Л., Мисриханов М.Ш., Петрухин А.А. Определение мест повреждений ЛЭП методами активного зондирования / Под ред. В.А. Шуина. – М.: Энергоатомиздат, 2009.

97. Многофункциональное устройство Qualitrol IDM+ VI [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www.qualitrolcorp.com/Products/IDM + Multifunction power system monitor \(with options for power quality, PMU and TWS fault location\)](http://www.qualitrolcorp.com/Products/IDM+Multifunction%20power%20system%20monitor%20(with%20options%20for%20power%20quality,%20PMU%20and%20TWS%20fault%20location)).

98 . 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>.

99. Устройство определения места повреждения ISA TFS 2100 [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www.isatest.com/index.php?page=tfs-2100](http://www.isatest.com/index.php?page=tfs-2100).

100. Многофункциональное устройство Reason RPV-310 [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www.reason.com.br/pt/produtos/registradores-digitais/rpv310](http://www.reason.com.br/pt/produtos/registradores-digitais/rpv310).

101. Микропроцессорное устройство определения места повреждения Бреслер-0107.090 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.bresler.ru/library/bresler 0107 090 docs>.

102. Высокоточный РАС и ОМП HPR-7000 [Электронный ресурс]–Режим доступа:<http://www.htabd.com/Upload/WebEditor/2011 03/31112609772.pdf>.

103. Краснышов С.В., Манжелей М.И., Лачугин В.Ф., Сидорук С.В., Джангиров В.А., Бояркин И.Е. Опыт применения регистраторов синхронизированных измерений токов и напряжений на ВЛ 110 кВ. - Электрические станции. – 2010. - № 9. - С. 23-31.

104. Баптиданов Л.Н., Тарасов В.И. Электрооборудование электрических станций и подстанций, т. 1. Основное электрооборудование электрических станций и подстанций. М.: ГЭИ, 1960.

105. Elhaffar A. M. Power Transmission Line Fault Location Based on Current Travelling Waves, Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology, Helsinki, 2008.

106. Патент РФ 2472169. Способ определения расстояния до места повреждения на линии электропередачи / В.Ф. Лачугин., Д.И. Панфилов, С.В. Сидорук., С.В. Краснышов, М.И. Манжелей, Д.В. Денисов, С.А. Образцов, А.Н. Смирнов // Бюлл. №1. -2013.

107. Поликар Р. Введение в вейвлет-преобразование. [Электронный ресурс] - <http://www.autex.spb.su>
108. Нагорнов О.В. Вейвлет-анализ в примерах: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2010.
109. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Высшая школа, 2010.
110. Аржанников Е.А., Чухин А.М. Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 1998.
111. 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. Энергетика. - 2013. - № 6. - С.137-146.
112. Многофункциональный измерительный преобразователь ЭНИП. [Электронный ресурс]- Режим доступа: [2http://www.enip2.ru](http://www.enip2.ru).
113. Счетчик электронный многофункциональный КИПП-2М. [Электронный ресурс]- Режим доступа: <http://www.ctsspb.ru>.
114. IEEE Std 1588–2008 Precision Time Protocol. New York, IEEE, 2008. – 269 с.
115. Программный комплекс WinBres [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.bresler.ru/products/software/WinBres>.
116. Комплекс программ для расчетов электрических величин при повреждениях сети и уставок релейной защиты АРМ СРЗА [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.pk-briz.ru/>.
117. Патент РФ № 2472169. Способ определения расстояния до места повреждения на линии электропередачи. / Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Сидорук С.В. и др//. 2011.
118. Патент РФ № 2475768. Способ определения расстояния до места повреждения на линии электропередачи / Панфилов Д.И., Арутюнов С.А., Горюшин Ю.А., и др// 2011.

119. Патент РФ № 113016 на полезную модель Устройство для определения расстояния до места повреждения на линии электропередачи / Арутюнов С.А., Горюшин Ю.А., Сидорук С.В. и др.// 2012.

120. Патент РФ № 128341 на полезную модель. Многофункциональное устройство регистрации процессов на линии электропередачи / Панфилов Д.И., Лачугин В.Ф., Смирнов А.Н., Образцов С. А., Ахметов И.М., Рывкин А.А., Шимина А.О. Артемьев И.Ф., Арутюнов С.А., Горюшин Ю.А. // 2013.

121. Калибратор переменного тока Ресурс К2М [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www.entp.ru/catalog/obraz/1](http://www.entp.ru/catalog/obraz/1).

122. 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.

123. Голдинг С. Исследования переходных процессов при замыканиях на землю в кабельных сетях. Выбор защиты от замыканий на землю// Энергетика за рубежом. Релейная защита. М., Л.: Госэнергоиздат. 1963. Вып. 5. С. 323 - 334.

124. Вильгейм Р. и Уотерс М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах. М., Л.: Госэнергоиздат, 1959.

125. Лихачев Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. М.: Энергия, 1971.

126. Реле тока с повышенной чувствительностью типа РТЗ-51.01 / Руководство по эксплуатации БКЖИ.647649.006 РЭ – Чебоксары: ОАО «ЧЭАЗ».

127. Нудельман Г.С., Шамис М.А. Быстродействующее реле тока для защиты от замыканий на землю // Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты низкого напряжения. – 1981. – Вып. 1 (92) – С. 13.

128. Нудельман Г.С., Кочкин Н.А., Эверсков О.Л. Органы защит от замыканий на землю // Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты низкого напряжения. – 1982. - № 1. – С. 16 – 18.

129. Универсальные устройства защиты MICOM P120/121/122/123 (a3). Alstom. - 2001.
130. Реле защиты /В.С. Алексеев, Г.П. Варганов, Б.И. Панфилов, Р.З. Розенблюм. М.: Энергия. – 1976.
131. Кискачи В.М. Защита от однофазных замыканий на землю ЗЗП-1. – М.: Энергия, 1972.
132. Кискачи В.В. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях напряжением 6-10 кВ с различным режимом заземления нейтрали типа ЗЗН. – М.: ИУЭГУУ, ВИПКэнерго, ИПКгосслужбы, 2004.
133. Богдан А.В., Калмыков В.В. Направленная защита повышенной селективности при замыканиях на землю в сети с изолированной нейтралью // Изв. ВУЗов. Электромеханика. 1993. - № 4. - С. 88-91.
134. Кискачи В.М., Назаров Ю.Г. Устройства сигнализации замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ.– В кн.: Сигнализация замыканий на землю в компенсированных сетях. Под ред. В.И. Иоэльсона. - М.: Госэнергоиздат. - 1962. – С. 39 – 66.
135. Кискачи В.М., Назаров Ю.Г. Сигнализация однофазных замыканий на землю в компенсированных кабельных сетях 6-10 кВ / Труды ВНИИЭ, вып. 16. - М.: Госэнергоиздат, 1963. – С. 219 – 251.
136. Кискачи, В.М. Селективность сигнализации замыканий на землю с использованием высших гармоник токов нулевой последовательности // Электричество. – 1967. - № 9. - С. 24-30.
- 137 . Устройство сигнализации однофазных замыканий на землю типа УСЗ-2/2. Руководство по эксплуатации ИАЕЖ.647649.002 РЭ1.
138. Устройства сигнализации замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ / В.М. Кискачи, С.Е. Сурцева, Н.М. Горшенина и др.// Электрические станции. – 1972. - № 4. – С. 69 – 72.



139. Лебедев О.В., Шуин В.А. Параметры настройки устройств сигнализации замыканий на землю, сравнивающих токи в присоединениях // Электричество. - 1980. – № 2 – С. 21-25.

140. Гельфанд, Я.С. Релейная защита распределительных сетей. М.: Энергия, 1975.

141. А.С. СССР № 299908. Способ направленной защиты от однофазных замыканий на землю / В.М. Кискачи // Б.И. № 12. - 1971.

142 . А.С. СССР № 221121. Способ защиты от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью / В.М. Кискачи// Б.И. № 21. - 1968.

143. Устройство микропроцессорной защиты «Сириус-2-Л». Техническое описание, инструкция по эксплуатации, паспорт. Москва. 2002.

144. Нудельман Г.С., Шевелев В.С. Избирательная защита от замыканий на землю для распределительных сетей 6-35 кВ // Энергетик. - 2001. - № 3. - С. 32-33.

145. А.С. СССР № 136445. Способ определения поврежденной электрической линии / В.А.Борухман, В.И. Иоэльсон // Б.И. № 5, 1961.

146. Борухман В.А., Иоэльсон В.И. Центральное устройство селективной сигнализации замыканий на землю типа «Земля» / Наладочные и экспериментальные работы ОРГРЭС. Вып 35. – М.: Энергия. – 1968. – С. 316 – 324.

147. Лебедев О.В., Шуин В.А. О защите от замыканий на землю компенсированных кабельных сетей 6-10 кВ с использованием принципа сравнения амплитуд переходных токов // Электричество. - 1973. – № 12 – С. 12-17.

148. Шуин В.А. Защита от замыканий на землю компенсированных кабельных сетей 6-10 кВ с использованием принципа сравнения амплитуд переходных токов в присоединениях: дис. ... канд. техн. наук – М, 1974.

149. Шуин В.А. Теория и практическая реализация защит от однофазных замыканий на землю, основанных на использовании переходных процессов, в электрических сетях 3-35 кВ: дис. ... докт. техн. наук. – М., 1994.

150. Бухтояров В.Ф., Поляков В.Е., Зырянов А.Н. Централизованное устройство селективной сигнализации замыканий на землю типа СЗВИ // Электрические станции. – 1968. - № 11. С. 78 – 80.

151. Бухтояров В.Ф., Поляков В.Е. Централизованная защита от замыканий на землю с параллельной индикацией наибольшего вектора тока. – М.: ГОСИНТИ, 1967.

152. Бухтояров В.Ф. Централизованная защита от замыканий на землю в сетях с малыми токами замыкания // Промышленная энергетика. – 1976. - № 11. – С. 38-41.

153. Бухтояров В.Ф., Токарев Г.И., Удавихин В.И. Устройство для направленной защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-35 кВ // Электрические станции. - 1996. - № 6. - С. 57 - 59.

154. Савин С.Н. Исследование переходных процессов и разработка централизованной защиты от замыканий на землю компенсированных сетей с блокировкой по сумме переходных токов присоединений: дис. ... канд. техн. наук. – Минск, 1978.

155. А.С. СССР 904065. Устройство для централизованной защиты от замыкания на землю в сети с изолированной или компенсированной нейтралью: / С.О. Алексинский// Б.И. № 5. - 1980.

156. А.С. СССР 1277283. Устройство для централизованной защиты от замыканий на землю в сети с изолированной или компенсированной нейтралью / О.В. Лебедев, А.М. Чухин, В.А. Шуин // Б.И. №46 - 1986.

157. Шуин В.А., Гусенков А.В., Мурзин А.Ю. и др. Устройства сигнализации и защиты от однофазных замыканий на землю в компенсированных кабельных сетях // Энергетическое строительство. – 1993. - № 10. - С. 35 – 39.

158. Шуин В.А., Гусенков А.В., Дроздов А.И. Централизованное направленное устройство сигнализации однофазных замыканий на землю с использованием переходных процессов // Электрические станции. – 1993. - № 9. – С. 53 – 57.

159. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6 – 10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2001.

160. Шалин А.И., Щеглов А.И. Централизованная защита от замыканий на землю в сетях 35 кВ // Известия академии наук. Энергетика. - 2002. - № 2. - С. 104-116.

161. Шалин А.И., Хабаров А.М., Шевчук В.В. Защита от замыканий на землю в сети 6-35 кВ, реагирующая на отношение токов присоединений // Избранные труды НГТУ-2004 / Под ред. А.И. Шалина. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. - С. 18-27.

162. Нейгебауэр Г. Определение места кратковременного замыкания на землю при помощи электронного реле // Энергетическое обозрение. - 1936. - № 11. – С. 10-20.

163. Geise F. Erdschluss und Erdschlussrelais // Siemens-Z. - Т. 26. - 1952. - № 2.- S. 78-84.

164. Попов И.Н. О принципах выполнения защиты от замыканий на землю с импульсным реле направления мощности // Электричество. - 1962. - № 2. - С. 14-19.

165. Попов И.Н., Соколова Г.В. Устройство сигнализации замыканий на землю с импульсным реле направления мощности. В кн.: Сигнализация замыканий на землю в компенсированных сетях. Под ред. В.И. Иоэльсона. - М.: Госэнергоиздат. – 1962. – С. 12 – 38.

166. Соколова Г. В. Разработка защиты от замыканий на земли с использованием волновых переходных процессов // Вопросы оптимального

развития энергосистем и новые технические средства их защиты. М.: Наука, 1970. - С. 74- 89

167. Попов И.Н., Соколова Г.В., Махнев В.И. Импульсная защита электрических сетей от замыканий на землю типа ИЗС // Электрические станции.–1978. - № 4. – С. 69–73.

168. Соколова Г. В. Защита от замыканий на землю ИЗС // Электрические станции. -1984. - № 1. - С. 59—62.

169. Патент РФ № 2550348. Устройство защиты от однофазных замыканий на землю воздушных и кабельных линий распределительных сетей 6-35 кВ/ Лачугин В.Ф., Иванов С.В., Белянин А.А.// Б.И. № 13. - 2015.

170. Дударев Л.Е., Зубков В.В. Проблемы защиты от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ // Электричество. - 1979. - № 2. - С. 8-12.

171. Дударев Л.Е., Зубков В.В., Стасенко В.И. Комплексная защита от замыканий на землю // Электрические станции. - 1981. - № 7. - С. 59-61.

172. Дударев Л.Е., Зубков В.В. Устройство универсальной комплексной защиты от замыканий на землю для сетей 6-35 кВ // Промышленная энергетика. -1982. - №4. - С. 36-38.

173. Корчмарик Ю.Г., Кокарев А.А. Опыт эксплуатации прибора сигнализации замыкания на землю ПЗЗМ 1М в сетях 3, 6, 10 кВ/ В сб.: Релейная защита и автоматика энергосистем – М.: ВВЦ, 7 – 9 апреля 2009 г.

174. Сирота И.М. Сигнализация замыканий на землю в компенсированной сети, основанная на использовании тока второй гармоники В кн.: Сигнализация замыканий на землю в компенсированных сетях. Под ред. В.И. Иоэльсона. - М.: Госэнергоиздат. – 1962. – С. 67 – 75.

175. Григорьев А.В. Защита от однофазных замыканий на землю в компенсированных сетях, реагирующая на наложенный ток: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1967. – 20 с.

176. Головки С.И., Вайнштейн Р.А., Албул В.Н. Условия селективной работы защит с наложением контрольного тока при перемежающихся дуговых замыканиях // Изв. ВУЗов. Энергетика. - 1988. - № 7. - С. 22-26.

177. Вайнштейн Р.А., Головки С.И., Григорьев В.С. и др. Защита от замыканий на землю в компенсированных сетях 6-10 кВ // Электрические станции. - 1998. - №7. - С. 26-30.

178. Головки С.И., Вайнштейн Р.А., Юдин С.М. Селективная сигнализация однофазных замыканий и измерение расстройки компенсации в сетях 35 кВ // Электрические станции. - 2000. - № 7. - С. 33-36.

179. Борухман В.А. Об эксплуатации селективных защит от замыканий на землю в сетях 6 - 10 кВ и мероприятиях по их совершенствованию // Энергетик. - 2000, № 1. – С. 20 - 22.

180. Лачугин В.Ф. Экспериментальные исследования импульсной защиты от замыканий на землю воздушных и кабельных сетей с компенсированной нейтралью // Электрические станции. – 2005. - № 8. – С. 58 – 63.

181. Лачугин В.Ф., Кононенко В.Ф. Устройства защиты от замыканий на землю в сетях 6-35 кВ ОАО «МРСК Юга» и необходимость разработки требований по учету работы этих защит // Известия ВУЗов. Электромеханика. - 2013. - № 1.- С. 86-88.

182. Сиротинский Л. И. Техника высоких напряжений. Ч. 3. Волновые процессы и внутренние перенапряжения в электрических системах. М.,Л.: Госэнергоиздат, 1959. Вып. 1.

183. Стрелков В. М. Основы расчета в матричной форме распространения токов высокой частоты по многопроводным линиям. М., Л.: Энергия, 1966. (Тр. ВНИИЭ. Вып. 26).- С. 128—155.

184. Шуин В.А., Гусенков А.В. Режимы заземления нейтрали и защиты от замыканий на землю, основанные на использовании переходных процессов, в электрических сетях 6-10 кВ // Вестник ИГЭУ. – 2001. - № 1.

185. Лачугин, В.Ф. Направленная импульсная защита от замыканий на землю // Энергетик. – 1997. - № 9. – С. 21.

186. Лачугин, В.Ф. Опыт разработки импульсных защит от замыканий на землю // Изв. ВУЗов. Электромеханика. - 2012. - № 2. - С. 77-79.

187. Лачугин В.Ф., Иванов С.В. Новое микропроцессорное устройство для воздушных и кабельных линий 6 – 35 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. - 2011. - № 6. - С. 150-151.

188. Лачугин В.Ф., Иванов С.В., Белянин А.А. Разработка импульсных защит от замыканий на землю // Релейная защита и автоматизация. - 2012. - № 3. - С. 44-50.

189. Pundt H. Untersuchung der Ausgleichvorgaunge bei Erdschluss in Hochspannungsnetzen mit isoliertem Sternpunkt und induktiefer Sternpunkterdung als Grundlage zur selektiver Erdschlusserfassung / Diss. Zur Erlangung des`Grades eines Dr.-Ing. – TU Dresden, 1963.

190. Gegner L. Elektronisches Erdschlussrelays TRER zur selektiver Erdschlusserfassung // Elektro-Apparate Mitteilungen. – 1967. - № 1. – S. 14-17.

191. Устройство направленной волновой защиты от замыканий на землю воздушных и кабельных линий 6-35 кВ типа УЗС-01. – Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Казань: Энергосоюз. – 1998. – 12 с.

192. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.-Л.: Энергия, 1964.

193. Шалыт Г.М. Определение места повреждения линий электропередачи эмпирическими методами, М.: Энергия, 1968.

194. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках. М.: Энергоатомиздат, 1984.

195. Руководящие указания по релейной защите. Защита блоков генератор-трансформатор и генератор-автотрансформатор. М. –Л.: Энергия, 1963, вып. 5.

196. Микропроцессорная селективная защита от замыканий на землю воздушных и кабельных линий 6-35 кВ «ИЗН-01». - [Электронный ресурс] // URL: <http://www.ic-bresler.ru>.

197. Ваксер Б. Д., Гуревич З. М. Предпробивные процессы в высоковольтной микалентной изоляции и вопросы методики ее испытания высоким переменным напряжением// Ионизационное старение, короностойкость и методы испытаний высоковольтной изоляции. М.: ЦИНТИ Приборэлектропром, 1963. - С. 130—139.

198. Кулаковский В. Б. Исследование незавершенных пробоев в изоляции генераторов// Электротехника. - 1968. - № 9. - С. 58—59.

199. Вишняков Р. Д., Каганов З. Г., Смирнов Ю.Р. Волновые параметры мощных гидрогенераторов // Электротехника. - 1968. № 11. - С. 27-30.

200. Люлько В. А. Волновые параметры турбогенераторов// Электричество. - 1960. - № 9. - С. 49—52.

201. Попов И. Н., Соколова Г. В. Селективная направленная защита гидрогенераторов от замыканий на землю// Электричество. - 1980. - № 7. - С. 51—58.

202. А. С. СССР № 274197. Устройство для защиты генератора / Р. Д. Вишняков, З. Г. Каганов, И. Н. Попов и др.// Б.И. № 21. -1970.

203. Кискачи В. М. Защита генераторов энергоблоков от замыканий на землю в обмотке статора// Электричество. - 1975. - № 11. - С 25—31.

204. Электротехнический справочник /под общей ред. профессоров МЭИ. – 7-е изд. М: Энергоатомиздат, 1988. Т. 2.

205. Караев Р. И. Переходные процессы в линиях большой протяженности. М.: Энергия, 1978.

206. Лугинский Я.Н., Новаковский А.Н. Цифровые регистраторы аварийных событий и процессов в энергосистемах за рубежом // Современные методы и средства быстродействующего преобразования режимных параметров энергосистемы. Челябинск: 1990. - С. 48-50.

207. Лачугин В.Ф. Опыт эксплуатации волновой быстродействующей направленной релейной защиты ВЛ СВН // Электрические станции.- 2010.- № 9. - С. 27-34.

208. Атабеков Г. И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. М., Л.: Госэнергоиздат, 1957.

209. Козлов В.Н., Павлов А.О., Бычков Ю.В. Развитие микропроцессорных средств определения места повреждения на линиях электропередачи // Релейная защита и автоматизация. - 2014.- № 2.- С. 45-49.



## ПРОГРАММА

### **испытаний на электродинамической модели основных измерительных органов волновой направленной высокочастотной защиты**

Настоящая программа предусматривает проверку действия измерительных органов волновой защиты в режимах КЗ и коммутаций при установке защиты в соответствии с моделируемыми схемами электропередачи П1.1 - П1.8.

#### **П1.1. Моделируемые схемы электропередачи**

Схема П1.1 Основная схема, соответствующая электропередаче 1150 кВ с защищаемой ЛЭП длиной 600 км, к концам которой подключены смежные линии длиной 500 км, а также трансформатор (Рис. П1.1).

Схема П1.2 В основной схеме П1.1 защищаемая ЛЭП является одной из параллельных к линии длиной 600 км (Рис. П1.2).

Схема П1.3 Защищаемая ЛЭП 600 км, на одном из концов которой подключены трансформатор и генератор (Рис. П1.3).

Схема П1.4 Защищаемая ЛЭП длиной 15 - 60 км, к одному из концов которой подключены трансформатор и генератор (Рис. П1.4).

Схема П1.5 Защищаемая ЛЭП длиной 600 км, соединенная со смежной ЛЭП, длиной 15-60 км, к противоположному концу которой подключены трансформатор и генератор (Рис. П1.5).

Схема П1.6 То же, что и в схеме 1.4, но кроме трансформатора и генератора подключена ЛЭП (Рис. П1.6).

Схема П1.7 То же, что и в схеме 1.5, но кроме трансформатора и генератора подключена ЛЭП (Рис. П1.7).

Схема П1.8 Схема электропередачи, состоящая из двух участков ЛЭП, соединенных между собой устройством продольной компенсации (Рис. П1.8).

## **П 1.2. Перечень проверяемых свойств и параметров защиты**

П1.2.1. Селективность действия органов направления мощности (ОНМ) при различных видах КЗ.

П1.2.2. Время срабатывания ОНМ и избирателя поврежденных фаз при различных видах КЗ в середине и по концам защищаемой линии (В некоторых схемах время срабатывания определяется и для других точек КЗ).

П1.2.3. Действие ОНМ при включении защищаемой и смежной линии, а также при коммутации трансформатора на холостой ход (для основной схемы).

П1.2.4. Действие защиты в неполнофазном режиме и в цикле АПВ.

П1.2.5. Действие защиты в режимах качаний мощности и асинхронного хода.

## **П1.3. Условия проверки**

П1.3.1. Переток мощности в нормальном режиме, предшествующем КЗ, направлен от шин в линию. Для некоторых случаев должно быть проверено действие защиты при обратном направлении перетока (к шинам).

П1.3.2. Фазовый угол напряжения в месте КЗ должен иметь значения в момент КЗ 0; 45; 90; 135; 180 электрических градусов. В некоторых случаях проверка может быть проведена и для других фазовых углов.

П1.3.3. Режим проверки соответствует максимальному, когда все генераторы схемы включены. Для некоторых случаев может быть проверено действие защиты и в минимальном режиме.

## **П1.4. Виды испытаний для моделируемых схем электропередачи**

П1.4.1. Схема П1.1.

П1.4.1.1. В нормальном режиме производится измерение небалансов на входах и выходах схем выделения аварийных составляющих (с контролем гармонического состава) при изменении частоты от 45 до 55 Гц. Измерения производятся в максимальном режиме работы энергосистемы.

П1.4.1.2. В точках 1, 2 и 3 при внутренних КЗ для защит М и N, проводятся:

- однофазные КЗ каждой из фаз;
- двухфазные КЗ фаз А и В и А и С;
- двухфазные КЗ фаз А и В на землю;
- трехфазные КЗ;
- переход однофазного (А0) в двухфазное (АС0) КЗ на землю;
- однофазное КЗ (А0) в точке 3 через переходное сопротивление, варьируемое от 5 до 100 Ом.

П1.4.1.3. В точках 4, 5 и 6 при внешних КЗ для защиты М и N проводятся указанные для точек 1, 2 и 3 виды КЗ (кроме двух последних).

П1.4.1.4. В точке 7 проводятся КЗ на шинах низшего напряжения трансформатора, внешние для защиты N.

П1.4.1.5. Проводится коммутация выключателями защищаемой и смежной линии, а также включение трансформатора на холостой ход.

П1.4.1.6. В неполнофазном режиме проводятся однофазные КЗ в точках 1, 2 и 3.

П1.4.1.7. В точках 1, 2 и 3 проводятся однофазные КЗ с последующим ОАПВ (успешным или неуспешным).

#### П1.4.2. Схема П1.2.

П1.4.2.1. В точках 1, 2 и 3 при внутренних КЗ проводятся:

- однофазные КЗ (АО);
- двухфазные КЗ (А и С).

П1.4.2.2. В точках 4, 5 и 6 при внешних КЗ на параллельной линии проводятся:

- однофазные КЗ (АО);
- двухфазные КЗ (АС).

#### П1.4.3. Схема П1.3.

В точках 1, 2 и 3 при внутренних КЗ проводятся:

- однофазные КЗ (АО);
- двухфазные КЗ (АС).

#### П1.4.4. Схема П1.4.

В точке 1 при внешних для защиты М КЗ проводятся:

- однофазные КЗ (АО);
- двухфазные КЗ (АС).

#### П1.4.5. Схема П1.5.

В точке 1 при внутренних КЗ проводятся:

- однофазные КЗ (АО);
- двухфазные КЗ (АС).

#### П1.4.6. Схема П1.6.

П1.4.6.1. В точке 1 при внутренних КЗ проводятся:

- однофазные КЗ (АО);
- двухфазные КЗ (АС).

П1.4.6.2. В точке 2 при внешних КЗ для защиты М и внутренних КЗ для защиты N проводятся:

- однофазные КЗ (АО);
- двухфазные КЗ (АС).

#### П1.4.7. Схема П1.7.

П1.4.7.1. В точке 1 при внутренних КЗ проводятся:

- однофазные КЗ (АО);
- двухфазные КЗ (АС).

П1.4.7.2. В точке 2 при внешних КЗ для защиты М и внутренних КЗ для защиты N проводятся:

- однофазные КЗ (АО);

- двухфазные КЗ (АС).

П1.4.8. Схема П1.8.

П1.4.8.1. В точках 1, 2, 3 и 4, соответствующих внутренним КЗ, проводятся:

- однофазные КЗ (АО);

- двухфазные КЗ (АС).

П1.4.8.2. В точках 5, 6 и 7 при внешних КЗ для защиты N и внутренних КЗ для защиты M проводятся:

- однофазные КЗ (АО);

- двухфазные КЗ (АС).

П1.4.9. В специальной схеме, обеспечивающей требуемую кратность тока качаний мощности, проводится проверка работы защиты при синхронных качаниях и асинхронном ходе.

П1.4.10. Виды проверок, уточняемые в процессе испытаний.

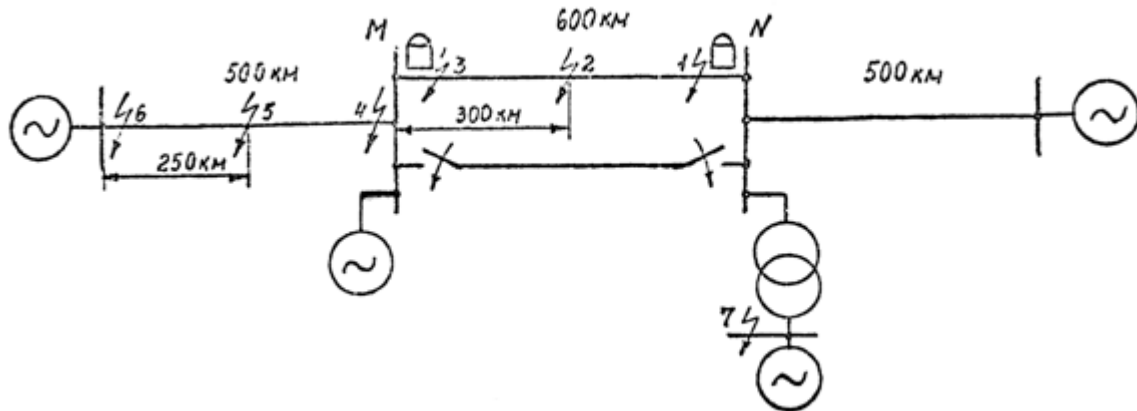


Рис. П1.1. Схема П1.1

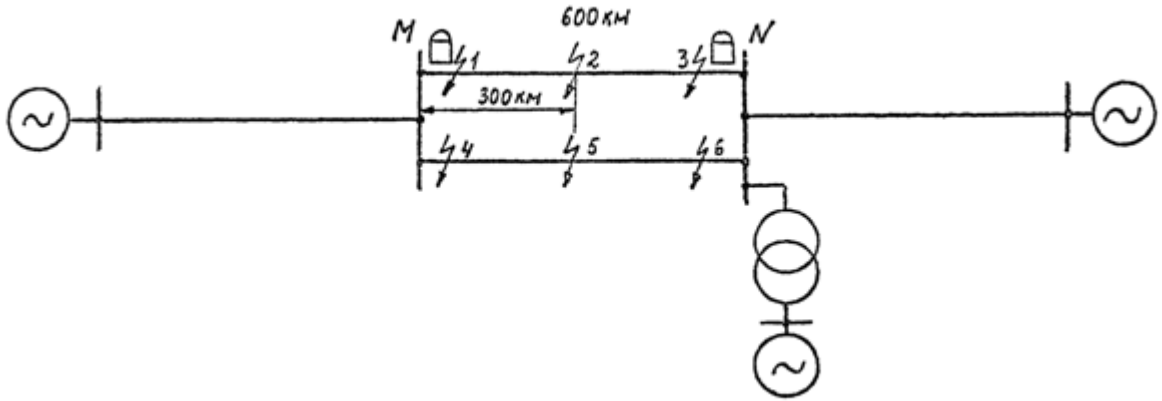


Рис. П1.2. Схема П1.2

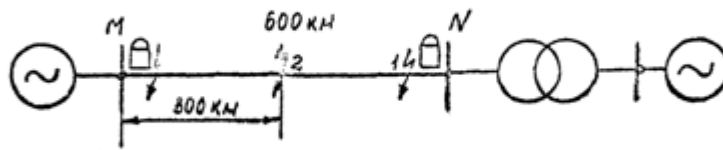


Рис. П1.3. Схема П1.3

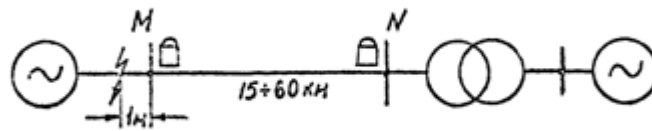


Рис. П1.4. Схема П1.4

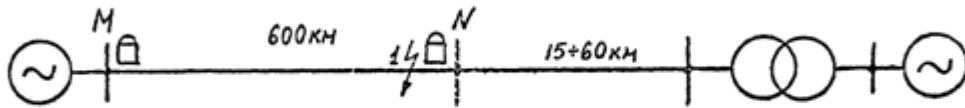


Рис. П1.5. Схема П1.5

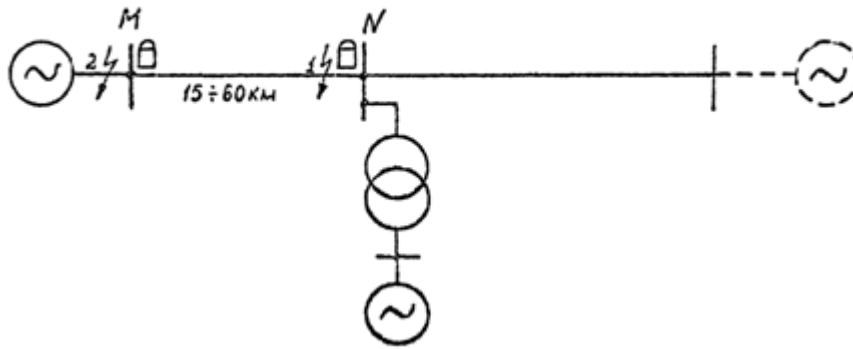


Рис. П1.6. Схема П1.6

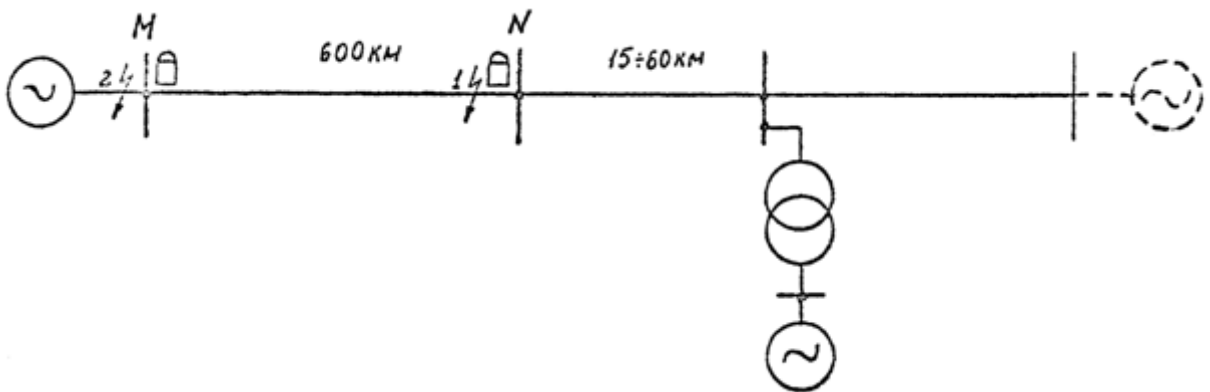


Рис. П1.7. Схема П1.7

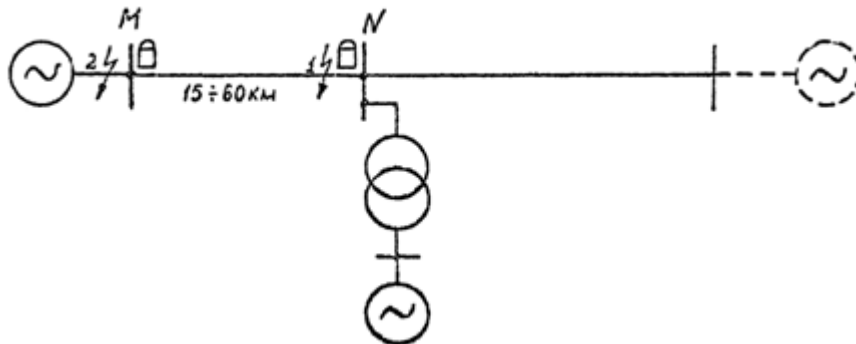


Рис. П1.8. Схема П1.8

## Расчёт схемы испытаний и выбор оборудования электродинамической модели

Для испытания защиты ВЛ ВН и СВН на электродинамической модели ВНИИЭ собрана модель электропередачи 1150 кВ, схема которой (рис. 1.44), состоит из четырех генерирующих узлов, связанных между собою тремя участками ЛЭП напряжением длиной несколько сотен километров каждый, один из которых (средний) может быть выполнен двухцепным. На рис. 1.45 представлена схема модели заданной электропередачи, два генерирующих узла (Г1 и Г3) представлены двумя модельными генераторами типа МГ-5-1500, узлы Г2 и Г4 представлены соответственно модельным генератором типа МГ-15-1000 и шинами энергосистемы Мосэнерго за соответствующим реактивным сопротивлением. ЛЭП воспроизводятся на модели в виде цепочечной схемы замещения.

### П2.1. Выбор масштабов моделирования

Масштаб моделирования по напряжению был определен, исходя из номинальных напряжений линии электропередачи оригинала и линии модели.

$$U_{л}^{op} = 1150 \text{ кВ}; \quad U_{л}^{mod} = 800 \text{ В};$$

$$m_V = \frac{U_{л}^{op}}{U_{л}^{mod}} = \frac{1150}{800} = 1,438 \frac{\text{кВ } op}{\text{В } mod}.$$

Масштаб моделирования по току был определен, исходя из соотношения коэффициентов трансформации трансформаторов тока для линии электропередачи оригинала и трансформаторов тока, установленных на линии модели

$$K_{TT}^{op} = 3000/1; \quad K_{TT}^{mod} = 5/1;$$

$$m_I = \frac{K_{TT}^{op}}{K_{TT}^{mod}} = \frac{3000/1}{5/1} = 600 \frac{\text{А } op}{\text{А } mod}.$$



Масштабы моделирования по сопротивлению  $m_Z$  и по мощности  $m_P$  были получены на основании масштабов  $m_U$  и  $m_I$

$$m_Z = \frac{m_U}{m_I} = \frac{1,438}{0,6} = 2,39 \frac{\text{Ом оп}}{\text{Ом мод}};$$

$$m_P = \frac{m_U^2}{m_Z} = \frac{1,438^2}{2,39} = 863 \frac{\text{МВт оп}}{\text{кВт мод}}.$$

## П2.2. Параметры основных элементов модели

### П2.2.1. Моделирование узла № 1

Как видно из рис. 1.44, узел № 1 электропередачи представлен на модели генератором типа МТ-5-1500 и модельным повышающим трансформатором, с помощью которого генератор подключается к модели ЛЭП. Последовательно с генератором на стороне низшего напряжения трансформатора включены дополнительные катушки индуктивности для получения одинаковых значений оригинала и модели в соответствии с основными критериями подобия генераторов. Основу узлов Г1, Г2 и Г4 составляют генераторы типа ТВВ-800-2. В таблицах П2.1 и П2.2 представлены параметры генератора ТВВ-800-2 и модельного генератора типа МТ-5-1500 соответственно.

Таблица П2.1

$P, \text{МВт}$	$\text{Cos } \varphi$	$X_d, \text{о.е.}$	$X_d', \text{о.е.}$	$X_d'', \text{о.е.}$	$X_{ad}, \text{о.е.}$	$\tau_{d_0}, \text{с}$	$\tau_j, \text{с}$
800	0,9	2,34	0,313	0,223	2,14	9,5	5,3

Таблица П2.2

$P, \text{кВт}$	$\text{Cos } \varphi$	$X_d, \text{Ом}$	$X_d', \text{Ом}$	$X_d'', \text{Ом}$	$X_{ad}, \text{Ом}$	$\tau_{d_0}, \text{с}$	$\tau_j, \text{с}$
4	0,8	14,2	1,44	0,625	13,94	1,4	7,8

Величина реактивного сопротивления катушки индуктивности, включенной последовательно с модельным генератором, определена, исходя из

критериев подобия  $\frac{X'_d}{X_{ad}} = idem$  для генератора оригинала и модели. Для генератора ТВВ-800-2  $\frac{X'_d}{X_{ad}}$  равно 0,146, а для генератора МТ-5-1500 составляет величину равную 0,103.

Расчетное значение этой величины было получено равным

$$\Delta X = \left( \frac{X'_d}{X_{ad}} \right)^{op} \times X_{ad}^{mod} - X_d^{mod} = 0,6 \text{ Ом.}$$

На катушках индуктивности, установленных по одной в каждой фазе между генератором и трансформатором, была включена одна секция, сопротивление которой составляет 0,54 Ом. При этом значения параметров генератора следующие:

$$X_d = 14,2 + 0,54 = 14,74 \text{ Ом;}$$

$$X'_d = 1,44 + 0,54 = 1,98 \text{ Ом;}$$

$$X_d'' = 0,63 + 0,54 = 1,17 \text{ Ом.}$$

Коэффициент трансформации повышающего трансформатора был выбран, исходя из необходимости иметь одинаковыми в модели и оригинале (отличающимися только масштабами) приведенные к напряжению линии основные параметры генераторов. Значения основных параметров генераторных узлов оригинала в именованных единицах, приведенных к напряжению линии, представлены на рис. 1.44. Для узла Г1  $X'_d$  в единицах модели составляет  $X'_d = \frac{58}{m_z} = 24,27$  Ом, для модельного генератора соответствующая величина равна  $X'_d = 1,98 K_{TP}^2$ .

Отсюда

$$K_{TP} = \sqrt{\frac{24,27}{1,98}} = 3,5.$$

На каждом из трех трансформаторов группы, соединенных на стороне низшего напряжения в треугольник, а на стороне высшего - в звезду, была собрана схема с коэффициентом трансформации

$$K_{TP} = \frac{\sqrt{3} \times W_{\lambda}}{W_{\Delta}} = \frac{\sqrt{3} \times 208 \times 2}{208} = 3,46.$$

Индуктивное сопротивление модельного трансформатора с помощью магнитного шунта было настроено равным соответствующему сопротивлению эквивалентного трансформатора узла Г1 схемы оригинала

$$X_K^M = \frac{X_K^{op}}{m_z} = \frac{30,6}{2,39} = 12,8 \text{ Ом.}$$

В таблице П2.3 приведены в относительных единицах параметры модельного генератора, причем при подсчете базисного сопротивления за единицу напряжения принято напряжение модели линии  $U_{Л}^{МОД} = 800 \text{ В}$ , а за единицу мощности - расчетная величина мощности модельного генератора

$$S = \frac{n_{\Gamma} \times P_{\Gamma}}{\cos \varphi \times m_p} = \frac{8 \times 800}{0,9 \times 863} = 8,24 \text{ кВА.}$$

Таблица П2.3

$X_{баз}, \text{ Ом}$	$X_d$	$X_d'$	$X_d''$	$X_{ad}$	$\tau_j, \text{ с}$
77,67	2,28	0,306	0,18	2,15	5,3

В таблице П2.4 приведено сопоставление основных критериев подобия генераторов оригинала и модели.

Таблица П2.4

$X_d / X_{ad}$		$X_d' / X_{ad}$		$X_d'' / X_{ad}$	
оригинал	модель	оригинал	модель	оригинал	модель
1,109	1,06	0,146	0,142	0,104	0,08

Как видно из приведенных таблиц П2.1 - П2.4, расхождения как по параметрам, так и по критериям подобия генераторов узла Г1 и модельного генератора ТГ-5 незначительны. В связи с тем, что естественная постоянная времени обмотки возбуждения модельного генератора  $\tau_{d_0}$  значительно меньше соответствующей величины генератора оригинала, на модели была осуществлена компенсация активного сопротивления обмотки возбуждения введением положи-

тельной обратной связи по току ротора [56]. Величина постоянной времени  $\tau_{d_0}$  после настройки стала равной 9 с. Регулирование возбуждения модельного генератора осуществлялось по отклонению напряжения, по производной напряжения в точке начала линии, а также по первой и второй производным тока генератора. Кратность форсировки возбуждения была установлена равной двум. Характеристики паровой турбины и регулятора скорости воспроизводились с помощью устройств математического аналогового моделирования. В качестве исполнительного элемента применен тиристорный преобразователь, питающий приводной двигатель постоянного тока. Статизм регулятора скорости был настроен на 4 %.

Для имитаций автотрансформаторной группы, связывающей узел Г1 с шинами 1150 кВ, использовались катушки индуктивности модели линии (ячейки 012, 013), индуктивное сопротивление которых настраивалось на значение соответствующей величины для схемы оригинала в единицах модели

$$X = \frac{X_{AT}}{m_z} = \frac{39,6}{2,39} = 16,57 \text{ Ом.}$$

Сопротивление катушек индуктивности включенных последовательно ячеек 012 и 013 было настроено на значение, равное  $X = 1,2 + j 16,9 \text{ Ом}$ .

### П2.2.2. Моделирование узла № 2

Блок генератор-трансформатор узла № 2 с параметрами, представленными в таблице П2.5, эквивалентен 20 генераторам мощностью 800 МВт каждый. Значения сопротивлений даны в именованных единицах, приведенных к напряжению ЛЭП.

Таблица П2.5

$P$	$\cos\varphi$	$X_d$	$X_d'$	$X_d''$	$X_{ad}$	$\tau_{d_0}$	$\tau_j$	$X_{KT}$
МВт		Ом	Ом	Ом	Ом	С	С	Ом
20x800	0,9	174,1	23	16,5	159,2	9	5,3	12,2

Как видно из рис. 1.45, этот эквивалентный блок на модели представлен генератором ГГ-2 типа МГ-15-1000 и повышающим трансформатором. Параметры модельного генератора типа МГ-15-1000 приведены в таблице П2.6.

Таблица П2.6

$P$	$X_{ad}$	$X_d$	$X_d'$	$X_q$	$X_d''$	$\tau_{d_0}$	$\tau_j$
кВт	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	С	С
12	7,65	7,85	1,72	3,9	0,77	1,75	12,0

Моделирование эквивалентного генератора было проведено по равенству приведенных к напряжению линии переходных сопротивлений  $X_d'$  генераторов оригинала и модели. Значение  $X_d'$  для генератора оригинала в единицах модели составляет

$$X_d' = \frac{23}{2,39} = 9,63 \text{ Ом},$$

а для модельного генератора

$$X_d' = 1,72 \times K_{TP}^2.$$

Отсюда был определен коэффициент трансформации повышающего модельного трансформатора

$$K_{TP} = \sqrt{\frac{X_d'^{top}}{X_d'^{mod}}} = \sqrt{\frac{9,63}{1,72}} = 2,37.$$

Для схемы, выполненной на каждом из трех однофазных трансформаторов, соединенных между собою со стороны генераторного напряжения в треугольник, а со стороны высшего напряжения в звезду  $K_{TP}$ , был получен равным:

$$K_{TP} = \sqrt{3} \frac{W_\lambda}{W_\Delta} = \frac{\sqrt{3} \times 204}{146} = 2,39.$$

В таблице П2.7 приведены параметры генератора и в именованных и в относительных единицах, приведенных к напряжению высшей обмотки

повышающего трансформатора  $U_{\text{баз}} = 800$  В. За единицу мощности генератора принято расчетное значение мощности узла № 2 в единицах модели, равное

$$P_{\Gamma}^M = \frac{P_{\Gamma} \times n_{\Gamma}}{m_p} = \frac{16000}{863} = 18,54 \text{ кВт};$$

$$S_{\Gamma_{\text{баз}}}^M = \frac{P_{\Gamma}^M}{\cos \varphi} = \frac{18,54}{0,9} = 20,6 \text{ кВА};$$

$$X_{\text{баз}}^M = \frac{800^2}{20,6 \times 10^3} = 31,07 \text{ Ом.}$$

Таблица П2.7

$X_d$		$X_d'$		$X_d''$	
Ом	о.е.	Ом	о.е.	Ом	о.е.
44,84	1,44	9,82	0,316	4,4	0,142

Сопоставление модели и оригинала генератора для узла № 2 в соответствии с критериями подобия приведено в таблице П2.8.

Таблица П2.8

$X_d / X_{ad}$		$X_d' / X_{ad}$		$X_d'' / X_{ad}$		$\tau_j$ с	
оригинал	модель	оригинал	модель	оригинал	модель	оригинал	модель
1,109	1,03	0,146	0,224	0,104	0,1	5,3	7,7

Как видно из таблиц П2.1, П2.7 и П2.8 имеет место существенное расхождение параметров модели и оригинала  $X_d' / X_{ad}$  и в параметрах  $X_d$  и  $X_d''$ . Для получения равными в относительных единицах параметров  $X_d$  и  $X_d''$  нужно увеличивать индуктивное сопротивление рассеяния генератора, но при этом еще больше возрастет критерий  $X_d' / X_{ad}$  нарушится равенство параметров  $X_d'$ , а также критерий  $X_d'' / X_{ad} = idem$ , а последний критерий имеет определяющее значение для настоящей работы. Поэтому дополнительный дроссель рассеяния в цепь статора не включался. На модельном генераторе ГГ-2 была установлена тиристорная система возбуждения со следующими номинальными параметрами цепи возбуждения

$$i_{f_{\text{ном}}} = 15 \text{ А}; \quad U_{f_{\text{ном}}} = 32 \text{ В};$$

$$i_{f_{\text{форс}}} = 30 \text{ А}; \quad U_{f_{\text{форс}}} = 64 \text{ В.}$$

Для получения постоянной времени цепи возбуждения  $\tau_{d_0} = 9,5$  с была осуществлена компенсация активного сопротивления обмотки возбуждения введением в задающее устройство сигнала положительной обратной связи по току ротора [56].

Регулирование возбуждения осуществлялось по отклонению и производной частоты и напряжения в точке подключения узла № 2 к модели линии. Характеристики турбины и регулятора скорости воспроизводились с помощью электрических машин постоянного тока и устройств математического моделирования.

Последовательно с повышающим трансформатором на стороне его высшего напряжения был включен дополнительный дроссель рассеяния, чтобы получить значение сопротивления  $X_K$ , равное соответствующей величине для трансформатора эквивалентного генератора узла № 2 в единицах модели

$$X_K = \frac{X_{KT}^{op}}{m_Z} = \frac{12,2}{2,39} = 5,1 \text{ Ом.}$$

Суммарное значение сопротивления трансформатора с дросселем было настроено равным

$$Z_K = 0,65 + j 5 \text{ Ом.}$$

Автотрансформаторная связь эквивалентного блока "генератор - трансформатор" с ВЛ СВН на модели имитировалась двумя катушками индуктивности (ячейки 305 и 306), реактивное сопротивление которых настраивалось на значение  $X_K$  для автотрансформаторов узла № 2 в единицах модели

$$X_K = \frac{X_{КАТ}^{op}}{n_{AT} \times m_Z} = \frac{79,2}{4 \times 2,39} = 8,28 \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление указанных катушек было равным

$$Z = 0,55 + j 8,35 \text{ Ом.}$$

### П2.2.3. Моделирование узла № 3

Основу узла № 3 в оригинале составляют генераторы типа ТВВ-220-2А с параметрами представленными в таблице П2.9.

Таблица П2.9

$n$	$p$	$\cos \varphi$	$X_{ad}$	$X_d$	$X_d'$	$X_d''$	$\tau_{d_0}$	$\tau_j$
	МВт		о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	с	с
30	220	0,85	2,14	2,32	0,3	0,197	7	7,05

Как видно из рис. 1.45, эквивалентный блок "генератор-трансформатор" узла № 3 на модели представлен модельным турбогенератором ТГ-4 типа МТ-5-1500 и повышающим трансформатором. Параметры турбогенератора приведены в таблице П2.10.

Таблица П2.10

$p$	$\cos \varphi$	$X_{ad}$	$X_d$	$X_d'$	$X_d''$	$\tau_{d_0}$	$\tau_j$
МВт		о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	с	с
4	0,8	13,94	14,2	1,3	0,64	1,56	8,05

Последовательно с модельным генератором на стороне низшего напряжения повышающего трансформатора были включены катушки индуктивности для получения идентичности критерия подобия  $X_d'/X_{ad}$  для генераторов оригинала и модели. Для генератора оригинала критерий подобия  $X_d'/X_{ad} = 0,14$ , для модельного генератора ТГ-4  $X_d'/X_{ad} = 0,093$ . Для соблюдения  $X_d'/X_{ad} = \text{idem}$  величина сопротивления дополнительно установленной катушки индуктивности должна быть равна

$$\Delta X = \left( \frac{X_d'}{X_{ad}} \right)^{op} \times X_{ad}^{mod} - X_d'^{mod} = 0,14 \times 13,94 - 1,3 = 0,65 \text{ Ом.}$$

На катушках была выполнена секция, величина индуктивного сопротивления которой равнялась 0,62 Ом. При этом значения параметров генератора стали равными

$$X_d = 14,2 + 0,62 = 14,82 \text{ Ом;}$$

$$X_d' = 1,3 + 0,62 = 1,92 \text{ Ом;}$$



$$X_d'' = 0,64 + 0,62 = 1,27 \text{ Ом.}$$

Коэффициент трансформации повышающего трансформатора был выбран, как и при моделировании узлов №1 и № 2, исходя из необходимости иметь равные в оригинале и на модели приведенные к напряжению линии переходные параметры генераторов  $X_d'$ . Для эквивалентного генератора узла № 3, как следует из рис. 1.44, в единицах модели

$$X_d' = \frac{X_d^{top}}{m_z} = \frac{49}{2,39} = 20,5 \text{ Ом, для генератора модели } X_d' = 1,92 \text{ Ом, поэтому}$$

расчетный коэффициент трансформации равен  $K_T = \sqrt{\frac{20,5}{1,92}} = 3,27$ .

Для схемы соединения секций обмоток однофазных трансформаторов, соединенных в трехфазную группу по схеме  $X/\Delta$  - коэффициент трансформации равен

$$K_{TP} = \frac{\sqrt{3} \times W_\lambda}{W_\Delta} = \frac{\sqrt{3} \times 200 \times 2}{208} = 3,33.$$

С помощью магнитного шунта индуктивное сопротивление  $X_K$  трансформатора было настроено равным соответствующей величине для трансформатора узла № 3 в единицах модели:

$$X_K = \frac{34,8}{m_z} = 14,56 \text{ Ом.}$$

В таблице П2.11 приведены в относительных единицах параметры модельного генератора. За единицу мощности при подсчете базисного сопротивления принята величина кажущейся мощности эквивалентного генератора узла № 3 в единицах модели, равная

$$S_r = \frac{P_{взл}}{\cos \varphi \times m_p} = \frac{6600}{0,85 \times 863} = 9,00 \text{ кВА,}$$

а за единицу напряжения - номинальное напряжение модели линии

$$U_{л}^{mod} = 800 \text{ В.}$$

Таблица П2.11

$X_{баз}$	$X_d$	$X_d'$	$X_d''$	$X_{ad}'$	$\tau_j$
Ом	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	с
71,1	2,31	0,3	0,198	2,17	7,22

Для получения необходимого значения постоянной инерции на модельном турбогенераторе ТГ-4 было установлено 3 диска. Модельный турбогенератор ТГ-4, моделирующий эквивалентный генератор узла № 3, по типу соответствует модельному турбогенератору ТГ-5, моделирующему эквивалентный генератор узла № 1 и имеет аналогичную схему возбуждения, характеристики систем возбуждения, привода, регулирования скорости и возбуждения. Постоянная времени цепи ротора  $\tau_{d_0}$  была установлена равной 6,5 с.

В таблице П2.12 приведены критерии подобия генераторов оригинала и модели для узла № 3.

Таблица П2.12

$X_d / X_{ad}$		$X_d' / X_{ad}$		$X_d'' / X_{ad}$		$\tau_j$ с		$\tau_{d_0}$ с	
ориг.	мод.	ориг.	мод.	ориг.	мод.	ориг.	мод.	ориг.	мод.
1,08	1,06	0,14	0,138	0,092	0,091	7,05	7,22	7	6,5

Как видно из таблиц П2.9, П2.11 и П2.12, параметры и основные критерии подобия генератора узла № 3 оригинала и модельного турбогенератора ТГ-4 отличаются незначительно.

Как и для узлов № 1 и № 2, автотрансформаторная связь эквивалентного блока с ЛЭП для узла № 3 имитировалась соответствующим реактивным сопротивлением воздушных катушек индуктивности. Были использованы катушки двух ячеек модели линии 014 и 015, суммарное сопротивление которых настроено на величину, равную

$$Z = 1 + j 16,5 \text{ Ом.}$$

Значение  $X_K$  для эквивалентного автотрансформатора узла № 3 для оригинала в единицах модели составляет  $X_K = \frac{39,6}{2} = 16,57 \text{ Ом}$ . Местная нагрузка каждого из трех узлов воспроизведена с помощью асинхронного двигателя с

фазным ротором типа АС-62-4 и лампового реостата. Максимальная мощность двигателя и лампового реостата составляет по 12 кВт. Поскольку номинальное напряжение асинхронного двигателя и лампового реостата равно 380 В, а в точке подключения нагрузки (шины высшего напряжения блочных трансформаторов) напряжение составляет 800 В. Нагрузка подключалась через понизительный трансформатор, расчетный коэффициент трансформации которого равен

$$K_{TP} = \frac{800}{380} = 2,1.$$

На трансформаторах нагрузки ТН-1, ТН-4, ТН-5 была собрана схема соединения секций, обеспечивающая коэффициент трансформации равный

$$K_T = \frac{\sqrt{3} \times W_\lambda}{W_\Delta} = \frac{\sqrt{3} \times 287}{229} = 2,16.$$

В соответствии с заданными перетоками мощности и принятыми масштабами моделирования мощность нагрузки была установлена равной

для узла № 1	$S_H = 5,6 + j 2;$
для узла № 2	$S_H = 12 + j 9;$
для узла № 3	$S_H = 7,6 + j 5.$

#### П2.2.4. Моделирование узла № 4

Узел № 4 (Г4 на рис. 1.44) моделировался шинами бесконечной мощности (шинами Мосэнерго 400 В) за соответствующим индуктивным сопротивлением. Эквивалентный блок генератор-трансформатор узла № 4 связан с приемным концом ЛЭП через автотрансформатор. На модели трансформатор и автотрансформатор представлены группой из трех однофазных трансформаторов с коэффициентом трансформации  $K_{TP} = 2$  с последовательно включенными катушками индуктивности и соединением обмоток трансформаторов со стороны низшего напряжения в треугольник, а со стороны высшего - в звезду.

Суммарное сопротивление трансформатора и катушек индуктивности (ячейки модели линии 215, 216 и 316) настраивалось на величину эквивалентного индуктивного сопротивления автотрансформатора и трансформатора схемы замещения оригинала в единицах модели, равную

$$X = \frac{X_{AT} + X_T}{m_Z} = \frac{19,8 + 12,2}{2,39} = 13,4 \text{ Ом.}$$

Величина сопротивления указанных элементов была установлена равной

$$Z = 1 + j 13,6 \text{ Ом.}$$

Между трансформатором и шинами бесконечной мощности на модели был включен потенциал-регулятор и катушка индуктивности для моделирования реактанса генерирующего узла. Суммарное сопротивление потенциал - регулятора и катушки индуктивности было настроено на величину, равную

$$Z = 1,25 + j 9 \text{ Ом,}$$

что в единицах оригинала соответствует сопротивлению, равному

$$X = 9 \times m_Z = 21,5 \text{ Ом.}$$

Из рис.1.44 видно, что для Г4  $X'_d = 23 \text{ Ом.}$

### П2.2.5. Моделирование линии электропередачи

Моделировалась ЛЭП длиной 1500 км напряжением 1150 кВ, состоящая из трех участков одинаковой длины. Причем средний участок задан двухцепным, а крайние - одноцепными.

Удельные параметры ВЛ 1150 кВ:

$$X_l = 0,268 \text{ Ом/км, } R_l = 0,0135 \text{ Ом/км, } B_l = 4,45 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Ом.км,}$$

$$X_0 = 1,05 \text{ Ом/км, } R_0 = 0,16 \text{ Ом/км, } B_0 = 3,15 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Ом.км.}$$

Для двухцепной линии сопротивление взаимной индукции нулевой последовательности между параллельными линиями равно

$$X_0^M = 1,5 \cdot X_l = 1,5 \cdot 0,268 = 0,402 \text{ Ом/км;}$$

$$X_0^2 = X_0^{(1)} + X_0^M = 1,05 + 0,402 = 1,452 \text{ Ом/км.}$$

Линия была выполнена в виде цепочечной схемы замещения. Индуктивное сопротивление участка одноцепной линии длиной 500 км равно  $X = 0,268 \cdot 500 = 134$  Ом, что в единицах модели составляет  $X = \frac{134}{m_z} = 56$  Ом.

Катушка индуктивности модели линии при последовательном соединении всех секциях имеет индуктивное сопротивление равное  $X = 5,6$  Ом. Было решено одной П-образной ячейкой модели линии, состоящей из катушки индуктивности и конденсаторов, включенных по обоим ее концам, моделировать участок линии длиной примерно 50 км, что обеспечивает приемлемые значения погрешностей волновых параметров линии для высших гармонических составляющих.

Конденсаторы каждого плеча ячейки модели линии разделены на две группы, одна из которых моделирует емкость между фазами ( $C_{3B}^{M\Phi}$ ), а другая - емкость между базами и землей ( $C_{03B}$ ).

Расчет параметров звена, моделирующего  $L$  км линии оригинала, производится по формулам

$$X_{13B} = \frac{X_1^{op} L}{m_z}; \quad \mathcal{C}_{13B} = \frac{\mathcal{C}_1^{op} \times L}{m_z};$$

$$X_{03B} = \frac{X_{01}^{op} L}{m_z}; \quad \mathcal{C}_{03B} = \frac{\mathcal{C}_0^{op} \times L}{m_z};$$

$$C_{03B} = B_0 \times L \times m_z \frac{10^6}{\omega} \text{ мкФ};$$

$$C_{3B}^{M\Phi} = \frac{1}{3}(B_1 - B_0) \times L \times m_z \frac{10^6}{\omega} \text{ мкФ.}$$

В таблице П2.13 представлены полученные в результате расчета параметры звена цепочки модели одноцепной линии.

Таблица П2.13

$X_{13B}$	$\mathcal{C}_{13B}$	$C_{03B}$	$C_{3B}^{H\Phi}$	$C_{\text{ЭКВ.3B}}$	$X_{03B}$	$\mathcal{C}_{03B}$
Ом	Ом	мкФ	мкФ	мкФ	Ом	Ом
5,61	0,28	1,2	0,16	1,68	21,97	3,35

На рис. 1.46 представлена схема замещения ЛЭП с указанием параметров каждого участка. Чтобы получить требуемую величину сопротивления нулевой последовательности, в четвертый ("нулевой") провод обоих одноцепных участков включались катушки индуктивности и реостаты. Для ячейки моделирующей участок одноцепной линии длиной  $L = 50$  км величина дополнительного сопротивления, которое следует включить в четвертый провод, равна

$$\Delta Z_{03B} = \frac{Z_{0\text{расч.3B}} - Z_{0\text{ест3B}}}{3},$$

где  $Z_{3B \text{ ест}}$  - сопротивление нулевой последовательности ячейки модели линии, не содержащей в четвертом проводе никаких сопротивлений, оно равно сопротивлению звена модели линии по прямой последовательности  $Z_{13B} = 0,33 + j 5,86$  Ом. Таким образом

$$\Delta Z_{\text{НУЛ ПР 3B}} = \frac{3,35 + j21,97 - 0,33 - j5,86}{3} = 1 + j5,37 \text{ Ом.}$$

В "нулевой" провод каждой ячейки модели одноцепных участков была включена катушка индуктивности с сопротивлением, равным  $X = 5,5$  Ом. Реостаты были включены в точках, где предполагалось осуществлять короткие замыкания, а именно: в начале участка ( $R = 1,17$  Ом), в его середине ( $R = 2,34$  Ом) и на расстоянии 0,8 от длины участка ( $R = 2,34$  Ом). Учитывая, что добротность катушек модели линии составляет примерно  $Q = 20$ , сопротивление нулевой последовательности модели одноцепного участка линии длиной  $L = 500$  км равно

$$\begin{aligned} Z_{\text{НУЛ, ПР}} &= 10 \cdot 0,05 \cdot 5,5 + 1,17 + 2 \cdot 2,34 + j 5,5 \cdot 10 = 8,6 + j 55 ; \\ Z^{(1)}_0 &= 10 (0,33 + j 5,86) + 3(8,6 + j 55) = 3,3 + j 58,6 + 25,8 + j 165 = \\ &= 29,1 + j 223,6 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

При переводе на удельные параметры линии оригинала получим

$$R_0 + jX_0 = \frac{Z_0^M \times m_Z}{L} = \frac{2,39(29,1 + j223,6)}{500} = 0,14 + j1,065 \text{ Ом/км.}$$

Модель двухцепного участка была выполнена физически двухцепной и собрана из специальных ячеек, катушки которых позволяют физически воспроизводить взаимную индуктивность между фазами одной цепи. В пределах одной ячейки ток каждой фазы протекает по двум сдвоенным катушкам, по соседним секциям которых протекают токи других фаз. Для таких ячеек можно записать следующие соотношения, характерные для линии электропередачи оригинала:

$$\dot{Z}_1 = 1 \times \dot{Z}_L + a^2 \times \dot{Z}_M + a \times \dot{Z}_M = \dot{Z}_L - \dot{Z}_M;$$

$$\dot{Z}_0 = \dot{Z}_L + 2\dot{Z}_M.$$

Параметры ячейки:

$$Z_1 = 0,6 + j 4,4 \text{ Ом};$$

$$Z_0 = 0,85 + j 14,85 \text{ Ом};$$

$$Z_L = 0,63 + j 7,0 \text{ Ом};$$

$$X_M = j 3,5 \text{ Ом.}$$

Такой ячейкой моделируется участок одной цепи двухцепной линии длиной  $L$ , равной

$$L^{op} = \frac{X_{яч}^M \times P^{op} \times m_Z}{X_1^{op} \times P^M} = \frac{4,4 \times 2 \times 2,39}{0,268 \times 2} = 39,2 \text{ км.}$$

На ЭДМ имеются 24 ячейки с такими специальными катушками. Все они были использованы в данной схеме, по 12 ячеек на каждую цепь. При этом длина моделируемого двухцепного участка получена равной

$$L = 39,2 \times 12 = 470 \text{ км.}$$

В таблице П2.14 представлены расчетные параметры звена модели для одной цепи двухцепной линии

Таблица П2.14

$X_I$	$R_I$	$X_L$	$X_{M\Phi}$	$X_{ML}$	$X_0^{(1)}$	$X_0^{(2)}$	$C_0$	$C_{M\Phi}$	$C_{ЭКВ}$	$R_0$
Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	мкФ	мкФ	мкФ	Ом
4,4	0,22	8,7	4,26	6,59	17,22	23,8	0,94	0,13	1,38	5,08

Из сопоставления расчетных параметров звена (табл.П2.14) с параметрами ячейки, которые удалось настроить, видно, что сопротивление самоиндукции и взаимоиндукции, а, следовательно, и сопротивление нулевой последовательности звена модели несколько ниже расчетной величины. Так для  $X_0^{(l)}$  имеем погрешность, равную

$$X_0^{(l)} = 17,22 - 14,85 = 2,37 \text{ Ом или } 13 \text{ \%}.$$

В нулевом проводе были установлены катушки индуктивности, сопротивление которых было настроено равным сопротивлению взаимоиндукции от токов параллельной линии. Для одного звена

$$X_{\text{нул.пр}} = \frac{X_{\text{М.Л.}}}{3} = \frac{6,59}{3} = 2,2 \text{ Ом}.$$

Величина полного сопротивления катушки индуктивности, установленной в четвертом проводе каждой ячейки модели двухцепного участка линии, была установлена равной

$$Z = 0,29 + j 2,2 \text{ Ом}.$$

Кроме катушек индуктивности в четвертом проводе каждой цепи модели двухцепного участка были установлены по три реостата. Один - сопротивлением 1,1 Ом и два - по 2,2 Ом, соответственно в начале, середине и на расстоянии 0,8 от длины участка.

Таким образом, суммарное сопротивление нулевой последовательности каждой цепи двухцепной линии, представленной на модели двенадцатью ячейками, составляет

$$Z_0 = Z_{0 \text{ ф.яч}} \cdot n_{\text{яч}} + 3 Z_{\text{нул.пр}} = (0,85 + j 14,85) \cdot 12 + 3[1,1 + 2 \cdot 2,2 + j 2,2] \cdot 12 = 10,2 + j 178,2 + 26,94 + j 79,2 = 37,14 + j 257,4,$$

что соответствует в оригинале линии с удельными параметрами по нулевой последовательности равными

$$Z_0 = \frac{Z_0^{\text{МОД}} \times m_Z}{L} = \frac{(37,14 + j 257,4) \times 2,39}{470} = 0,19 + j 1,31 \text{ Ом/км}.$$

Следует особо отметить, что на модели при физическом воспроизведении влияния фаз друг на друга имеет место превышение в 2,7 раза по сравнению с



оригиналом активного сопротивления по прямой последовательности, что ведет к более быстрому затуханию переходных процессов. Уменьшить значение активного сопротивления сдвоенных катушек возможности в настоящее время не имеется.

На каждом участке модели линии были установлены реакторы - по одному на каждом ее конце. Значения сопротивлений каждого реактора модели указано на схеме замещения (рис. 1.46) и находится в пределах  $X_p = 425 \div 477$  Ом, что в единицах оригинала соответствует мощности реакторов, установленных на одном конце линии, равной

$$Q = Q_p^M \times m_p = \frac{U_{\text{МОД}}^2}{X_p} \times m_p = 1300 \div 1160 \text{ Мвар.}$$

При этом степень компенсации емкостных токов получена (рис. 1.44) равной

для Л-1

$$K = \frac{X_C}{X_p} = \frac{10^6 \times 853}{425 \times 428 \times 10 \times 1,68 \times 314} = 0,89;$$

для Л-4

$$K = \frac{10^6 \times 937}{460 \times 477 \times 1,68 \times 10 \times 314} = 0,81;$$

для Л-2

$$K = \frac{10^6 \times 876}{440 \times 436 \times 314 \times 1,38 \times 12} = 0,88;$$

для Л-3

$$K = \frac{10^6 \times 868}{440 \times 428 \times 1,38 \times 12 \times 314} = 0,89.$$

Ниже приведена оценка погрешностей при моделировании участков длиной 500 км и 470 км цепочечной схемой, состоящей соответственно из 10 и 12 ячеек.

Моделируемая линия имеет волновое сопротивление, равное

$$Z_c = \sqrt{\frac{X}{B}} = \sqrt{\frac{0,268 \times 500}{4,45 \times 10^{-6} \times 500}} = 245,4 \text{ Ом,}$$

и волновую длину, для участка длиной 500 км равную

$$\lambda = \frac{X}{\sqrt{\frac{X}{B}}} = \frac{0,268 \times 500}{268,4} = 0,546;$$

для участка длиной 470 км

$$\lambda = \frac{0,268 \times 470}{245 \times 4} = 0,513.$$

П-образной ячейке модели линии может быть поставлен в соответствие участок линии с волновыми характеристиками

$$Z'_c = \frac{Z_c}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{4}}};$$

$$\lambda' = \arcsin \lambda \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{4}}.$$

Следовательно, погрешности волновых характеристик одной ячейки могут быть представлены в виде

$$K_z = \left| 1 - \frac{Z'_c}{Z_c} \right| = \left| 1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{4}}} \right|;$$

$$K_\lambda = \left| 1 - \frac{\lambda'}{\lambda} \right| = \left| 1 - \frac{\arcsin \lambda \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{4}}}{\lambda} \right|.$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Утверждаю  
 Зам. директора  
 им. Г.М.Кржижановского  
 Д.Т.Н.,  
 Соколов В.С.



Утверждаю  
 Главный инженер  
 Энергосетьпроект  
 Петров С.Я.



## А К Т

по результатам испытаний на электродинамической модели ВНИИЭ опытного образца волновой защиты линий электропередачи ВЛ СВН

20 июня 1986г.

Настоящий акт составлен представителями Энергетического института (ЭНИН) им. Г.М.Кржижановского - ст.н.с. к.т.н. Лачугиным В.Ф., ст.н.с. к.т.н. Поповым И.Н., ст. конструктором Соколовой Г.В., представителями Института Энергосетьпроект (ЭСП) - главным инженером проекта, руководителем лаборатории релейной защиты к.т.н. Любарским Д.Р., ст.инженером Плещенко И.И., зав.группой лаборатории физического моделирования энергосистем ВНИИЭ Травиной Ю.Я. и ст.инженером службы релейной защиты Татэнерго Айхенвальдом В.Е. в том, что в 1985 г. (ноябрь) и в 1986 г. (январь, февраль и июнь) на электродинамической модели ВНИИЭ были проведены испытания опытного образца импульсной высокочастотной направленной защиты (ИЗЛ) ВЛ СВН, основанной на контроле волновых переходных процессов.

Опытный образец защиты ИЗЛ разработан ЭНИН и ЭСП и в виде двух полукомплектов и изготовлен в лаборатории релейной защиты ЭСП в соответствии с техническим проектом этой защиты. Была осуществлена наладка и проверка образца в лабораторных условиях.

Испытания на модели проведены по программе, разработанной Институтом Энергосетьпроект и ЭНИН. При этом учитывалось, что схема и параметры модели соответствует объединенной энергосистеме с линиями СВН протяженностью до 500 км. Параметры схемы замещения линий определяют верхнюю граничную частоту в пределах 1780-2280 Гц, что давало возможность проведения испытаний волновой защиты ИЗЛ, имеющей верхнюю граничную частоту рабочего диапазона не более 3000 Гц.

Измерительные цепи защиты подключались к трансформаторам тока и напряжения, установленным на линиях модели.

На первых этапах испытаниям был подвергнут один полукомплект волновой защиты в составе блоков органов направления мощности 1-го и 2-го волновых каналов, подключенных к измерительным трансформаторам через фильтры аварийных составляющих цепей напряжения и тока, избирателей поврежденных фаз, блока контроля при грозовых возмущениях и устройства защиты при опробовании линии.

В испытаниях последнего этапа участвовали два полукомплекта защиты с отдельными блоками логической части защиты, сигнализации, а также с органами контроля правильности включения защиты по направлению.

Параметры срабатывания импульсных органов направления в процентах от номинальных величин при времени фиксации  $t_{\phi}$ , равном 500 мкс, на уставке "1,0" составили:

- на блокировку -  $U_{\text{бл}} \approx 3,5 \%$ ;  $i_{\text{бл}} \approx 8,5 \%$ ;
- на отключение -  $U_{\text{откл}} \approx 7 \%$ ,  $i_{\text{откл}} \approx 17 \%$ .

На уставках "0,5" и "0,25" чувствительность снижается соответственно в 2 и 4 раза. Указанные параметры устанавливались в условиях воздействия напряжения и тока промышленной частоты при угле коммутации  $\varphi_U$ , равном нулю. При  $0 < \varphi_U < 180^\circ$  чувствительность повышается, увеличиваясь, например, при  $\varphi_U = 90^\circ$  примерно в 2-3 раза.

При испытаниях осциллографировались

шлейфным осциллографом типа Н 010 М - фазные напряжения и токи, напряжения и токи нулевой последовательности, напряжения в цепях выхода схем совпадения (несовпадения) органов направления мощности на блокировку и на отключение, а также - избирателей фаз и в выходных цепях защиты;

электронным запоминающим осциллографом типа С8-17 - импульсные напряжения и токи на выходе различных элементов органов направления (фильтров аварийных составляющих, сумматоров волновых каналов, схем совпадения и несовпадения).

После первых этапов испытаний, выявивших влияние на функционирование защиты повышенных значений небалансов напряжений и токов на выходе фильтров аварийных составляющих (ФАС) в нормальных и переходных режимах, в опытный образец защиты были внесены следующие усовершенствования:

1. В связи с наличием 5<sup>ой</sup> гармоники в фазных напряжениях и токах модели, проявившемся в появлении существенного небаланса на выходе ФАС в нормальном режиме, в цепи ФАС введены фильтрующие звенья, подавляющие частоту 250 Гц.

2. В целях ограничения величин небалансов были также устранены нежелательные нелинейные режимы работы отдельных элементов защиты.

3. Снижена верхняя граничная частота фильтра нижних частот (ФН) в модулях аварийных составляющих тока и напряжения с 3000 Гц до 500 Гц, что способствовало увеличению длительности сигнала, формируемого в начальной стадии переходного процесса, и тем самым ограничивало влияние повышенных частот, появляющихся при наличии коротких участков линии (40-50 км),

4. С целью снижения напряжения небаланса в нормальном режиме на входе разрешающего органа блока контроля при грозовых возмущениях дополнительно установлено фильтрующее звено, подавляющее частоту 150 Гц.

Основные результаты испытаний:

1. Защита при всех уставках отстроена от нормального режима работы передачи при номинальных величинах напряжения и тока и частоте 50 Гц, а также при отклонениях частоты в пределах 48 Гц ÷ 51 Гц. При уставках (0,5) защита отстроена в условиях отклонений частоты до 45 Гц и 52 Гц. За пределами указанных частот действовала на блокирование.

2. При опытах внутренних и внешних коротких замыканий (однофазных, двухфазных, двухфазных на землю, трехфазных), осуществляемых при различных условиях - длине защищаемых участков от 40 км до 500 км, удаленности коротких замыканий (КЗ) от 0 до 500 км; наличии на концах участков только трансформаторов, трансформаторов и линий, смежных коротких линий, длиной 40-50,0 км - функционирование измерительных органов и защиты на уставках по току (I) и напряжению (0,5), при  $t_{фикс.} = 500$  мкс и значениях фазовых углов предшествующего КЗ напряжения  $\varphi_U = 0-360^\circ$  - в целом было правильным.

Общее число опытов КЗ составило порядка 1000.

На уставках по току (0,5) и напряжению (0,5) при КЗ на защищаемой линии, на спаде полуволны фазного напряжения при углах  $\varphi_U = 155^\circ - 160^\circ$  имели место отдельные случаи срабатывания органа на мощности на блокировку, которые устранялись при повышении чувствительности по току до 1,0 или уменьшением времени фиксации до 250 мкс,

Время срабатывания защиты на отключение при КЗ составляло единицы миллисекунд; при функционировании органа контроля грозовых возмущений это время составляло 4 – 6 мс (уставка 0) и 14 - 20 мс (уставка 10 мс).

3. При коммутациях защищаемой линии защита надежно блокировалась, поскольку выключатели находятся вне зоны защиты. При включении защищаемой линии на КЗ надежно срабатывал дистанционный орган защиты при опробовании линии с  $t_{cp} \leq 10$  мс.

4. При синхронных качаниях (с двукратным током по отношению к номинальному и частоте 50 Гц) срабатывание органов направления и защиты в целом не наблюдалось. При увеличении тока качаний до 4А органы направления срабатывают на блокировку при уставках (1). Переход к более интенсивным качаниям с последующим асинхронным ходом при токе 7-8 А приводил к срабатыванию органов направления на блокировку и при уставках по току и напряжению (0,5) и частотах в цикле качаний - ниже 49 Гц вплоть до 37 Гц и выше 51 Гц вплоть до 55 Гц.

## ВЫВОДЫ

1. Результаты испытаний волновой защиты на электродинамической модели подтвердили правильность выбранного принципа построения защиты, основанного на контроле направления распространения волн импульсными измерительными органами, реагирующими на знак мощности переходного

процесса в волновых каналах, при всех видах коротких замыканий на защищаемой линии и внешних.

2. Избиратели поврежденных фаз правильно функционировали при однофазных КЗ; при двухфазных КЗ и при двухфазных КЗ на землю осуществлялся правильный выбор двух поврежденных фаз, при трехфазных КЗ избиратели срабатывали на двух фазах, при этом отключение происходило на трех фазах. Время действия избирателя - не более 5 мс.

3. В целях совершенствования волновой защиты и ее измерительных органов должна обеспечиваться большая идентичность измерительных цепей тока и напряжения, что будет способствовать увеличению интервалов времени несовпадения (совпадения) знаков тока и напряжения в начальной стадии процесса и, следовательно, позволит увеличить время фиксации. Кроме того, в ФНЧ измерительной цепи тока должна быть увеличена степень подавления частот, больших частоты среза, что улучшит функционирование защиты при наличии линий с короткими участками ( $L \leq 50$  км).

4. В соответствии с полученными результатами испытаний волновой защиты на электродинамической модели рекомендуется передать опытный образец указанной защиты в ТАТЭНЕРГО для установки на линии 500 кВ ПС Киндери – Заинская ГРЭС длиной 207 км и проведения опытной эксплуатации.

По результатам испытаний на модели в целях обеспечения устойчивости функционирования защиты в условиях нормального режима, качаний и при КЗ рекомендуется работа со следующими уставками по чувствительности - ток - 0,5, напряжение – 0,5, по времени  $t_{\phi} = 250$  мкс.

В условиях эксплуатации целесообразна проверка и при более высокой чувствительности: при уставках по току - 1,0, по напряжению - 1,0 и при больших значениях времени фиксации, до 500 мкс.

От ЭНИН

С. н. с., к.т.н.

С.н.с., к.т.н.

Инженер

От ВНИИЭ

Зав. группой  
лаборатории  
физического  
моделирования  
энергосистем

Попов И.Н.

Лачугин В.Ф.

Соколова Г.В.

Травина Ю. Я.

От Энергосетьпроекта

Гл. инженер проекта, к.т.н.

Ст. инженер

От Татэнерго  
Ст. инженер службы релейной  
защиты

Любарский Д.Р.

Плещенко И. И.

Айхенвальд В.Е.

### Описание алгоритмов модифицированного пакета программ

Рассмотрим более подробно организацию исходных данных в модифицированном пакете программ на примере сети, изображенной на рис. 2.30. Каждый участок ЛЭП, соединяющий соседние подстанции, разбит пунктами транспозиции на участки равной длины (с точностью до интервала разбиения линий  $h$ , соответствующего выбранному расчетному шагу по времени  $\Delta t=10^{-5}$ с). На участке ЛЭП между ПС Киндери и Заинской ГРЭС дополнительно рассматривается узел, моделирующий условия КЗ (или грозового разряда). На рис. 2.30 отражено упорядочение расчетных узлов рассматриваемой сети: возрастание номеров узлов на участке между местом КЗ и Костромской ГРЭС от 1 до 278, между местом КЗ и Кармановской ГРЭС - от 279 до 443, а также на участках ЛЭП, соответствующим ответвлениям от Заинской ГРЭС на Куйбышев - от 444 до 534 и на Бугульму - от 535 до 574. Число расчетных узлов на каждой подстанции или пункте транспозиции в сумме равно числу отходящих линий (месту КЗ также соответствуют 2 расчетных узла: с номерами 1 и 279).

Для описания расчетной сети достаточно задать целочисленный массив  $KDMAS1$  размерности  $KK1$  (по числу выделенных участков ЛЭП - на рис. 2.30  $KK1=41$ ). Каждая компонента массива  $KDMAS1$  соответствует числу разбиений на рассматриваемом участке ЛЭП с номером  $KKD$ , меняющимся от 1 до  $KK1$ . Упорядочение компонент соответствует порядку возрастания расчетных узлов.

Для описания сосредоточенных параметров схемы предусмотрены двумерные массивы типа  $PLT$  ( $9, KK1$ ), характеризующего матрицы индуктивностей (третьего порядка) в расчетных узлах, соответствующих подстанциям сети. В качестве рабочих массивов, в которых запоминаются значения напряжений и токов в расчетных узлах текущего временного слоя, согласно схеме пакета программ ИФАН [78] используются массивы  $C(2k \cdot JLC)$ ,  $PC(2k \cdot JLPC)$ ,  $FC(3k \cdot JLC)$ ,  $FPC(3k \cdot JLPC)$ , где  $k$  - число проводов в линиях,  $JLC$  - максимальное число расчетных узлов схемы на целых временных слоях (с учетом

концевых узлов),  $JLPC$  - количество расчетных узлов схемы на полуцелых временных слоях. В нашем случае  $\kappa = 5$ ,  $JLC = 574$ ,  $JLPC = 533$ , поэтому массивы  $C$ ,  $PC$ ,  $FC$  и  $FPC$  имеют описания:  $C(5740)$ ,  $PC(5330)$ ,  $FC(8610)$ ,  $FPC(7995)$  (используется модель поверхностного эффекта с тремя ветвями).

Остальная информация об исходных данных для выполнения расчетом на базе модифицированного пакета программ ИФАН осталась без изменений. В процессе рабочего обмена информацией с внешними носителями предусмотрены первый и третий файлы МД, оформленные вместе с соответствующими управляющими параметрами ( $NDELS$ ,  $NDEFLS$  и т.д.).

Основной процедурой при работе пакета программ ИФАН является подпрограмма  $PLEP$ , в которой в каждый момент времени  $t$  (или  $t+\Delta t/2$ ) вычисляются напряжения и токи во всех расчетных узлах разбиения данного участка линии (кроме граничных точек). Поскольку большая часть изменений, внесенных в головную программу пакета программ ИФАН, относится именно к  $PLEP$ , приведем ее краткое описание. Формальные параметры  $PLEP$  образуют список

$PLEP(C, PC, Z, T, K, KC, KPC, KT, NP, W, W1, W2)$ ,

где  $C$  – массив определяемых напряжений и токов в точках полуцелого (целого) временного слоя,

$PC$  – массив известных напряжений и токов в точках предыдущего целого (полуцелого) временного слоя,

$Z$  - массив квадратных матриц порядка  $\kappa$ :  $Z, Z_n, (Z + Z_n)^{-1}, (1 + hzq)^{-1}, Z'_{n1}, Z'_{n2}, Z'_{n3}, Z'^{-1}_{s1}, Z'^{-1}_{s2}, Z'^{-1}_{s3}$ ,

$T$  - массив известных и определяемых токов в трех (четырех) ветвях модели поверхностного эффекта полуцелых (целых) временных слоев,

$K$  - размерность матриц, определяемая количеством проводов,

$KC, KPC, KT$  – целые переменные, определяющие начало массивов  $C, PC, T$ ,

$NP$  - число точек линии для полуцелого (целого) временного слоя, в которых определяются значения напряжений и токов,



$W, W1, W2$  - рабочие массивы длины  $2k$ .

Для работы подпрограммы используются известные напряжения и токи ЛЭП в точках  $p$  и  $q$  с координатами  $p\left(t - \frac{\Delta t}{2}, 2hn\right)$ ,  $q\left(t - \frac{\Delta t}{2}, 2h(n+1)\right)$ , а также токи  $i_{f\kappa}$  в ветвях модели учета поверхностного эффекта с координатами  $f(t - \Delta t, h(2n+1))$  ( $n=0, 1, \dots, NP-1$ ). Вычисляются  $U_d, i_d, i_{f\kappa}$  в  $NP$  внутренних точках линии с координатами  $d(t, h(2n+1))$  (при  $n=0, 1, \dots, NP-1$ ).

Обращение в подпрограмму *PLEP* (а из нее - во внутренние подпрограммы *APAQ, MATVEC, TOKIF*) в пакете ИФАН производится многократно, по количеству выделенных участков ЛЭП - между обращениями в подпрограммы, обслуживающие расчет уравнений переходного процесса на концах участков (*USEL, USEL19, TRANS* и др.).

В разработанной модификации головной программы пакета программ ИФАН проведена автоматизация вычислений, обеспечивающая единообразное обращение из головного сегмента во внутренние подпрограммы (в том числе, в *PLEP*) с соответствующей программной корректировкой значений фактических параметров.

На первом этапе при расчете состояния переменных текущего целого временного слоя организован внешний цикл по количеству выделенных участков линий в схеме ( $KKD = 1, \dots, KK1$ ) с программным пересчетом фактических параметров подпрограммы *PLEP KC, KPC, KFC, KD1* (соответствующих формальным параметрам  $KC, KPC, KT, NP$ ), определяющих текущие адреса в массивах  $C, PC, FC$  и количество разбиений  $KD1$  очередного участка ЛЭП на целом временном слое. В зависимости от текущего значения  $KKD$  производится обращение в ту или иную подпрограмму, обрабатывающую конец данного участка ЛЭП (*USEL1, USEL19, USEL49* - для узлов схемы с различным количеством ответвлений - или *TRANS* - для пунктов транспозиции), для этого используется простая логика, учитывающая топологию схемы.

На втором этапе - при расчете значений переменных в полуцелых точках  $t + \Delta t/2$  - вновь в цикле по  $KKD = 1, \dots, KK1$  происходит обращение в

подпрограмму *PLEP* при автоматически скорректированных значениях фактических параметров *KPC*, *KC*, *KFPC*, *KD*, соответствующих текущим адресам массивов *PC*, *C*, *FPC* и числу разбиений *KD* очередного подучастка ЛЭП.

Для простоты работы с текущими адресами массивов *C*, *PC*, *FC*, *FPC*, соответствующими началу очередного участка линии в начале работы головного модуля формируются вспомогательные целочисленные массивы *KCDM*, *KPCDM*, *KFCDM* размерности  $KK1$  (по количеству выделенных участков ЛЭП).

В конце обработки очередного временного слоя (целого) происходит оформление рабочего массива *CR* (*JLC*,  $2K$ ) - для вывода на печать результатов оперативного счета при текущем  $t$ , а также обмен с третьим файлом МД - для накопления результатов вычислений с возможностью последующей независимой от оперативного счета обработки с помощью набора сервисных программ.

Основная часть вычислений пакета программ ИФАН связана с многократными обращениями из подпрограммы *PLEP* в подпрограмму *MATVEC*, например, при умножении квадратной матрицы порядка  $k$  на вектор размерности  $k$ , в соответствии с значениям напряжения и тока в точке разбиения. На одном шаге по времени производится по 20 таких обращений для каждой внутренней точки разбиения.

С учетом этого проведена модернизация пакета программ ИФАН. При этом использовано обстоятельство, что в методе характеристик значения переменных в любой внутренней точке разбиения ЛЭП на текущем временном слое определяются лишь значениями соответствующих переменных на предыдущих временных слоях и не зависят от искомым значений переменных в других точках разбиения линий текущего временного слоя. На этой основе при расчете переменных очередного временного слоя в модифицированном пакете программ разработана следующая вычислительная схема.

Перед входением в цикл по количеству выделенных участков ЛЭП (при  $KKD = 1, \dots, KK1$ ) на первом этапе расчета - для вычисления значений переменных

на текущем целом временном слое - производится обращение в модуль *SPLEP1*, где формируются вспомогательные двумерные массивы *CVPCV*, *CVWI*, *CIPCV*, *CIWI*, *CIWT* размерности  $(K, JLC)$  ( $K$  - число проводов ЛЭП, а  $JLC$  - общее число узлов разбиений всех линий схемы, где  $JLC = 574$ ). Данные массивы, образованные путем умножений прямоугольных матриц высоких размерностей  $(K, JLC)$  используются в дальнейшем для моделирования работы подпрограммы *PLEP* в цикле по  $KKD = 1, \dots, KK1$  посредством соответствующей выборки их компонент, с существенным сокращением числа арифметических действий, совершаемых в центральном процессоре ЭВМ. Таким образом, в модуле *SPLEP1* производятся операции

1. Создаются двумерные массивы, *PCV*, *PCI*, *FC1*, *FC2*, *FC3*, соответствующие массивам комплекса программ ИФАН, по схеме:

$$PC(2KJLPC) \rightarrow \begin{cases} PCV(K, JLPC), (U_p, U_q - n/\text{цел}); \\ PCI(K, JLPC), (i_p, i_q - n/\text{цел}). \end{cases} \quad (\text{П4.1})$$

Здесь *JLPC* - в отличие от *JLC* - общее число узлов разбиений всех линий схемы на полуцелых временных слоях.

Аналогичным образом организуются пересылки:

$$FC(3K \cdot JLC) \rightarrow \begin{cases} FC1(K, JLC), (i_{f_1} - \text{цел}); \\ FC2(K, JLC), (i_{f_2} - \text{цел}); \\ FC3(K, JLC), (i_{f_3} - \text{цел}). \end{cases} \quad (\text{П4.2})$$

2. Путем четырех матричных умножений, моделирующих работу подпрограммы *APAQ*, у которой производится обращение из подпрограммы *PLEP*, формируются матрицы *WI*, *WT1*, *WT2*, *WT3*

$$Z * PCI = WI(K, JLPC), (Z \cdot i_p; Z \cdot i_q - n/\text{цел});$$

$$\begin{aligned} Z'_{n_1} * FC1 &= WT1(K, JLC), (Z'_{n_1} \cdot i_{f_1} - \text{цел}); \\ Z'_{n_2} * FC2 &= WT2(K, JLC), (Z'_{n_2} \cdot i_{f_2} - \text{цел}); \\ Z'_{n_3} * FC3 &= WT3(K, JLC), (Z'_{n_3} \cdot i_{f_3} - \text{цел}). \end{aligned}$$

3. Определяется суммарная матрица  $WT$ :

$$WT1 + WT2 + WT3 = WT(K, JLC), \left( \sum_{k=1}^3 Z'_{n_k} \cdot i_{f_k} - \text{цел} \right). \quad (\text{П4.3})$$

4. Путем пяти матричных умножений формируются результирующие матрицы  $CVPCV$ ,  $CIPCV$ ,  $CVWI$ ,  $CIWI$ ,  $CIWT$ :

$$\begin{aligned} (1 + hzg)^{-1} * PCV &= CVPCV(K, JLPC), \left\{ \begin{array}{l} (1 + hzg)^{-1} \cdot U_p \\ (1 + hzg)^{-1} \cdot U_q \end{array} \right. - n / \text{цел}; \\ (Z + Z_n)^{-1} * PCV &= CIPCV(K, JLPC), \left\{ \begin{array}{l} (Z + Z_n)^{-1} \cdot U_p \\ (Z + Z_n)^{-1} \cdot U_q \end{array} \right. - n / \text{цел}; \\ (1 + hzg)^{-1} * WI &= CVWI(K, JLPC), \left\{ \begin{array}{l} (1 + hzg)^{-1} \cdot Z \cdot i_p \\ (1 + hzg)^{-1} \cdot Z \cdot i_q \end{array} \right. - n / \text{цел}; \\ (Z + Z_n)^{-1} * WI &= CIWI(K, JLPC), \left\{ \begin{array}{l} (Z + Z_n)^{-1} \cdot Z \cdot i_p \\ (Z + Z_n)^{-1} \cdot Z \cdot i_q \end{array} \right. - n / \text{цел}; \\ (Z + Z_n)^{-1} * WT &= CIWT(K, JLC), \left( (Z + Z_n)^{-1} \sum_{\kappa=1}^3 Z'_{n_\kappa} \cdot i_{f_\kappa} - \text{цел} \right). \end{aligned} \quad (\text{П4.4})$$

После подготовительной работы, осуществленной программой  $SPLEP1$ , на первом этапе рассчитываются состояния переменных в узлах очередного целого временного слоя на основе вычисленных ранее значений на предыдущем полуцелом слое и модели поверхностного эффекта - на предыдущем целом

временном слое. При этом обращение в подпрограмму *PLEP* в цикле по  $KKD = 1, \dots, KK1$  заменяется циклическим обращением в модуль *FPLEP1*, моделирующий работу *PLEP* следующим образом.

5. Массив пакета программ ИФАН  $C(2K, JLC)$  со значениями напряжений и токов в проводах ЛЭП в точках целого временного слоя формируется как линейная комбинация соответствующих компонент массивов *CVPCV*, *CIPCV*, *CVWI*, *CIWT*, сформированных в результате подготовительной работы модуля *SPLEP1*. В модуле *FPLEP1* реализованы следующие формулы из подпрограммы *PLEP*:

$$U_d = (1 + hzg)^{-1} \cdot [A_p - A_q] = (1 + hzg)^{-1} \cdot \frac{1}{2} \cdot [(U_p + U_q) + Z(i_p - i_q)];$$

$$i_d = (Z + Z_n)^{-1} \cdot [A_p + A_q] = (Z + Z)^{-1} \cdot \frac{1}{2} \cdot [(U_p - U_q) + Z(i_p + i_q)] + 2 \sum_{\kappa=1}^3 Z'_{n\kappa} \cdot i_{f\kappa} \quad .(П4.5)$$

Значения токов  $i_{d\kappa}$  в ветвях модели поверхностного эффекта на текущем полуцелом временном слое формируются в данном варианте программы *FPLEP1* - в массиве *FC* ( $3K \cdot JLC$ ) - так же, как и в *PLEP* - путем обращения в подпрограмму *TOKIF*. В остальном головной модуль модифицированного пакета программ ИФАН на первом этапе своей работы (при вычислении напряжений и токов в узлах разбиений ЛЭП на текущем целом временном слое) работает без изменений, т.е. организует обращения в подпрограммы, обрабатывающие концы участков ЛЭП и т.д.

Перед вторым этапом работы головного модуля, состоящем в расчете значений переменных на текущем полуцелом временном слое, происходит обращение в модуль *SPLEP2*, формирующий новое состояние вспомогательных двумерных массивов *CVPCV*, *CVWI*, *CIPCV*, *CIWI*, *CIWT* по схеме, соответствующей переходу с целого на полуцелый временной слой:

$$C(2K \cdot JLC) \rightarrow \begin{cases} PCV(K, JLC), & (U_p, U_q - \text{цел}); \\ PCI(K, JLC), & (i_p, i_q - \text{цел}); \end{cases} \quad (П4.6)$$

$$FPC(3K \cdot JLPC) \rightarrow \begin{cases} FC1(K, JLPC), & (i_{f_1} - n/\text{цел}); \\ FC2(K, JLPC), & (i_{f_2} - n/\text{цел}); \\ FC3(K, JLPC), & (i_{f_3} - n/\text{цел}); \end{cases} \quad (\text{П4.7})$$

$$Z * PCI = WI(K, JLC), \quad (Z \cdot i_p, \quad Z \cdot i_q - \text{цел});$$

$$Z'_{n_1} * FC1 = WT1(K, JLPC), \quad (Z'_{n_1} \cdot i_{f_1} - n/\text{цел}); \quad (\text{П4.8})$$

$$Z'_{n_2} * FC2 = WT2(K, JLC), \quad (Z'_{n_2} \cdot i_{f_2} - n/\text{цел});$$

$$Z'_{n_3} * FC3 = WT3(K, JLC), \quad (Z'_{n_3} \cdot i_{f_3} - n/\text{цел});$$

$$WT1 + WT2 + WT3 = WT(K, JLPC), \quad \left( \sum_{\kappa=1}^3 Z'_{n_\kappa} \cdot i_{f_\kappa} - n/\text{цел} \right); \quad (\text{П4.9})$$

$$(1 + hzg)^{-1} * PCV = CVPCV(K, JLC), \quad \left\{ \begin{array}{l} (1 + hzg)^{-1} \cdot U_p \\ (1 + hzg)^{-1} \cdot U_q \end{array} \right. - \text{цел};$$

$$(Z + Z_n)^{-1} * PCV = CIPCV(K, JLC), \quad \left\{ \begin{array}{l} (Z + Z_n)^{-1} \cdot U_p \\ (Z + Z_n)^{-1} \cdot U_q \end{array} \right. - \text{цел};$$

$$(1 + hzg)^{-1} * WI = CVWI(K, JLC), \quad \left\{ \begin{array}{l} (1 + hzg)^{-1} \cdot Z \cdot i_p \\ (1 + hzg)^{-1} \cdot Z \cdot i_q \end{array} \right. - \text{цел}; \quad (\text{П4.10})$$

$$(Z + Z_n)^{-1} * WI = CIWI(K, JLC), \quad \left\{ \begin{array}{l} (Z + Z_n)^{-1} \cdot Z \cdot i_p \\ (Z + Z_n)^{-1} \cdot Z \cdot i_q \end{array} \right. - \text{цел};$$

$$(Z + Z_n)^{-1} * WT = CIWT(K, JLPC), \quad \left( (Z + Z_n)^{-1} \sum_{\kappa=1}^3 Z'_{n_\kappa} \cdot i_{f_\kappa} - n/\text{цел} \right).$$

На втором этапе вычислений значений напряжений и токов на полуцелом временном слое путем циклических обращений в модуль *FPLEP2* (при  $KKD = 1, \dots, KK1$ ) формируются компоненты массива *PC* ( $2\kappa, JLPC$ ) и используются расчетные выражения (П4.5), но уже для точек полуцелого временного слоя.

Аналогично значения токов в ветвях модели поверхностного эффекта на текущем целом временном слое формируются в программе *FPLEP2* в массиве *FPC* (*3k*, *JLPC*), а в остальном головной модуль модифицированного пакета программ ИФАН повторяет схему вычислений пакета программ ИФАН в соответствии с (П4.1 – П4.10).

Помимо расчета параметров, характеризующих переходный процесс непосредственно в ВЛ СВН, требуется проведение расчета токов и напряжений в измерительных цепях защиты. Определение напряжений и токов в цепи из каскадно соединенных частотных фильтров проводится с учетом того, что за источник возмущений на входе измерительной цепи может быть принят сигнал в линии в месте подключения защиты [5]. При этом напряжения и токи на выходе каждого *s*-ого звена измерительной цепи (см. главу 1 диссертации)

$$U_{\text{вых}_s}(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t U_{\text{вх}_s}(\lambda) \cdot H_s(t - \lambda) d\lambda = \int_0^t U_{\text{вх}_s}(\lambda) \cdot \frac{dH_s(t - \lambda)}{dt} d\lambda + U_{\text{вх}_s}(t) \cdot H_s(0) = \int_0^t \frac{dU_{\text{вх}_s}(t - \lambda)}{dt} \cdot H_s(\lambda) d\lambda + U_{\text{вх}_s}(0) \cdot H_s(t), \quad (\text{П4.11})$$

где  $H_s(t)$  - передаточная функция *s*-ой ступени, а  $U_{\text{вх}_s}(t)$  - входное напряжение.

Принята следующая последовательность выполнения расчетов в цепях измерительного органа защиты:

- 1) фильтр низших частот (0 – 2 кГц),
- 2) режекторный фильтр третьей гармоники (150 Гц),
- 3) режекторный фильтр пятой гармоники (250 Гц),
- 4) три звена режекторного фильтра промышленной частоты (50 Гц).

Для обеспечения независимости обработки результатов вычисление на каждой ступени и для экономии машинного времени ЭВМ сначала с помощью сервисной программы *CHARVT* рассчитываются и записываются на файл МД передаточные функции последовательных звеньев (при  $s = 1, \dots, 4$ ):

$$H_{1-2}(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t H_1(\lambda) \cdot H_2(t - \lambda) d\lambda = \int_0^t H_1(\lambda) \cdot \frac{dH_2(t - \lambda)}{dt} d\lambda + H_1(t) \cdot H_2(0);$$





МД - см. программу *LAGRAFVT*). Результаты выводятся также в табличном и графическом виде.

Сервисные программы *LAGRINT* и *LAGRINVT* работают аналогично *LAGRINV*, обрабатывая соответственно значения токов и падающих волн в волновых каналах четырех ступеней частотного фильтра измерительного органа.

## Приложение 5

Утверждаю  
 Заместитель Главного инженера  
 Верхне-Донского ПМС  
 А. М. Щевень



Акт ввода в опытную эксплуатацию  
 многофункционального измерительного устройства  
 для регистрации переходных процессов  
 и определения места повреждения (ЭНИС).

г. Тамбов

«20» февраля 2012 года

1. В период с 06 по 09 февраля 2012 года на ПС «Тамбовская 500» и на ПС «Давыдовская» выполнены работы по монтажу и подключению многофункционального измерительного устройства для регистрации переходных процессов и определения места повреждения (ЭНИС) к цепям измерительных трансформаторов тока и напряжения ВЛ 220 кВ Тамбовская - Давыдовская - 1, к каналам передачи информации и к цепям питания устройства.

1.1. На ПС «Тамбовская 500» многофункциональное устройство установлено в Панели № 187 «Учет ВЛ 220 кВ» в ПРП 220 кВ. Для коммутации измерительных цепей устройства и цепей трансформаторов тока и напряжения на этой же панели установлено три испытательных блока БИ-6. Подключение цепей тока и напряжения фаз А, В и С осуществлено с Панели № 187. Подключение цепей тока  $3I_0$  осуществлено с Панели № 179 «ДФЗ -504 ВЛ 220 кВ Давыдовская 1». Подключение цепей напряжения  $3U_0$  осуществлено с Панели № 180 «Резервные защиты ВЛ 220 кВ Давыдовская -1». Пуск устройства от защит с помощью последовательно соединенных контактов РПО и РФК осуществлено с Панели № 181 «Автоматика ВЛ 220 кВ Давыдовская 1, Давыдовская 2». Питание устройства переменным током выполнено от Шкафа АВР - 0,4 кВ ЛАЗ № 1, АК АВЗК через автоматический выключатель АП50Б. Сетевой маршрутизатор устройства подключен к оборудованию передачи данных узла связи ПРП 220 кВ с помощью проложенного кабеля УТР-5Е. Синхронизация измерений токов и напряжений по концам ВЛ 220 кВ осуществляется с помощью системы GPS, антенна которой установлена на ограждении площадки на входе в чердачное помещение ПРП 220 кВ.

1.2. На ПС «Давыдовская» многофункциональное устройство установлено в Панели № 24 «Измерительные преобразователи» в ОПУ 220 кВ. Для коммутации измерительных цепей устройства и цепей трансформаторов тока и напряжения на этой же панели установлено три испытательных блока БИ-6. Подключение цепей напряжения фаз А, В и С, а также цепей  $3U_0$  осуществлено с Панели № 23 «ТН-220 кВ ВЛ Давыдовская 1, 2». Подключение цепей тока фаз А, В и С, а также цепей  $3I_0$  осуществлено с Панели № 6 «Управление ВМ-1; ВМ-2; ВМ-3; ВМ-4». Пуск устройства от защит с помощью последовательно соединенных контактов РПО и РФК осуществлено с Панели № 33

«Автоматика 1В, 2В». Питание устройства переменным током выполнено от Панели № 85 «Секция 1» через автоматический выключатель АП50Б. Сетевой маршрутизатор устройства подключен к оборудованию передачи данных Узла связи ОПУ 220 кВ с помощью проложенного кабеля UTP-5Е. Синхронизация измерений токов и напряжений по концам ВЛ 220 кВ осуществляется с помощью системы GPS, антенна которой установлена на мачте антенного узла ОПУ 220 кВ.

2. 20 февраля 2012 года оба комплекта многофункционального устройства ЭНИС были введены в опытную эксплуатацию на ПС «Тамбовская 500» и ПС «Давыдовская». Контроль за состоянием и функционированием устройства осуществляется ОАО «ЭНИН» на основе данных, получаемых от устройства по вышеуказанным каналам связи передачи данных. Аварийное отключение устройства осуществляется путем нажатия кнопки «Включение/Отключение», расположенной в правом нижнем углу лицевой панели устройства. Регламентные работы на устройстве проводятся работниками ОАО «ЭНИН». Текущая эксплуатация устройства ЭНИС не требует вмешательства персонала подстанций.

3. В случае возникновения вопросов, касающихся эксплуатации устройства ЭНИС, и при нештатных ситуациях необходимо связаться со следующими работниками ОАО «ЭНИН»:

- Панфилов Дмитрий Иванович - Заместитель Генерального директора по науке (Руководитель работы) +7-985-969-95-50 (моб.), +7-495-770-31-10 (раб.);
- Лачугин Владимир Федорович - Ученый секретарь (Ответственный исполнитель) +7-909-674-02-73 (моб.), +7-495-770-34-64 (раб.)

От Верхне-Донского ПМЭС:

Начальник Тамбовского  
района МЭС 220 кВ

Н. Т. Паршин

Начальник ПС «Тамбовская 500»

С. И. Судоргин

Начальник ПС «Давыдовская»

А. С. Ремаренко

Ведущий инженер службы РЗиА

Ю. В. Юрьев

От ОАО «ЭНИН»:

Заместитель Генерального  
директора по науке

Д. И. Панфилов

Ученый секретарь

В. Ф. Лачугин

«Утверждаю»

Заместитель главного инженера  
Верхне-Донского ПМЭС

Н. А. Воронцов



Акт монтажа опытных образцов многофункционального  
устройства регистрации процессов в ВЛ ЕЭС  
и определения места повреждения

г. Тамбов

«13» июля 2012 года

1. В период с 9 по 13 июля 2012 года на подстанциях (ПС) «Тамбовская 500» и «Давыдовская» выполнены работы по монтажу и привязке опытных образцов многофункционального устройства регистрации процессов в ВЛ ЕЭС и определения места повреждения к цепям измерительных трансформаторов тока и напряжения ВЛ 220 кВ Тамбовская - Давыдовская - 1, к каналам передачи информации, а также к цепям экспериментальных образцов указанного устройства, введенных в опытную эксплуатацию на этих ПС 20 февраля 2012 года.

1.1. На ПС «Тамбовская 500» опытный образец устройства установлен в панели № 187 «Учет ВЛ 220 кВ» в ПРП 220 кВ. Подключение цепей тока и напряжения фаз А, В и С опытного образца осуществлено с этой же панели. Цепи тока фаз А, В и С опытного образца включены последовательно с цепями тока соответственно фаз А, В и С экспериментального образца, а цепи напряжения фаз А, В и С опытного образца - параллельно цепям напряжения фаз А, В и С экспериментального образца. Пуск опытного образца от защит, так же как и экспериментального, осуществлен от последовательно соединенных контактов РПО и РФК, расположенных на панели № 181 «Автоматика ВЛ 220 кВ Давыдовская 1, Давыдовская 2». Сетевой маршрутизатор опытного образца подключен к оборудованию передачи данных узла связи ПРП 220 кВ с помощью кабеля UTP-5E. Синхронизация измерений токов и напряжений по концам ВЛ 220 кВ осуществляется с помощью системы GPS, антенна которой установлена на ограждении площадки на входе в чердачное помещение ПРП 220 кВ.

1.2. На ПС «Давыдовская» опытный образец устройства установлен в панели № 24 «Измерительные преобразователи» в ОПУ 220 кВ. Подключение цепей напряжения фаз А, В и С опытного образца осуществлено с панели № 23 «ТН-220 кВ ВЛ Давыдовская 1, 2». Подключение цепей тока фаз А, В и С опытного образца осуществлено с панели № 6 «Управление ВМ-1; ВМ-2; ВМ-3; ВМ-4». Цепи тока фаз А, В и С опытного образца включены последовательно с цепями тока соответственно фаз А, В и С экспериментального образца, а цепи напряжения опытного образца - параллельно цепям напряжения фаз А, В и С экспериментального образца. Пуск опытного образца от защит, так же как и экспериментального, осуществлен с помощью последовательно соединенных

контактов РПО и РФК, расположенных на панели № 33 «Автоматика 1В, 2В». Сетевой маршрутизатор устройства подключен к оборудованию передачи данных узла связи ОПУ 220 кВ с помощью кабеля UTP-5Е. Синхронизация измерений токов и напряжений по концам ВЛ 220 кВ осуществляется с помощью системы GPS, антенна которой установлена на мачте антенного узла ОПУ 220 кВ.

2. 13 июля 2012 года опытные образцы устройства введены в опытную эксплуатацию на ПС «Тамбовская 500» и ПС «Давыдовская». Контроль за состоянием и функционированием опытных образцов осуществляется ОАО «ЭНИН» на основе данных, получаемых по вышеуказанным каналам связи передачи данных. Испытания образцов проводятся работниками ОАО «ЭНИН» по соответствующим программам совместно с работниками Верхне - Донского ПМЭС.

3. На вопросы по эксплуатации экспериментальных и опытных образцов устройства смогут ответить сотрудники ОАО «ЭНИН»:

- Панфилов Дмитрий Иванович - заместитель Генерального директора по науке (руководитель работы) +7-985-969-95-50 (моб.), +7-495-770-31-10 (раб.);
- Лачугин Владимир Федорович - заведующий лабораторией 0105 информационно-измерительных и управляющих систем в электроэнергетике (ответственный исполнитель) +7-909-674-02-73 (моб.), +7-495-770-34-64 (раб.).

От Верхне-Донского ПМЭС:

От ОАО «ЭНИН»:

Начальник Тамбовского района  
МЭС 220 кВ

Заместитель генерального  
директора по науке

Н. Т. Паршин

Д. И. Панфилов

Начальник ПС «Тамбовская 500»

Заведующий лабораторией 0105

С. И. Судоргин

В. Ф. Лачугин

Начальник ПС «Давыдовская»

А. С. Ремаренко

Инженер ТУ РЗИА

А. А. Дрогалин

ДЭМ ПС «Давыдовская»

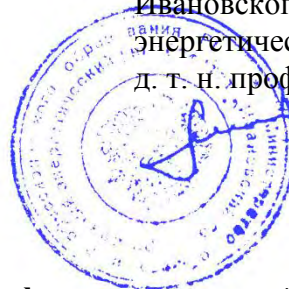
А. П. Федоренко

## Приложение 7

## УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе  
Ивановского государственного  
энергетического университета,  
д. т. н. профессор

Ю. Я. Щелькалов  
15 мая 1998 г.



## АКТ

испытаний устройства защиты от однофазных замыканий на землю  
типа УЗС-01, разработанного на предприятии "Энергосоюз"  
совместно с ЭНИН им. Кржижановского

г. Иваново

15.05.98

1. Испытания проводились на физической модели трехфазной электрической сети кафедры "Автоматическое управление электроэнергетическими системами" (АУЭС) Ивановского государственного энергетического университета (ИГЭУ) в период с 12.05.98 г. по 15.05.98 г.

2. Цель **испытаний** - экспериментальные исследования эффективности функционирования устройства защиты типа УЗС-01 в условиях, приближенных к реальным в электрических сетях 6-10 кВ.

3. Физическая модель, на которой проводились испытания устройства защиты от однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), имитирует смешанную кабельно-воздушную сеть с  $U_{ном} = 6$  кВ, работающую с изолированной нейтралью или с компенсацией емкостного тока ОЗЗ. Схема сети обеспечивала моделирование нескольких кабельных (с длиной от 100 до 500 м) и воздушных (с длиной до 10 км) линий, изменение суммарного емкостного тока сети  $I_{с\sum}$ , удаленности  $I_3$  точки ОЗЗ от шин, начальной фазы пробоя изоляции  $\varphi$ , интервалов времени между повторными пробоями, переходного сопротивления  $R_n$  в месте повреждения. Кабельные и воздушные линии имитировались трехфазными цепными схемами, удаленные участки сети - сосредоточенными трехфазными емкостями.

4. Испытания включали проверку эффективности функционирования устройства защиты УЗС-01 при внешних и внутренних ОЗЗ всех разновидностей: кратковременных самоустраняющихся, устойчивых, прерывистых. Параметры, определяющие условия экспериментов, изменялись в следующих пределах:  $I_{с\sum}$  от 10 до 30 А;  $I_3$  от 0 до 10 км;  $\varphi$  от 0 до 360°;  $R_n$  от 0 до 1000 Ом; интервалы времени между повторными пробоями изоляции от долей периода до 10 и более периодов промышленной частоты. Общее число произведенных на модели внутренних и внешних ОЗЗ при испытаниях составило более 1000.

5. Основные результаты испытаний:

- при всех внешних ОЗЗ устройство УЗС-01 срабатывало правильно (на блокировку);

- при внутренних ОЗЗ устройство УЗС-01 срабатывало правильно во всех случаях, когда амплитуда переходного тока превышала заданный порог срабатывания по току, а длительность существования напряжения  $3U_0$  в сети - время срабатывание пускового органа защиты по напряжению нулевой последовательности. Если уровень входных сигналов по току и напряжению нулевой последовательности оказывался меньше заданных техническими требованиями параметров срабатывания, устройство действовало на блокировку.

Таким образом, излишних и ложных срабатываний защиты при испытаниях отмечено не было. Срабатывания при внутренних ОЗЗ на блокировку имели место только в тех условиях, когда уровни входных сигналов по току и напряжению нулевой последовательности оказывался ниже установленных техническими требованиями на устройство защиты УЗС-01.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Устройство УЗС-01 удовлетворяет своему назначению и может быть использовано для защиты и селективной сигнализации однофазных замыканий на землю в электрических сетях 6-35 кВ.

Испытания проводили:

Заведующий кафедрой АУЭС ИГЭУ,  
д. т. н., профессор

К. т. н. доцент кафедры АУЭС ИГЭУ

К. т. н., с. н. с. ЭНИН им. Кржижановского

В. А. Шуин

А. В. Гусенков

В. Ф. Лачугин



### Технические данные устройства ИЗГ

Устройство импульсной направленной защиты гидрогенераторов типа ИЗГ предназначено для осуществления селективной защиты от устойчивых и неустойчивых ОЗЗ обмотки статора гидрогенератора, работающего в схеме укрупненного блока, но может применяться для генераторов, работающих и на сборные шины в системах с изолированной и компенсированной нейтралью.

Измерительными цепями защита ИЗГ подключается к выходам ФННП с номинальным напряжением не более 100 В и ФТНП с номинальным током 5 А.

Питание защиты осуществляется от междуфазного напряжения  $U_{AC}$  измерительного ТН системы генераторного напряжения с  $U_{ном} \approx 100$  В.

Устройство обеспечивает [5]:

срабатывание в момент появления ОЗЗ в любой точке обмотки статора, включая нейтраль, при использовании пуска от защиты типа ЗЗГ-11 или ЗЗГ-12 с действием на сигнал или отключение с выдержкой I ступени или без выдержки времени;

автоматический возврат после устранения ОЗЗ;

счет числа срабатываний по каналам с реле напряжения  $KV$  и с реле тока  $KC$  (селективные каналы) при ОЗЗ в зоне;

световую сигнализацию срабатывания;

несрабатывание при внешних ОЗЗ, а также при коммутациях в течение устойчивого ОЗЗ;

неселективное отключение с выдержкой времени резервной II ступени при неотключенных устойчивых ОЗЗ в схеме укрупненного блока, а также при работе одиночного генератора.

Время срабатывания:



по каналу с  $KV$  — не более 50 мс (0 ступень) и от 0,5 до 0,7 с (I ступень);

по каналу с  $KC$  — не более 0,11 с;

по каналу срабатывания без  $KW$  — от 2 до 2,8 с (II резервная ступень).

Время удерживания выходного реле в состоянии срабатывания — не менее 0,3 с.

Устройство сохраняет работоспособность после воздействия напряжения и тока промышленной частоты:

115 В и 5,5 А — при длительном воздействии;

150 В — в течение 5 с;

150 А — в течение 3 с.

Устройство содержит также элементы, обеспечивающие:

контроль работоспособности со световой сигнализацией и срабатыванием выходного реле;

проверку действия на блокирование.

Устройство размещено в двух блоках (основном и дополнительном) с габаритными размерами  $250 \times 175 \times 255$  и весом 7 кг каждый.

Электрическая мощность, потребляемая защитой при номинальных входных величинах, равна не более:

7,5 В·А по цепи тока в режиме срабатывания;

3 В·А по цепи напряжения в режиме срабатывания;

10 В·А по цепи питания в режиме ожидания;

15 В·А по цепи питания в режиме срабатывания.

#### **Реле $KW$ :**

параметры срабатывания по импульсам тока ( $15 \pm 3$ ) мА амплитудного значения и по импульсам напряжения ( $1,5 \pm 0,3$ ) В амплитудного значения при длительности фронта ( $100 \pm 15$ ) мкс, измеренной на уровне 0,9 амплитудного значения; возможно увеличение параметров срабатывания в 2 раза;

чувствительность на блокирование в 1,5 раза выше чувствительности на срабатывание;

частотные фильтры в измерительных цепях напряжения и тока имеют полосу пропускания от 2 до 25 кГц;

длительность удерживания в состоянии срабатывания и блокирования — в пределах от 0,22 до 0,27 с.

**Реле *KV*:**

порог срабатывания по напряжению составляет  $(5 \pm 1)$  В в диапазоне частот от 40 до 75 Гц и может быть увеличен в 2 раза; при частотах 100 и 150 Гц порог увеличивается не менее чем в 2 и 10 раз соответственно;

время срабатывания 20 - 35 мс с момента подачи напряжения, составляющего не менее 1,5 от порога срабатывания;

время удерживания в состоянии срабатывания после окончания воздействия входного сигнала - 0,27 с;

время срабатывания при замыкании внешних контактов — не более 10 мс.

**Реле *KC*:**

параметры срабатывания по импульсам тока аналогичны параметрам срабатывания реле *KW*;

срабатывает при накоплении не менее четырех импульсов при их следовании в каждый период промышленной частоты при срабатывании реле *KW*.

**Расчет токов и напряжений для ОНМ ИЗГ в расчетном случае ОЗЗ на выводах гидрогенератора, работающего в блоке с повышающим трансформатором**

Расчет волновых токов и напряжений в расчетной схеме на нескольких временных интервалах процесса, определяемых прохождением волной фазной обмотки НН трансформатора, при учете, что коэффициент преломления

$$K_{npU} = \frac{1}{1 + \frac{Z_{втр}}{2Z_{вг}}} = \frac{1}{1 + 5} = \frac{1}{6}.$$

1.  $0 - t_1$  (интервал времени до первого перехода волны на неповрежденные фазы)

$$U_A = 1; U_B = U_C = 0; i_A = \frac{1}{150}; i_B = i_C = 0; 3U_0 = 1; 3i_0 = \frac{1}{150}.$$

2.  $t_1 - t_2$  (интервал времени после первого перехода волны на неповрежденные фазы)

$$U_A = 1; U_B = \frac{1}{6}; U_C = \frac{1}{6}; i_A = \frac{1}{150}; i_B = i_C = -\frac{1}{6 * 30} = -0,00595;$$

$$3U_0 = 1,33; 3i_0 = \frac{1}{150} - \frac{2}{180} = -\frac{1}{225} = -0,00444.$$

3.  $t_2 - t_3$  (интервал времени после второго перехода волны на неповрежденные фазы)

$$U_A = 1; U_B = \frac{1}{6} + \frac{1}{6} * \frac{1}{6} = \frac{7}{36} \approx 0,2 = U_C; 3U_0 = 1 + 0,2 + 0,2 = 1,4;$$

$$i_A = \frac{1}{150} + \left(-\frac{5}{6 * 300}\right) * (-1) * 2 + \left(-\frac{5}{6 * 300}\right) * (-1) * 2 = \frac{1}{150} \left(1 + 2\frac{5}{6}\right) = 0,0178;$$

$$i_B = -\frac{1}{180} - \frac{1}{6} * \frac{1}{6 * 30} = -\frac{1}{180} * \frac{7}{6} = -0,00647 = i_C;$$

$$3i_0 = \frac{4}{225} - \frac{2 * 7}{1080} = 0,0178 - 0,013 = -0,0048.$$

4.  $t_3 - t_4$  (интервал времени после третьего перехода волны на неповрежденные фазы)

$$U_A = 1; U_B = 0,2 + \frac{5}{6} * \frac{1}{6} - \frac{1}{6} * \frac{5}{6} * \frac{1}{6} = 0,316 = U_C; 3U_0 = 1,632;$$

$$i_A = \frac{4}{225} + \left(\frac{1}{6} * \frac{1}{6} * \frac{1}{300}\right) * (-1) * 2 + \left(\frac{1}{6} * \frac{1}{6} * \frac{1}{300}\right) * (-1) * 2 = 0,01815;$$

$$i_B = i_C = -\frac{7}{1080} - \frac{5}{6} * \frac{1}{6} * \frac{1}{30} + \frac{5}{6} * \frac{1}{6} * \frac{1}{6} * 30 = 0,01815;$$

$$3i_0 = 0,01815 - 2 * 0,01034 = -0,00253.$$

Если, для упрощения, принять  $Z_{вг} \ll Z_{втр}$ , то тогда для соответствующего из указанных интервалов:

$$0 - t_1 \quad 3U_0 = 1; 3i_0 = \frac{1}{150} = 0,00667;$$

$$t_1 - t_2 \quad 3U_0 = 1; 3i_0 = \frac{1}{150} - 2\frac{2}{300} = -\frac{1}{150} = -0,0067;$$

$$t_2 - t_3 \quad 3U_0 = 1; 3i_0 = \frac{3}{150} - 2\frac{1}{150} = \frac{1}{150} = -0,0067;$$

$$t_3 - t_4 \quad 3U_0 = 1; 3i_0 = \frac{3}{150} - 2\frac{2}{150} = -\frac{1}{150} = -0,0067.$$

Схема замещения трехфазной цепи блока генератор-трансформатор при ОЗЗ на фазном выводе А гидрогенератора для операторного метода имеет вид, представленный на рис. П9.1.

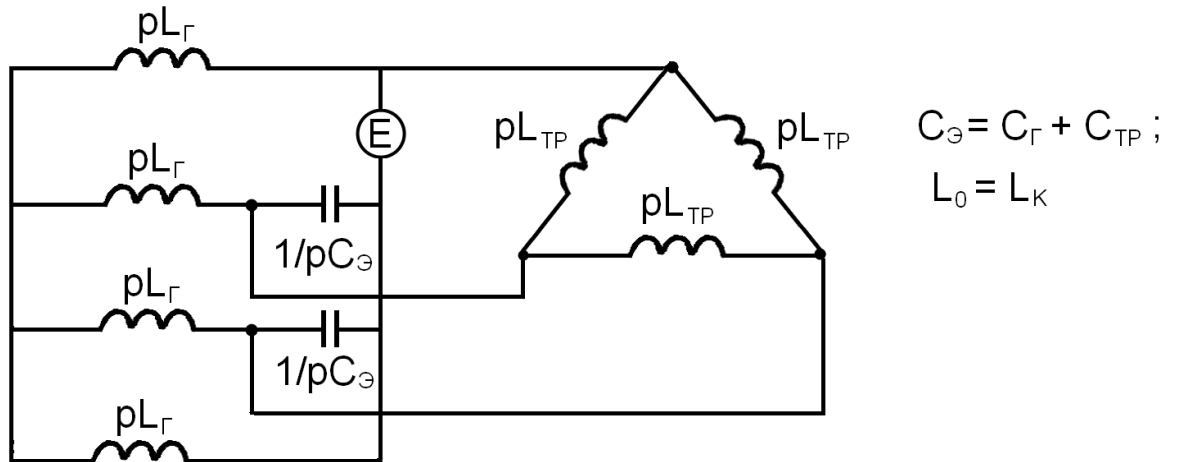


Рис. П9.1. Схема замещения трехфазной цепи блока генератор-трансформатор

Преобразуем схему к виду, представленному на рис. П9.2.

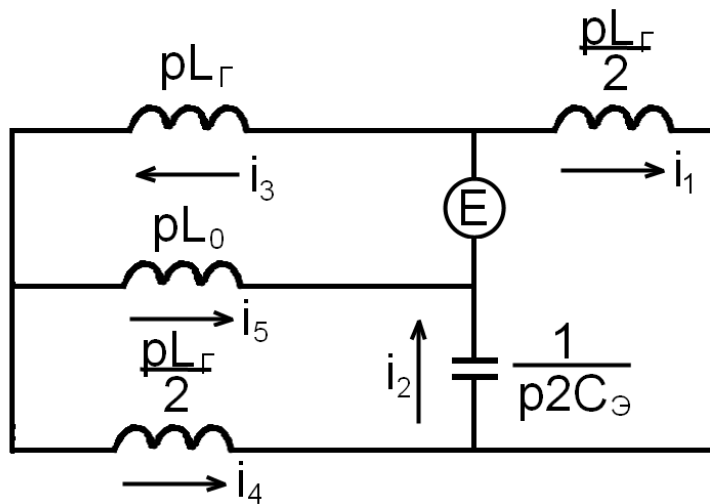


Рис. П9.2. Эквивалентная схема замещения трехфазной цепи блока генератор-трансформатор

На основании законов Кирхгофа составим систему уравнений для определения искомых токов

$$\begin{cases} i_2 = i_1 + i_4; \\ i_3 = i_4 + i_5; \\ E = pL_2 i_3 + pL_0 i_5; \\ pL_0 i_5 - \frac{1}{2pC_3} i_2 - p \frac{L_2}{2} i_4 = 0; \\ E = p \frac{L_{mp}}{2} i_2 + \frac{1}{2pC_3} i_4. \end{cases} \quad (\text{П7.1})$$

Решая (П7.1) относительно  $i_1$ , получим

$$i_1 = \frac{E \left( 1 - \left( 2p^2 L_2 C_3 + \frac{L_2 + L_0}{L_0} (1 + p^2 L_2 C_3) \right) 2pC_3 \right)}{\frac{L_2 + L_0}{L_0} - \left( 2p^2 L_2 C_3 + \frac{L_2 + L_0}{L_0} (1 + p^2 L_2 C_3) \right) (1 + p^2 L_{mp} C_3)}. \quad (\text{П7.2})$$

Знаменатель (П7.2) преобразуется к виду

$$p^2 \left( p^2 \left( 2 + \frac{L_2 + L_0}{L_0} \right) L_2 L_{mp} C_3^2 + \left( 2L_2 + \frac{L_2 + L_0}{L_0} (L_2 + L_{mp}) \right) C_3 \right) = 0$$

Отсюда

$$\omega^2 = \frac{2L_2 + \frac{L_2 + L_0}{L_0} (L_2 + L_{mp})}{\left( 2 + \frac{L_2 + L_0}{L_0} \right) L_2 L_{mp} C_3}$$

Поэтому

$$\begin{aligned} i_1(p) &= E \frac{\left( 1 + \frac{L_2 + L_0}{L_0} \right) 2C_3}{pL_2 L_{mp} C_3^2 \left( 2 + \frac{L_2 + L_0}{L_0} \right) (p^2 + \omega^2)} - \frac{2p^2 L_2 C_3^2 \left( 2 + \frac{L_2 + L_0}{L_0} \right) E}{pL_2 L_{mp} C_3^2 \left( 2 + \frac{L_2 + L_0}{L_0} \right) (p^2 + \omega^2)} \doteq \\ &\doteq 2E \frac{1 - \frac{L_2 + L_0}{L_0}}{2 + \frac{L_2 + L_0}{L_0}} * \frac{1}{L_2 L_{mp} C_3} \left( \frac{t^2}{\omega^2} - \frac{\sin \omega t}{\omega^3} \right) + 2E \frac{\sin \omega t}{\omega L_{mp}}. \end{aligned}$$

Так как  $L_0 \gg L_r$ , то

$$\omega^2 = \frac{2L_2 + L_2 + L_{mp}}{(2 + 1)L_2 L_{mp} C_3} = \frac{3L_2 + L_{mp}}{3L_2 L_{mp} C_3} = \frac{1}{L_{\text{ЭК}} C_3}, \quad \text{где } L_{\text{ЭК}} = \frac{3L_2 L_{mp}}{3L_2 + L_{mp}} \text{ и}$$

$$i_1(t) = E \frac{1}{\omega \frac{L_{mp}}{2}} \sin \omega t$$

После подстановки исходных данных (глава 5) получим, что

$$\omega \approx 7.76 * 10^4 \frac{1}{c}, \text{ а } f = \frac{\omega}{2\pi} = 12.4 \text{ кГц.}$$

Следовательно, знаки  $3i_0$  изменяются с частотой в пределах частотного диапазона ОНМ ИЗГ.

## Испытания ИЗГ на Нижнекамской ГЭС



УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер НК ГЭС

В.И. Хохлов

21.10.1997 г.

## ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ

выполнения работ по договору № 35/97

Согласно договору № 35/97 ЭНИН и НК ГЭС 23 октября 1997 г. силами обеих организаций были проведены испытания модернизированной схемы защиты от замыкания на землю обмотки статора гидрогенераторов в укрупненных блоках НК ГЭС типа ИЗГ.

Испытания проводились на втором блоке НК ГЭС. Модернизация схемы защиты была осуществлена на ИЗГ гидрогенератора № 5. Целью модернизации являлось обеспечение селективной работы ИЗГ в режиме работы блока с одним генератором (на холостом ходу и в сети под нагрузкой), для чего она не была ранее функционально предназначена.

Модернизация схемы ИЗГ коснулась выполнения схемы цепи отключения от установившегося напряжения нулевой последовательности промышленной частоты ("сраб. без ИРМ") путем ввода, ее в режимах недостаточной чувствительности импульсного реле мощности (ИРМ) - при работе одиночного генератора, но без нарушения селективности ИЗГ в других режимах работы укрупненного блока, на которые ИЗГ ранее была рассчитана.

В процессе испытаний проводились внешние и внутренние по отношению к зоне срабатывания ИЗГ замыкания на землю в цепи генераторного напряжения при холостом ходе ГГ№5, работе ГГ№5 в сети под нагрузкой (при отключенных других генераторах блока №2) и при параллельной работе с другими генераторами блока.

Во всех случаях испытаний модернизированное устройство ИЗГ работало селективно, чем и была подтверждена правильность предложенного технического решения по модернизации схемы ИЗГ.

Для завершения работы по договору № 35/97 ЭНИН необходимо выполнить корректировку рабочей документации защиты от замыкания на землю ИЗГ и совместно с НК ГЭС осуществить мероприятия по модернизации всех устройств ИЗГ станции в соответствии с полученными результатами.

От НК ГЭС

Начальник ЭЦ  М. М. ТкачевНачальник ЭТЛ  В. Н. Беляев

От ЭНИН

Ст. научный сотр.

канд. техн. наук

 В.Ф. Лачугин



УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер НК ГЭС

 В.И. Хохлов

21.10.1997 г.

## ПРОГРАММА

Испытаний защиты ИЗГ от замыканий на землю обмотки статора гидрогенераторов в укрупненных блоках НКГЭС.

Цель испытаний: Проверка действия защиты ИЗГ в условиях внешних и внутренних замыканий на землю, при работе 1 генератора в блоке.

Методы испытаний: Осциллографирование переходных процессов, сопровождающих искусственные замыкания на землю, наблюдение за работой измерительных приборов ГЭС и действием ИЗГ в этих условиях.

## 1. Подготовительные работы

1.1. Подготовить осциллограф для записи параметров Г5:  $3U_0$ ,  $U_{ст}$ ,  $3I_0$ , срабатывания ИЗГ и ЗЗГ 1.

1.2. Замерить небаланс токов и напряжений на входе фильтров тока ФТНП и напряжения ФННП нулевой последовательности с помощью амперметра и вольтметра в режиме блока одним генератором.

1.3. Подготовить схему подключения "земли" на нейтраль и фазу Г5 с помощью выключателя 6кВ типа ВМП 10к, вывести управление и сигнализацию В6кВ на испытательный стол АЩУЗ и опробовать схему.

1.4. Подключить цепи ИЗГ и осциллографа в действующую схему Г5.

1.5. На отключенном от сети Г5 при  $n=n$  ном и при  $U_{ном}$  произвести измерения  $3U_0$ ,  $3I_0$ .

## 2. Испытание ИЗГ в режиме хх Г5.

2.1. Схема ГЭС нормальная

2.2. Г5,6 выведены в ремонт по бланку переключений.

Отключены: ВГ5,6, РГ5,6, ВОР5,6 и снят опер. ток.

Подключен в/в кабель в нейтраль Г5 от В-6кВ

БЩУ2, п.1. Снять крышку блока 5БИ "Диф. защита Т2 плечо ВГ5,6."

АЩУЗ панели защит Г5,Г6. Накладки переведены:

1Н - "Защита от замыканий на землю статора Г5" - на сигнал,

2Н - "пуск УРОВ ВГ5, 6 от защит Г5" - выведено.

5Н-"1,11 ст. фильтровой защиты и МТЗ Г5 на откл. В6,В7"- выведено,

6Н- "пуск УРОВ ВГ5.6 от МТЗ ТТВ 5,6" – выведено

ХВ24 - "пуск УРОВ ВГ 5,6 от ДЗОШ Г5, Г6" -выведено

1ст. фильтровой защиты и МТЗ Г5 ускорить до 0,2с (min возможное)

АЩУ 3 - снять крышку испытат. блока ВИ "ДЗОШ 13,8, плечо ВГ5.6".

Ответственному за проведение работ проверить готовность схемы.

2.3. Испытание при внезапных и установившихся замыканиях на землю в нейтрали Г5.

2.3.1. Собрать схему Г5:

Отключить РЗ Г5;

Включить РГ5, РВГ5, РНГ5, автоматы и рубильники ТН1Г5, ТН2Г5 с низкой стороны;

Включить АГП Г5.

2.3.2. Пустить Г5 на х.х.

- 2.3.3. Возбудить Г5, процесс осциллографировать.
- 2.3.4. Включить В6кВ замыкание на землю нейтрали Г5, процесс осциллографировать.
- 2.3.5. Произвести измерения на ИЗГ и ЗЗГ 1, отключить В6кВ, процесс осциллографировать.
- 2.3.6. Развозбудить Г5, отключить АГП Г5 и снять опер. ток.
- 2.3.7. П. защит Г5: закоротить цепи т. тока 10 ТТ1, 8 изменить полярность подключения токовых цепей ИЗГ на Г5 снять закорачивающие переключки.
- 2.3.8. Поставить опер. ток и включить АГП Г5, возбудить Г5.
- 2.3.9. Включить В6кВ, наблюдая за поведением ИЗГ Г5, процесс осциллографировать, проверить направленность действия органов направления мощности /ОНМ/, срабатывание реле напряжения /РН/, реле тока /РТ/, выходных органов ИЗГ.
- 2.3.10. Развозбудить Г5, отключить АГП Г5 и снять опер, ток В6кВ.
- 2.3.11. Закоротить цепи т.т.10 ТТ1, 8, восстановить полярность подключения токовых цепей ИЗГ Г5, снять закорачивающие переключки.
- 2.3.12. Разобрать схему Г5:  
Отключить РГ5, РВГ5, РНГ5, автоматы и рубильники ТН1Г5, ТН2Г5 с низкой стороны.
- 2.3.13. Проверить отсутствие напряжения 13, 8кВ и включить РЗГ5.
- 2.3.14. Отсоединить от нейтрали Г5 в/в кабель, идущий от В6кВ.
- 2.3.15. Подключить к "земле" через В6кВ фазу "А" в месте подключения ТН1 Г5 на токопроводе.
- 2.3.16. Отключить РЗГ5.
- 2.3.17. Собрать схему Г5. Включить:РГ5, РВГ5, РНГ5, ТН1, ТН2Г5 автоматы и рубильники с низкой стороны. Поставить опер, ток и включить АГП Г5
- 2.4. Испытания при внезапных и установившихся замыканиях на землю ф. А Г5.
- 2.4.1. Возбудить Г5, процесс осциллографировать.
- 2.4.3. Произвести измерения  $\dot{U}_0$ ,  $3U_0$ ,  $I_A$ ,  $U_{ст}$ , проверить направленность действия органов направления мощности /ОБМ/, срабатывание реле напряжения /РН/, реле тока /РТ/, выходных органов ИЗГ.  
Время измерений не более 3 минут.  
Отключить В6кВ, процесс осциллографировать.
- 2.4.4. Развозбудить Г5, отключить АГП Г5, снять с него опер.ток.
- 2.4.5. Включить В6кВ.
- 2.4.6. Включить АГП Г5, возбудить Г5, процесс осциллографировать.  
Время опыта не более 3 минут.
- 2.4.7. Развозбудить Г5, отключить АГП Г5Т В6кВ.

### 3. Испытания ИЗГ при работе Г5 в сети под нагрузкой.

- 3.1. Исходная схема: Г7, Г8 отключены, Г6 остановлены, схема его разобрана.
- 3.2. БЩУ 2 п. 1 вставить крышку блока 5ВИ "Диф. защита Т2 плечо ВГ5,6"
- 3.3. АЦУ 3 п. защит Г5 накладки перевести:  
2Н - "Запуск УРОВ ВГ5,6 от защит Г5" - "введено"  
ВН - "Запуск УРОВ ВГ5.6 от МТЗ ТТВ5.6" - "введено"  
5Н- "1,11 ступень фильтровой защиты и МТЗ Г5 на откл. В6, В7"- "введено"  
ХВ24- "Запуск УРОВ ВГ5,6 от ДЗОШ Г5,6" - "введено"  
Вставить крышку БИ "ДЗОШ 13,8 плечо ВГ5,6"
- 3.4. Включить РГ5,6, АГП Г5, возбудить Г5 и включить в сеть, нагрузка по напору.
- 3.5. При разных активных нагрузках /минимальная, средняя, максимальная/ включается на 6 сек В6кВ /заземляется ф. "А"/, процессы осциллографируются, ведется наблюдение за поведением ИЗГ Г5.

- 3.6. Разгрузить Г5, отключить от сети, развозбудить и отключить АПП Г5 и снять опер.ток.
- 3.7. Разобрать схему Г5:  
Отключить РГ5, РВГ5, РНГ5, ТН1, ТН2Г5 автоматами и рубильниками с низкой стороны.
- 3.8. Проверить отсутствие напряжения на РГ5 и включить РЗ Г5.
- 3.9. Отсоединить от ф. "А" в/в кабель, идущий на В6кВ и подключить к нейтрали Г5.
- 3.10. Отключить РЗГ5, собрать схему Г5: включить РГ5, РВГ5, РНГ5, ТН1, ТН2Г5 рубильниками и автоматами с низкой стороны, АПП Г5 /предварительно поставив опер.ток /.
- 3.11. Г5 возбудить и включить в сеть, нагрузка по напору.
- 3.12. Включить В6кВ /заземляется нейтраль Г5/ процесс осциллографируется.
- 3.13. Разгрузить Г5, отключить от сети, развозбудить и отключить АПП Г5.
- 3.14. Восстановить уставку 1ст. фильтровой защиты и МТЗ Г5.
- 3.15. А Щ У 3 п. защит Г7, Г8:  
1Н - защиты от замыканий на землю статора Г7, Г8 перевести на сигнал.

#### 4. Испытания ИЗГ при работе Г5, 6 в сети под нагрузкой.

- 4.1. Исходная схема: Г7, Г8 в сети под нагрузкой.
- 4.2. Г5, Г6 по бланку переключений подготовить для включения в сеть и включить, нагрузка по напору.
- 4.3. При разных активных нагрузках /максимальная, средняя, минимальная/ включается В6кВ /заземляется нейтраль Г5/, процессы осциллографируются, ведется наблюдение за поведением ИЗГ Г7, Г8, Г5, Г6.
- 4.4. Разгрузить Г5, 6, отключить от сети, развозбудить и отключить АПП Г5, Г6.
- 4.5. П. защит Г5: закортить цепи т. т. 10 ТТ1, 8, изменить полярность включения токовых цепей ИЗГ, снять закорачивающие перемычки.
- 4.6. Включить АПП Г5, Г6, возбудить Г5, Г6 и включить в сеть нагрузки по напору.
- 4.7. Включить В6кВ /заземляется нейтраль Г5/, процесс осциллографируется, ведется наблюдение за ИЗГ Г7, Г8, Г5, Г6, отключить В6кВ.
- 4.8. Разгрузить Г5, 6, отключить от сети, развозбудить и отключить АПП Г5, Г6, снять опер. ток с ВГ5, 6 и АПП 5, 6.
- 4.9. Закортить цепи т. т. 10 ТТ1, 8, восстановить полярность подключения токовых цепей ИЗГ Г5, снять закорачивающие перемычки.
- 4.10. Разобрать схему Г5:  
Отключить РГ5, РВГ5, РНГ5, ТН1, ТН2Г5 автоматами и рубильниками с низкой стороны.
- 4.11. Проверить отсутствие напряжения на РГ5 и включить РЗГ5
- 4.12. Отсоединить от нейтрали в/в кабель, идущий от В6кВ, подключить его на ф "А" Г5 в месте подключения ТН1 на токопроводе.
- 4.13. Отключить РЗГ5, собрать схему Г5:  
включить РГ5, РВГ5, РНГ5, ТН1, 2 Г5 рубильниками и автоматами с низкой стороны, поставить опер, ток и вкл. АПП Г5, Г6.
- 4.14. Г5, Г6 возбудить и включить в сеть, нагрузки по напору.
- 4.15. При разных активных нагрузках /максимальная, средняя, минимальная/ включается на 6 сек В6кВ /заземляется ф. "А" Г5/, процессы осциллографируются, ведется наблюдение за ИЗГ Г7, Г8, Г5, Г6.
- 4.16. Разгрузить Г5, Г6, отключить от сети, развозбудить и отключить АПП Г5, Г6 и снять опер. ток.
- 4.17. Разобрать схему Г5:  
Отключить РГ5, РВГ5, РНГ5, ТН1, 2 Г5 автоматами и рубильниками с низкой стороны.
- 4.18. Проверить отсутствие напряжения на РГ5 и включить РЗГ5.





УТВЕРЖДАЮ  
Главный инженер НКГЭС  
В. И. Хохлов  
24.10.1997 г.

## ПРОТОКОЛ

Испытаний защиты ИЗГ от замыканий на землю  
обмотки статора генератора на Нижнекамской ГЭС.

г. Набережные Челны

24.10.1997 г.

23 октября 1997 г. на Нижнекамской ГЭС были проведены испытания защиты ИЗГ при замыканиях на землю в цепи генераторного напряжения второго блока НКГЭС с изменениями ее схемы, предусматривающими расширение функциональных возможностей защиты. Изменения схемы касались дополнительного ввода двух одновибраторов - одного (с памятью 3,5 с) последовательно с цепью "сраб. без ИРМ" ИЗГ и второго (с памятью 7 с) - вход которого подключался к выходу схемы сравнения (дешифратора) импульсного реле мощности (ИРМ) ИЗГ "сигнал на срабатывание", а выход - на запрещающий вход первого одновибратора.

При таком дополнении схемы ИЗГ решалась задача обеспечения ее срабатывания на отключение при замыканиях в зоне ИЗГ в режиме работы блока одним генератором как на холостом ходу, так и при подключении его к сети, и соответственно несрабатывания ИЗГ на отключение при замыканиях вне зоны защиты.

Выполнение поставленной задачи являлось продолжением усилий по обеспечению селективной работы ИЗГ при любом числе генераторов в блоке, начатой в 1993 г. разработкой одного из предложений, сомнения в использовании которого показали испытания ИЗГ в сентябре-октябре 1993 г. Исследовательская проработка этой проблемы в 1994-95 годах привела к необходимости выполнения схемы ИЗГ в том виде, который был представлен на данных испытаниях.

Сущность предложенного изменения заключается в переводе на отключение цепи "сраб. без ИРМ", действующей от установившегося значения напряжения нулевой последовательности промышленной частоты, в режимах, когда оказывается нечувствительным тракт на отключение защиты от ИРМ, что имеет место при внутренних замыканиях в блоке с одним генератором. При всех других замыканиях чувствительность ИРМ оказывается достаточной для срабатывания на отключение и действие указанной вновь вводимой цепи отключения запрещается (блокируется) через второй одновибратор от выхода схемы сравнения (дешифратора) ИРМ.

Однократность действия цепи "сраб. без ИРМ", время срабатывания которой при выпуске устройства было установлено равным 2,8 с, обеспечивается установкой на входе первого одновибратора дифференцирующей цепочки с временем формирования сигнала на входе одновибратора, равным 5 мс с памятью 7 с (двойной запас по сравнению 2,8 с). Блокировка тракта отключения "сраб. без ИРМ" обеспечивается вторым одновибратором всегда раньше за счет использования не установившихся (как для первого одновибратора), а более быстрых составляющих - переходных.

Испытания защиты с измененной схемой проводились на комплекте ИЗГ (гидрогенератора) №5. При этом элементы дополнительной части схемы конструктивно были смонтированы на отдельной плате, их входы и выходы соединены проводниками с соответствующими элементами, расположенными на средней плате основного блока ИЗГ.

В соответствии с программой, были проведены испытания модернизированного устройства ИЗГ при внешних и внутренних замыканиях на землю в цепи генераторного напряжения ГГ №5 в режиме его холостого хода, при работе его одного в блоке в сети под нагрузкой и при параллельной работе в блоке с другим генератором. Всего было проведено 20 опытов.

Во всех опытах, кроме одного, ИЗГ работала селективно - действовала на отключение при внутренних и не срабатывала на отключение при внешних замыканиях. Опыт с неселективным срабатыванием ИЗГ относился к внешнему на землю фазы ГГ №5 при его работе в сети под нагрузкой (без других генераторов блока). Поскольку три повторных опыта в аналогичных режимных условиях (введен в сеть только один генератор блока и произведено внешнее замыкание на землю) закончились селективным срабатыванием ИЗГ, то следует констатировать, что оставшийся особняком опыт связан с включением выключателя, выполняющего функции заземления фазы ГГ в момент подхода синусоиды фазного напряжения к нулевому значению, вследствие чего уровень входного сигнала носит слабо выраженный импульсный характер, при котором не обеспечивается не только срабатывание ИРМ, но и второго из двух дополнительных одновибраторов (запрещающего). В результате ИЗГ беспрепятственно сработала по цепи "сраб. без ИРМ" (от напряжения нулевой последовательности промышленной частоты).

Однако, замыкания в цепях генераторного напряжения при мгновенных значениях синусоидального напряжения, близких к нулевым, должны быть исключены из рассмотрения, так как пробой изоляции в закрытых электротехнических установках (к каковым относятся и генераторы) по данным исследований и эксплуатации происходят в зоне изменения напряжения, близкой к амплитудной (примерно от 30 град. до 120 град.). опыты же замыкания с помощью заземляющего выключателя за счет быстрого смыкания контактов выключателя характеризуются повышенной вероятностью "попадания в ноль" момента коммутации.

В прежних опытах ОЗЗ на НКГЭС уже отмечались случаи "попадания в ноль" (данные осциллографирования 1986 и 1993 годов) и их следует отнести не к реально возникающей ситуации, а лишь к особенностям схемы наложения заземления.

Таким образом модернизированное устройство ИЗГ при проведенных испытаниях действовало вполне успешно, что позволяет обеспечить по сравнению с действующим устройством селективную работу ИЗГ не только в режиме работы укрупненного блока, но и при работе одиночного генератора. Тем самым открываются пути для выполнения селективной защиты от замыканий на землю в цепи генераторного напряжения не только на ГЭС, работающих по схеме с укрупненными блоками, но и на других электростанциях, где преимущественно осуществляется работа одиночными блоками.

Предложенная модернизированная схема устройства ИЗГ может быть рекомендована для установки в комплектах ИЗГ на всех шестнадцати генераторах НКГЭС, для чего необходимо провести требуемые мероприятия по выполнению рабочих схем дополнительных плат, их изготовлению и монтажу вспомогательных цепей и элементов схемы устройства.

От Нижнекамской ГЭС

Начальник ЭТЛ  В. Н. Беляев

Ведущий инженер  Б. Е. Чашин

От ЭНИН

С. Н. С., К.Т.Н.  В. Ф. Лачугин

## Приложение 11

Утверждаю



Зам. главного инженера ПО «Татэнерго»

В. А. Мещанинов

7. 12. 1992 г.

## АКТ

## О включении в промышленную эксплуатацию волновой релейной защиты ВЛ-500 кВ Киндери-Заинская ГРЭС.

В июне-ноябре 1992 года ЭНИН совместно с Татэнерго на ПС Киндери и на Заинской ГРЭС были выполнены работы по монтажу и наладке схем привязки цепей волновой защиты к комплексу ОАПВ и цепям ускорения защит в соответствии с рабочим проектом, выполненным ЭСП и ЭНИН и согласованный с ОДУ Средней Волги.

24 ноября 1992 г. на Заинской ГРЭС и 30 ноября 1992 г. на ПС Киндери была проведена проверка взаимодействия цепей ускорения резервных защит /контакт реле 8РП/ панели ускорения резервных защит с цепями волновой защиты, функционирующими при включении ВЛ. При замыкании контакта 8РП /имитация срабатывания реле ускорения защит/ и подаче тестовых сигналов на реле сопротивления модуля волновой защиты /имитирующих короткие замыкания /КЗ/ на включаемой линии выходные цепи волновой защиты действовали на отключение. При разомкнутом состоянии контакта 8РП /имитация несрабатывания реле ускорения защит/ и подачи тех же тестовых сигналов на реле сопротивления волновой защиты выходные цепи ее на отключение не действовали. Таким образом, подтверждена надежность взаимодействия защит в режимах включения защищаемой ВЛ.

7 декабря 1992 года на ПС Киндери и Заинской ГРЭС была проведена проверка взаимодействия выходных цепей волновой защиты с панелью АПВ-503 ВЛ-500 кВ Киндери-Заинская ГРЭС в соответствии с разработанной программой.

При подаче тестовых сигналов от волновой защиты, имитирующих различные виды коротких замыканий на защищаемой ВЛ-500 кВ от выходных цепей волновой защиты, на панели АПВ-503, срабатывали соответственно 1РП5 и РУ1/1 /при имитации КЗ фазы А /, 1РП6 и РУ1/2 /при имитации КЗ фазы В/, 1РП7 и РУ1/3 /при имитации КЗ фазы С/, 1РП5, 1РП6 и РУ1/1, РУ1/2 /при имитации КЗ фаз А и В/.

Все это свидетельствует о правильном взаимодействии цепей отключения волновой защиты с цепями АПВ-503 линии Киндери -Заинская ГРЭС.

При переводе накладки Н1 волновой защиты в положение "Работа без ОАПВ" и имитации указанных видов КЗ вышеприведенные промежуточные реле действовали на отключение всех фаз, что также подтверждает правильное взаимодействие цепей волновой защиты и АПВ-503.

С целью проверки автоматического перевода волновой защиты на отключение трех фаз при исчезновении оперативного тока на панели ОАПВ накладка П2 на панели волновой защиты была замкнута последовательно с контактом РК 2.2 панели АПВ-503. При имитации всех указанных видов КЗ волновая защита действовала по цепи отключения трех фаз ВЛ-500 кВ Киндери-Заинская ГРЭС.

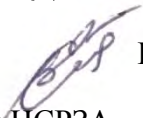
Следовательно, в результате проведенной проверки установлена надежность взаимодействия волновой защиты с панелью АПВ-503 ВЛ—500 кВ Киндери-Заинская ГРЭС.



Таким образом, волновая релейная защита ВЛ-500 кВ Киндери-Заинская ГРЭС может быть включена в промышленную эксплуатацию с действием на отключение через панель АПВ-503.

От ПО «Татэнерго»:


Начальник ЦДС

 В. П. Ерин

Начальник ЦСРЗА

 В. М. Меер

Инженер РЗиА ПС Киндери

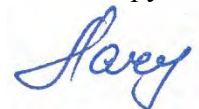
 А. А. Исхаков

Мастер гр. гл. схемы ЗайГРЭС

 И. Э. Закиев

От ЭНИН

Старший научный сотрудник

 В. Ф. Лачугин



## Приложение 12



«Утверждаю»  
Зам. главного инженера  
ПС Татэнерго  
В. А. Мещанинов  
22.06.1990 г.

## АКТ

о включении в опытную эксплуатацию органа селекции грозовых возмущений на ВЛ по признаку сопоставления длительностей и пауз напряжения переходного процесса.

Настоящий акт составлен о том, что 21 июня 1990 года на ВЛ-500 кВ Киндери-Заинская ГРЭС со стороны ПС Киндери включен в опытную эксплуатацию (в составе с устройством волновой защиты этой линии) орган селекции (контроля) КВ-1 грозового возмущения на ВЛ по признаку сопоставления длительности импульсов  $t_{имп}$  и пауз  $t_{п}$  напряжения переходного процесса. При превышении  $t_{п}$  больше чем в 4 раза  $t_{имп}$  выявляется грозовой процесс. Выход органа КВ-1 соединен с регистратором срабатывания защит подстанции. Кроме того имеется световая сигнализация срабатывания КВ-1, расположенная на панели волновой защиты. Работоспособность органа проверена от устройства тестового контроля. Порог срабатывания органа - 1 В, время срабатывания -  $t_{ср} = 4t_{имп}$ . Орган КВ-1 обладает возможностью для определения длительности контролируемых импульсов.

От СРЗА ПО Татэнерго

Нач. службы В. М. Меер

Инж. 1 кат. В. Е. Айхенвальд

От ЭНИН им. Г. М. Кржижановского

С. н. с. к. т. н. В. Ф. Лачугин

Н. с. Г. В. Соколова