

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ФРОЛОВА ЕКАТЕРИНА ИГОРЕВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК ВЫБОРА УСТАВОК И
ПРОВЕРКИ УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ДИСТАНЦИОННЫХ ОРГАНОВ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Глазырин Владимир Евлампиевич

Новосибирск – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ОРГАНА.....	11
1.1 Основные требования, предъявляемые к дистанционным измерительным органам	12
1.2 Характеристики срабатывания дистанционных органов, выполненных на электромеханической и полупроводниковой элементной базе.....	13
1.3 Характеристики срабатывания дистанционных органов, выполненных на микропроцессорной элементной базе	19
1.4 Область применения дистанционных органов в релейной защите и автоматике энергосистем	24
Выводы по главе 1.....	30
ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРАНСФОРМАТОРАХ ТОКА НА ПОВЕДЕНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ ОРГАНОВ.....	32
2.1 Постановка задачи.....	32
2.2 Математическая модель первичной сети.....	36
2.3 Моделирование трансформаторов тока	43
2.4 Преобразование входных сигналов дистанционного органа в векторную форму.....	45
2.5 Особенности моделирования характеристик срабатывания	52
2.6 Разработка интерактивного инструментария, используемого при моделировании	60
2.7 Области применения разработанной системы моделирования.....	62
Выводы по главе 2.....	71
ГЛАВА 3 ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ОРГАНОВ В УСТРОЙСТВАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ	72
3.1 Постановка задачи.....	72

3.2 Основные положения, принимаемые при расчёте параметров срабатывания дистанционной защиты.....	73
3.3 Особенности выбора уставок дистанционных защит кабельных линий	81
3.4 Особенности применения дистанционной защиты от междуфазных коротких замыканий на блоках линия - трансформатор.....	87
3.5 Особенности применения дистанционной защиты от междуфазных коротких замыканий на трансформаторе блока «генератор–трансформатор»	95
3.6 Особенности применения дистанционной защиты от междуфазных коротких замыканий на кабельно-воздушных линиях.....	102
Выводы по главе 3.....	106
ГЛАВА 4 ФОРМИРОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ПРОВЕРКЕ ПРАВИЛЬНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОРГАНА В АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ	108
4.1 Постановка задачи.....	108
4.2 Проверка дистанционного органа стандартными средствами устройства «РЕТОМ»	109
4.3 Синтез проверочного режима, имеющего желаемую траекторию	122
4.4 Особенности проверки устройства токовой блокировки при качаниях	140
Выводы по главе 4.....	148
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	149
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	152
ПРИЛОЖЕНИЕ А ОСОБЕННОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В АНАЛОГОВУЮ ФОРМУ СИГНАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ	164
ПРИЛОЖЕНИЕ Б СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ.....	169
ПРИЛОЖЕНИЕ В АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	172

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. По мере развития ЭЭС усложняется её конфигурация и повышаются уровни токов коротких замыканий (КЗ). В результате этого при экстремальных режимах КЗ могут возникать такие погрешности трансформаторов тока (ТТ), которые существенно искажают вторичную информацию и, как следствие, приводят к нарушению устойчивости функционирования устройств релейной защиты.

Нормативно-техническая документация предъявляет жёсткие требования к точности работы ТТ, предназначенных для питания токовых цепей устройств РЗ, однако в ней учитывается работа ТТ только в установившихся режимах, что приводит к недооценке негативного влияния насыщения ТТ на работу релейной защиты.

Произошедшие системные аварии в Единой энергетической системе России (4.11.2014 г. трехфазное КЗ на ОРУ 500 кВ Ростовской АЭС, 13.06.2018 г. устойчивое КЗ на системе шин 10 кВ ПС 500 кВ Тамань) вследствие неправильной работы устройств релейной защиты и автоматики в связи с насыщением трансформаторов тока из-за появления значительной по величине апериодической составляющей в токе короткого замыкания подтвердили необходимость проверки работы ТТ в переходных режимах. Министерство энергетики Российской Федерации на основе рассмотрения причин этих аварий в письме от 02.04.2019 г. № ЧА-3440/10 «О мерах по недопущению неправильной работы устройств релейной защиты» рекомендовало собственникам объектов электроэнергетики при строительстве или модернизации устройств РЗ уже на этапе проектной документации осуществлять расчет времени до насыщения ТТ (времени достоверного измерения значений вторичного тока), при котором обеспечивается правильная работа РЗ в переходных режимах, а на существующих объектах помимо расчета времени до насыщения произвести анализ работы устройств РЗ на предмет их правильной работы при КЗ с апериодической составляющей тока. Также собственникам предлагается

разработать мероприятия (при необходимости), исключаяющие риски неправильной работы устройств РЗ в режимах, сопровождающихся насыщением ТТ.

Учитывая повсеместное применение дистанционного органа в устройствах релейной защиты и автоматики (дистанционная защита является одной из важнейших в системе защиты линий электропередачи сетей высокого и сверхвысокого напряжения, является резервной защитой сосредоточенных объектов, является пусковым органом в автоматике ликвидации асинхронного режима и т.д.) к ней предъявляются повышенные требования по устойчивости функционирования, Таким образом, можно утверждать, что разработка методов и средств анализа устойчивости функционирования дистанционных органов устройств релейной защиты является актуальной и важной задачей, затрагивающей большинство объектов ЭЭС как в настоящее время, так и в обозримой перспективе.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в исследование и разработку измерительных дистанционных органов релейной защиты и автоматики внесли: Е.А. Аржанников, Ю.Я. Лямец, Д.Р. Любарский, В.Л. Фабрикант, Г. Циглер, Э.М. Шнеерсон, В.А. Шуин и другие.

Наряду с этим исследованиями переходных процессов в цепях трансформаторов тока и их влияния на устойчивость функционирования релейной защиты посвящены работы многих отечественных авторов, таких как: Л.В. Багинский, В.Е. Глазырин, А.М. Дмитриенко, Н.А. Дони, А.Д. Дроздов, А.С. Засыпкин, С.Л. Кужеков, В.А. Наумов, Г.С. Нудельман и многие их коллеги.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования является цифровой измерительный дистанционный орган устройств релейной защиты и автоматики. Предмет исследований – статическая и динамическая устойчивость функционирования дистанционного органа.

Цель работы: разработка методик выбора параметров срабатывания и средств анализа устойчивости функционирования дистанционных органов релейной защиты и автоматики.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

- создать математическую модель «объект защиты - измерительные трансформаторы - измерительные органы защиты»;
- исследовать поведение дистанционных органов (ДО) в переходных режимах и оценить их устойчивость функционирования;
- адаптировать существующие методики расчета параметров срабатывания дистанционных защит к современным условиям работы объединенных энергосистем и требованиям современного первичного оборудования;
- разработать меры повышения быстродействия автоматики ограничения повышения частоты путем применения дистанционных органов;
- сформировать способы проверки правильности функционирования дистанционного органа в асинхронном режиме.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались теория электромагнитных переходных процессов в электрических цепях, методы математического моделирования, экспериментальные исследования на цифровых и физических моделях.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель комплекса «объект защиты - измерительные трансформаторы - измерительные органы дистанционной защиты», учитывающая особенности функционирования трансформаторов тока (ТТ) при соединении их вторичных обмоток по схеме «звезда».
2. Предложен способ использования в ступени дистанционной защиты, установленной на трансформаторе блока, одновременно нескольких независимых измерительных органов заданной конфигурации.

3. Впервые предложена концепция дополнения автоматики ограничения повышения частоты (АОПЧ) (при наличии в нем ступеней по скорости изменения частоты) дистанционным блокирующим органом.

Практическая значимость и реализация результатов работы:

1. Предложены методики расчета параметров срабатывания дистанционной защиты от междуфазных КЗ на кабельно-воздушных линиях и блоках линия-трансформатор, которые применены в рамках выполнения проектной и рабочей документации АО «КОТЭС» и ООО «НОВОСИБИРСКСТРОЙКОМПЛЕКС-ПРОЕКТ».

2. Предложен подход к применению на существующих микропроцессорных терминалах РЗ способа реализации в ступени дистанционной защиты, установленной на трансформаторе блока, одновременно нескольких независимых измерительных органов. Данный подход использован в рабочем процессе проектирования релейной защиты электрооборудования электроэнергетических систем ООО УК «РусЭнергоМир».

3. Разработаны алгоритмы, позволяющие формировать входные сигналы устройств релейной защиты и автоматики в виде токов и напряжений, подаваемых непосредственно на входы испытуемого объекта. Подаваемые на входы устройства сигналы позволяют проверять поведение дистанционных органов в асинхронных режимах работы контролируемого участка сети. На предложенные алгоритмы получено 3 свидетельства о государственной программе для ЭВМ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа функционирования дистанционного органа комплекта ступенчатых защит линии при близких КЗ.

2. Подход к выбору параметров срабатывания дистанционной защиты на блоках «линия-трансформатор».

3. Подход к использованию в ступени дистанционной защиты, установленной на трансформаторе блока, одновременно нескольких независимых измерительных органов заданной конфигурации.

4. Использование дистанционного блокирующего органа в устройстве АОПЧ.

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности.

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы:

1. пункт 6 – «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике»;

2. пункт 9 – «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике»;

3. пункт 13 – «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике».

Достоверность научных положений, полученных результатов и выводов подтверждается корректным использованием математического аппарата, теоретических основ электротехники, соответствием результатов теоретического анализа и вычислительных экспериментов, обсуждением результатов работы со специалистами на научных конференциях и других мероприятиях.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях:

- Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, 3-5 декабря 2010 г.;
- Международная молодежная научно-техническая конференция «Управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах», г. Новосибирск, 21-24 сентября 2011 г.;

- XXVIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 9-13 апреля 2012 г.;
- 13th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2018). Harbin, China, May 30-June 1, 2018;
- XXII Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, 3-7 декабря 2018 г.;
- 20 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2019, Altai Republic, Erlagol, 29 June – 3 July, 2019.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации опубликованы в 16 печатных работах, в том числе 9 работ в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации (из них 3 научные статьи, переведенные на английский язык, опубликованы в журнале, входящем в наукометрическую базу Scopus), 1 работа индексируется в наукометрической базе Scopus, 5 работ в прочих изданиях. Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. В научных трудах, опубликованных в соавторстве, соискатель представил постановку задач, разработку математических моделей, анализ и обобщение полученных результатов.

Личный вклад. Результаты, приведенные в диссертационной работе, получены лично автором. Соискателем определены основные направления исследования дистанционного органа, разработаны математические модели, позволяющие анализировать поведение ДО в сложных переходных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ, и рекомендации по их применению. Предложены пути совершенствования методик расчета параметров срабатывания дистанционных защит при использовании современного первичного оборудования. Предложены подходы по проверке основных характеристик ДО в асинхронном режиме.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка литературы, включающего в себя 96 библиографических ссылок. Общий объем работы составляет 174 страницы, включая 5 таблиц и 53 рисунка.

ГЛАВА 1 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ОРГАНА

Дистанционный орган (ДО) является основным элементом дистанционной защиты (универсальная защита от коротких замыканий) [1] и устанавливает удаленность повреждения от места включения защиты [2].

В качестве ДО используется реле сопротивления. Для проведения анализа работы ДО еще в 20-е годы было введено понятие о сопротивлении на зажимах реле. Это мнимое, не имеющее никакого смысла, сопротивление, представляющее собой отношение напряжения в реле или его слагающей к току реле, подводимых для действия ДО, то есть [3]:

$$Z_p = \frac{U_p}{I_p},$$

где U_p, I_p – величины напряжения и тока, подводимые к реле.

При этом в установившемся режиме U_p, I_p имеют синусоидальный характер, значит, могут быть выражены комплексными числами, соответственно их отношение также является комплексным числом:

$$\underline{Z}_p = R_p + jX_p = Z_p \cdot e^{j\varphi}.$$

Таким образом, каждому значению \underline{Z}_p соответствует определенная точка в плоскости с декартовыми координатами R_p и X_p или с полярными координатами Z_p и φ (рисунок 1.1). Эта плоскость называется комплексной плоскостью Z . Следовательно, для каждого ДО могут быть указаны точки комплексной плоскости, соответствующие его срабатыванию или несрабатыванию. Совокупность этих точек плоскости, соответствующих срабатыванию рассматриваемого ДО, образует область срабатывания, а совокупность точек, соответствующих несрабатыванию – область несрабатывания [4].

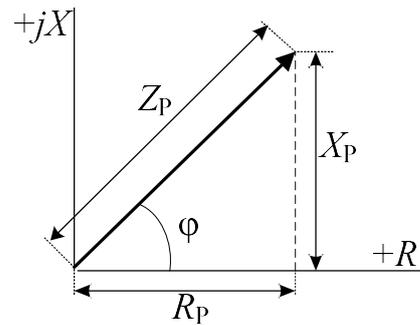


Рисунок 1.1 – Изображение точки в комплексной плоскости

Характеристикой срабатывания в комплексной плоскости ДО называется граница между областями срабатывания и несрабатывания [5].

1.1 Основные требования, предъявляемые к дистанционным измерительным органам

Согласно [6], техническое совершенство устройств, содержащих дистанционные измерительные органы, характеризуется рядом показателей, определяющих способность эффективно выполнять необходимые функции в реальных условиях эксплуатации, к которым в первую очередь необходимо отнести чувствительность, точность, стабильность характеристик срабатывания в условиях изменения входных сигналов и параметров окружающей среды.

В реальных условиях характеристика срабатывания ДО отличается от заданной тем больше, чем меньше уровень подводимых к ДО величин. Поэтому, чем быстрее граничная линия приближается к заданной характеристике при возрастании уровня подводимых величин, тем более чувствительным является ДО. Основным критерием чувствительности в таких режимах является ток 10%-ной точности (ток точной работы), при котором сопротивление срабатывания отличается от сопротивления уставки на 10%.

Не менее важным показателем является и диапазон уставок ступеней защиты по сопротивлению срабатывания, который определяет возможность использования дистанционной защиты (ДЗ) в энергосистеме (ЭС) различной конфигурации на линиях различной протяженности. В современных ДЗ

указанный диапазон обеспечивает возможность изменения уставок в 100-200 раз.

Такой показатель, как время срабатывания ступеней ДЗ, действующих без выдержки времени, зависит в основном от принципов выполнения ДО, уровней величин, подводимых к ДО, и расположения точки, соответствующей сопротивлению на входе ДЗ, внутри зоны действия. Дистанционные органы, выполненные на различных принципах, обычно сравнивают между собой по времени срабатывания при одинаковых подводенных параметрах режима (токах и напряжениях). Время срабатывания аналоговых (электромеханических и электронных) ДО возрастает с приближением входного сопротивления к граничной линии и на границе зоны действия стремится к бесконечности.

К устройствам, в состав которых входят ДО, предъявляются требования, распространяющиеся на все устройства релейной защиты, такие как минимальное потребление мощности по входным цепям тока и напряжения (в современных ДЗ не превышает единицы вольт-ампер), коммутационная способность выходных отключающих устройств (защита должны обеспечить своими выходными контактами действие на катушки отключения выключателей, как в однофазных, так и в трехфазных схемах отключения), электрическая прочность изоляции независимых цепей (тока, напряжения, цепей питания) относительно друг друга и корпуса, определяемая требованиями стандартов к подводимым к этим цепям испытательным переменным напряжением, помехоустойчивость, характеризующая подверженность влиянию внешних помех.

1.2 Характеристики срабатывания дистанционных органов, выполненных на электромеханической и полупроводниковой элементной базе

Существует большое число разновидностей характеристик срабатывания как органов отдельных ступеней защиты, так и их сочетаний. Выбор используемой характеристики осуществляется в зависимости от

области применения, класса напряжения и протяженности линий электропередачи, от диапазона передаваемых мощностей, ответственности контролируемых объектов, возможностей технической реализации, требований по чувствительности к КЗ через переходное сопротивление, необходимости принятия дополнительных мер по отстройке от нагрузочных режимов [7].

Ниже рассмотрены виды характеристик срабатывания, нашедших применение в устройствах релейной защиты и автоматики.

На рисунке 1.2 представлена круговая характеристика с центром в начале координат. Сопротивление срабатывания органов с такой характеристикой срабатывания не зависит от угла φ_p , то есть $Z_{cp} = const$. Поэтому такие ДО называются органами полного сопротивления. Реле, реализующее данный вид характеристики срабатывания, широко используется в защитах сетей среднего напряжения [8].

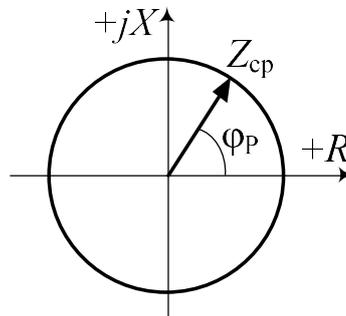


Рисунок 1.2 – Круговая характеристика с центром в начале координат

На рисунке 1.3 представлена круговая характеристика, проходящая через начало координат, с центром, обычно располагаемым на прямой, характеризующей защищаемый участок. Для такого измерительного органа сопротивление срабатывания зависит от угла φ_p , причем наибольшую чувствительность орган имеет при угле максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч}$, который целесообразно иметь равным углу сопротивления линии $\varphi_{л} = \arctg(X_{л} / R_{л})$. Органы с такой характеристикой не чувствительны к повреждениям на смежных элементах сети, располагающихся в третьем

квадранте, и имеют мертвую зону в начале защищаемого участка. Для исключения мертвой зоны у быстродействующих ступеней защит используют специальные меры, например, контур "памяти", подпитка напряжением неповрежденных фаз при несимметричных КЗ, а для резервных ступеней вводят смещение характеристики в третий квадрант [8]. Направленные реле сопротивления с круговой характеристикой обычно используют в защитах электрических сетей 110 кВ и выше.

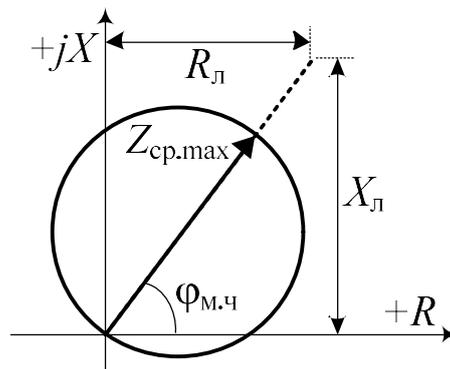


Рисунок 1.3 – Круговая характеристика, проходящая через начало координат

Эллиптические характеристики срабатывания (рис. 1.4) обычно используются для резервных ступеней дистанционных защит, так как обеспечивают большую чувствительность, чем направленные реле сопротивления с круговой характеристикой, и лучшую отстройку от сопротивлений на зажимах реле в нагрузочных режимах Z_H на длинных линиях электропередачи, в которых токи нагрузки соизмеримы с токами короткого замыкания. Для исключения мертвой зоны при близких коротких замыканиях и повышения чувствительности при наличии переходного сопротивления в месте КЗ, так же как и для ДО с характеристикой срабатывания, представленной на рисунке 1.3, вводят смещение характеристики в третий квадрант.

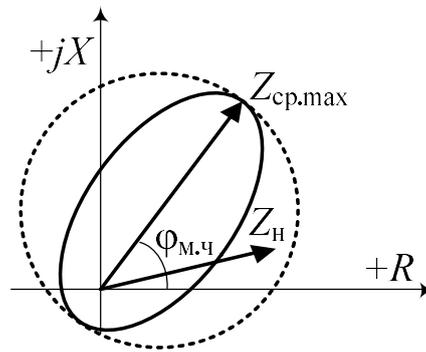


Рисунок 1.4 – Эллиптическая характеристика, смещенная в третий квадрант

Характеристики срабатывания, приведенные на рисунках 1.3 и 1.4, в настоящее время широко используются для защит линий 110–220 кВ в панелях защит типа ПЗ-2/1, ПЗ-2/2, ЭПЗ–1636, в которых круговая характеристика обычно используется для реализации I и II ступеней, а эллиптическая - для III ступени с возможностью регулировки коэффициента эллиптичности (0,5; 0,65; 0,8) [5, 9].

Орган с характеристикой в виде прямой, параллельной оси $+R$, называется органом реактивного сопротивления (рис. 1.5). Первоначально считалось, что применение такого реле для ДО исключает нежелательное влияние переходного сопротивления в месте КЗ на работу защиты. Однако опыт эксплуатации показал, что на линиях с двухсторонним питанием влияние переходного сопротивления может быть негативным из-за различия по фазе токов в местах повреждения и включения защиты. Рассматриваемые органы реактивного сопротивления нельзя использовать без пусковых органов, так как их невозможно отстроить от нагрузочных режимов.

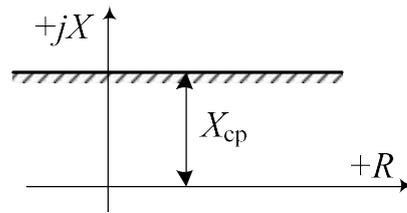


Рисунок 1.5 – Характеристика срабатывания органа реактивного сопротивления

Для ограничения зоны действия в направлении $+R$ с целью предотвращения срабатывания в режиме нагрузки могут быть использованы различные комбинации дуг окружностей и отрезков прямых линий (рис. 1.6) [1].



Рисунок 1.6 – Комбинированная характеристика из дуг окружностей и отрезков прямых

Характеристика, изображенная на рисунке 1.7, проходит через начало координат и составлена из трех дуг, опирающихся на хорды Z_1Z_2 , Z_2Z_3 , Z_3Z_1 . Орган, обладающий такой характеристикой, имеет более высокое быстродействие в зоне, ограниченной треугольником $Z_1 Z_2 Z_3$, и повышенную селективность из-за увеличения времени срабатывания при сопротивлениях замера, располагающихся вблизи границ зоны действия (в областях между сторонами треугольника и окружностью). При этом также улучшается стабильность характеристики при наличии высших гармоник в сети [10]. Такими характеристиками обладают реле сопротивления первой ступени устройства ДЗ в шкафах типа ШДЭ 2801 и ШДЭ 2802.

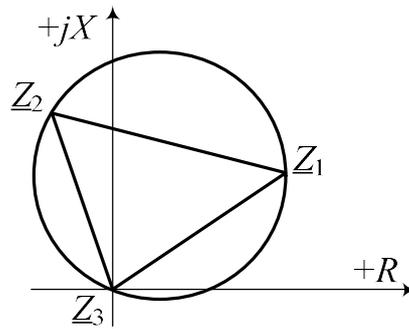


Рисунок 1.7 – Круговая характеристика, составленная из трёх дуг

Четырёхугольная характеристика (рис. 1.8) в большей мере, чем другие характеристики, совпадает с контуром области расположения векторов Z_p при КЗ на защищаемой линии и является в этом случае наиболее рациональной [2]. Верхняя сторона рассматриваемой характеристики направляется под небольшим углом к оси $+R$, поэтому она похожа на характеристику ДО реактивного сопротивления. Данный вид характеристики четко фиксирует границы защищаемых зон первой и второй ступеней дистанционной защиты и отстроен от небольших реактивных нагрузок, обуславливающих значительные реактивные слагающие сопротивления нагрузки для третьей ступени. Правая боковая сторона обеспечивает надежную отстройку от режимов передачи наибольшей мощности по защищаемому объекту, а также частично компенсирует недостатки характеристики ДО реактивного сопротивления. Левая боковая сторона позволяет отстроиться от режимов передачи активной мощности к месту включения защиты. Нижняя сторона для органа первой ступени проходит через начало координат и имеет наклон к активной оси, обеспечивая чувствительность защиты к повреждениям через переходное сопротивление вблизи места установки защиты. Для второй и третьей ступеней эта сторона может быть смещена в третий квадрант для устранения мертвых зон [8]. Такие характеристики используются в реле сопротивления второй ступени устройства ДЗ в шкафах типа ШДЭ 2801 и ШДЭ 2802.

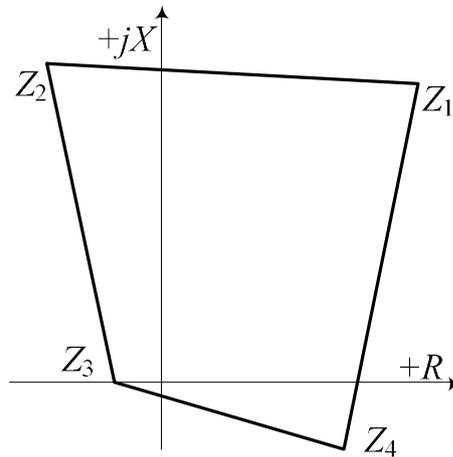


Рисунок 1.8 – Четырехугольная характеристика срабатывания

В некоторых случаях, для повышения чувствительности резервных ступеней дистанционной защиты могут использоваться характеристики в виде двух пересекающихся окружностей (рис. 1.9). Однако при использовании такой характеристики срабатывания требуется обеспечить достаточную чувствительность в местах сопряжения окружностей [8].

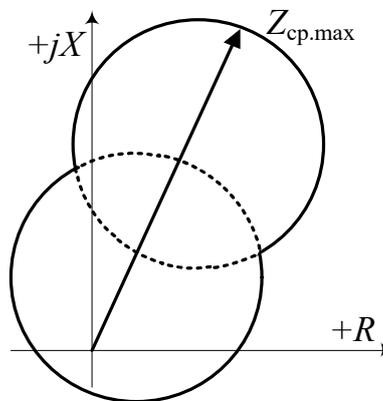


Рисунок 1.9 – Характеристика в виде двух пересекающихся окружностей

1.3 Характеристики срабатывания дистанционных органов, выполненных на микропроцессорной элементной базе

Для обеспечения правильной работы защиты во всех возможных режимах характеристика срабатывания должна выбираться с учетом ряда требований. Должна быть обеспечена достаточная зона действия в направлениях X и R , при этом сохранена надежная отстройка от режима нагрузки. Необходимое быстродействие и устойчивая работа органов в

статических и динамических режимах также являются обязательными требованиями. Защита должна четко срабатывать при повреждениях в начале защищаемого участка и при этом не срабатывать при повреждениях «за спиной». Дополнительно должен быть решен вопрос о целесообразности перекрытия области срабатывания каждой последующей ступенью предыдущих ступеней. Рассмотренные характеристики срабатывания часто не удаётся адаптировать к конкретным условиям. Это обусловлено тем, что электромеханические и микроэлектронные реле сопротивлений позволяют регулировать масштаб и углы характеристик, но в очень ограниченном диапазоне.

По сравнению с электромеханическими и микроэлектронными цифровые реле имеют огромное преимущество, поскольку позволяют формировать характеристики практически любой необходимой формы, адаптированные под конкретные условия сети и обеспечивающие необходимые чувствительность и селективность. При этом появляется возможность регулировать не только масштаб, но и форму характеристики срабатывания ДО в комплексной плоскости сопротивлений.

Ниже рассмотрены характеристики некоторых дистанционных органов, применяемые в современных микропроцессорных устройствах защиты отечественных и зарубежных производителей.

АО «РАДИУС Автоматика»

Устройство микропроцессорной защиты «Сириус-3-ЛВ-02», производства АО «РАДИУС Автоматика» предназначено для защиты воздушных и кабельных линий 110-220 кВ в сетях с глухозаземленной нейтралью. Устройство содержит четырехступенчатую дистанционную защиту от междуфазных КЗ с независимыми выдержками времени и одноступенчатую дистанционную защиты от КЗ на землю с независимой выдержкой времени [11].

На рисунке 1.10 представлен обобщенный вид характеристики срабатывания измерительных органов ступеней дистанционной защиты от

междуфазных КЗ, которая определяется следующими уставками: $X_{\text{ср}}$ - координата по оси $+jX$ пересечения верхней границы характеристики с прямой, характеризующей сопротивление линии; $R_{\text{ср}}$ - координата по оси $+R$ пересечения правой границы характеристики с осью $+R$; $\varphi_{\text{л}}$ - характеристический угол линии (этот же угол определяет наклон правой границы характеристики).

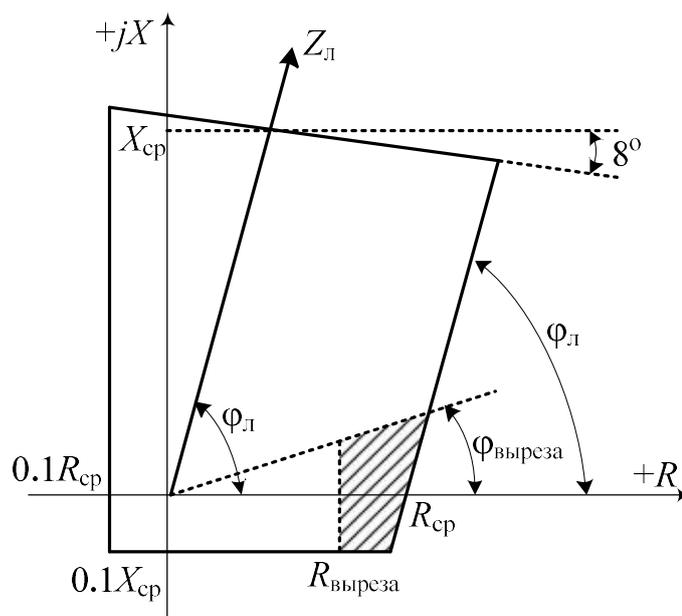


Рисунок 1.10 – Характеристика ДО терминала «Сириус-3-ЛВ-02» для защиты от междуфазных КЗ

У характеристики срабатывания ДО третьей ступени, в отличие от первой и второй ступеней, имеется вырез, обеспечивающий отстройку от нагрузочного режима с уставками $R_{\text{выреза}}$ - координата по оси $+R$ границы выреза для отстройки от нагрузочного режима (если величина данной уставки менее $0,1R_{\text{ср}}$, то она автоматически принимается равной $0,1R_{\text{ср}}$), $\varphi_{\text{выреза}}$ - угол сектора выреза для отстройки от нагрузочного режима.

Измерительные органы ступеней защиты построены по многосистемному принципу, то есть одновременно рассчитываются и контролируются все контуры «фаза-фаза» для дистанционной защиты от междуфазных коротких замыканий и все контуры «фаза-земля» - для защиты

от коротких замыканий на землю. Измерительные органы ступеней имеют гистерезис на возврат, который определяется коэффициентом возврата.

Особенностью данной дистанционной защиты является охват начала координат характеристиками измерительных органов ступеней ДЗ. Это устраняет проблему «мертвой зоны» по напряжению при близких КЗ на линии без использования специальных мер (подпитка от неповрежденных фаз, контур памяти).

ООО НПП«ЭКРА»

Устройства защиты серии ШЭ 2607 011(021) [12], производства ООО НПП «ЭКРА», применяются для защиты линий электропередачи 110–220 кВ. В комплект ступенчатых защит данных устройств обязательно входит дистанционная защита, имеющая 3-5 ступеней от междуфазных КЗ и одну дополнительную ступень от защиты КЗ на землю. На рисунке 1.11 представлены характеристики срабатывания измерительных органов сопротивления первой и резервной (как правило, третьей) ступеней защиты от междуфазных КЗ. Форма характеристик других ступеней подобна рассматриваемым.

Перечень уставок, определяющих форму характеристик срабатывания, следующий: X_N - уставка по оси X , где $N = I, II, \dots, V$ - номер ступени ДЗ; R_N - уставка по оси R ; $\varphi_{1(N)}$ - угол наклона правой боковой части характеристики; φ_2 - угол наклона нижней правой части характеристики; φ_3 - угол наклона левой части характеристики; φ_4 - угол наклона верхней части характеристики первой ступени; $R_{\text{нагр}}$ - уставка по оси R для отстройки от нагрузочного режима; $\varphi_{\text{нагр}}$ - угол выреза нагрузочного режима.

Угол наклона правой боковой части характеристики срабатывания реле сопротивления φ_1 в большинстве случаев может быть принят равным углу линии.

Угол наклона нижней правой части характеристик реле сопротивления φ_2 должен выбираться из условия охвата всех возможных сопротивлений замера при КЗ в начале линии электропередачи.

Наклон верхней правой части характеристики реле сопротивления φ_4 используется только для первых ступеней дистанционной защиты. Он необходим для отстройки от КЗ в начале линии, отходящей от шин, подключенных к концу защищаемой линии, с учётом угла поворота, обусловленного наличием переходного сопротивления в месте КЗ.

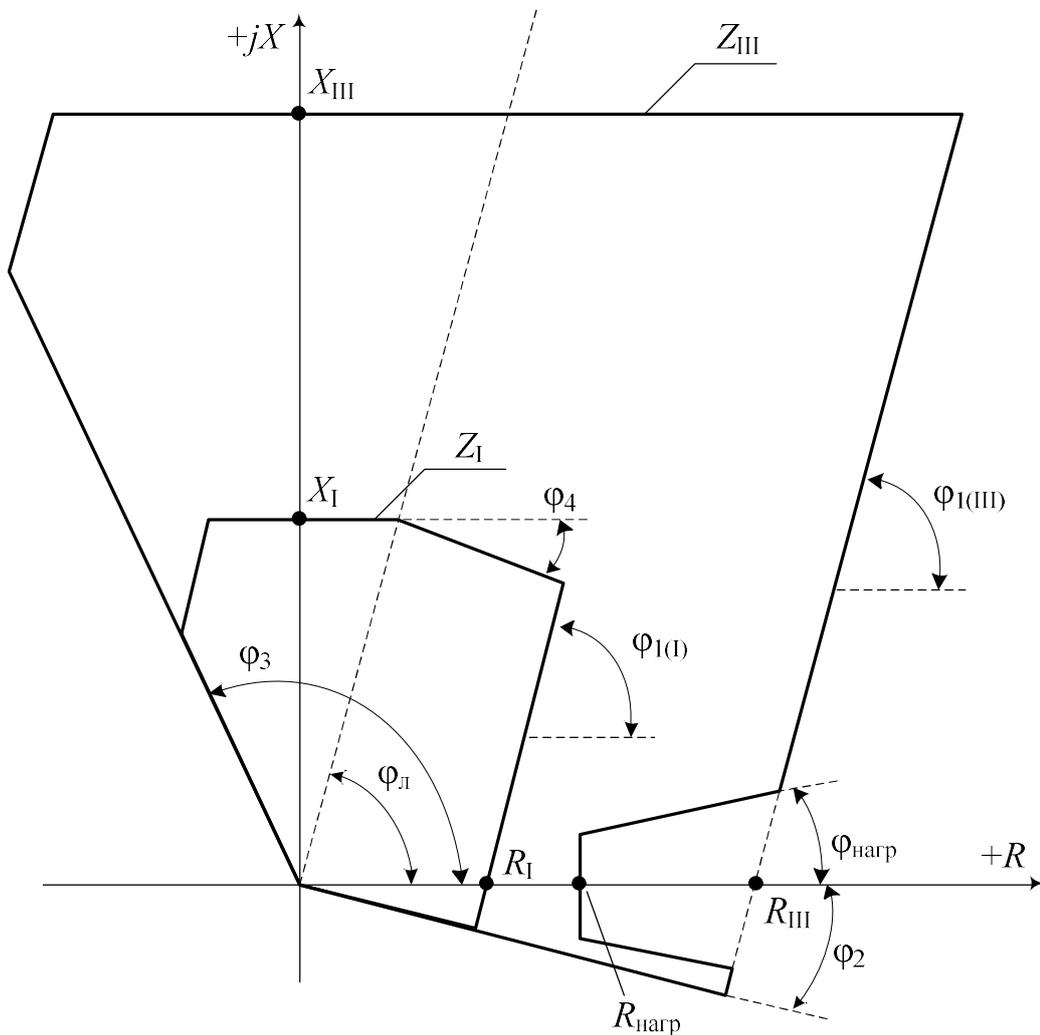


Рисунок 1.11 – Характеристика срабатывания I и III ступеней ДЗ устройства ШЭ 2607 011(021)

На некоторых линиях электропередачи с двухсторонним питанием короткие замыкания могут сопровождаться возникновением синхронных качаний или асинхронных режимов. В таких случаях векторы

электродвижущих сил (ЭДС) систем могут расходиться на угол более 90° и возможно попадание вектора сопротивления замера во второй квадрант комплексной плоскости. Для обеспечения надёжного срабатывания реле сопротивления в этих условиях характеристика срабатывания принимается симметричной относительно отрезка, отображающего на комплексной плоскости сопротивление линии при «металлическом КЗ», и левая боковая сторона характеристики принимается на одинаковом с правой стороной расстоянии от этого отрезка.

Ограничение области срабатывания реле сопротивления во втором квадранте комплексной плоскости путём задания угла наклона левой стороны характеристики срабатывания φ_3 требуется для линий с двусторонним питанием, чтобы обеспечить отстройку от КЗ «за спиной» через переходное сопротивление, при которых ток в месте установки защиты определяется удалённой ЭДС, а напряжение, в значительной мере, ближайшей ЭДС.

Подходы к построению характеристик срабатывания микропроцессорных устройств с функциями дистанционной защиты у зарубежных производителей, таких как Siemens и General Electric [13, 14], и обоснование принятой характеристики в значительной степени аналогичны рассмотренным.

1.4 Область применения дистанционных органов в релейной защите и автоматике энергосистем

Дистанционный принцип получил наибольшее распространение в защитах линий электропередачи. Дистанционные измерительные органы применяются также в ряде других устройств защиты и автоматики, в которых необходим контроль входного сопротивления замера в нормальном и аварийном режимах. К ним следует отнести в первую очередь следующие устройства:

– Отключающие и блокирующие ДО направленных высокочастотных защит, обеспечивающие правильное действие защит при симметричных трехфазных повреждениях в зонах и вне зон действия, при которых органы направления мощности не всегда функционируют правильно и с достаточной надежностью.

– Резервные дистанционные защиты объектов станций и подстанций (шин, генераторов, трансформаторов, сборок собственных нужд), обеспечивающие дальнейшее резервирование и более высокую чувствительность к междуфазным повреждениям, чем токовые и токовые направленные защиты. К ним относятся, например, резервные дистанционные защиты мощных автотрансформаторов, дистанционные защиты от междуфазных коротких замыканий (КЗ) турбогенераторов и защиты вводов рабочего и резервного питания собственных нужд мощных тепловых и атомных электростанций.

– Избирательные органы для выявления поврежденных фаз устройств однофазного автоматического повторного включения. Избиратели, выполненные на дистанционном принципе, представляют собой ДО, включенные на фазные напряжения и компенсированные токами нулевой последовательности фазные токи. Для отстройки от нагрузочных режимов и обеспечения необходимой чувствительности при КЗ через переходное сопротивление характеристики срабатывания ДО в устройствах ОАПВ выполняются комбинированными.

– Выявительные органы устройств автоматической ликвидации асинхронного режима (АЛАР) в энергосистемах. Устройства автоматики энергосистем в составе органов, выявляющих наличие асинхронного хода на линии электропередачи, содержат органы сопротивления и реле направления мощности. Их функцией является выявление асинхронного хода путем контроля прохождения вектора входного сопротивления через определенные области комплексной плоскости сопротивлений. Такой подход использован, например, в серийных панелях, выполненных на полупроводниковой

элементной базе, применением комплекта реле сопротивления типа КРС-2 и реле мощности РБМ-275. [15].

Помимо перечисленных устройств, дистанционный орган предлагается применять в автоматике ограничения повышения частоты (АОПЧ) [16]. Рассмотрим этот случай применения подробнее.

АОПЧ предназначена для предотвращения недопустимого повышения частоты в энергосистеме до уровня, при котором возможно срабатывание автоматов безопасности турбин ТЭС и АЭС, а также для предотвращения полного останова генерирующего оборудования технологическими защитами тепловых (ТЭС) и/или атомных (АЭС) электростанций при выходе частоты за пределы регулировочного диапазона.

Устройства АОПЧ в качестве основного контролируемого параметра используют частоту напряжения в энергосистеме. Ступени (очереди) АОПЧ работают при фиксации повышения частоты в контролируемом узле энергосистемы выше заданной уставки с заданной выдержкой времени. Выдержки времени предусматриваются для исключения срабатывания устройств АОПЧ при коротких замыканиях в сети, в асинхронных режимах и в режимах синхронных качаний, а также для согласования ступеней между собой. Очереди АОПЧ, имеющие ступенчатые выдержки времени предназначены для ограничения длительного повышения частоты.

Для обеспечения эффективности действия АОПЧ при возникновении забросов частоты из-за больших избытков активной мощности следует использовать ступени, реагирующие на скорость повышения частоты. Такую разгрузку следует осуществлять с помощью быстродействующих ступеней, реагирующих на скорость повышения частоты, что позволят отключать генерацию значительно раньше, чем это могут обеспечить ступени АОПЧ по отклонению частоты.

Для исключения ложного действия при коротких замыканиях устройства АОПЧ, использующего ступени, контролирующей скорость изменения частоты, необходимо использовать пусковой орган (ПО),

разрешающий работу автоматики при превышении уставки по частоте в течение заданной уставки по времени. Однако выдержка времени ПО имеет следующие отрицательные стороны для АОПЧ:

- она сравнима с уставками по времени ступеней АОПЧ по повышению частоты;
- задерживает срабатывание ступеней АОПЧ по скорости повышения частоты;
- увеличивает общее время срабатывания автоматики.

Для того чтобы исключить задержки в действии пусковых органов для АОПЧ и при этом обеспечить максимальное быстродействие ступеней, работающих по скорости повышения частоты, необходимо выполнять дополнительный контроль электрических величин объекта, чтобы распознать режим короткого замыкания. Для этого предлагается ввести в АОПЧ дистанционный орган, блокирующий работу ступеней при коротком замыкании в прилегающей сети [16].

Реализуемость такого подхода может быть показана на примере устройства АОПЧ производства АО «ИАЭС», содержащего ступени по скорости повышения частоты, установленного на Богучанской ГЭС. Схема прилегающей к Богучанской ГЭС сети представлена на рисунке 1.12.

Устройства АОПЧ на Богучанской ГЭС выполнены отдельно для сторон 500 кВ и 220 кВ, поскольку существует возможность разделения станции на несинхронно работающие части. Рассмотрим поведение дистанционного органа при подключении к нему токов и напряжений стороны высшего напряжения одного из блоков генератор-трансформатор стороны 500 кВ.

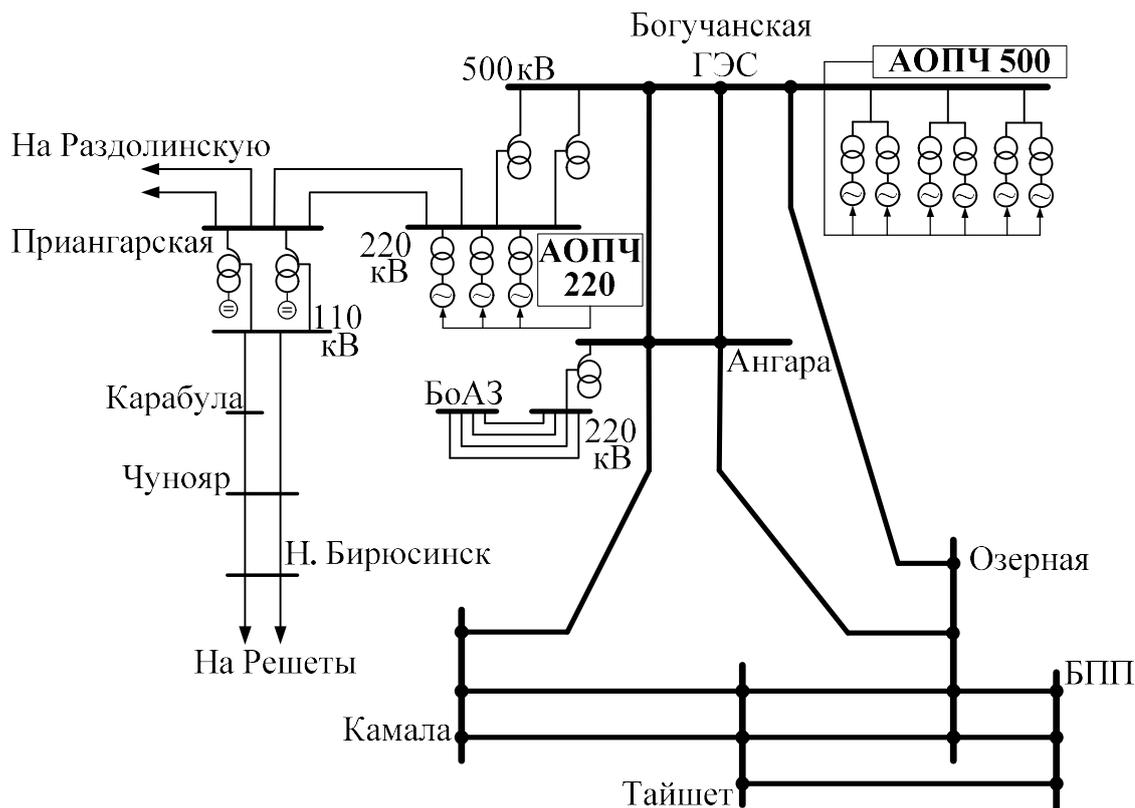


Рисунок 1.12 – Богучанская ГЭС и схема прилегающей сети

На рисунке 1.13 представлены векторы сопротивлений замера дистанционного органа АОПЧ в различных схемно-режимных условиях станции и прилегающей сети при металлических междуфазных КЗ в конце элементов, находящихся в пределах первого пояса (под элементами первого пояса понимаются элементы, подключенные непосредственно к шинам контролируемого объекта, от которых берётся информация о напряжениях для рассматриваемых дистанционных органов). Вокруг концов векторов сопротивлений показаны окружности, радиусы которых рассчитываются исходя из требуемого коэффициента чувствительности к рассматриваемым повреждениям. Тогда характеристика срабатывания, огибающая необходимые векторы замера сопротивлений с учетом связанных с ними окружностями, обеспечит надежное срабатывание дистанционного органа с требуемой чувствительностью к КЗ в области действия реле.

Следует отметить, что обе характеристики срабатывания (А и Б, рис. 1.13), выбранные исходя из условия обеспечения чувствительности, позволяют надежно отстроиться от нагрузочного режима. Поэтому

приоритет при выборе характеристики дистанционного органа необходимо отдавать той характеристике, реализация которой требует меньших ресурсов с точки зрения работы микропроцессорной техники. В конкретном рассматриваемом случае (для которого на рисунке представлены числовые значения) предпочтительней использовать эллиптическую характеристику срабатывания.

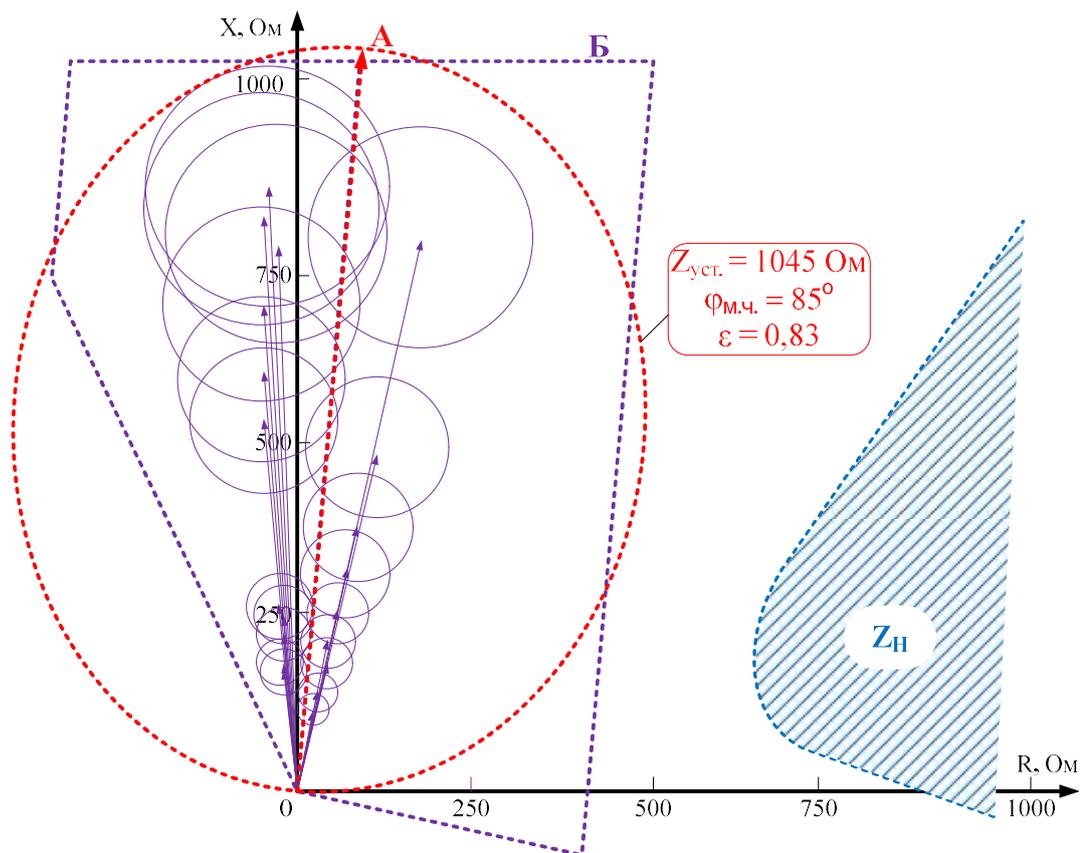


Рисунок 1.13 – Эллиптическая и полигональная характеристика срабатывания измерительного органа реле сопротивления, входящего в состав быстродействующей АОПЧ

Z_H – область сопротивлений замера, соответствующих нагрузке, в доаварийном и послеаварийном режимах; A – эллиптическая характеристика срабатывания реле сопротивления, выбранная исходя из обеспечения чувствительности к КЗ в конце элементов, находящихся в пределах первого пояса; B – полигональная характеристика измерительного органа реле сопротивления, выбранная аналогично характеристике A ; $Z_{уст.}$ – сопротивление уставки для характеристики A ; $\varphi_{м.ч.}$ – угол максимальной чувствительности для характеристики A ; ε – коэффициент эллиптичности для характеристики A .

Как видно из рисунка 1.13, можно четко отличить область коротких замыканий, при попадании в которую необходимо вводить блокировку для ступеней АОПЧ.

Опасность срабатывания ступеней АОПЧ по скорости изменения частоты при коротких замыканиях выявлена также расчетным путём. На рисунке 1.14 показаны графики изменения частоты для двух характерных режимов, связанных с коротким замыканием, по которым явно прослеживается появление большой скорости повышения частоты (до 1 Гц/с).

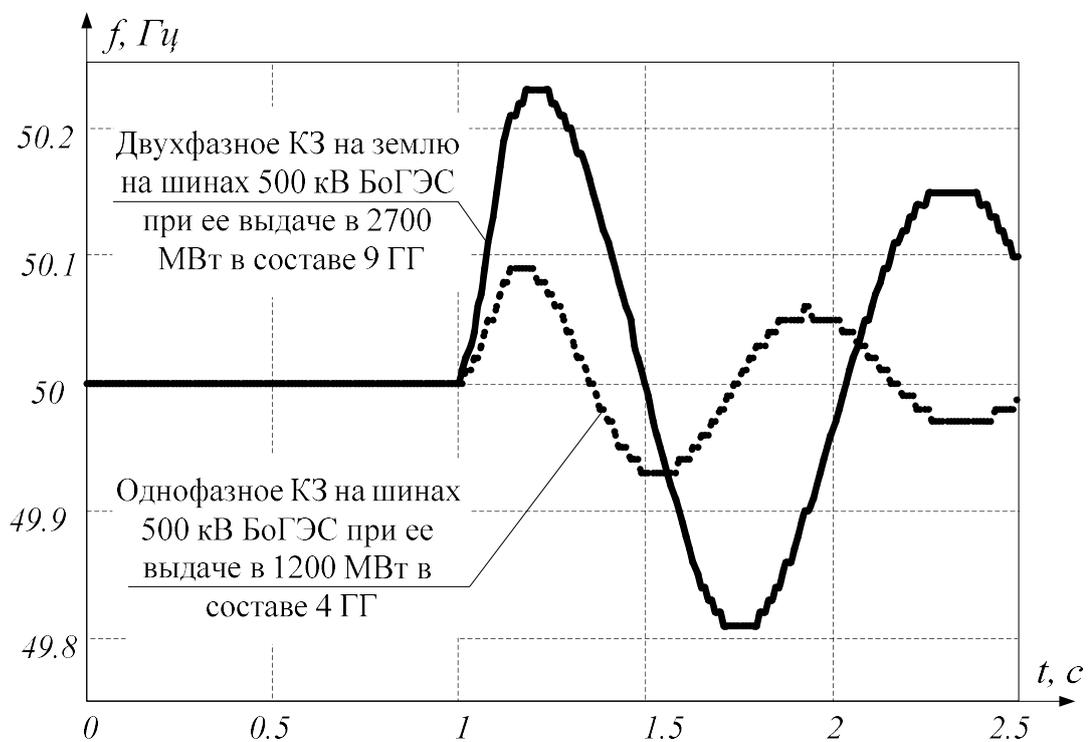


Рисунок 1.14 – Изменение частоты на шинах 500 кВ Богучанской ГЭС при коротких замыканиях

Выводы по главе 1

1. Обзор литературы показал, что по мере развития технологий усложнялись и устройства, использующие дистанционные органы. В частности, характеристика срабатывания адаптировалась под особенности защищаемых первичных элементов электрической сети. Однако такое усложнение ставит вопрос об обеспечении надежности их функционирования

в режимах экстремальных переходных процессов при насыщении трансформаторов тока.

2. Усложнение характеристик дистанционных органов приводит к тому, что возрастают требования к их проверке. В частности, простое снятие характеристики срабатывания для проверки правильности задания уставок становится недостаточным, так как необходимо проверить и другие свойства дистанционных органов, например их несрабатывание в асинхронном режиме.

3. Обзор принципов действия АОПЧ показал, что для обеспечения эффективности действия АОПЧ при возникновении забросов частоты из-за больших избытков активной мощности следует использовать ступени, реагирующие на скорость повышения частоты. Однако из-за опасности срабатывания ступеней АОПЧ по скорости изменения частоты при коротких замыканиях от таких режимов приходится отстраиваться как по частоте, так и по времени. Автором предлагается дополнять устройство АОПЧ (при наличии в нем ступеней по скорости изменения частоты) дистанционным блокирующим органом, который может четко отличить область коротких замыканий, при попадании в которую необходимо вводить блокировку для ступеней АОПЧ. Использование дистанционного блокирующего органа приводит к повышению быстродействия АОПЧ в аварийных режимах, связанных с недопустимым повышением частоты, при этом существенно сокращается ущерб, вызванный отключением оборудования на электрических станциях.

ГЛАВА 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРАНСФОРМАТОРАХ ТОКА НА ПОВЕДЕНИЕ ДИСТАНЦИОННЫХ ОРГАНОВ

2.1 Постановка задачи

Развитие электроэнергетических систем приводит к усложнению их конфигурации и повышению уровня токов коротких замыканий (КЗ). По этой причине токи КЗ на определённом этапе развития системы могут превосходить значения, соответствующие предельной кратности для ранее установленных трансформаторов тока (ТТ). В результате этого при экстремальных режимах КЗ могут возникать значительные погрешности ТТ, искажающие вторичную информацию и, как следствие, приводящие к нарушению устойчивости функционирования устройств релейной защиты (УРЗ) [17–19]. Это связано с тем, что при КЗ индукции в сердечниках ТТ возрастают и могут достигать значений, соответствующих насыщению магнитопроводов. При насыщении магнитопроводов ТТ вторичные токи искажаются, что приводит к уменьшению их средних и действующих значений и увеличению угловых погрешностей. Это может приводить к излишним срабатываниям или отказам в срабатывании УРЗ [7], так как для всех серийно выпускаемых УРЗ гарантируются уровни надёжности, селективности и быстродействия только при синусоидальных входных сигналах промышленной частоты. При отличии входных сигналов от синусоидальных устойчивость функционирования защит снижается [20].

Нормативно-техническая документация предъявляет жёсткие требования к точности работы ТТ, предназначенных для питания токовых цепей УРЗ, реагирующих на короткие замыкания, а также к динамическим характеристикам функционирования систем релейной защиты. Отключение любого поврежденного элемента должно выполняться с минимальным возможным временем для сохранения устойчивой бесперебойной работы неповрежденной части системы, а также ограничения области и степени повреждения [21, 22].

Одним из методов обеспечения правильной работы защит, выполненных на микропроцессорной базе, в переходных режимах, сопровождающихся искажением вторичных сигналов тока, обусловленных насыщением магнитопроводов ТТ, является выбор характеристик и параметров срабатывания защит на основании анализа поведения измерительных органов в условиях интенсивных переходных процессов. Такой подход позволяет ещё на стадии проектирования выявлять режимы, наиболее сложные с точки зрения обеспечения устойчивой и надёжной работы релейной защиты, и принимать соответствующие меры для достижения её эффективного функционирования.

Для решения этой задачи необходимо выполнить исследование поведения измерительных органов УРЗ в переходных режимах с использованием математических моделей. В открытой печати, в большинстве случаев, затрагиваются вопросы поведения дифференциальных защит [23–25] в режиме экстремальных переходных процессов, так как последние наиболее чувствительны к искажению вторичного сигнала ТТ. Но вопросы поведения измерительных органов в переходных процессах актуальны и для ступенчатых защит нового поколения, используемых на системообразующих и распределительных линиях высокого и сверхвысокого напряжения, которые благодаря цифровой обработке сигналов и интеллектуальным алгоритмам работы могут реализовывать сложные характеристики, позволяя повышать точность и селективность действия защиты при условии правильного задания параметров срабатывания.

Проведение полноценного натурного эксперимента, позволяющего оценить поведение ступенчатых дистанционных защит на реальных объектах электроэнергетики, не представляется возможным из-за ограничений, накладываемых эксплуатирующими субъектами. Эти ограничения обусловлены следующими причинами: повышением опасности повреждения оборудования, участвующего в проведении экспериментов, снижением схемной надёжности участка сети, прилегающей к используемому при

эксперименте оборудованию, возможному недоотпуску электроэнергии потребителям, возможности неблагоприятного развития событий, спровоцированного проведением экспериментов. По этим причинам существенно ограничиваются уровни токов КЗ, что резко снижает ценность и достоверность результатов проведенных экспериментов. Но даже, если не учитывать перечисленные ограничения, проведение натурного эксперимента имеет низкую эффективность, что связано с вероятностным характером возникновения максимальных значений апериодических слагающих токов КЗ, а также начальных состояний сердечников используемых ТТ. Следствием этого является получение недостоверных результатов испытаний, и непрогнозируемое поведение исследуемых устройств в реальных аварийных ситуациях.

Именно поэтому для решения поставленной задачи наиболее подходящим является проведение исследований методами математического моделирования. Здесь под математическим моделированием подразумевается процесс замещения исследуемого объекта его математической моделью и постановки экспериментов на этой модели для получения необходимой для дальнейших исследований информации об объекте и процессах, протекающих в нём в экстремальных аварийных ситуациях [26].

Создавая математическую модель объекта исследования, в первую очередь нужно чётко определить цель, которую необходимо достичь при реализации и использовании модели [27]. В данной работе при создании математических моделей основной целью являются выбор характеристик и параметров срабатывания дистанционных органов исходя из их поведения в условиях интенсивных переходных процессов, как в первичной сети, так и во вторичных цепях релейной защиты [28–30].

Определим состав компонентов системы моделирования, которые необходимо реализовать для достижения поставленной цели. Для выполнения исследования необходимо создать модель объекта защиты, позволяющую формировать параметры режима первичной сети в различных

условиях, модели ТТ, вторичные обмотки которых соединены по схеме «полная звезда с нулевым проводом», и модели измерительных органов УРЗ. Другие схемы соединения ТТ не рассматриваются, поскольку для современных резервных защит линий используется только эта схема. На рисунке 2.1 представлена обобщённая структура взаимосвязи разрабатываемых математических моделей, для которых результатом моделирования первичной сети являются массивы мгновенных значений первичных токов $i_{1\text{контр}}$ и напряжений $u_{1\text{контр}}$ на контролируемом конце защищаемой линии, $i_{1\text{подп}}$, $u_{1\text{подп}}$ токи подпитки с противоположного конца защищаемой линии (параметры подпитки точки КЗ). В результате работы математических моделей измерительных дистанционных органов (ДО1 и ДО2) при получении информации о вторичных значениях токов и напряжений от моделей групп ТТ (ГТТ 1 и ГТТ 2) и трансформаторов напряжения (ТН1 и ТН2) формируются осциллограммы состояния контактов выходных реле моделируемых защит (Out_1 и Out_2).

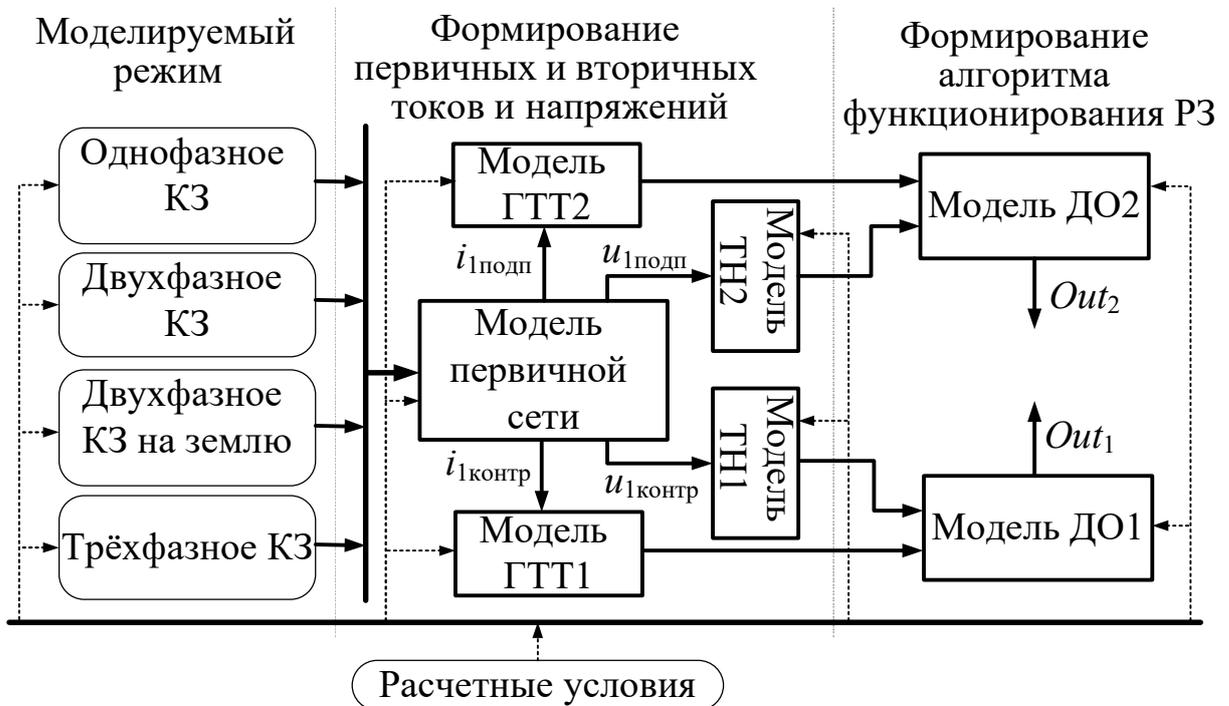


Рисунок 2.1 – Обобщённая структура моделируемой системы

Для реализации разрабатываемой системы моделирования работы УРЗ, включающей в себя модели измерительных дистанционных органов (ДО),

использован пакет прикладных программ решения технических задач MATLAB [31, 32].

2.2 Математическая модель первичной сети

При оценке поведения измерительных ДО в условиях интенсивных электромагнитных переходных процессов (ЭМП) используется математическая модель участка сети, приведенная на рисунке 2.2 [33]. Её математическое описание позволяет воспроизводить те особенности аварийных процессов, которые являются наиболее существенными с точки зрения задачи исследования. Наиболее существенным для оценки динамических свойств УРЗ является искажение вторичного тока ТТ вследствие насыщения его магнитопровода. При этом, чем больше величина тока, протекающего по первичной обмотке ТТ, чем больше величина его апериодической составляющей, тем значительнее искажение формы вторичного тока ТТ. Поэтому при создании математической модели первичных цепей электрической сети допустимо использование упрощенных выражений для расчёта первичных токов и напряжений.



Рисунок 2.2 – Схема рассматриваемой двухцепной линии, связывающей две системы, с указанием мест установки защит

КСЗ – комплект ступенчатых защит; КЗ – точка короткого замыкания;

$R_{п}$ – переходное сопротивление в месте КЗ.

При создании модели первичной сети, приняты следующие допущения [34]:

1. Насыщение магнитных цепей первичного оборудования отсутствует.
2. Токи намагничивания силовых трансформаторов и автотрансформаторов пренебрежимо малы.
3. Сохраняется симметрия трёхфазной системы ЭДС генерирующих источников.
4. Поскольку разрабатываемые математические модели предназначены только для исследования начальной стадии КЗ, то частоту в электроэнергетической системе в течение всего рассматриваемого процесса можно принимать неизменной и равной значению, задаваемому в начале процесса моделирования (50 Гц).

Для заданной модели электрической сети выполняется расчёт параметров при поперечной несимметрии, обусловленной внезапным КЗ. Внезапное короткое замыкание на защищаемой линии, во-первых, приводит к резкому увеличению тока в сети из-за резкого снижения полного сопротивления электрической цепи. Во-вторых, КЗ характеризуется двумя составляющими в фазах, в которых произошло повреждение: периодической (вынужденной) составляющей, вызванной ЭДС источников питания на короткозамкнутом участке электрической сети, и апериодической (свободной) составляющей, обусловленной в соответствии с первым законом коммутации невозможностью скачкообразного изменения тока от доаварийного значения до величины тока КЗ из-за наличия индуктивности в короткозамкнутой цепи [35]. Учитывая это, ток КЗ в общем виде можно представить следующим выражением:

$$i(t) = I_{nm} \cdot \sin(\omega t + \alpha) + I_{a(0)} \cdot e^{-t/T_a}, \quad (2.1)$$

где I_{nm} – амплитуда периодической (вынужденной) слагающей тока КЗ;
 α – угол, определяющий значение тока в фазе A в начальный момент времени, или так называемая фаза включения;
 $I_{a(0)}$ – начальное значение апериодической слагающей тока КЗ;
 T_a – постоянная времени апериодической слагающей тока КЗ.

Наиболее важным этапом математического моделирования участка сети (рис. 2.2) является расчёт комплексных параметров режима (амплитуды и фазы напряжения в месте установки защиты, периодической составляющей тока КЗ, протекающего через защиту) в заданном аварийном режиме. Наиболее универсальным для реализации расчёта этих параметров является метод фазных координат. При использовании этого метода каждый пассивный элемент энергосистемы в математической модели представляется матрицей собственных фазных и взаимных междуфазных сопротивлений [36, 37]. Однако этот метод наиболее выгодно использовать при необходимости учёта развития моделируемой электрической сети или больших объёмах вычислений. Поскольку для рассматриваемой сети (рис. 2.2), в которой для анализа работы ДО нет необходимости в учёте развития сети или одновременного рассмотрения нескольких видов несимметрии, наиболее целесообразно использовать метод симметричных составляющих [34, 38], так как при его применении используется уменьшенный объём информации для формирования схемы замещения [39].

Использование метода симметричных составляющих подразумевает представление расчётного участка сети (рис. 2.2) в виде схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей. Далее каждая из этих схем эквивалентруется относительно точки КЗ. Используя результаты эквивалентирования, определяются суммарные токи КЗ и напряжения (их симметричные составляющие) в месте повреждения. Далее путем «разворачивания» схем определяются симметричные составляющие токов и напряжений в местах установки защит на контролируемом объекте.

Рассмотрим основные этапы расчёта симметричных составляющих токов и напряжений прямой последовательности для схемы замещения прямой последовательности, представленной на рисунке 2.3.

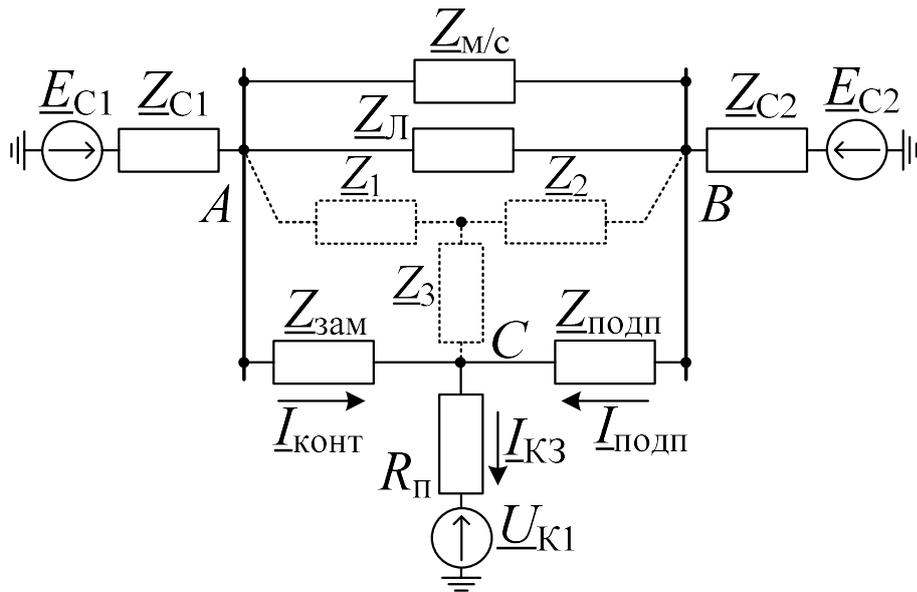


Рисунок 2.3 – Схема замещения прямой последовательности контролируемого участка сети

В первую очередь, определяются параметры схемы замещения, не зависящие от места КЗ на линии: комплексные значения ЭДС \underline{E}_{C1} и \underline{E}_{C2} и собственных сопротивлений \underline{Z}_{C1} и \underline{Z}_{C2} эквивалентных энергосистем С1 и С2, а также комплексное значение сопротивления межсистемной связи $\underline{Z}_{M/C}$. Следует отметить, что перечисленные параметры определяются путём эквивалентирования части энергосистемы, содержащей исследуемую линию, относительно этой линии. Такие расчёты выполняются при наличии параметров схемы замещения элементов всего энергорайона на основе специализированных программ, например, АРМ СРЗА производства ПК «БРИЗ» или ПВК АРУ СРЗА производства АО «НТЦ ЕЭС», и, как правило, специализированными эксплуатирующими организациями, отвечающими за соответствующую часть сети.

Сопротивление линии \underline{Z}_L , включенной параллельно контролируемой, также не зависит от места КЗ. В то же время сопротивление от начала линии до точки КЗ $\underline{Z}_{зам}$ и от точки КЗ до конца повреждённой линии $\underline{Z}_{подп}$ зависит от места повреждения:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{зам}} &= l_{\text{КЗ}} / l_{\text{Л}} \cdot \underline{Z}_{\text{Л}}; \\ \underline{Z}_{\text{подп}} &= (1 - l_{\text{КЗ}} / l_{\text{Л}}) \cdot \underline{Z}_{\text{Л}}, \end{aligned}$$

где $l_{\text{КЗ}}$ и $l_{\text{Л}}$ – длина участка от места установки защиты до точки КЗ и полная длина защищаемой линии, соответственно.

Для дальнейшего эквивалентирования схемы замещения необходимо «треугольник» сопротивлений между узлами A , B и C , преобразовать в «звезду» сопротивлений \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 и \underline{Z}_3 :

$$\begin{bmatrix} \underline{Z}_1 \\ \underline{Z}_2 \\ \underline{Z}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\frac{\underline{Z}_{\text{м/с}} \cdot \underline{Z}_{\text{Л}}}{\underline{Z}_{\text{м/с}} + \underline{Z}_{\text{Л}}} + \underline{Z}_{\text{зам}} + \underline{Z}_{\text{подп}}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\underline{Z}_{\text{зам}} \cdot \underline{Z}_{\text{м/с}} \cdot \underline{Z}_{\text{Л}}}{\underline{Z}_{\text{м/с}} + \underline{Z}_{\text{Л}}} \\ \underline{Z}_{\text{подп}} \cdot \underline{Z}_{\text{м/с}} \cdot \underline{Z}_{\text{Л}} \\ \frac{\underline{Z}_{\text{м/с}} \cdot \underline{Z}_{\text{Л}}}{\underline{Z}_{\text{зам}} \cdot \underline{Z}_{\text{подп}}} \end{bmatrix}.$$

Результирующее эквивалентное сопротивление прямой последовательности без учёта активного сопротивления дуги, а также эквивалентную ЭДС можно определить, используя выражения:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{эkv(1)}} &= \frac{[\underline{Z}_{\text{C1}} + \underline{Z}_1] \cdot [\underline{Z}_{\text{C2}} + \underline{Z}_2]}{\underline{Z}_{\text{C1}} + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{\text{C2}} + \underline{Z}_2} + \underline{Z}_3; \\ \underline{E}_{\text{эkv(1)}} &= \frac{\underline{E}_{\text{C1}} \cdot [\underline{Z}_{\text{C1}} + \underline{Z}_1] + \underline{E}_{\text{C2}} \cdot [\underline{Z}_{\text{C2}} + \underline{Z}_2]}{\underline{Z}_{\text{C1}} + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{\text{C2}} + \underline{Z}_2}. \end{aligned}$$

Аналогичным образом определяется сопротивление обратной последовательности, а также сопротивление нулевой последовательности при отсутствии взаимоиндукции между параллельными линиями.

Следует отметить, что на параллельных линиях электропередачи, расположенных на малом расстоянии друг от друга (закреплены на одних и тех же опорах, либо имеются протяженные участки, располагающиеся в одном коридоре), при КЗ, сопровождающихся появлением токов нулевой последовательности, необходимо учитывать электромагнитную связь между

ними [40]. Для моделируемого участка электрической сети упрощенная схема замещения параллельных линий с учётом сопротивления взаимной индукции между ними представлена на рисунке 2.4.

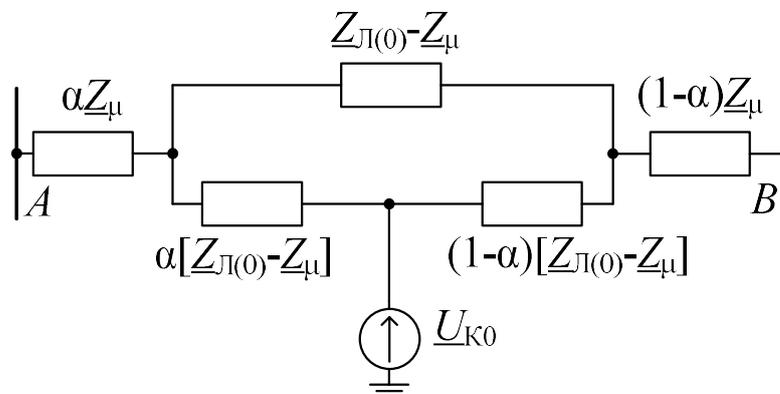


Рисунок 2.4 – Схема замещения нулевой последовательности параллельных линий при наличии взаимной индукции

$Z_{Л(0)}$ – сопротивление линии нулевой последовательности, Ом;

Z_{μ} – сопротивление взаимной индукции параллельных линий, Ом;

$\alpha = l_{КЗ} / l_{Л}$ – относительная длина от начала линии до точки КЗ.

Активное сопротивление дуги в месте повреждения и сопротивление заземления учитываются в расчёте симметричных составляющих токов и напряжений, исходя из вида поперечной несимметрии на основе [34].

Постоянная времени апериодической слагающей первичного тока, протекающего через защиту, необходимая для расчёта его мгновенных значений согласно (2.1), в общем виде описывается выражением:

$$T_a = \frac{Im(\underline{Z}_{\text{ЭКВ}})}{\omega \cdot Re(\underline{Z}_{\text{ЭКВ}})},$$

где $\underline{Z}_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентное сопротивление прямой последовательности, полученное при «сворачивании» схемы относительно участка с током $I_{\text{конт}}$, либо $I_{\text{подп}}$ (рис. 2.3).

Для эквивалентирования схемы замещения относительно рассматриваемого участка необходимо переходное сопротивление в точке КЗ

представить в виде двух комплексных сопротивлений, по одному из которых (\underline{Z}') протекает ток $\underline{I}_{\text{конт}}$, а по другому (\underline{Z}'') – $\underline{I}_{\text{подп}}$. Значения этих сопротивлений определяется следующим образом:

$$\underline{Z}' = R_{\Pi} \frac{\underline{I}_{\text{зам}}}{\underline{I}_{\text{КЗ}}},$$

$$\underline{Z}'' = R_{\Pi} \frac{\underline{I}_{\text{КЗ}} - \underline{I}_{\text{зам}}}{\underline{I}_{\text{КЗ}}}.$$

Рассчитав симметричные составляющие тока и напряжения в начале защищаемой линии (в месте установки защиты) и на противоположном её конце, необходимо определить фазные значения этих параметров (в векторной форме) из выражения [38]:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} & 1 \\ e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_0 \end{bmatrix}.$$

После определения векторных значений токов и напряжений установившегося процесса в заданных местах формируются массивы их мгновенных значений на рассматриваемом интервале времени. После их формирования данные могут быть использованы в качестве входных сигналов для моделей трансформаторов тока и напряжения.

Модель ТН, представленная на рисунке 2.1, ориентирована на моделирование переходных процессов в режимах КЗ влияние которых на работу ДО незначительно. Поэтому при формировании вторичных фазных напряжений, подводимых к измерительным органам дистанционной защиты, достаточно выполнить масштабирование массивов первичных сигналов на заданный в начале моделирования коэффициент трансформации.

2.3 Моделирование трансформаторов тока

Выбор (или разработка) модели трансформаторов тока является одним из важных этапов исследования, так как искажение ими вторичных сигналов может приводить к непредсказуемому поведению ДО. Наиболее сложным при моделировании первичного преобразователя тока является математическое описание процессов в его магнитной цепи, которому посвящено большое число публикаций, например, [41–46]. Более того, в ряде работ [47–49] математические модели ТТ разрабатывались в рамках создания программных комплексов моделирования электромагнитных переходных процессов в электроэнергетических системах. Необходимо подчеркнуть, что ТТ, используемые в схемах основных и резервных защит линий 110 кВ и выше, устанавливаются в каждой фазе, а их вторичные обмотки соединяются по схеме «звезда». Поэтому при моделировании ТТ необходимо учитывать возможность влияния первичных преобразователей тока, установленных в одних фазах, на поведение аналогичных устройств в других фазах при их работе в группах из-за наличия общей нагрузки, которой является нулевой провод токовых цепей. Более того, при выборе (разработке) модели группы ТТ «звезда» желательно задействовать такое минимальное количество информации о ТТ, которое является достаточным для моделирования основных процессов в нём до, в момент и после насыщения. Таким требованиям в полной мере удовлетворяет модель группы ТТ «звезда», разработанная на кафедре электрических станций НГТУ [50], при составлении которой приняты следующие допущения:

- ТТ представляются Г-образными схемами замещения;
- ветвь намагничивания представляется усреднённой нелинейной характеристикой намагничивания сердечника, построенной по экспериментальным значениям;
- не учитывается влияние частных гистерезисных циклов и активных потерь на перемагничивание;

– на начальном участке характеристики намагничивания, до индукции 1.4 Тл, значение намагничивающего тока принимается равным нулю.

С учетом принятых допущений процессы в рассматриваемой группе ТТ описываются следующей системой уравнений [50]:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_j}{dt} = (L_{Tj} + L_{Hj}) \frac{di_{2j}}{dt} + (R_{Tj} + R_{Hj}) \cdot i_{2j} + L_{0i} \sum_j \frac{di_{2j}}{dt} + R_{0i} \sum_j i_{2j}; \\ i_{1j} = i_{\mu j} + i_{2j}; \\ L_{\mu j} = \frac{d\Psi_j}{di_{\mu j}}. \end{cases} \quad (2.2)$$

где i_{1j} , $i_{\mu j}$, i_{2j} – приведенные первичный, намагничивающий и вторичный токи ТТ, соответственно;

R_{Tj} , L_{Tj} – активное сопротивление и индуктивность рассеяния вторичной обмотки ТТ;

$L_{\mu j}$ – индуктивность ветви намагничивания ТТ;

R_{Hj} , L_{Hj} – активное сопротивление и индуктивность рассеяния нагрузки, подключенной к ТТ;

R_0 , L_0 – активное сопротивление и индуктивность рассеяния в нулевом проводе группы ТТ;

$j=A, B, C$.

Системе уравнений (2.2) соответствует схема замещения, представленная на рисунке 2.5 [50].

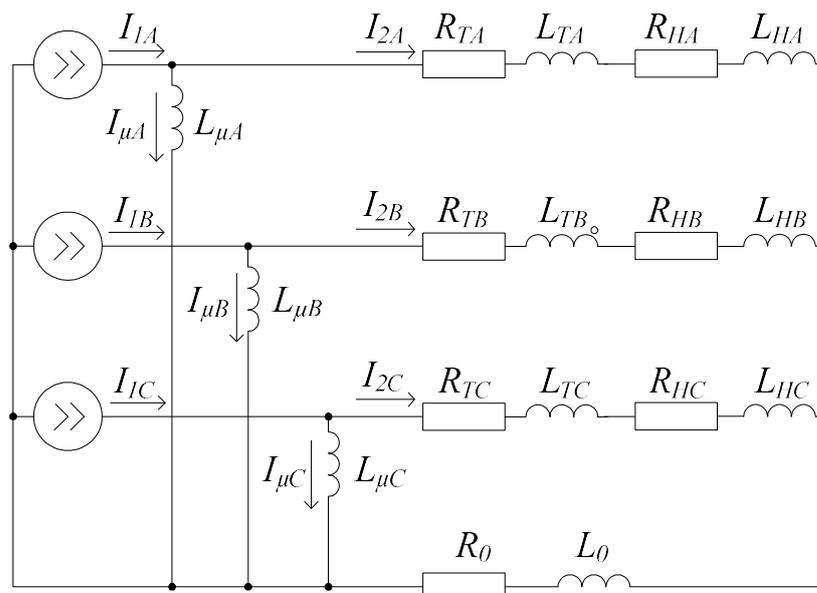


Рисунок 2.5 – Схема замещения группы трансформаторов тока «звезда»

Система уравнений (2.2) представляется в явной форме Коши, которая должна использоваться при численном решении системы дифференциальных уравнений средствами выбранной среды моделирования (MATLAB). Однако результатом этого решения являются не вторичные токи ТТ, а приведённые к числу витков вторичной обмотки токи намагничивания. После этого для определения входных токовых сигналов измерительного дистанционного органа достаточно определить разность приведённого ко вторичной цепи тока, полученного при моделировании первичной сети, и соответствующего тока намагничивания, вычисленного при моделировании ТТ.

2.4 Преобразование входных сигналов дистанционного органа в векторную форму

Для фиксации действия дистанционного органа в микропроцессорных устройствах контролируется положение вектора сопротивления замера в комплексной плоскости сопротивлений относительно его области срабатывания. Вектор сопротивления замера – величина производная, получаемая как отношение специально сформированных векторов напряжения и тока. Векторное представление электрических величин широко используется в энергетике для описания синусоидально изменяющихся

сигналов [51]. Например, мгновенным значениям сигнала напряжения $u(t)=U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$, где U_m – амплитуда напряжения, φ – начальный угол, соответствует вектор $\underline{U}(t) = U_m \cdot e^{j(\omega \cdot t + \varphi)}$, вращающийся против часовой стрелки с циклической частотой ω . Такой подход применим и к цифровым аналоговым синусоидальным сигналам, получаемым в результате работы аналого-цифровых преобразователей (АЦП), которые вместо непрерывного сигнала формируют последовательность дискретных значений $u(nT)$, соответствующих этому сигналу в моменты времени nT , где n – постоянно увеличивающееся целое число, T – шаг дискретизации (временной интервал между двумя соседними выборками). Соответствие дискретного представления синусоидального сигнала и его векторного отображения показано на рисунке 2.6

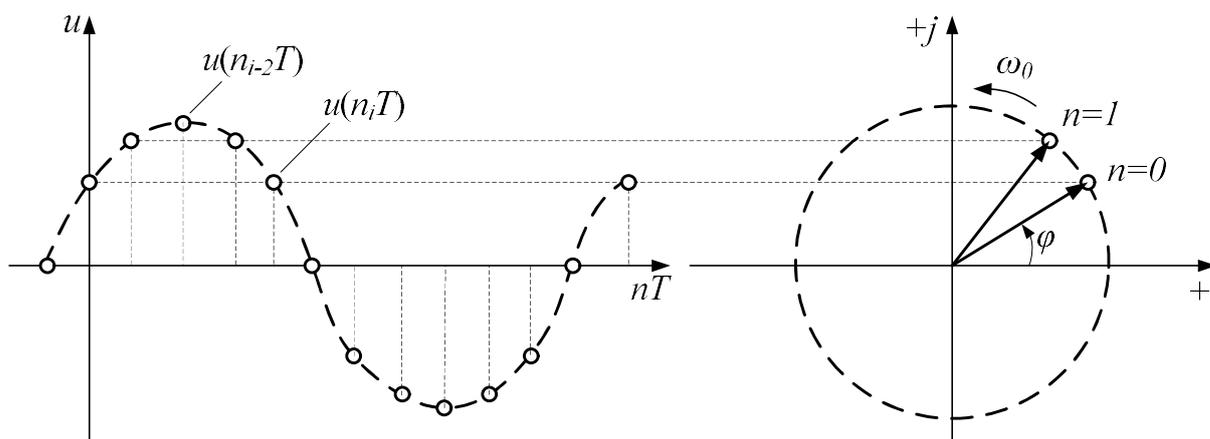


Рисунок 2.6 – Соответствие дискретного представления синусоидальной величины и вращающегося вектора

Таким образом, оцифрованные синусоидальные сигналы тока и напряжения заданной дискретности могут быть представлены вращающимися векторами вида:

$$\begin{cases} \underline{I}(nT) = I \cdot e^{j(\omega \cdot nT + \varphi_I)} = I_x(nT) + jI_y(nT); \\ \underline{U}(nT) = U \cdot e^{j(\omega \cdot nT + \varphi_U)} = U_x(nT) + jU_y(nT), \end{cases}$$

где I_x , U_x - проекции тока и напряжения на вещественную ось;

I_y, U_y - проекции тока и напряжения на мнимую ось, которые в моменты времени $t = (0, 1, 2, \dots, n)T$ равны цифровым выборкам величин $i(t)$, $u(t)$.

Таким образом, для формирования корректного значения сопротивления замера важнейшей задачей является вычисление векторов тока и напряжения по их дискретизированным мгновенным значениям.

В основе одного из способов вычисления вектора синусоидального сигнала лежит возможность определения амплитуды U и фазы φ вектора подводимого сигнала при известных его частоте ω , мгновенном значении самого сигнала $u(t)$ и его производной $u'(t)$ в любой момент времени [7], используя следующие выражения:

$$\begin{cases} U = \sqrt{u^2(t) + \frac{u'(t)^2}{\omega^2}}; \\ \omega \cdot t + \varphi = \arctg \frac{\omega \cdot u(t)}{u'(t)}. \end{cases}$$

Однако такой способ в явном виде не пригоден, так как при определении производной синусоидального сигнала возникают большие погрешности в расчётах, обусловленные дискретностью обрабатываемой информации и погрешностями АЦП. Также значительным является и влияние помех.

Альтернативным способом определения точного векторного значения сигнала является метод двух выборок [52], заключающийся в расчёте параметров вектора на основе выборки в текущий момент времени $u(nT)$ и выборки, полученной на m отсчетов ранее, $u(nT - mT)$ синусоидального сигнала заданной частоты путём решения следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} u(nT - mT) = U \cdot \sin(\omega \cdot nT + \varphi - \omega \cdot mT); \\ u(nT) = U \cdot \sin(\omega \cdot nT + \varphi). \end{cases}$$

Алгоритмы, основанные на методе двух выборок, являются наиболее распространенными и достаточно быстродействующими, однако для их работы необходимо, во-первых, знать или заранее определять частоту подаваемого синусоидального сигнала. Расчёт частоты сам по себе требует времени не менее одного периода (20 мс для 50 Гц), поэтому актуальная информация о частоте сигнала в алгоритм расчета векторных параметров поступает с некоторой задержкой, что приводит к дополнительным погрешностям. Во-вторых, при отклонении подаваемого сигнала от синусоидального, что однозначно происходит с сигналом тока при насыщении ТТ, такие алгоритмы имеют низкую точность. Следовательно, для повышения точности целесообразно использовать предварительную цифровую фильтрацию.

Амплитуду и фазу векторного изображения входного синусоидального сигнала в любой момент времени можно определить, зная значения его проекций на мнимую и вещественную ось. Например, для сигнала тока выражения выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} I(nT) = \sqrt{I_x^2(nT) + I_y^2(nT)}; \\ \varphi_I(nT) = \arctg \frac{I_y(nT)}{I_x(nT)}. \end{cases} \quad (2.3)$$

Именно эти проекции предлагается определять в [53]. Суть метода заключается в умножении мгновенных значений входного сигнала заданной частоты на идеальные синусоидальные колебания единичной амплитуды двух опорных источников с углом сдвига между колебаниями - 90°. Частота колебаний источников должна быть равна частоте входного сигнала. Каждое произведение содержит две составляющие – полезную низкочастотную и сопутствующую высокочастотную (с частотой колебаний равной двойной частоте входного сигнала):

$$\begin{cases} u(nT) \cdot \cos(\omega \cdot nT) = U(nT) \cdot \cos(\omega \cdot nT + \varphi(nT)) \cdot \cos(\omega \cdot nT) = \\ \quad = \frac{1}{2} U_x(t) + \frac{1}{2} U(nT) \cdot \cos(2\omega \cdot nT + \varphi(nT)); \\ u(nT) \cdot \sin(\omega \cdot nT) = U(nT) \cdot \cos(\omega \cdot nT + \varphi(nT)) \cdot \sin(\omega \cdot nT) = \\ \quad = \frac{1}{2} U_y(t) + \frac{1}{2} U(nT) \cdot \cos(2\omega \cdot nT - \varphi(nT)). \end{cases} \quad (2.4)$$

Для практического применения предложенного в [53] алгоритма с целью определения параметров векторной величины по выражению (2.3) необходимо выполнить следующее. Во-первых, выделить узкополосный сигнал: для рассматриваемой системы моделирования – основную гармонику тока и напряжения. Для этого смоделированные вторичные напряжения и токи необходимо пропустить через полосовой фильтр (ПФ), настроенный на заданную при моделировании частоту сети (50 Гц). Во-вторых, для выделения в каждый момент времени проекций на вещественную и мнимую оси векторов тока и напряжения необходимо результаты перемножения узкополосных сигналов на «идеальные» колебания двух источников, полученные в соответствии с выражением (2.4), пропустить через фильтр низших частот и умножить на 2. Структурная схема алгоритма представлена на рисунке 2.7.

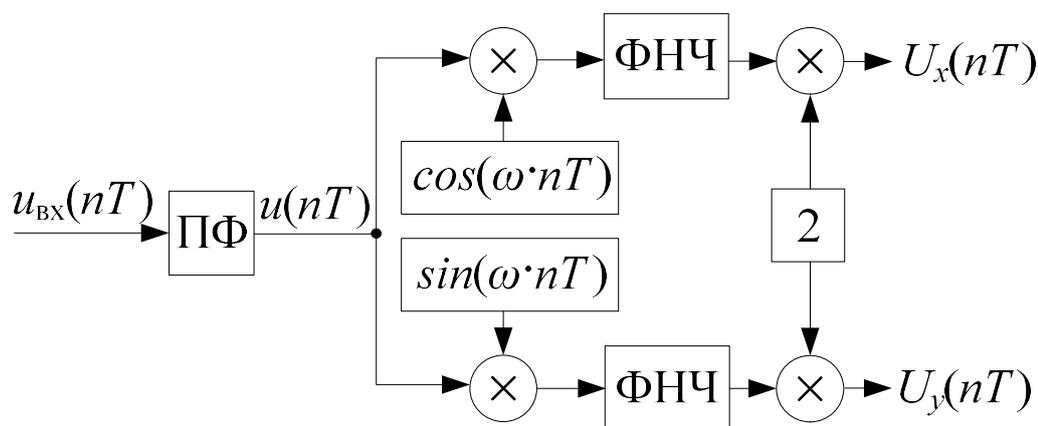


Рисунок 2.7 – Алгоритм выделения проекций векторного изображения входного сигнала на вещественную и мнимую оси

Недостатком рассмотренного способа определения параметров вектора является сравнительно большое время установления выходного сигнала при

скачкообразном изменении значения входного сигнала, что характерно для перехода в режим КЗ. Однако длительность установления зависит от параметров настройки ПФ и ФНЧ, используемых при реализации алгоритма. Анализ работы этих фильтров показывает, что задание в ПФ достаточно широкой полосы пропускания для основной гармоники, позволяющей отсеять вторую и более высокие гармоники, а в ФНЧ – границы, достаточной для отсеивания составляющих двойной частоты, приводит к тому, что суммарное время установления выходных сигналов не превышает двух периодов промышленной частоты. При анализе рассмотрен эллиптический фильтр первого порядка, поскольку он позволяет обеспечить максимально возможную крутизну спада амплитудно-частотной характеристики [53]. Следует отметить, что существует время установления величины выходного сигнала, наличие которого свойственно всем цифровым фильтрам, и оно, как правило, не меньше одного периода (20 мс при 50 Гц). Преимуществом алгоритма выделения проекций вектора при правильно подобранных параметрах фильтров является плавное изменение выходного сигнала от доаварийного значения к аварийному, имеющему место при КЗ, то есть переходной процесс в цифровых фильтрах рассматриваемого алгоритма проходит без переколебаний и без выдачи значений, превышающих фактические (даже кратковременно).

Из рассмотренных выше алгоритмов последний является наиболее подходящим для использования при исследовании поведения измерительных дистанционных органов ввиду его преимущества в части плавного и достаточно быстрого установления выходного сигнала, а также простоты реализации. Использование единого алгоритма цифровой фильтрации векторных значений тока и напряжения с последующим формированием единого сопротивления замера и его использование при различных характеристиках срабатывания позволяет сопоставить эти характеристики в «чистом» виде, то есть без особенностей, вносимых производителями при их реализации.

В разработанной системе моделирования учтены возможности различного формирования вектора сопротивления замера в зависимости от схемы подключения ДО:

- на междуфазное напряжение и разность токов соответствующих фаз

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}_{\phi 1} - \underline{U}_{\phi 2}}{\underline{I}_{\phi 1} - \underline{I}_{\phi 2}}, \quad (2.5)$$

где $\underline{U}_{\phi 1}$, $\underline{U}_{\phi 2}$, $\underline{I}_{\phi 1}$, $\underline{I}_{\phi 2}$ – значения соответствующих фазных напряжений и токов в месте установки защиты;

- на фазное напряжение и ток с компенсацией тока нулевой последовательности

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}_{\phi}}{\underline{I}_{\phi} - \underline{k}_0 \cdot 3\underline{I}_0}, \quad (2.6)$$

где \underline{k}_0 - комплексный коэффициент компенсации, учитываемый в расчете сопротивления непосредственно (как задаваемая уставка реле), либо косвенно, если вместо указанного коэффициента, задаваемого уставкой, является величина сопротивления нулевой последовательности защищаемой зоны,

\underline{I}_0 - значение тока нулевой последовательности в месте установки защиты.

Выбор способа формирования замера осуществляется в зависимости от назначения исследуемого дистанционного органа: при исследовании защиты от междуфазных КЗ сопротивление замера рассчитывается по выражению (2.5), если защита должна реагировать на КЗ с участием «земли» - по выражению (2.6).

2.5 Особенности моделирования характеристик срабатывания

Использование микропроцессорной техники в устройствах релейной защиты позволяет значительно расширить возможности функций защиты. В частности, позволяет реализовывать характеристики ДО защиты такой формы, которая учитывает особенности первичного оборудования и режимы его работы, что, как следствие, позволяет повысить чувствительность, селективность и устойчивость функционирования ДО в сложных переходных режимах по сравнению с аналогичными защитами, выполненными на электромеханической или микроэлектронной базе.

Следует отметить, во-первых, что производители зачастую не предоставляют пользователю возможность выбора формы характеристики ДО, ограничивая тем самым и защитные возможности выпускаемых терминалов. Так, один из крупных производителей УРЗ (НПП «ЭКРА») для резервных защит генераторов предлагает использовать исключительно круговые характеристики [54], диапазон выбора уставок которых зачастую ограничен сопротивлением замера в нагрузочных режимах, что приводит к недостаточной чувствительности одной из ступеней защиты при её настройке на работу в режиме дальнего резервирования. Таким образом, предоставление пользователю выбора формы характеристики ДО или дополнение существующей характеристики средствами отстройки от нагрузочного режима («вырез от нагрузки») позволило бы полностью исключить этот негативный эффект.

Во-вторых, алгоритмы реализации характеристик срабатывания ДО являются собственностью производителя и не представлены в открытом доступе. Поэтому описание принципов реализации характеристик срабатывания дистанционных защит является актуальной задачей, решение которой позволит небольшим производителям, не обладающим значительными ресурсами, выпускать УРЗ с гибкой настройкой и приемлемой стоимостью.

Основной трудностью, которая возникает при создании ДО, является отсутствие информации о том, как следует реализовывать конкретные характеристики в комплексной плоскости. В [55] отображена информация о формировании характеристик в виде окружностей, эллипсов и некоторых типов многоугольников. Эта информация в настоящее время утратила свою актуальность, поскольку подразумевает реализацию измерительных органов сопротивления на электромеханической и микроэлектронной элементной базе. В связи с этим в работе рассмотрены вопросы формирования некоторых типовых характеристик срабатывания дистанционных органов при реализации их в микропроцессорных устройствах. Условия срабатывания ДО при этом должны быть выражены через соотношение входных величин (комплексного сопротивления замера) и заданных параметров (уставок защиты) [56].

Далее рассмотрено формирование наиболее часто используемых характеристик срабатывания дистанционных органов.

Окружность

Формирование характеристики срабатывания ДО в виде окружности, смещенной относительно начала координат (рис. 2.8) имеет следующие особенности. Положение характеристики в комплексной плоскости однозначно определяется следующими уставками: $\varphi_{\text{мч}}$ – угол максимальной чувствительности реле; $Z_{\text{ср}}$ – сопротивление срабатывания реле, соответствующее углу $\varphi_{\text{мч}}$; $Z_{\text{см}}$ – сопротивление смещения характеристики относительно начала координат (при положительном значении $Z_{\text{см}}$ характеристика смещается в 3-й квадрант, при отрицательном – в 1-й.)

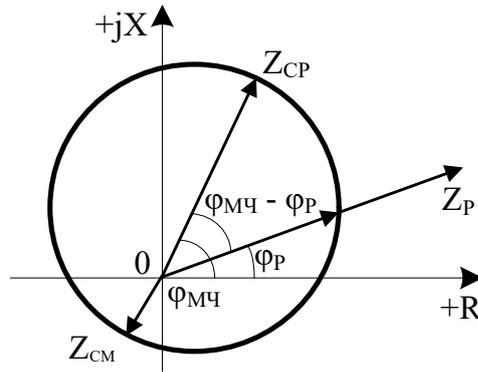


Рисунок 2.8 – Круговая характеристика ДО:

Z_P – сопротивление замера; φ_P – угол сопротивления замера на зажимах реле

Фиксация срабатывания реле происходит лишь в том случае, если вектор сопротивления замера Z_P находится внутри окружности, уравнение которой, в общем виде с координатами центра в $(R_0; X_0)$ и заданным радиусом r описывается следующим выражением:

$$(R - R_0)^2 + (X - X_0)^2 = r^2.$$

Радиус и координаты центра окружности применительно к рассматриваемой характеристике ДО зависят только от вводимых уставок, то есть рассчитываются однократно в момент применения новых параметров срабатывания, и определяются по выражениям:

$$\begin{cases} r = 0.5 \cdot (Z_{CP} + Z_{CM}); \\ R_0 = 0.5 \cdot (Z_{CP} - Z_{CM}) \cdot \cos \varphi_{MCh}; \\ X_0 = 0.5 \cdot (Z_{CP} - Z_{CM}) \cdot \sin \varphi_{MCh}. \end{cases} \quad (2.7)$$

Таким образом, для круговой характеристики ДО условие срабатывания с учетом выражений (2.7) выглядит следующим образом:

$$(R_P - R_0)^2 + (X_P - X_0)^2 < r^2,$$

где R_P, X_P - проекции сопротивления замера на вещественную и мнимую оси соответственно.

Эллипс

Эллиптическая характеристика срабатывания, проходящая через начало координат, может быть задана тремя основными параметрами Z_{CP} , $\varphi_{MЧ}$ и эксцентриситет ε (рис.2.9).

Задать эллипс уравнением в канонической форме возможно лишь при условии, что его оси совпадают с осями координат или же им параллельны. Переносим начало координат в центр эллипса и поворачиваем оси координат таким образом, чтобы они совпадали с его осями. Координаты центра эллипса через исходные параметры могут быть рассчитаны следующим образом:

$$\begin{cases} R_{0'} = 0.5Z_{CP} \cdot \cos \varphi_{MЧ}; \\ X_{0'} = 0.5Z_{CP} \cdot \sin \varphi_{MЧ}. \end{cases}$$

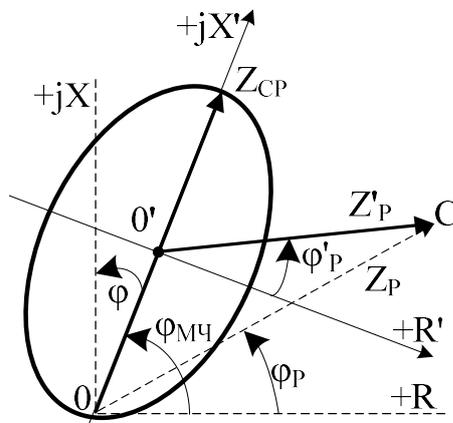


Рисунок 2.9 – Характеристика срабатывания ДО в виде эллипса

Угол поворота новых осей координат относительно исходных составляет $\varphi = 90 - \varphi_{MЧ}$ по часовой стрелке. Эллиптическая характеристика срабатывания, представленная в новых осях $(+R'; +jX')$, приведена на рисунке 2.9 (исходные оси координат и вектор замера отмечены штриховой линией).

В новых осях замер характеризуется параметрами Z'_p и φ'_p . Длину вектора сопротивления замера Z'_p в новых осях можно выразить через проекции на мнимую и вещественную оси:

$$Z'_p = \sqrt{(R_p - R_{0'})^2 + (X_p - X_{0'})^2}.$$

Зная Z'_p , параметр φ'_p можно рассчитать по теореме синусов для треугольника $OO'S$:

$$\varphi'_p = \arccos\left(\frac{Z_p \sin(\varphi_{MЧ} - \varphi_p)}{Z'_p}\right).$$

Результирующим условием срабатывания дистанционного органа, имеющему эллиптическую характеристику срабатывания, является:

$$\frac{(X'_p - X_{0'})^2}{b^2} + \frac{(R'_p - R_{0'})^2}{a^2} < 1,$$

где R'_p, X'_p - проекции вектора сопротивления замера Z'_p на новые вещественную и мнимую оси соответственно;

$a = 0.5Z_{CP}$ - большая полуось эллипса;

$b = a\sqrt{1 - \varepsilon^2}$ - малая полуось эллипса.

Параллелограмм

Для измерительных органов ненаправленных ступеней дистанционных защит, а также некоторых пусковых дистанционных органов часто используют характеристики срабатывания, имеющие форму параллелограмма, вид которого приведен на рисунке 2.10.

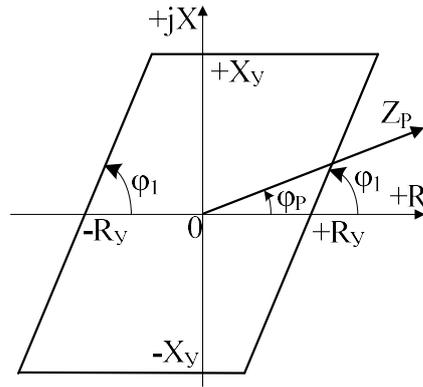


Рисунок 2.10 – Характеристика срабатывания ДО, имеющая вид параллелограмма:

R_y, X_y – уставки срабатывания по активному и реактивному сопротивлению соответственно; φ_1 – угол наклона боковых сторон характеристики срабатывания

Выражения, описывающие левую и правую боковые стороны характеристики, могут быть заданы уравнениями прямых линий $y = k \cdot x + b$. Переходя к обозначениям в комплексной плоскости сопротивлений, и выразив коэффициенты k и b через параметры срабатывания, получаем условие, при выполнении которого вектор замера находится выше прямой, продолжающей правую сторону характеристики:

$$X_p > \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot R_p - R_y \cdot \operatorname{tg} \varphi_1. \quad (2.8)$$

Условие срабатывания для левой стороны характеристики:

$$X_p < \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot R_p + R_y \cdot \operatorname{tg} \varphi_1. \quad (2.9)$$

Результирующая система неравенств, выполнение которых однозначно говорит о нахождении сопротивления замера в зоне действия, выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} X_p > \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot R_p - R_y \cdot \operatorname{tg} \varphi_1; \\ X_p < \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot R_p + R_y \cdot \operatorname{tg} \varphi_1; \\ -X_y < X_p < +X_y. \end{cases}$$

Полигональная характеристика

Характеристики срабатывания типа REL широко используются в измерительных органах дистанционных защит таких производителей, как НПП «ЭКРА» и «Siemens» [57]. Общий вид характеристики срабатывания отдельно взятой ступени без учета выреза, обеспечивающего отстройку от режимов нагрузки, представлен на рисунке 2.11.

Задаваясь некоторым произвольным положением вектора сопротивления замера, составляем алгоритм реализации этой характеристики, то есть записываем все необходимые условия срабатывания. Граничные условия различных частей характеристики, которые для срабатывания ДО должны выполняться одновременно все, рассмотрены для удобства анализа отдельно.

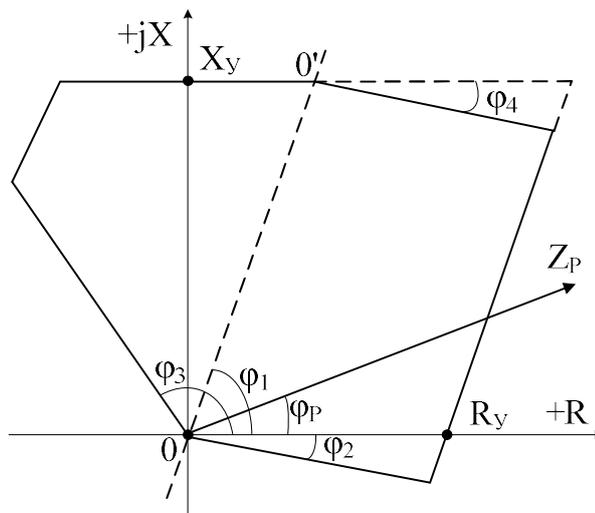


Рисунок 2.11 – Полигональная характеристика срабатывания:

R_y , X_y – уставки срабатывания по оси R и X соответственно;

φ_1 – угол максимальной чувствительности (угол наклона характеристики срабатывания),

φ_2 – угол наклона нижней правой части характеристики,

φ_3 – угол наклона левой части характеристики,

φ_4 – угол наклона верхней части характеристики

Условие попадания вектора замера в область срабатывания, ограниченную лучами, выходящими из начала координат и являющимися

продолжением нижней и левой сторон характеристики, записывается следующим образом:

$$\varphi_2 < \varphi_P < \varphi_3. \quad (2.10)$$

Описание условий фиксации попадания замера в область, ограниченную лучами, выходящими из точки O' и являющимися продолжением верхних сторон характеристики, требует переноса начала координат в точку O' , координаты которой определяются по выражениям:

$$\begin{cases} R_{0'} = X_Y \cdot \operatorname{tg}(90 - \varphi_1); \\ X_{0'} = X_Y. \end{cases}$$

Угол замера в новых координатных осях определяется из выражения:

$$\varphi'_P = \operatorname{arctg} \left(\frac{X_P - X_{0'}}{R_P - R_{0'}} \right).$$

В результате, условие фиксации замера ниже верхних сторон характеристики записывается следующим образом:

$$-180^\circ < \varphi'_P < \varphi_4. \quad (2.11)$$

Фиксация попадания замера сопротивления в область между двумя боковыми сторонами характеристики происходит в случае одновременного выполнения условий (2.8) и (2.9).

Таким образом, срабатывание органа с полигональной характеристикой (рис. 2.11) происходит при одновременном выполнении условий (2.8) - (2.11). Однако, как правило, в дополнение к рассмотренным условиям необходимо предусмотреть возможность выреза части зоны действия для отстройки от нагрузочных режимов (рис. 2.12). Параметры выреза R_H , φ_H считаются заданными, то есть являются уставками, и устанавливаются при настройке. Условия, определяющие попадание вектора в область выреза:

$$-\varphi_H < \varphi_P < \varphi_H, \quad R_P > R_H; \quad (2.12)$$

$$-\varphi_H + 180^\circ < \varphi_P < \varphi_H + 180^\circ, \quad R_P < -R_H. \quad (2.13)$$

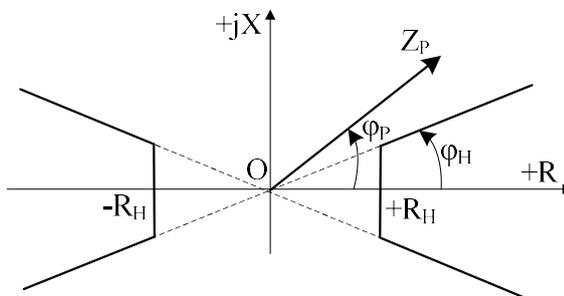


Рисунок 2.12 – Изображение выреза, используемого для отстройки от нагрузки, в комплексной плоскости

Неравенства (2.12) соответствуют вырезу, расположенному в первом и четвертом квадрантах, а неравенства (2.13) – вырезу, расположенному во втором и третьем. При выполнении любого из этих условий срабатывание дистанционного органа не допускается.

2.6 Разработка интерактивного инструментария, используемого при моделировании

Эффективное проведение экспериментов по оценке влияния искажения вторичных сигналов ТТ на качество функционирования дистанционных защит подразумевает применение в системе моделирования (рис. 2.1) не только базового перечня математических моделей исследуемых объектов (первичная сеть, ТТ, измерительные ДО), но и удобного интерактивного инструментария. Использование интерактивных средств обусловлено необходимостью достаточно простого и наглядного ввода пользователем используемых в эксперименте параметров и формирования результатов вычислений в том виде, который, во-первых, удобен пользователю, а, во-вторых, наиболее полно отображает информацию о моделируемом режиме. Таким образом, разработка системы моделирования требует решения ряда задач, а именно:

– интеграция в разрабатываемую систему математических моделей всех ранее описанных элементов, необходимых для полноценного исследования, и предоставление возможностей для дальнейшего расширения сформированной системы моделирования не только её разработчиком, но и другими исследователями;

– формирование удобного графического интерфейса пользователя для ввода исходных данных, необходимых для подготовки и проведения эксперимента, изменения и расширения базы данных элементов первичной сети, измерительных преобразователей тока и напряжения, а также параметров срабатывания исследуемых защит.

Решение поставленных задач может быть достаточно просто выполнено в среде разработки программного пакета MATLAB, возможности которого позволяют реализовать все необходимые модули системы моделирования (рис. 2.13), такие как графический интерфейс пользователя, систему управления базой данных, математическое ядро, а также модуль визуализации.

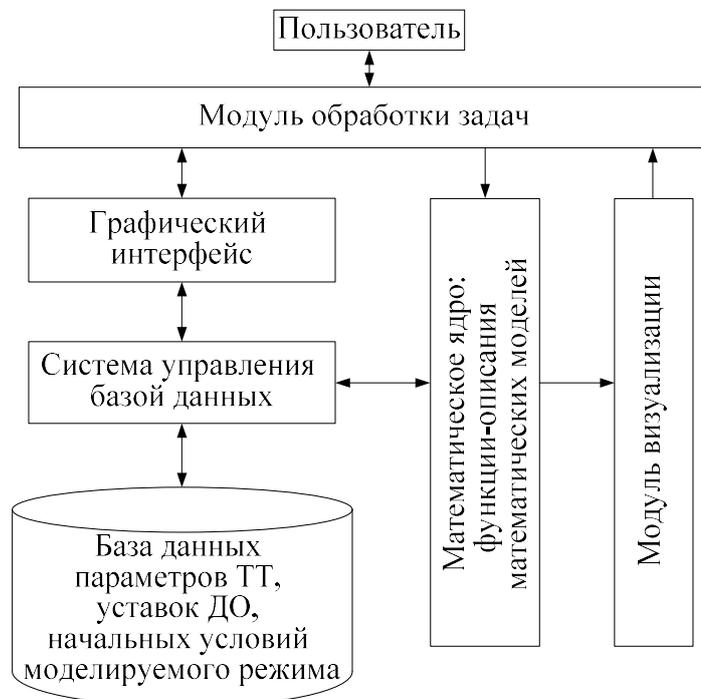


Рисунок 2.13 – Структура взаимосвязи модулей системы моделирования переходных процессов в дистанционных органах

Графический интерфейс, разработанный на основе приёмов, описанных в [58, 59], позволяет пользователю вводить исходные данные как для проведения самого эксперимента, так и задания параметров моделируемых объектов, при этом обеспечивая наглядность, а в некоторых случаях и проверку корректности вводимых данных. Использование графического интерфейса (ГИ) сокращает время освоения возможностей разработанной системы моделирования пользователями, а также упрощает подготовку исходных данных при проведении исследований. Система управления базой данных обеспечивает преобразование данных, полученных от средств ввода через ГИ или считанных из расширяемой базы данных, в удобный для решения вид. Математическое ядро содержит набор функций, обеспечивающих работу ранее описанных математических моделей. После выполнения расчётов результаты моделирования передаются в модуль визуализации, обеспечивающий отображение итоговых и промежуточных результатов моделирования в виде графических зависимостей первичных, вторичных фазных токов, вторичных фазных напряжений, а также состояний выходных устройств моделируемых ДО от времени. Также предоставлена возможность визуализации изменения значений сопротивления замера в комплексной плоскости.

2.7 Области применения разработанной системы моделирования

Для применения разработанной системы моделирования переходных процессов в дистанционных органах устройств РЗ и ПА пользователю необходимо подготовить следующие исходные: параметры и топологию схемы замещения первичной сети (рис. 2.2), напряжение сети, технические параметры и значения остаточной индукции в трансформаторах тока, к которым подключено исследуемое устройство защиты, а также параметры его срабатывания. Правильный выбор параметров срабатывания устройств РЗ, особенно в сетях с нестандартной конфигурацией, например в [60], является важным этапом проведения экспериментов.

Наиболее очевидной областью применения разработанного инструментария является выбор характеристик и параметров срабатывания измерительных дистанционных органов защиты на основании анализа их поведения в условиях экстремальных переходных процессов в цепях трансформаторов тока.

С другой стороны, погрешности ТТ приводят к искажению вторичных токов и, как следствие, появлению высших гармоник во входных сигналах измерительных ДО, существенно влияя на работу этих органов в переходных режимах. В частности могут происходить сокращение зоны действия, изменение угла максимальной чувствительности и задержка в срабатывании. Поэтому, согласно [61], в целях предотвращения отказов и излишних срабатываний устройств РЗ обязательной является проверка допустимости возникающих погрешностей ТТ из-за изменения конфигурации первичной сети (при её развитии) и модернизации или реконструкции самих устройств релейной защиты и автоматики.

Для наглядности рассмотрим пример, в котором проводится проверка ТТ на допустимую погрешность расчётным путём. К вторичным обмоткам рассматриваемых ТТ подключены токовые цепи резервной дистанционной защиты линии. В процессе реконструкции во вторичных цепях ТТ выполнена замена контрольных кабелей и установлены дополнительные устройства противоаварийной автоматики. Завершающим этапом анализа должна быть оценка влияния переходных процессов в рассматриваемых ТТ на поведение дистанционных органов резервной защиты линии. Оценка проведена с использованием разработанных средств моделирования.

Используемые в защите ТТ встроены в элегазовый баковый выключатель типа ЗАР1D-145 кВ и имеют следующие технические характеристики: коэффициент трансформации $1000/5$, номинальная мощность нагрузки вторичной обмотки 30 ВА ($30 / 5^2 = 1,2$ Ом), предельная кратность тока КЗ, при которой обеспечивается точная работа измерительных органов защит с нагрузкой на ТТ, не превышающей

номинальную, равна 20. Кривая предельной кратности, показывающая границу работы ТТ с погрешностью, не превышающей 10 %, изображена на рисунке 2.14, загрузка по фазам до и после проведения реконструкционных работ приведена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Загрузка трансформаторов тока по фазам

Нагрузка по фазам до реконструкции, Ом			Нагрузка по фазам после реконструкции, Ом		
А	В	С	А	В	С
0.636	1	1	0.793	2.156	1.157

Параметры схемы замещения рассматриваемого участка сети (рис. 2.2): эквивалентная ЭДС системы 1 равна $\underline{E}_1 = 111,6 \cdot e^{-j1,2^\circ}$ кВ, её эквивалентное сопротивление прямой последовательности равно $\underline{Z}_1 = 0,155 + j1,765$ Ом, аналогично для системы 2: $\underline{E}_2 = 112,8 \cdot e^{-j0,9^\circ}$ кВ, $\underline{Z}_2 = 1,007 + j8,296$ Ом; межсистемная связь характеризуется сопротивлением $\underline{Z}_{12} = 0,303 + j0,961$ Ом; линия длиной 6,9 км, выполнена проводом марки АСО 300 с удельным сопротивлением $\underline{Z}_{уд} = 0,107 + j0,372$ Ом/км. При расчетах принято, что номинальный ток нагрузки по линии равен 494 А, ток нагрузки отстаёт от напряжения на шинах подстанции на 36 градусов. Результаты проведённых испытаний на разработанных математических моделях показали, что сочетание остаточных индукций в моделируемых ТТ -0,6, 1,4, -0,8 Тл (в фазах «А», «В» и «С» соответственно) приводит к наиболее сильному искажению вторичных токов ТТ. Далее приведены параметры, определённые с использованием разработанных средств моделирования, а именно: расчетная постоянная времени апериодической составляющей первичного тока, протекающего по защищаемой линии со стороны системы 1 к точке КЗ, составляет 0,02 с, а расчетная кратность первичного установившегося тока повреждения, протекающего через исследуемые ТТ при КЗ в конце зоны

действия первой ступени дистанционной защиты (87% линии) – 7, а при КЗ в начале защищаемой линии – 39,4.

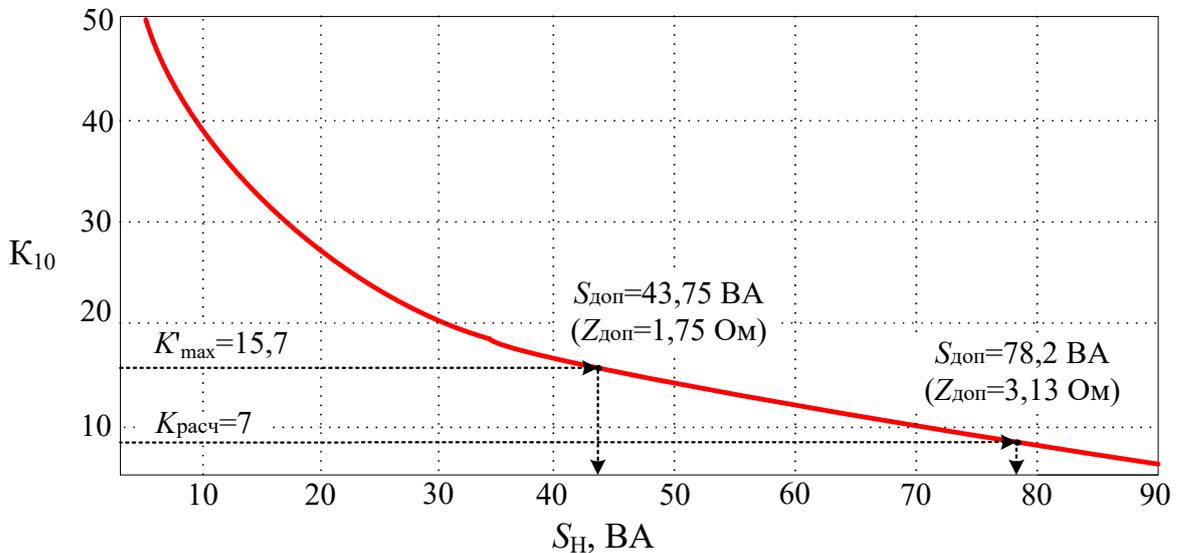


Рисунок 2.14 – Кривая предельной кратности исследуемых ТТ

Трансформаторы тока, применяемые в релейной защите должны удовлетворять трём требованиям, а именно – обеспечивать:

- точную работу измерительных органов защиты при коротких замыканиях в расчетной точке (для ступенчатых защит линий в качестве расчетной точки принимают конец зоны действия первых ступеней);
- надёжную работу измерительных органов защиты (без дребезга контактов) при КЗ вблизи места установки трансформаторов тока;
- отсутствие опасных перенапряжений на вторичной обмотке при максимальных токах короткого замыкания.

В соответствии с первым требованием при КЗ вне защищаемой зоны действия первой ступени дистанционной защиты погрешность ТТ не должна превышать 10 % [61]. По кривым предельной кратности для рассматриваемого ТТ при кратности тока в конце зоны действия первой ступени защиты линии $K_{расч} = 7$ допустимое значение вторичной нагрузки $Z_{доп}$ составляет 3,13 Ом (рис. 2.14), следовательно, полная погрешность ТТ в установившемся режиме при подключенной к ним нагрузке в соответствии с таблицей 2.1 до и после реконструкции не превышает 10 %.

Особое место занимает проверка ТТ по второму условию, где помимо мощности, потребляемой устройствами РЗА и выделяющейся в контрольных кабелях, необходима информация о возможности устойчивой работы реле (измерительных органов) при значительных искажениях вторичных сигналов ТТ. При этом, если для защит на электромеханической и микроэлектронной базе информация о допустимых погрешностях ТТ, при которых реле работают без дребезга, известна (указывается либо в паспорте на устройство, либо в литературе, посвященной выбору ТТ для РЗ, например [20, 62]), то для микропроцессорных защит такая информация, как правило, отсутствует. В связи с этим, при проверке ТТ по этому условию и использовании микропроцессорных устройств РЗ проектировщики, как правило, используют данные по допустимым погрешностям ТТ для электромеханических устройств РЗ. Для рассматриваемого случая примем, что предельно допустимая токовая погрешность ТТ составляет 50 %.

Наиболее вероятно, что такой подход приводит к некоторому запасу по надежности срабатывания РЗ. Поэтому на практике возможны случаи, в которых нагрузка трансформатора тока превышает допустимую (если расчет производить таким же образом, как и в случае применения электромеханических реле), хотя в действительности надёжная работа цифровой защиты обеспечена. В таких случаях нет необходимости принятия дополнительных мер, направленных на уменьшение погрешности ТТ и требующих материальных вложений. Например, в [63] результаты исследований цифровых токовых защит свидетельствуют о том, что во всех теоретически возможных сочетаниях мощности электрической системы и длины защищаемой линии электропередачи наблюдается надежное их функционирование при КЗ вблизи места установки ТТ. Это справедливо в том случае, если выбор нагрузки трансформаторов тока произведен по условию надежной работы защиты при КЗ в расчетной точке, а также по недопустимости перенапряжений во вторичных цепях.

Оценить соответствие ТТ в рассматриваемом примере второму требованию можно, используя кривую предельной кратности (рис. 2.14). Для этого определяется откорректированная (с учетом допустимой токовой погрешности) расчетная кратность тока K'_{\max} , по которой определяется допустимая нагрузка на ТТ $Z_{\text{доп}}$ [20, 62]. Результаты расчетов сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты проверки ТТ по второму условию

Наибольшая нагрузка на фазу $Z_{\text{нагр}}$, (Ом)	K_{\max}	$K'_{\max} = K_{\max} / A$	$Z_{\text{доп}}$, Ом
2.156	39.4	15.68	1.75
где $A=2.5$ - повышающий коэффициент, определенный по зависимости коэффициента A от токовой погрешности ТТ [62].			

Из результатов проведенных расчётов следует, что рассмотренные ТТ после реконструкции их вторичных цепей не удовлетворяют требованию обеспечения надёжной работы измерительных ДО при максимальных токах КЗ ($Z_{\text{доп}} < Z_{\text{нагр}}$), при которых возможны повышенные погрешности ТТ и, как следствие, существенные искажения вторичного тока. В таком случае, необходимо принимать решения для выполнения этого требования от наиболее простого (последовательное соединение вторичных обмоток ТТ одной фазы) при наличии такой возможности до непопулярного и наиболее дорогостоящего (замена ТТ). Здесь следует учитывать, что для анализа использовалась информация, относящаяся к защитам, выполненным на устаревшей элементной базе, поэтому также необходимо рассмотреть поведение измерительных ДО при КЗ в начале защищаемой линии, используя разработанные средства моделирования.

На рисунке 2.15 представлены осциллограммы токов, подводимых к измерительным органам защиты, и осциллограммы выходных сигналов измерительных ДО, использующих различные характеристики срабатывания, при близком трехфазном металлическом КЗ на защищаемой линии при

нагрузке на ТТ, не превышающей допустимую (до реконструкции), а на рисунке 2.16 – аналогичные осциллограммы при нагрузке на ТТ, превышающей допустимую в фазе «В» (после реконструкции).

Из приведенных на рисунке 2.15 осциллограмм разностей токов видно, что при нагрузке на ТТ, не превышающей допустимую (до реконструкции), уже существует небольшое искажение вторичного тока вследствие превышения предельной кратности ТТ ($K_{\max} = 39.4 > K_{10} = 20$), которое в незначительной мере проявляется во всех фазах. При увеличении нагрузки в результате проведенной реконструкции, как это следует из осциллограмм, приведенных на рисунке 2.16, происходит и увеличение искажения сигналов на входах дистанционных органов.

В соответствии с представленными осциллограммами значительное увеличение нагрузки на ТТ фаз В и С не привело к заметным задержкам срабатывания быстродействующих ступеней дистанционной защиты линии. В двух приведенных случаях устойчивый сигнал на отключение хотя бы в одной фазе появляется через время, не превышающее 37 мс. Сопоставление осциллограмм для выходных сигналов ДО, имеющих различные характеристики срабатывания, позволяет утверждать, что в качестве быстродействующей ступени защиты линии можно использовать ДО с характеристикой срабатывания, как в виде многоугольника, так и в виде окружности. Окончательное решение по выбору формы характеристики необходимо принимать с учетом удобства согласования характеристик защит, устанавливаемых в прилегающей сети.

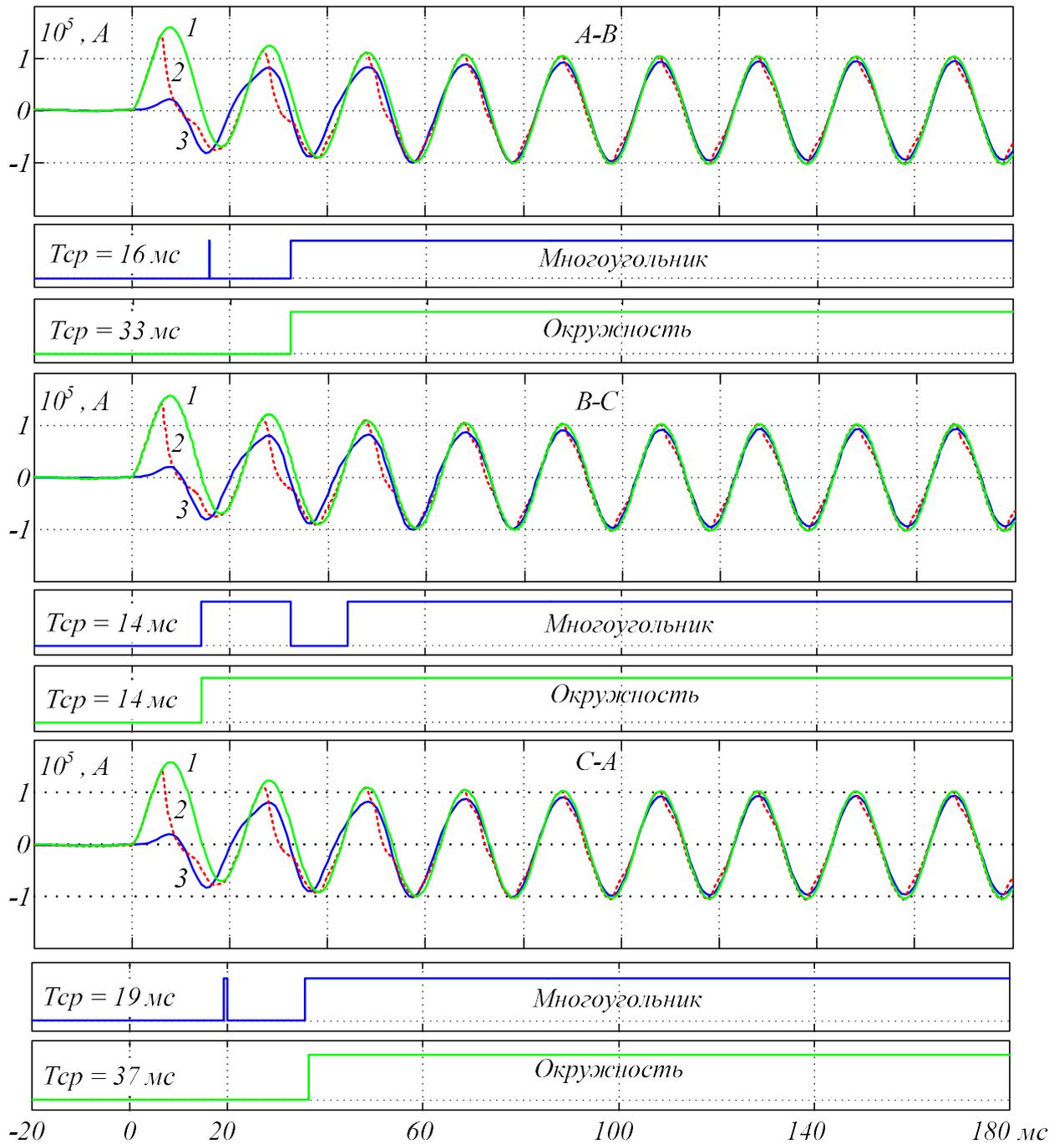


Рисунок 2.15 – Осциллограммы разностей токов соответствующих фаз и выходных сигналов ДО (при нагрузке ТТ до реконструкции)

1 - разность первичных токов фаз, 2 - разность вторичных токов ТТ, приведенных к числу витков первичной обмотки ТТ, 3 - разность вторичных токов фаз после выделения основной гармоники, приведенных к числу витков первичной обмотки ТТ

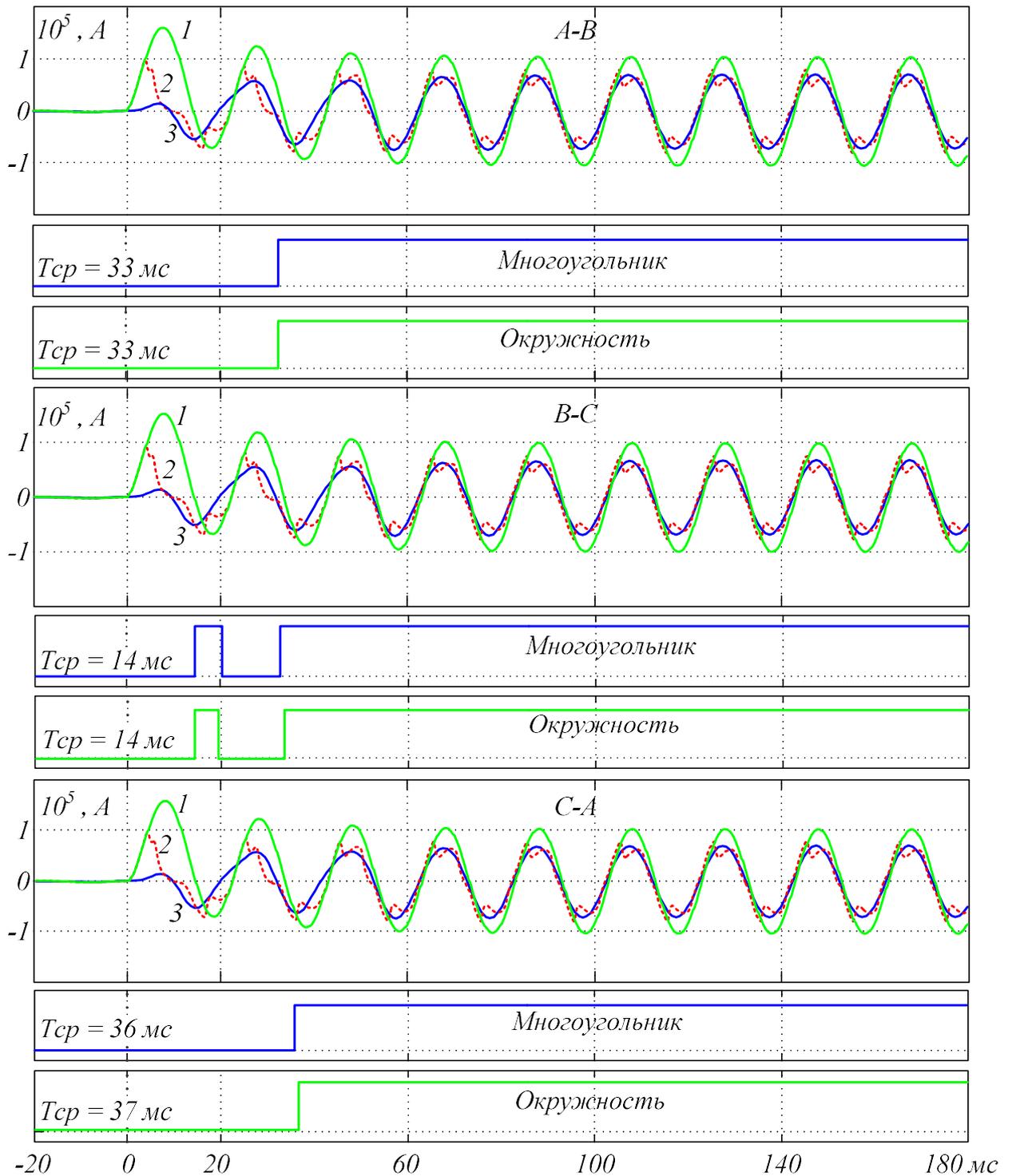


Рисунок 2.16 – Осциллограммы разностей токов соответствующих фаз и выходных сигналов ДО (при нагрузке ТТ после реконструкции)

1 - разность первичных токов фаз, 2 - разность вторичных токов ТТ, приведенных к числу витков первичной обмотки ТТ, 3 - разность вторичных токов фаз после выделения основной гармоники, приведенных к числу витков первичной обмотки ТТ

Выводы по главе 2

1. Разработана достаточно полная математическая модель комплекса «объект защиты - измерительные трансформаторы - измерительные органы защиты», позволяющая исследовать поведение защит в наиболее сложных режимах для исследования их устойчивости функционирования.

2. Разработанные средства моделирования позволяют оценивать поведение измерительных дистанционных органов в переходных процессах с учётом влияния погрешностей защитных трансформаторов тока. Эти средства могут быть использованы для выбора характеристик срабатывания измерительных органов устройств РЗ на основании получаемых осциллограмм токов, напряжений, годографов вектора замера реле сопротивления в комплексной плоскости и осциллограмм выходных сигналов измерительных органов.

3. Анализ результатов моделирования ДО, имеющих различные характеристики срабатывания, при близких КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ, позволяет выбрать такую форму характеристики срабатывания быстродействующей ступени защиты линии, в которой устойчивый сигнал на отключение повреждения формируется раньше, чем при использовании иных характеристик.

4. Разработанные средства моделирования позволяют проверять ТТ на соответствие требованию надёжной работы измерительных органов защиты при КЗ в месте установки ТТ.

ГЛАВА 3 ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ОРГАНОВ В УСТРОЙСТВАХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

3.1 Постановка задачи

Современные условия работы объединенных энергосистем предъявляют повышенные требования к устройствам релейной защиты, которые должны осуществлять надежное, быстрое и селективное отключение повреждений, возникающих на защищаемых объектах.

Основными требованиями к устройствам РЗ, с точки зрения их правильного функционирования, является обеспечение устойчивой работы в установившихся и переходных режимах, которая трактуется как свойство устройств РЗ сохранять стабильность измерения, характеристики, параметры, уставки, и способность выполнять требуемые функции с учетом переходных процессов (ПП) в энергосистеме и в самих устройствах РЗ, возникающих при КЗ и коммутациях [7].

Учитывая, что дистанционная защита является одной из важнейших в системе защиты линий электропередачи сетей высокого и сверхвысокого напряжения, к ней, как и другим защитам, предъявляются повышенные требования по устойчивости функционирования, на которую влияют наличие переходного сопротивления в точке повреждения, поведение ТТ и ТН в переходном процессе [1].

При этом работа дистанционной защиты, как и других видов защит, основана на использовании электрических величин промышленной частоты. Свободные составляющие токов и напряжений ПП, искажение вторичных сигналов тока ТТ представляют собой помехи и могут вызывать нарушения устойчивости функционирования измерительных органов дистанционной защиты.

Одним из способов достижения необходимой устойчивости функционирования устройств РЗ, в частности дистанционной защиты, в условиях ПП, как было рассмотрено в предыдущей главе, является выбор наиболее подходящих характеристик ДО, что требует использования

разработанных программных средств. Другим способом является выбор характеристики срабатывания ДО и его уставок, исходя из особенностей исполнения и режимов работы защищаемого оборудования. Именно такой подход более подробно рассмотрен в данной главе.

3.2 Основные положения, принимаемые при расчёте параметров срабатывания дистанционной защиты

Современные устройства РЗ, в общем случае, имеют от трех до шести направленных ступеней по сопротивлению срабатывания при междуфазных и однофазных КЗ в защищаемых зонах, имеющих заданную круговую или полигональную характеристику с уставками по активному и реактивному (R и X) сопротивлениям срабатывания. Каждая из ступеней имеет независимую выдержку времени. Под такую особенность устройств РЗ адаптирована и современная методика расчёта их параметров срабатывания: расчёт ведется для каждой ступени в отдельности.

Выбор уставок срабатывания первой ступени

На первую ступень дистанционной защиты возлагается функция обеспечения надежного отключения всех видов КЗ на линии без выдержки времени при вероятном существовании переходного сопротивления в месте повреждения $R_{пер}$, а также обеспечение селективности работы (то есть недействия) при КЗ на шинах подстанции противоположного конца линии.

В соответствии с руководящими указаниями [64] сопротивление срабатывания первой ступени дистанционной защиты одиночной и параллельных линий с двухсторонним и односторонним питанием, за исключением тупиковых линий, определяется при металлических КЗ по следующему выражению:

$$\underline{Z}_{с.з.}^I \leq \frac{\underline{Z}_л}{1 + \beta + \delta} = k_{отс} \cdot \underline{Z}_л, \quad (3.1)$$

где $\underline{Z}_л$ - сопротивление защищаемой линии;

β - относительное значение полной погрешности трансформаторов тока и трансформаторов напряжения, и релейной аппаратуры;

δ - коэффициент погрешности, вызванной неточностью расчета первичных электрических величин и необходимый запас;

$k_{отс}$ - коэффициент отстройки.

При этом в зависимости от типа и производителя устройства РЗ коэффициенты β и δ могут варьироваться, и коэффициент отстройки может иметь значения в диапазоне $0,85 \div 0,9$. Последние рекомендации заводоизготовителей предлагают принимать коэффициент отстройки равным $K_{отс} = 0,87$ [65], то есть

$$Z_{с.з.}^I = 0,87 Z_л, \quad (3.2)$$

Сопротивление срабатывания реле определяется на основании первичного сопротивления срабатывания защиты

$$Z_{ср.}^I = Z_{с.з.}^I \cdot \frac{K_I}{K_U}, \quad (3.3)$$

где K_I , K_U - коэффициент трансформации ТТ и ТН, соответственно.

На тупиковых линиях сопротивление срабатывания первой ступени дистанционной защиты в целях повышения чувствительности целесообразно выбирать по условию отстройки от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения подстанции, примыкающей к противоположному концу линии:

$$\underline{Z}_{с.з.}^I \leq \frac{\underline{Z}_л + \underline{Z}_{тр}}{1 + \beta + \delta},$$

где $Z_{тр}$ - минимально возможное сопротивление трансформатора.

При этом выбор уставки по сопротивлению срабатывания первой ступени дистанционной защиты от междуфазных КЗ и КЗ на землю, у большинства устройств, производится идентично, так как в расчёте сопротивления замера от места установки защиты до точки повреждения, как правило, учитывается только сопротивление прямой последовательности.

При определении уставок по оси активного сопротивления R необходимо учитывать активное переходное сопротивление в месте повреждения. Для расчета уставки R , в общем случае, применяется следующее выражение [57]:

$$R = R_L + R_{пер}, \quad (3.4)$$

где R_L - активное сопротивление линии;

$R_{пер} = R_{дуги}$ - активное переходное сопротивление дуги в месте повреждения линии при междуфазном КЗ.

В части определения активного сопротивления дуги при КЗ существует несколько различных методических рекомендаций, результаты которых часто носят противоречивый характер. Оценить эти противоречия можно наглядно – сравнив расчётные выражения для определения $R_{дуги}$. Например, в [57, 1] это сопротивление определяется согласно выражению:

$$R_{дуги} = 2500 \cdot L / I_{КЗmin}, \quad (3.5)$$

где L - длина дуги, определяется как расстояние между изоляторами (или, при КЗ на землю - между изолятором и опорой), м;

$I_{КЗmin}$ - минимальный ток, протекающий в месте установки защиты к точке короткого замыкания, А.

Сопротивление дуги в городских кабельных сетях в [1] предлагается рассчитывать следующим образом:

$$R_{\text{дуги}} = U_{\text{дуги}} / I_{\text{КЗmin}}, \quad (3.6)$$

где $U_{\text{дуги}}$ - падение напряжения на дуге, кВ.

Группу формул расчета сопротивления дуги в месте повреждения дополняет следующее выражение, приведенное в [4]:

$$R_{\text{дуги}} = 28700 \cdot L / I_{\text{КЗmin}}^{1,4}. \quad (3.7)$$

При выборе параметров срабатывания микропроцессорного устройства защит производства компании AREVA сопротивление дуги в [66] предлагают рассчитывать следующим образом:

$$R_{\text{дуги}} = 1050 \cdot L / I_{\text{КЗmin}}. \quad (3.8)$$

В соответствии с [2], постоянный коэффициент K при отношении длины дуги к току КЗ не является фиксированным значением, а указан в диапазоне от 1200 до 1500:

$$R_{\text{дуги}} = K \cdot L / I_{\text{КЗmin}}. \quad (3.9)$$

Для зон, охватывающих петлю сопротивления фаза-земля, необходимо, кроме сопротивления дуги, учитывать также сопротивления грунта и опор ЛЭП (пределы этих величин принимаются в пределах от 5 до 50 Ом). При этом для сохранения точности замеров (с учетом влияния погрешностей на результат измерения) необходимо контролировать, чтобы уставки по активной составляющей для петли фаза-фаза, фаза-земля никогда не превышали величину $8X_{\text{уст}}$, где $X_{\text{уст}}$ – параметр срабатывания рассматриваемой характеристики по реактивной оси [66].

В некоторых случаях, производят расширение характеристики срабатывания по активному сопротивлению с правой стороны от оси ординат в 1,25 раза относительно значения, полученного по формуле (3.4). Уставка по активному сопротивлению левой стороны характеристики (от оси ординат) принимается равной половине уставки правой стороны.

В ситуациях, когда требование по быстродействию является определяющим, первую ступень дистанционной защиты настраивают таким образом, чтобы осуществить полный охват всей длины линии, включая шины смежных подстанций с коэффициентом чувствительности $k_{\text{ч}} = 1,25$, то есть:

$$(R + jX)_{\text{с.з.}} = k_{\text{ч}} \cdot \underline{Z}_{\text{л}}.$$

Выбор уставок срабатывания второй ступени

Вторая ступень служит для перекрытия «мертвой зоны» первой ступени, то есть обеспечивает надежное отключения КЗ всех видов на всей длине защищаемой линии с учетом вероятного существования переходного сопротивления в месте КЗ, достигающего расчетного значения $R_{\text{пер}} = 0 \div R_{\text{пер.расч}}$. В таком случае, уставка по сопротивлению срабатывания второй ступени дистанционной защиты от междуфазных КЗ и КЗ на землю должна быть такой, чтобы надежно охватывать защищаемую линию, включая шины смежной подстанции с коэффициентом чувствительности $k_{\text{ч}} = 1,25$.

Помимо обеспечения требуемого коэффициента чувствительности в конце защищаемого участка, уставка срабатывания реле сопротивления второй ступени дистанционной защиты должна удовлетворять следующим условиям:

- отстройка от КЗ на шинах низшего и среднего напряжения подстанции, примыкающей к противоположному концу линии;
- согласование с первыми ступенями защит смежных линий

$$\underline{Z}_{\text{с.з.}}^{\text{II}} \leq \frac{\underline{Z}_{\text{л}} + (1 - \alpha) \cdot \underline{Z}_{\text{с.з.}}^{\text{I}} / k_{\text{T}}}{1 + \beta + \delta} = k_{\text{отс}} \cdot \left(\underline{Z}_{\text{л}} + \frac{0,9 \cdot \underline{Z}_{\text{с.з.}}^{\text{I}}}{k_{\text{T}}} \right), \quad (3.10)$$

где $\underline{Z}_{\text{л}}$ - полное сопротивление защищаемой линии;

α - коэффициент, учитывающий погрешности ТТ и трансформатора напряжения в релейной аппаратуре в сторону уменьшения;

k_{T} - максимальный коэффициент токораспределения.

При отстройке от КЗ за трансформатором (автотрансформатором) необходимо использовать в расчёте наименьшее его сопротивление, которое может иметь место при регулировании напряжения:

$$\underline{Z}_{\text{с.з.}}^{\text{II}} \leq \frac{\underline{Z}_{\text{л}} + \underline{Z}_{\text{тр}}/k_{\text{T}}}{1 + \beta + \delta} = k_{\text{отс}} \cdot \left(\underline{Z}_{\text{л}} + \frac{\underline{Z}_{\text{тр.min}}}{k_{\text{T}}} \right), \quad (3.11)$$

где $\underline{Z}_{\text{тр.min}}$ - минимальное значение полного сопротивления трансформатора (автотрансформатора).

В выражениях (3.10) – (3.11) при выборе сопротивления срабатывания второй ступени дистанционной защиты учитывается коэффициент токораспределения k_{T} , который равен отношению первичного тока в защите к току в участке, с защитами которого производится согласование. Расчетным является значение коэффициента в таком реально возможном режиме работы, которому соответствует наименьшее значение сопротивления замера в месте установки рассматриваемой защиты.

Для большинства современных дистанционных защит выбор уставок выполняется отдельно по активной и реактивной составляющим в соответствии с рассмотренными выше условиями. Для ряда устройств, например производства АВВ, расчет уставок срабатывания от КЗ на землю осуществляется отдельно, но исходя из условий, предъявляемых для ступени от междуфазных замыканий.

Выбор параметров срабатывания активной составляющей производится аналогично расчету для первой ступени. Только расчет сопротивления дуги по выражениям (3.5) – (3.9) выполняется с учетом уменьшения расчетного минимального тока в конце зоны чувствительности второй ступени.

При необходимости учета увеличения длины и сопротивления дуги при действии защиты на отключение с выдержкой времени, можно воспользоваться следующим выражением [65]:

$$R'_{\text{дуги}} = R_{\text{дуги}} \cdot \left(1 + \frac{5 \cdot v \cdot t_{\text{в}}}{L} \right),$$

где $R_{\text{дуги}}$ - сопротивление дуги, определяемое по одному из выражений (3.5)-(3.9);

L - начальная длина дуги, м;

v - скорость ветра, м/с;

$t_{\text{в}}$ - время существования дуги.

Выбор уставок срабатывания третьей ступени

Третья ступень должна обеспечивать надежное отключение КЗ по всей длине защищаемой линии, а также выявлять повреждения на смежных присоединениях (резервирование).

Сопротивление срабатывания третьей ступени дистанционной защиты от междуфазных КЗ выбирается по нескольким условиям.

Во-первых, необходимо отстроиться от сопротивления замера в режиме максимального аварийного перетока мощности по линии:

$$Z_{\text{нагр}} = \frac{U_{\text{min}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{раб.мах}}},$$

где U_{min} - минимальное значение первичного напряжения в месте установки защиты в режиме самозапуска;

$I_{\text{раб.мах}}$ - максимальное значение первичного рабочего тока в защищаемой линии в режиме самозапуска.

При этом у современных дистанционных защит есть возможность выреза области сопротивления нагрузки, которая определяется параметрами $R_{\text{нагр}}$, $\varphi_{\text{нагр}}$, что позволяет увеличить зону срабатывания защиты при выполнении функции дальнего резервирования, так как условие отстройки от нагрузочного сопротивления при наличии такого выреза не является определяющим при выборе уставок срабатывания.

Во-вторых, необходимо обеспечить согласование со вторыми (третьими) ступенями дистанционных защит смежных линий:

$$\underline{Z}_{с.з.}^{\text{III}} \leq k_{\text{отс}} \cdot \left(\underline{Z}_{\text{Л}} + \frac{\underline{Z}_{\text{см}}^{\text{II(III)}}}{k_{\text{T}}} \right),$$

где $\underline{Z}_{\text{см}}^{\text{II(III)}}$ - сопротивление уставки второй (третьей) ступени дистанционной защиты смежной линии.

В-третьих, необходимо обеспечить требуемый коэффициент чувствительности к повреждениям за трансформаторами, установленными на противоположной подстанции:

$$\underline{Z}_{с.з.}^{\text{III}} \leq k_{\text{ч}} \cdot \left(\underline{Z}_{\text{Л}} + \frac{\underline{Z}_{\text{тр.мах}}}{k_{\text{T}}} \right),$$

где $\underline{Z}_{\text{тр.мах}}$ - наибольшее сопротивление трансформатора, которое может иметь место при регулировании напряжения изменением коэффициента трансформации.

Практический опыт использования дистанционных защит от междуфазных КЗ в Российской Федерации показывает достаточность применения трех ступеней, даже в сетях со сложной конфигурацией, поэтому традиционно третья ступень ДЗ выполняет функцию дальнего резервирования и выбирается исходя из условия обеспечения требуемого коэффициента чувствительности в конце зоны резервирования, то есть

$$\underline{Z}_{с.з.}^{\text{III}} \leq k_{\text{ч}} \cdot \underline{Z}_{\text{КЗ расч.}},$$

где $\underline{Z}_{\text{КЗ расч.}}$ - сопротивление замера в месте установки защиты при КЗ в расчетной точке.

3.3 Особенности выбора уставок дистанционных защит кабельных линий

В настоящее время в городских условиях широко распространены и продолжают внедряться кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ-изоляция). Это обусловлено тем, что использование кабельных линий уменьшает зоны отчуждения, приводит к снижению эксплуатационных расходов и электромагнитного воздействия на окружающую среду. В связи с этим в электроэнергетических системах многих стран осуществляется перевод городских воздушных линий электропередачи (ВЛ) в кабельное исполнение. При этом расчет параметров срабатывания защит, защищающих кабельные линии (КЛ), осуществляется по аналогии с расчетом ступенчатых защит ВЛ. Корректность такого подхода к расчёту уставок защиты вызывает сомнения, поскольку параметры линий воздушного и кабельного исполнения различаются существенно: если в полном сопротивлении ВЛ напряжением 110 кВ и выше преобладает индуктивная составляющая, то в КЛ этого же класса напряжения – и активное и индуктивное сопротивления порой соизмеримы. Например, для сталеалюминиевого провода АС-240/32 на напряжении 110 кВ удельное активное сопротивление равно 0,12 Ом/км, удельное реактивное – 0,405 Ом/км [67], а для КЛ такого же сечения токоведущей алюминиевой жилы – 0,16 Ом/км и 0,197 Ом/км при расположении фазных проводников в одной плоскости [68]. Более того, в связи с тем, что кабели с СПЭ-изоляцией легко воспламеняются, имеют невосстанавливаемую изоляцию и высокую стоимость, вопрос обеспечения высокой эффективности функционирования релейной защиты КЛ является актуальным.

Рассмотрим выбор параметров срабатывания первой ступени ДЗ КЛ с СПЭ-изоляцией на конкретном примере.

Линия 110 кВ состоит из двух участков длиной $l_1 = 2,35$ км и $l_2 = 5,93$ км, первый выполнен кабелем марки ПвЭгаПу 240/95 с удельным сопротивлением $\underline{Z}_{уд1} = 0,126 + j0,152$ Ом/км, а второй – кабелем марки

ПвЭгаПу 630/120 с удельным сопротивлением $Z_{уд2} = 0,032 + j0,163$ Ом/км. ТТ, установленные на рассматриваемой линии, имеют коэффициенты трансформации $K_I = 800/5$. Уставка срабатывания первой ступени защиты по оси индуктивного сопротивления, рассчитанная в соответствии с выражением (3.2), в первичных величинах равна $X_{с.з.}^I = 1,152$ Ом, во вторичных – $X_{ср.}^I = 0,167$ Ом. Полученное значение уставки срабатывания выставить на терминале защиты невозможно, поскольку диапазон изменения параметров, определяющих форму характеристик ДО направленных ступеней дистанционной защиты, реализованной на базе терминала ШЭ2607 НПП «ЭКРА» [12], равен $0,2 \div 100$ Ом на фазу при номинальном вторичном токе ТТ 5 А. Задание же минимального значения из диапазона приводит к невыполнению условия (3.2), то есть защита не обеспечивает отстройку от внешних КЗ. При этом корректировка полученного значения за счет увеличения коэффициента трансформации ТТ или установки промежуточного ТТ часто невозможна, так как это приводит к увеличению стоимости проекта и сложности выполнения требований нормативной документации.

Наиболее очевидным решением в рассматриваемом случае является вывод первой ступени. Если по каким-либо причинам этот вывод невозможен, то данную ступень можно вывести параметрически, то есть выставить минимально возможную уставку по сопротивлению срабатывания и максимально возможную выдержку времени. Недостатком данного подхода является невозможность выполнить требования, предъявленные в [22, 61], которые предусматривают на КЛ установку двух быстродействующих защит, где в качестве второй быстродействующей защиты используется комплект ступенчатых защит.

Для выполнения требований нормативно-технической документации в рассматриваемом случае предлагается использовать встроенные возможности современных микропроцессорных защит. Для этого выставляется минимальная уставка по сопротивлению и нулевая выдержка

времени первой ступени. Возможность неселективного действия устраняется блокировкой защиты до прихода разрешающего сигнала по каналам высокочастотной аппаратуры передачи команд (ВЧТО) при пуске второй ступени дистанционной защиты с противоположного конца.

При определении уставки срабатывания первой ступени по оси активного сопротивления используются выражения (3.5) – (3.9), позволяющие определить активное переходное сопротивление в месте повреждения и повсеместно используемые при расчете параметров срабатывания дистанционной защиты на ВЛ. Выполнение же расчета уставок защиты КЛ аналогично расчету уставок ВЛ, как рекомендуют производители защит, вызывает ряд вопросов. Если аналогию выбора уставок по реактивному сопротивлению срабатывания провести можно, то по активному сопротивлению срабатывания – затруднительно. Поскольку кабели с СПЭ-изоляцией высокого напряжения выполняются пофазно и имеют одножильную конструкцию, а их прокладка осуществляется в отдельных закрытых каналах, встает вопрос о возможности возникновения междуфазных металлических и дуговых КЗ на таких линиях. Поэтому расчет переходного сопротивления по формулам (3.5) – (3.9) применительно к КЛ является некорректным, поскольку неизвестно, какое значение длины дуги L необходимо принимать.

На рисунке 3.1 приведена характеристика срабатывания первой ступени дистанционной защиты, установленной на КЛ, определенная по оси X согласно формуле (3.2), по оси активного сопротивления на основании опыта эксплуатации по следующему выражению:

$$R_{I\text{ ст}} = 0,3 Z_{I\text{ ст}},$$

где $Z_{I\text{ ст}}$ - модуль сопротивления срабатывания первой ступени дистанционной защиты.

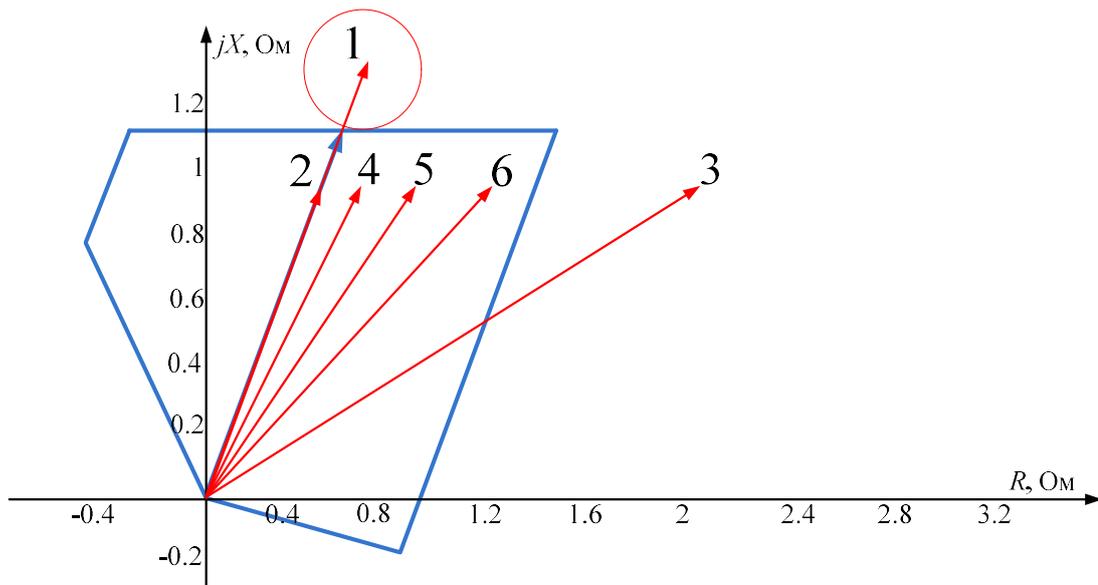


Рисунок 3.1 – Характеристика срабатывания первой ступени дистанционной защиты

1 – вектор полного сопротивления линии; 2 – вектор замера реле сопротивления при металлическом КЗ в зоне срабатывания защиты; 3-6 – векторы замера реле сопротивления при КЗ через переходное сопротивление в зоне срабатывания защиты, рассчитанное по выражениям (3.5)-(3.8) соответственно.

При металлическом КЗ в зоне действия защиты вектор замера реле сопротивления (вектор 2, рис.3.1) попадает в область срабатывания защиты. В случае КЗ в пределах зоны действия первой ступени, но через переходное сопротивление, величина которого рассчитана по одной из формул (3.5) – (3.9), вектор замера реле сопротивления (вектор 3, рис.3.1) может не попасть в область срабатывания, что приводит к несрабатыванию быстродействующей ступени защиты.

Таким образом, правильное определения величины сопротивления дуги и его учет при расчетах дает основание для постановки вопроса о выборе наиболее подходящей уставки срабатывания защиты и её характеристики.

С другой стороны, в [69] указано, что существуют определенные ограничения на задаваемую уставку срабатывания дистанционного органа первой ступени по активному сопротивлению, обусловленные указанием фирм-изготовителей защит. Например, для дистанционных органов, используемых в отечественной практике, значения переходных

сопротивлений, при которых обеспечивается их срабатывание, определяется условиями:

- для направленных реле сопротивления с круговыми характеристикой

$$R_{\text{ср}} \leq 0,5 Z_{\text{уст}} ; \quad (3.12)$$

- для направленных реле сопротивления с четырехугольной характеристикой

$$R_{\text{ср}} \leq 0,75 Z_{\text{уст}} . \quad (3.13)$$

В связи с вышеизложенным, предлагается выбирать $R_{\text{ср}}$ по алгоритму, представленному на рисунке 3.2. Здесь, в первую очередь, необходимо уточнить максимально возможное выставляемое на конкретном устройстве защит значение уставки срабатывания первой ступени дистанционной защиты по активной оси $R_{\text{макс}}^I$. Фактическая уставка срабатывания $R_{\text{ср}}^I$ не может быть больше этого значения. Далее присвоенное значение сравнивается с уставкой срабатывания $R_{\text{нагр}}^I$, рассчитанной исходя из обеспечения отстройки от максимально возможного нагрузочного режима. В подавляющем большинстве случаев $R_{\text{нагр}}^I$ всегда будет меньше $R_{\text{макс}}^I$, следовательно новое значение $R_{\text{ср}}^I$ будет равно $R_{\text{нагр}}^I$, тем не менее данное условие желательно проверить, особенно если используется панель защит ранее неизвестного производителя. На следующем этапе производится расчет уставки срабатывания по активному сопротивлению $R_{\text{огр}}^I$, исходя из рекомендуемых в [69] ограничений, по выражениям (3.12), (3.13). Сравнивая полученное значение с последним присвоенным значением уставки срабатывания $R_{\text{ср}}^I$, делается вывод о необходимости корректировки данной уставки. Особенно важным этапом является сравнение $R_{\text{ср}}^I$ со значением параметра срабатывания первой ступени по активному сопротивлению $R_{\text{пер}}^I$, выбранному исходя из обеспечения чувствительности к КЗ через переходной

сопротивление, рассчитанное по выражению (3.4), при этом для расчета непосредственно переходного сопротивления дуги предлагается использовать выражение (3.8), так как данная формула отражена в нормативно-технической документации, действующей на территории РФ. В случае, если $R_{\text{пер}}^I$ оказалось больше $R_{\text{ср}}^I$, то окончательная уставка приравнивается $R_{\text{пер}}^I$. Тем не менее, в виду неопределенности определения переходного сопротивления дуги предлагается выставлять уставку, взятую из диапазона от $R_{\text{пер}}^I$ до $R_{\text{нагр}}^I$ [70].

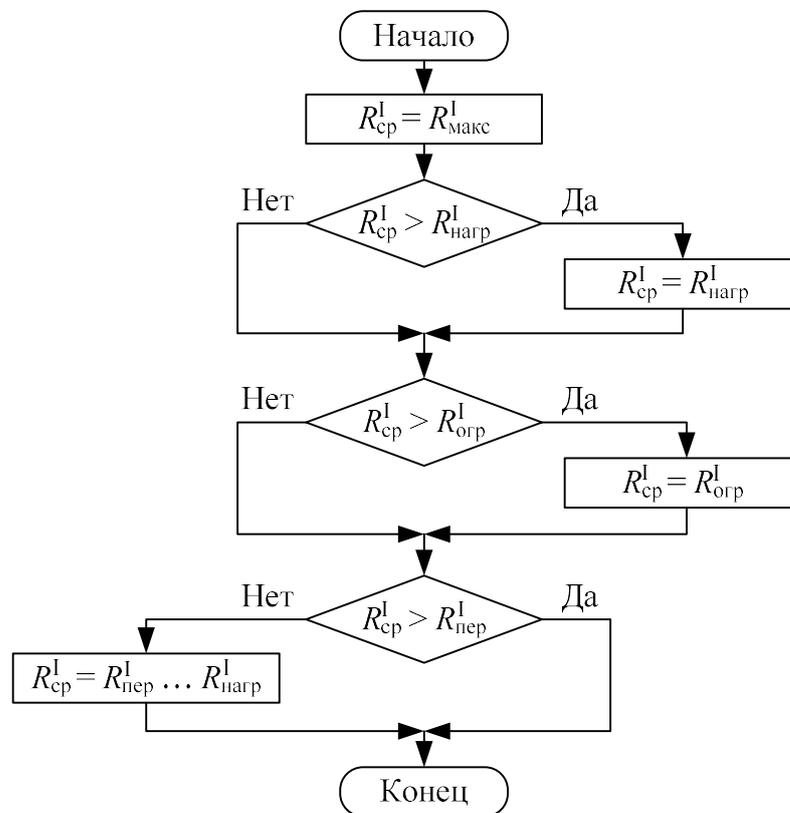


Рисунок 3.2 – Алгоритм расчета уставки первой ступени дистанционной защиты по активному сопротивлению

Алгоритм, представленный на рисунке 3.2 в большей степени подходит для создания программ автоматизированного расчета уставок. При ручном расчете нет необходимости проверки первых двух условий и в качестве начального значения $R_{\text{ср}}^I$ используется $R_{\text{огр}}^I$.

3.4 Особенности применения дистанционной защиты от междуфазных коротких замыканий на блоках линия - трансформатор

В связи с высоким процентом электроустановок, отработавших 25 лет и более, повсеместно ведутся работы по реконструкции и техническому перевооружению объектов энергетики. Старое оборудование заменяется на новые, более удобные в обслуживании и более надёжные устройства электроэнергетических систем.

В настоящее время, в силу существенных преимуществ, широко внедряются комплектные распределительные устройства с элегазовой изоляцией (КРУЭ), и осуществляется массовый перевод городских ВЛ на КЛ с преимущественным применением кабелей с СПЭ-изоляцией.

Применение КРУЭ получило широкое распространение благодаря значительному уменьшению габаритов подстанции при их применении. На таких подстанциях распределительные устройства занимают около 5 % её площади. Это значительно меньше по сравнению с комплектными устройствами, имеющими воздушную изоляцию. Кроме того, они имеют такие преимущества как более высокую эксплуатационную безопасность, повышенную надёжность, меньшее время монтажа и т.д. Переход от ВЛ на КЛ, выполненные с СПЭ-изоляцией активно осуществляется в связи с тем, что в этих кабелях отсутствуют жидкие компоненты, снижены эксплуатационные затраты, повышена пропускная способность, а также снижена трудоёмкость монтажа. В то же время, наряду с указанными преимуществами, КРУЭ и кабели с СПЭ-изоляцией предъявляют повышенные требования по ограничению длительности протекания через них токов повреждения, то есть к селективности, чувствительности и быстродействию устройств релейной защиты.

В соответствии с требованиями завода-изготовителя внутренние короткие замыкания в КРУЭ, сопровождающиеся токами, близкими по величине к номинальному току отключения, должны отключаться за время не более 0,1 с, для более низких токов допускается проводить отключение за

время не более 0,2 с. Невыполнение этих требований может приводить к прожигу оболочки КРУЭ. Кроме того, из-за повышения давления в повреждённом отсеке может срабатывать разрывной предохранительный диск, что вызывает снижение давления элегаза ниже уровня допустимого при эксплуатации. В этом случае дальнейшее развитие аварии при повторном зажигании дуги и время прожига оболочки не предсказуемы и катастрофичны.

К КЛ с СПЭ-изоляциями также предъявляются требования по предельно допустимой температуре, что жёстко регламентирует время срабатывания защит, обеспечивающих отключение близких КЗ, а также ближнее резервирование.

Таким образом, надёжная и бесперебойная работа ЭЭС может быть обеспечена только сочетанием правильного функционирования первичного оборудования и релейной защиты. Одной из составляющей обеспечения устойчивой работы ЭЭС в аварийных условиях является корректная работа устройств РЗ, которая в свою очередь зависит не только от аппаратной надёжности, но и от правильной настройки, то есть от грамотного конфигурирования и выбора параметров срабатывания принятого набора защит. В настоящее время всё более широкое распространение получают многофункциональные микропроцессорные устройства РЗ, которые по сравнению с защитами, выполненными на аналоговой элементной базе имеют существенно большие возможности для реализации сложных характеристик измерительных органов и алгоритмов работы защит. В то же время методические указания, которыми руководствуются проектные и эксплуатирующие организации, разработаны для защит, выполненных на традиционных принципах, не учитывают ни изменившихся требований к защитами, ни особенностей и возможностей современных защит. Всё это может приводить (а зачастую и приводит) к неселективным срабатываниям или недостаточной чувствительности, возникающим из-за неэффективного использования возможностей современных защит. Поскольку требования

нормативной технической документации к защите рассматриваемых объектов неоднозначны и окончательно не определены, вопрос правильного выбора параметров срабатывания устройств РЗ является важным и актуальным. Поскольку требования к защите рассматриваемых объектов в нормативной технической документации не определены, вопрос правильного выбора параметров срабатывания устройств РЗ является важным и актуальным.

Далее рассмотрим методики выбора параметров срабатывания устройств РЗ тупиковых линий 110 - 220 кВ, которые не нашли отражения в указаниях по расчёту уставок, например в [64].

Рассмотрим варианты выполнения защиты блоков линия - трансформатор.

На рисунке 3.3 (а) представлена типовая схема распределительного устройства (РУ) 110 кВ № 4Н: «два блока линия – трансформатор с выключателями в цепях трансформаторов и неавтоматической перемычкой со стороны линий» [71], с применением элегазовых модулей PASS-110 кВ и жесткой ошиновкой.

На рисунке 3.3 (б) отображена схема электроснабжения промышленного предприятия со сложным непрерывным длительно восстанавливаемым технологическим процессом, в которой силовые трансформаторы главных понизительных подстанций (ГПП) подключены по радиальным схемам, то есть подключение силовых понизительных трансформаторов выполнено от независимых источников внешней электрической сети через закрытое РУ 220 кВ. К такой схеме предъявляются повышенные требования по надежности электроснабжения, так как для таких подстанций характерен следующий состав нагрузки: 80% электроприемников I категории и по 10% электроприемников II и III категории.

На рисунке 3.3 (в) приведена типовая схема № 110-4 «два блока с отделителями и неавтоматической перемычкой со стороны линии» [71].

В схемах (а) и (б) на рисунке 3.3 питающие линии выполнены одножильными кабелями с СПЭ-изоляцией длина, которых варьируется от 1,5 до 4,5 километров.

Согласно [21, 22, 61] на линиях 110-220 кВ с односторонним питанием используются два комплекта ступенчатых защит, каждый из которых включает:

- токовую (если удовлетворяется требование селективности) или дистанционную защиту от многофазных КЗ;
- токовую направленную или ненаправленную защиту от КЗ на землю (ТЗНП).

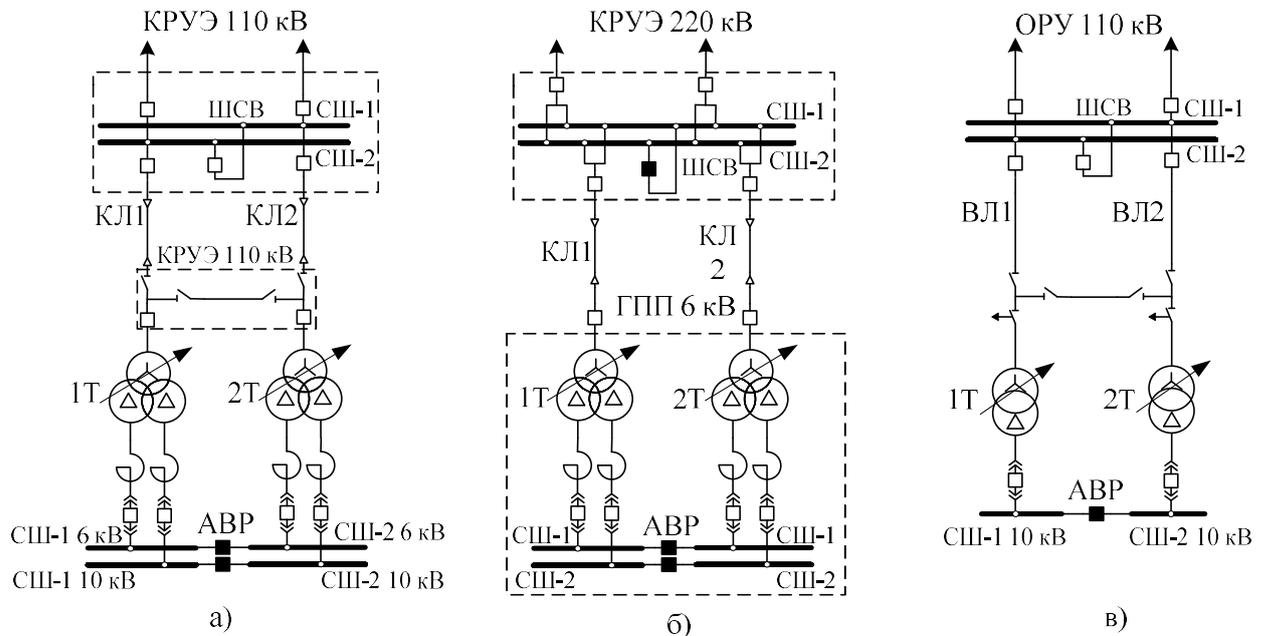


Рисунок 3.3 – Принципиальные электрические схемы распределительных устройств 110 – 220 кВ

а) схема № 110-4Н «два блока линия – трансформатор с выключателями в цепях трансформаторов и неавтоматической перемычкой со стороны линии»; б) две рабочие системы сборных шин; в) схема № 110-4 «два блока с отделителями и неавтоматической перемычкой со стороны линии».

Для защиты линий в таких схемах применяются терминалы, в которых реализованы описанные функции. Здесь рассматривается определение параметров срабатывания дистанционной защиты только от междуфазных

КЗ, поскольку задачу защиты от КЗ с участием земли выполняют ТЗНП. Одной из проблем выбора уставок для существующих терминалов защит является то, что на них часто оказывается невозможным выставить слишком маленькое необходимое сопротивление срабатывания первой ступени для короткой КЛ.

Для решения этого вопроса сначала обратимся к нормативной литературе. Согласно [64] на концевых участках радиальной распределительной сети рекомендуется применять двухступенчатую защиту от междуфазных КЗ. При этом сопротивление срабатывания первой ступени в целях повышения чувствительности предлагается выбирать из условий отстройки от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения ПС, примыкающей к противоположному концу линии. То есть выполнять неселективную защиту без выдержки времени. Благодаря этому мертвая зона в пределах защищаемой линии отсутствует. Неселективное действие первой ступени дистанционной защиты линии при КЗ в трансформаторе или ошиновке исправляется совместной работой АПВ защищаемой линии, защиты трансформатора и средств телемеханики: защита трансформатора передает сигнал на отключение выключателя линии по каналам телемеханики (или на включение короткозамыкателя трансформатора), а затем во время паузы АПВ отключается отделитель трансформатора. Такой способ выполнения защиты характерен для схемы (в) на рисунке 3.3 с использованием панелей ЭПЗ [5].

В качестве примера можно рассмотреть расчёт дистанционной защиты, выполненной на базе терминала серии SIPROTEC фирмы Siemens [13] для схемы (в), рисунок 3.3. Эта защита имеет пять независимых направленных ступеней с характеристиками срабатывания, имеющими форму параллелограммов. Параметры каждого параллелограмма задаются отрезками на осях R и X , углом наклона φ_d и сектором нагрузки с параметрами $R_{\text{нагр}}$ и $\varphi_{\text{нагр}}$.

Первичное сопротивление срабатывания первой ступени дистанционной защиты определяется исходя из условия отстройки от КЗ на шинах ПС, примыкающей к противоположному концу линии по выражению (3.1). Ступень выполняется с пуском АПВ и с нулевой выдержкой времени ($t_{cp} = 0$ с).

Параметры срабатывания второй ступени выбираются из условия обеспечения необходимого минимального коэффициента чувствительности при металлическом КЗ в конце защищаемой линии:

$$\underline{Z}_{с.з.}^{II} = k_{\text{ч}} \cdot \underline{Z}_{\text{л}},$$

где $k_{\text{ч}} = 1,25$ - коэффициент чувствительности.

Вторая ступень также выполняется с пуском АПВ и $t_{cp} = 0,05 - 0,3$ с.

Третья ступень защиты отстраивается от КЗ на шинах низшего (среднего) напряжения ПС, примыкающей к противоположному концу линии с запретом АПВ и $t_{cp} = 0,05 - 0,3$ с:

$$\underline{Z}_{с.з.}^{III} = k_{\text{отс}} \cdot (\underline{Z}_{\text{л}} + \underline{Z}_{\text{тр.мин}}), \quad (3.14)$$

где $\underline{Z}_{\text{тр.мин}}$ - наименьшее сопротивление трансформатора, которое имеет место при крайнем положении средств регулирования, соответствующем минимальному сопротивлению трансформатора.

Параметры срабатывания четвертой ступени дистанционной защиты определяются по условию обеспечения коэффициента чувствительности к КЗ на шинах низшего напряжения противоположной ПС:

$$\underline{Z}_{с.з.}^{IV} = k_{\text{ч}} \cdot (\underline{Z}_{\text{л}} + \underline{Z}_{\text{тр.макс}}), \quad (3.15)$$

где $k_{\text{ч}} = 1,2$ - коэффициент чувствительности;

$\underline{Z}_{\text{тр.макс}}$ - наибольшее сопротивление трансформатора, которое имеет место при крайнем положении средств регулирования, соответствующем максимальному сопротивлению трансформатора.

Ступень, обеспечивающая дальнейшее резервирование (четвертая), выполняется с запретом АПВ, а выдержка времени выбирается по условию согласования с защитой ввода НН (СН).

Пятая ступень защиты выполняет функцию пускового органа и её параметры срабатывания определяются по условию обеспечения необходимого запаса чувствительности по отношению к измерительным дистанционным органам.

Теперь рассмотрим выбор параметров срабатывания дистанционной защиты для питающих линий схем (а) и (б), рисунок 3.3.

При защите оборудования рассматриваемых схем необходимо учитывать требования, предъявляемые к КЛ по условию предельно-допустимой температуры жилы кабеля при протекании по нему тока КЗ, который должен быть отключен с наименьшей возможной выдержкой времени, а также запрета действия АПВ в случае внутреннего повреждения КРУЭ.

На основании изложенного и с учетом требований, предъявляемых к защите КЛ (согласно [22] на кабельных и кабельно-воздушных линиях должны устанавливаться две основные быстродействующие защиты), предлагается для защиты КЛ применять терминалы дифференциальной токовой продольной защиты линии (ДЗЛ) с использованием цифровых каналов связи, использование которых позволяет обеспечить быстродействующую селективную защиту данных линий. При этом не требуется исправлять неселективное действие одной из ступеней ДЗ применением АПВ линии, так как КЗ в трансформаторе и КЗ в линии четко выявляются своими защитами с абсолютной селективностью.

Защиту оборудования схемы (б) на рисунке 3.3 рассмотрим на примере терминалов защит производства фирмы АВВ REL_670, реализующие функцию ДЗЛ и комплекта ступенчатых защит (КСЗ) [72] (согласно [22] в терминале ДЗЛ должен быть предусмотрен КСЗ). Дистанционная защита в терминале REL_670 выполняет функции защиты от многофазных КЗ с

возможностью осуществления пяти независимых ступеней и дополненная средствами отстройки от нагрузочного режима.

С учётом того, что в качестве основной защиты КЛ приняты ДЗЛ и КСЗ, параметры срабатывания ступеней дистанционной защиты необходимо выбирать следующим образом:

Первичное сопротивление срабатывание первой ступени определяется по выражению (3.1) из условия отстройки от металлического КЗ на шинах ПС, примыкающей к противоположному концу линии. Ступень выполняется с запретом АПВ и с нулевой выдержкой времени ($t_{cp} = 0$ с).

Сопротивление срабатывания второй ступени определяется по условию отстройки от КЗ за понижающими трансформаторами согласно выражению (3.14). Вторая ступень также выполняется с запретом АПВ, $t_{cp} = 0,3$ с.

Третья ступень выполняет функцию дальнего резервирования. Уставка реле сопротивления третьей ступени определяется по выражению (3.15), исходя из требований достаточной чувствительности при КЗ в конце смежного участка. Ступень выполняется с запретом АПВ, а выдержка времени выбирается по условию согласования с максимальной токовой защитой на высокой стороне (МТЗ ВН) трансформатора.

Защиту КЛ в схеме (а), приведенной на рисунке 3.3, можно реализовать на базе терминалов защит производства НПП «ЭКРА», выполняющих функции КСЗ [12]. В этих терминалах реализована трехступенчатая дистанционная защита с характеристикой срабатывания реле сопротивления в виде параллелограмма с независимым заданием уставок по осям R и X . Предварительный расчет параметров срабатывания показал, что у этих терминалов при установке на коротких КЛ невозможно выставить уставки срабатывания первой ступени дистанционной защиты, выбранные по выражению (3.1). Поэтому защита коротких КЛ должна выполняться в виде двухступенчатой дистанционной защиты с неселективной первой ступенью, охватывающей с заданным коэффициентом чувствительности всю защищаемую линию. При этом неселективное действие исправляется АПВ

линии использованием передачи разрешающего сигнала, подтверждающего срабатывание защит трансформатора. Такое исполнение защиты коротких КЛ позволяет выполнять требование производителя КРУЭ о запрете АПВ при КЗ внутри распределительного устройства. Для этого первая ступень рассчитывается по выражению (3.14) для отстройки от КЗ за трансформатором противоположной ПС и действует без выдержки времени. Уставка реле сопротивления второй ступени определяется по выражению (3.15) для обеспечения достаточной чувствительности при КЗ в конце смежного участка. Выдержка времени второй ступени согласовывается с МТЗ ВН трансформатора [73].

3.5 Особенности применения дистанционной защиты от междуфазных коротких замыканий на трансформаторе блока «генератор–трансформатор»

Рассмотрим выбор параметров срабатывания резервных защит от междуфазных КЗ трёхобмоточного трансформатора блока «генератор–трансформатор», которые должны обеспечивать надежное ближнее и дальнее резервирование его основных защит и защит элементов прилегающей сети. В схемах защиты трехобмоточных трансформаторов, для резервирования отключений КЗ на шинах среднего напряжения и на элементах, присоединенных к этим шинам, на стороне среднего напряжения трансформатора дополнительно устанавливается максимальная токовая защита с комбинированным пуском напряжения [74].

Вопросы обеспечения необходимой чувствительности возникают не только при защите сетевых объектов. На рисунке 3.4, представлена схема объекта, на котором возникла проблема обеспечения чувствительности при защите от внешних симметричных КЗ трансформатора блока 2ГТ. Вследствие изменения схемы выдачи мощности станции, резервная защита перестала удовлетворять требованиям чувствительности, поэтому при реконструкции устройств релейной защиты на этом блоке применена защита, выполненная на дистанционном принципе, которая обладает большими

возможностями в обеспечении чувствительности и селективности по сравнению с токовыми, что обусловлено использованием более полной информации о токах и напряжениях защищаемого объекта.

Защита выполняется трёхрелейной на основе измерительных органов сопротивления и подключается к измерительным трансформаторам тока ТА (рис. 3.4) и напряжения со стороны среднего напряжения (в последующем именуемая, как «сторона 35 кВ») на линейные напряжения и разности фазных токов.

Защита включает в себя две ступени. Первая ступень, предназначенная для резервирования основной защиты трансформатора блока, направлена соответственно в трансформатор. Вторая ступень, направленная в сеть 35 кВ, обеспечивает дальнейшее резервирование защит присоединений прилегающей сети.

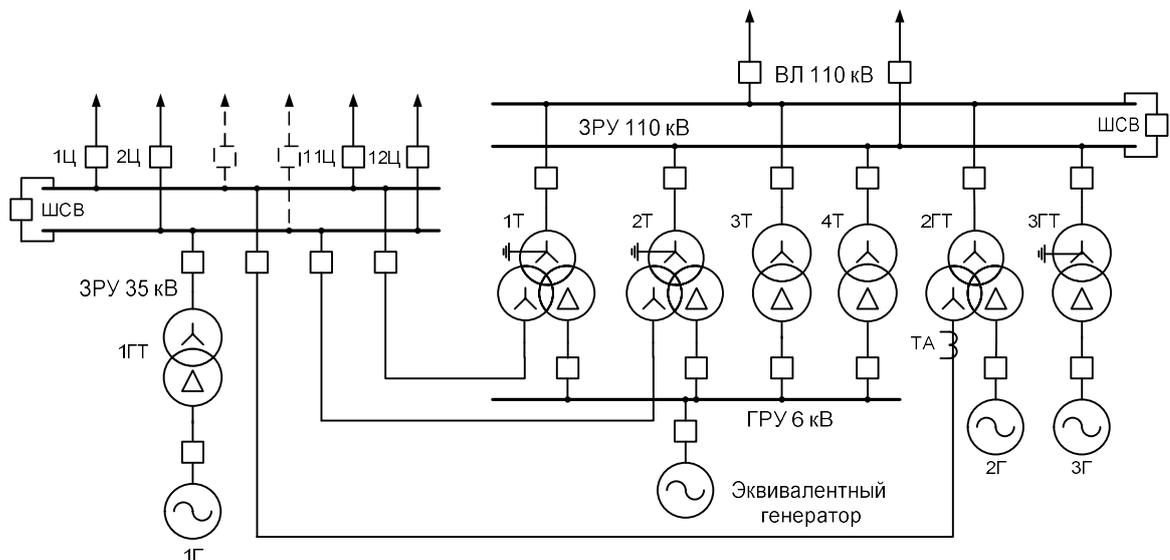


Рисунок 3.4 – Структурная схема рассматриваемой станции

Выбор параметров срабатывания рассматриваемой дистанционной защиты выполняется следующим образом.

1. Сопротивление срабатывания первой ступени, направленной в сторону трансформатора блока, отстраивается от минимального значения сопротивления замера защиты при металлическом КЗ на смежной стороне:

$$Z_{с.з.}^I \leq k_{отс} \cdot Z_{тр.мин}, \quad (3.16)$$

где $k_{отс} = 0,85$ - коэффициент отстройки;

$Z_{тр.мин}$ - минимальное сопротивление трансформатора, Ом.

2. Сопротивление срабатывания второй ступени дистанционной защиты определяется исходя из требований достаточной чувствительности при КЗ в конце зоны резервирования, то есть в самой удалённой точке по сопротивлению в резервируемой сети, отходящей от шин 35 кВ, а также по условию отстройки от режима наибольшей реально возможной нагрузки, то есть по выражениям:

- для круговой характеристики:

$$Z_{с.з.}^{II} = k_{ч} \cdot \frac{Z_{расч}}{K_{т.мин}},$$

- для полигональной характеристики:

$$X_{с.з.}^{II} = k_{ч} \cdot \frac{X_{расч}}{K_{т.мин}},$$

где $k_{ч}$ - коэффициент чувствительности, равный 1,2;

$Z_{расч}$, $X_{расч}$ - наибольшее сопротивление присоединения, отходящего от шин 35 кВ, Ом;

$K_{т.мин}$ - минимальный коэффициент токораспределения.

Первичное сопротивление срабатывания по активной оси выбирается по условию обеспечения требуемой чувствительности к активной составляющей замеров, зависящих от переходного сопротивления в месте КЗ по выражению:

$$R_{с.з.}^{\text{II}} = k_{\text{ч}} \cdot (R_{\text{КЗ}} + R_{\text{дуги}}),$$

где $R_{\text{КЗ}}$ – действительная составляющая сопротивления замера реле при металлическом КЗ в расчетной точке;

$R_{\text{дуги}}$ – сопротивление дуги.

Для полигональной характеристики уставка по активной оси, гарантирующая отстройку от заданного перетока мощности, определяется по выражению:

$$R_{\text{нагр}} = 0,8 \cdot Z_{\text{нагр}} \cdot \cos \varphi_{\text{раб}},$$

где $Z_{\text{нагр}}$ - сопротивление нагрузки;

$\varphi_{\text{раб}}$ - угол полного сопротивления нагрузки в рассматриваемом режиме после отключения внешнего КЗ.

Сопротивление нагрузки определяется по выражению

$$Z_{\text{нагр}} = \frac{U_{\text{мин}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{нагр}}},$$

где $U_{\text{мин}} = 0,8 \div 0,9 U_{\text{ном}}$ - минимальное значение первичного напряжения в месте установки защиты, кВ;

$I_{\text{нагр}}$ - максимальное значение рабочего тока стороны трансформатора, на которой установлена рассматриваемая защита, кА.

Допустимый угол нагрузки выбирается по условию:

$$\varphi_{\text{нагр}} \geq \varphi_{\text{раб}} + 12^\circ.$$

Время срабатывания второй ступени выбирается по условию согласования с резервными защитами присоединений, отходящих от распределительного устройства 35 кВ.

Защита выполняется, как правило, с двумя выдержками времени: с первой - на деление системы шин на стороне 35 кВ, со второй - на отключение блока от сети 35 кВ.

Стоит отметить, что вторая ступень защиты чувствительна к любым КЗ на ошиновке, поскольку ТН, к которому подключена защита, находится на шинах 35 кВ ЗРУ, и, как следствие, сопротивление замера в этих режимах попадает в область срабатывания рассматриваемой ступени.

Далее производится выбор подходящей формы характеристики срабатывания реле сопротивления на основе полученных векторов замера, определенных по выше описанным расчетным условиям, исходя из общих требований к формам характеристик срабатывания реле сопротивления ступеней дистанционной защиты, которые заключаются в обеспечении уверенного выполнения заданных функций в реальных условиях функционирования [75]. Здесь необходимо учитывать возможности современных цифровых устройств дистанционной защиты, которые, как правило, используют две характеристики срабатывания: круговую и полигональную, и в общей сложности могут иметь до шести независимых ступеней и восьми ступеней выдержек времени срабатывания.

Как показали расчёты, в качестве первой ступени возможно использование измерительного органа как с круговой характеристикой срабатывания, так и с полигональной, расположенной в III-IV квадрантах и проходящей через начало координат.

Параметры срабатывания характеристики срабатывания второй ступени ДЗ (первичные значения) при использовании круговой и эллиптической характеристик приведены на рисунке 3.5), при использовании полигональной характеристики – в таблице 3.1, на рисунке 3.6.

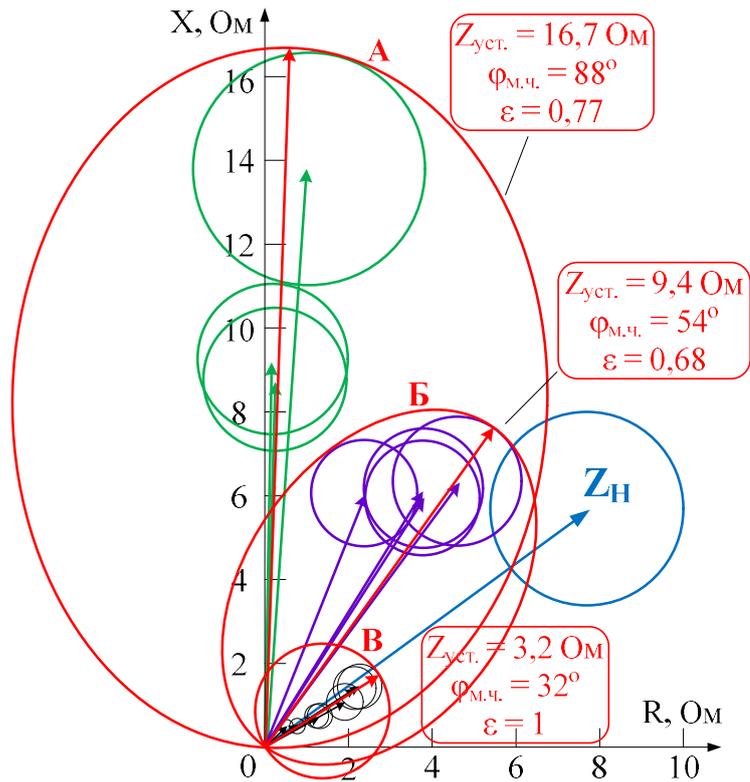


Рисунок 3.5 – Эллиптические и круговые характеристики срабатывания измерительных органов сопротивления второй ступени

Таблица 3.1 – Параметры срабатывания дистанционных органов 2 ступени защиты при использовании полигональных характеристик (первичные величины)

Обозначение на рисунке	$X_{уст.}$, Ом	$R_{уст.}$, Ом	$\varphi_{м.ч.}, ^\circ$	$\varphi_2, ^\circ$	$\varphi_3, ^\circ$	$\varphi_4, ^\circ$	$R_{нагр.}$, Ом	$\varphi_{нагр.}, ^\circ$
А	16,6	5,2	88	-15	115	0	—	—
Б	8	3,75	58	-15	115	0	5,4	48
В	2	1,54	35	-15	115	-30	—	—

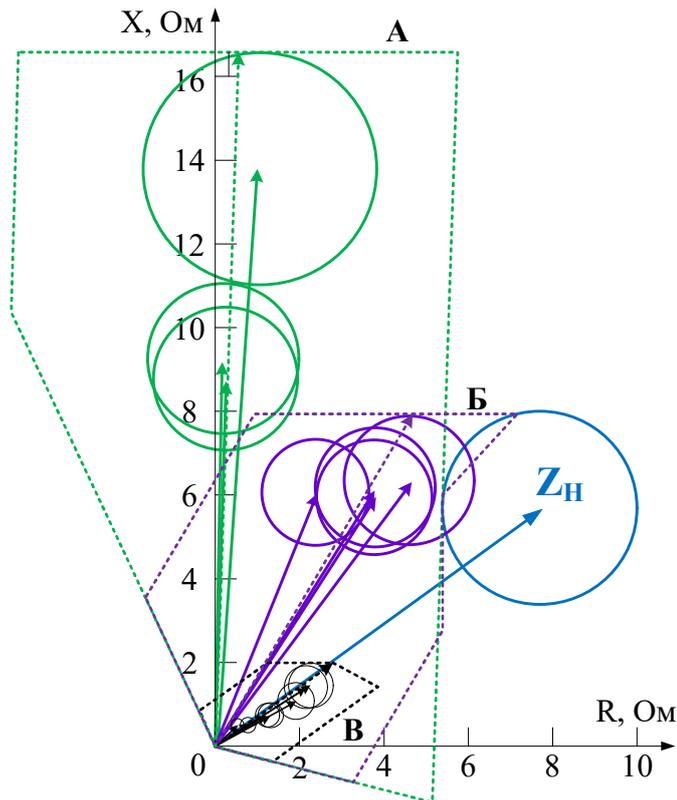


Рисунок 3.6 – Полигональные характеристики срабатывания измерительных органов сопротивления второй ступени

На рисунках 3.5 и 3.6 в векторной форме изображены сопротивления на зажимах реле при металлических КЗ в конце смежных элементов. При этом вектора сопротивлений, отмеченные *зеленым* цветом, соответствуют КЗ за силовыми трансформаторами, подключенными к ЗРУ 35 кВ, *фиолетовым* – в конце воздушных линий, отходящих от ЗРУ 35 кВ, *черным* – в конце кабельных линий, отходящих от данного распределительного устройства. Вокруг концов векторов сопротивлений замеров показаны окружности, радиус которых определяется требуемым коэффициентом чувствительности. В таком случае, при построении характеристики срабатывания, огибающей вектора сопротивлений замера в расчетных точках с учётом вышеописанных окружностей, надёжное срабатывание реле (с требуемой кратностью) при проверке чувствительности обеспечивается.

Выполнив расчет параметров срабатывания резервной дистанционной защиты от междуфазных КЗ блока генератор - трансформатор 2ГТ мощностью 63 МВт стороны 35 кВ, принято, что в качестве второй ступени

дистанционной защиты, обеспечивающей дальнейшее резервирование, возможно использовать один измерительный орган с полигональной характеристикой и вырезом, обеспечивающим отстройку от нагрузочных режимов. Более целесообразным является использование нескольких ИО с полигональными характеристиками срабатывания (рис. 3.6), так как выбор параметров срабатывания ИО можно проводить для каждой группы присоединений независимо. Выходные цепи используемых ИО должны быть включены по схеме ИЛИ, то есть при срабатывании любого из них должен запускаться отсчет выдержки времени.

Дополнительным преимуществом использования нескольких ИО является возможность ускорения ступени при попадании сопротивления замера в область срабатывания, характерную только для конкретной группы присоединений, то есть при попадании в одну из рассматриваемых областей вторая ступень дистанционной защиты может отработать с выдержкой времени, согласованной с временами резервных защит только рассматриваемой группы [60].

3.6 Особенности применения дистанционной защиты от междуфазных коротких замыканий на кабельно-воздушных линиях

При выборе параметров срабатывания дистанционной защиты в нормативной литературе и в большинстве методических указаний рассматриваются только характерные (типовые) участки энергосистемы. В настоящее время в связи с развитием кабельных сетей всё чаще строятся кабельно-воздушные линии (КВЛ), для расчёта релейной защиты которых типовые методики оказываются непригодными. По этой причине возникла необходимость разработки методов выбора параметров срабатывания дистанционной защиты для КВЛ.

Рассмотрим на примере выбор параметров срабатывания дистанционной защиты для реактированной КВЛ [76] с двухсторонним питанием (рис. 3.7).

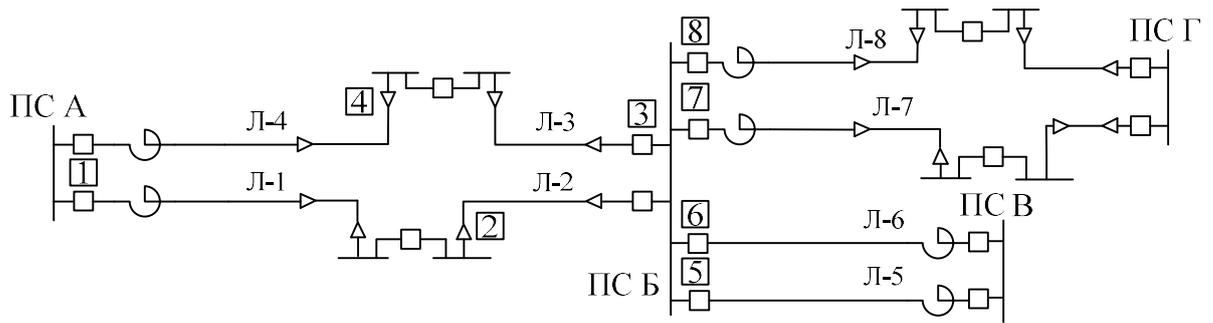


Рисунок 3.7 – Участок электрической сети с реактированными КВЛ

При определении уставок необходимо учитывать, что жилы кабелей, которыми выполнены участки КВЛ, не допускают по предельно-допустимой температуре время срабатывания резервной защиты (второй ступени дистанционной защиты) более 0,613 секунд (для кабеля на участке линии Л-3).

Первичные сопротивления срабатывания ступеней дистанционной защиты, обеспечивающих ближнее резервирование, определяются по условиям отстройки от КЗ в конце защищаемого участка или в конце первой зоны следующего участка, а резервных ступеней - по условию обеспечения требуемого коэффициента чувствительности в конце смежного участка для всех возможных режимов работы первичной сети.

Наиболее сложен выбор параметров срабатывания второй ступени.

Рассмотрим определение параметров срабатывания защиты 3. Сопротивление срабатывания второй ступени защиты линии Л-3 при данной конфигурации сети определяется из условия согласования с первой ступенью защиты 4 линии Л-4, а выдержка времени принимается равной на ступень селективности большей, чем выдержка времени быстродействующей защиты следующего участка с учетом времени действия устройства резервирования при отказе выключателей (УРОВ) [64]. В данном случае выдержка времени второй ступени составляет 0.8 секунд. В связи с этим для выполнения требований по обеспечению термической стойкости кабеля желательно, чтобы все повреждения на рассматриваемой линии отключались без дополнительных задержек. Этого можно достичь путем использования

телеускорения защиты передачей соответствующей команды по каналам связи ВЧТО. Таким образом, ступенчатая защита с относительной селективностью на линии Л-2 при использовании каналов связи для обмена логической информацией о действии измерительных органов, установленных по концам защищаемого элемента, превращается в быстродействующую защиту с абсолютной селективностью с косвенным сравнением сигналов по концам защищаемого объекта [7]. В таком случае быстродействие ступенчатой защиты реализуется путём передачи разрешающего сигнала от ступени с неполным охватом защищаемой зоны для ускорения второй ступени дистанционной защиты противоположного конца.

Теперь выполним расчет уставок срабатывания защиты 1.

Сопrotивление срабатывания второй ступени защиты 1 определяется из условия согласования с первой ступенью защиты 2 линии Л-2. Результаты расчета параметров срабатывания второй ступени защиты 1 представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Сопrotивление срабатывания $Z_{с.з.1}^{\text{II}}$

Расчетное условие	Значение, Ом	$k_{\text{ч}}$
Согласование с первой ступенью защиты 2	$4,62+j8,992$	0,91
Согласование со второй ступенью защиты 2	$8,63+j10,659$	1,08

В соответствии с полученными результатами вторая ступень дистанционной защиты $Z_{с.з.1}^{\text{II}}$ не удовлетворяет требованию чувствительности ($k_{\text{ч}} > 1,25$) при повреждениях в конце защищаемой линии. Мера по повышению чувствительности в зоне ближнего резервирования путем согласования со второй ступенью защиты линии Л-2 является неэффективной ($k_{\text{ч}} = 1,08 < 1,25$). В связи с этим, для обеспечения чувствительности и приемлемой выдержки времени второй ступени дистанционной защиты, обеспечивающей ближнее резервирование основной защиты линии Л-1, необходимо, чтобы КЗ, возникающие на линии Л-2, были отключены

защитами без выдержек времени, то есть возникает потребность ускорения действия ступенчатой защиты средствами команд ВЧТО.

В таком случае, сопротивление срабатывания второй ступени защиты 1 (рисунок 3.7) определяется следующими условиями:

- отстройка от КЗ на шинах подстанции В при двух линиях на участке подстанции Б - подстанции В;
- согласование с первой ступенью защит 3, 7, 8.

Результаты расчета приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Сопротивление срабатывания $Z_{с.з.1}^{\text{II}}$ с учетом телеускорения защит на линии Л-2

Расчетное условие	Значение, Ом	$k_{\text{ч}}$
Согласование с первой ступенью защиты 3	6,14+j11,499	1,16
Согласование со второй ступенью защиты 3	13,328+j28.09	-
Отстройка от КЗ на шинах подстанции В	8,38+j16,64	1.5
Согласование с первой ступенью защиты 7	14,78+j24,63	-
Согласование с первой ступенью защиты 8	15,81+j26,18	-

Согласно полученным результатам определяющим условием при выборе первичного сопротивления срабатывание второй ступени защиты 1 стала отстройка от КЗ на шинах подстанции В. При такой уставке обеспечивается надежное ближнее резервирование защищаемой линии.

Из таблицы 3.3 также видно, что согласование с первой ступенью защиты 3 является определяющим условием, но в этом случае требования чувствительности не обеспечиваются. Поэтому ускорение действия ступенчатых защит на линиях Л-2 и Л-3 рассматриваемого участка сети является наиболее целесообразным решением.

Выводы по главе 3

1. В расчётах параметров срабатывания быстродействующих ступеней дистанционных защит кабельных линий применение в явном виде методик расчета защит воздушных линий некорректно. Здесь необходимо учитывать переходное сопротивление в месте КЗ, которое не совпадает с аналогичным сопротивлением на воздушных линиях, и диапазон регулирования уставки срабатывания по сопротивлению используемого терминала защит. В общем случае, рекомендуется выбирать уставки по активному сопротивлению из условия ограничения максимально допустимого выставляемого значения.

2. Методики, используемые для расчёта дистанционных защит ВЛ, прямо применять при выборе параметров срабатывания дистанционной защиты КЛ и, особенно, при наличии КРУЭ не позволяют учесть все их особенности, поскольку как при выборе необходимого набора защит, так и применяемых аппаратных средств защиты необходимо учитывать требования не только нормативно-технических актов, но и требования к установленному на объекте защиты оборудованию, поскольку заводские требования часто оказываются более жесткими, чем требования нормативно-технических актов.

3. Использование типовых методик расчета уставок дистанционных защит элементов ЭЭС от междуфазных КЗ в ряде случаев не позволяет обеспечить чувствительность, требуемую при защите кабельных линий, кабельно-воздушных линий и оборудования с элегазовыми выключателями.

4. Использование расширенных возможностей современных защит позволяет выбрать такой набор параметров срабатывания защит, который обеспечит необходимые селективность и чувствительность их действия, а также в полной мере удовлетворит требованиям, обусловленным особенностями современного вновь устанавливаемого первичного оборудования электроэнергетических систем.

5. Предложенный способ к использованию в ступени дистанционной защиты, установленной на трансформаторе блока, одновременно нескольких

независимых измерительных органов заданной конфигурации не только позволяет достичь необходимую чувствительность устройств и обеспечить надежную отстройку от нагрузочного режима, но и даёт проектировщику устройств РЗ дополнительный инструментарий, расширяющий возможности выбора уставок защит в сетях сложной конфигурации. Использование такого подхода не позволяет в явном виде выставить рассчитанные уставки на конкретных микропроцессорных терминалах РЗ, так как в последних для каждой ступени ДЗ реализован лишь один ИО. При необходимости следует использовать незадействованные, но реализованные в устройстве (зачастую с избытком), ступени и по схеме ИЛИ объединять уже управляющие воздействия ступеней с одинаковыми выдержками времени.

ГЛАВА 4 ФОРМИРОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ПРОВЕРКЕ ПРАВИЛЬНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ОРГАНА В АСИНХРОННОМ РЕЖИМЕ

4.1 Постановка задачи

Описанный в главе 2 дистанционный орган позволяет задать его характеристику срабатывания такой формы, которая наиболее полно соответствует требованиям конкретных видов РЗ и ПА, а также учитывает особенности режима работы энергосистемы в целом и первичного оборудования в частности. Это позволяет повысить устойчивость функционирования ДО в сложных переходных режимах по сравнению с аналогичными устройствами, выполненными на электромеханической или микроэлектронной базе. Такими же характеристиками обладают и дистанционные органы, выполненные на базе современных микропроцессорных устройств. Однако по мере усложнения характеристики ДО (вне зависимости от производителя) [77–80] возрастают и требования к качеству его функционирования в различных аварийных режимах [81, 82].

Возникновение крупных аварий в электроэнергетических системах характеризуется нарушением баланса мощностей, сопровождающимся отклонением частот генераторов электрических станций. При этом устройства релейной защиты и автоматики функционируют в условиях, отличающихся от обычных, и в ряде случаев могут действовать неправильно, что в свою очередь может приводить к излишним отключениям объектов энергосистемы и дальнейшему развитию аварий. С учетом этого вопросы анализа поведения дистанционных органов (ДО) при асинхронном режиме и качаниях в энергосистеме являются особенно важными [7].

Большой интерес с точки зрения анализа и проверки ДО представляет асинхронный режим (АР), в котором годограф вектора сопротивления замера Z_p пересекает характеристику ДО или находится в непосредственной близости от неё. Важно отметить, что в зависимости от области использования ДО цели его проверки в АР могут существенно отличаться.

Для ДО, используемого в защитах линий, в рассматриваемом режиме необходимо оценить:

- надёжность несрабатывания защиты при прохождении годографа сопротивления замера через зону действия ДО;

- уставку блокировки защиты при качаниях и АР.

Проверка ДО, используемого в ПА, например в устройствах автоматики ликвидации асинхронного режима (АЛАР) [83], позволяет оценить:

- надежное несрабатывание автоматики при прохождении годографа вектора сопротивления замера в максимальной близости к любой из границ характеристики срабатывания ДО, не пересекающего его в течение всей длительности аварийного режима;

- надежное срабатывание автоматики в АР с заданным периодом при прохождении годографа сопротивления замера через зону действия используемого ДО;

- время срабатывание автоматики при прохождении годографа вектора сопротивления замера через характеристику срабатывания ДО в максимальной близости к любой из её границ (высокое быстроедействие – недостижимый параметр при использовании традиционных устройств и алгоритмов).

4.2 Проверка дистанционного органа стандартными средствами устройства «РЕТОМ»

Оценить устойчивость функционирования ДО в асинхронных режимах позволяют специализированные программно-аппаратные комплексы, например устройства РЕТОМ-51(61) [84], формирующие сигналы тока и напряжения посредством имитации аварийных режимов в приложении «RL-модель энергосистемы».

Однако при моделировании АР в данном приложении наибольшую сложность представляет задача определения параметров модели энергосистемы, использование которых позволяет получить годограф

сопротивления замера с требуемыми параметрами. Параметрами годографа моделируемого режима, имеющего вид окружности, являются: диаметр окружности и положение её центра на комплексной плоскости, а также направление движения вектора сопротивления замера (по или против часовой стрелки). В руководстве по эксплуатации [84] отсутствуют рекомендации по выбору параметров «RL-модель энергосистемы» для получения годографа с необходимыми параметрами. Это создаёт существенные трудности при проведении пуско-наладочных и проверочных работ средств РЗ и ПА.

При исследовании используется первый тип модели энергосистемы (рис. 4.1) приложения «RL-модель энергосистемы» устройства РЕТОМ-51(61). В качестве расчётного рассматривается режим, в котором годограф вектора сопротивления замера касается в комплексной плоскости верхнего основания характеристики срабатывания ДО, таким образом, что минимальное сопротивление замера в АР совпадает с точкой пересечения характеристики органа направления мощности (ОНМ) для устройства АЛАР (линии максимальной чувствительности для РЗ) и верхнего основания характеристики ДО (рис. 4.2).

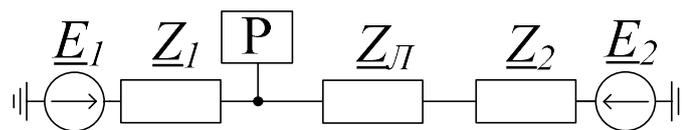


Рисунок 4.1 – Расчетная модель энергосистемы

$\underline{E}_1, \underline{E}_2$ – векторы ЭДС эквивалентных систем $C1$ и $C2$ соответственно;
 $\underline{Z}_1, \underline{Z}_L, \underline{Z}_2$ – векторы сопротивлений систем $C1, C2$ и линии соответственно;
 P – место установки РЗ (ПА).

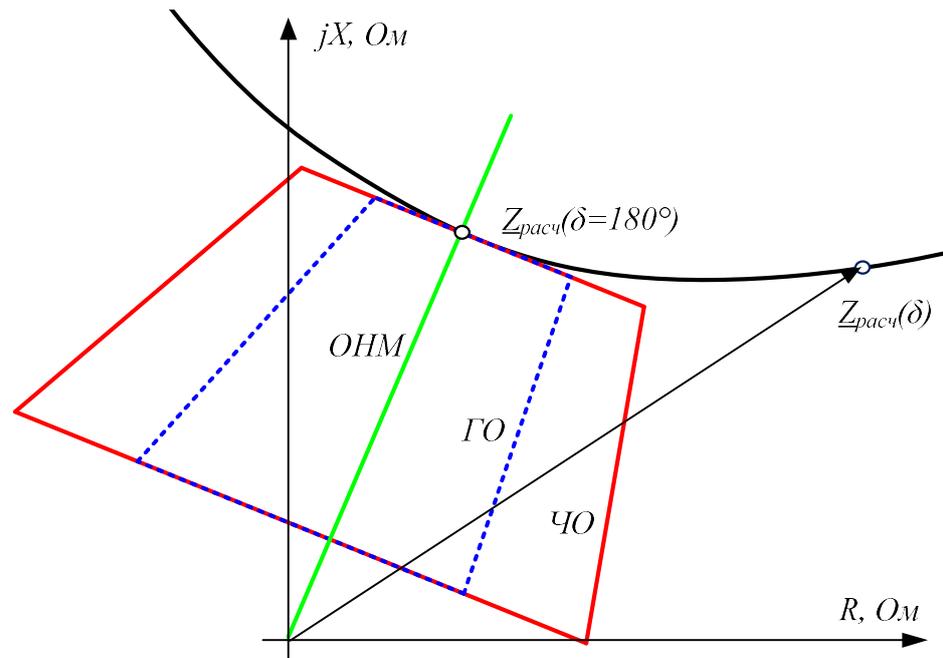


Рисунок 4.2– Годограф расчетного АР и характеристики срабатывания измерительных органов АЛАР

ГО, ЧО – грубый и чувствительный органы АЛАР;

$Z_{расч}(\delta)$ – зависимость измеряемого сопротивления замера в расчетном режиме от взаимного угла между ЭДС энергосистем

Основным допущением при моделировании АР в расчетной модели энергосистемы (рис. 4.1) является постоянное скольжение ЭДС относительно друг друга. В действительности оно не остаётся постоянным и содержит колебательную составляющую. Тем не менее, учет этой колебательной составляющей не приведет к изменению траектории годографа сопротивления замера.

При определении параметров энергосистемы, соответствующих расчетному режиму, для уменьшения количества исходных данных целесообразно принять следующие допущения [85]:

- 1) сопротивление линии Z_L равно нулю;
- 2) аргументы векторов сопротивлений систем Z_1, Z_2 равны углу максимальной чувствительности исследуемой характеристики ДО.

Первое допущение объясняется тем, что Z_L характеризует лишь часть общего сопротивления плеча от места установки защиты до ЭДС системы 2,

поэтому пренебрежение им не приводит к каким-либо осложнениям при расчете АР. Использование второго допущения позволяет формировать годограф вектора сопротивления при АР, минимальное и максимальное сопротивления которого лежат на срединной линии трапецеидальных характеристик срабатывания ДО.

Для используемой модели (рис. 4.1) зависимость сопротивления $\underline{Z}_p(\delta)$, измеряемого ДО в месте установки РЗ (ПА), в том числе и в расчетном режиме, при пренебрежении постоянной входа в асинхронный режим (то есть $\tau_{ax} = 0$ с [84]) с учетом некоторых преобразований может быть представлена следующим выражением [86]:

$$\underline{Z}_p(\delta) = \underline{Z}_\Sigma \cdot \frac{1}{1 - \frac{\underline{E}_2(\delta)}{\underline{E}_1(\delta)}} - \underline{Z}_1, \quad (4.1)$$

где $\underline{Z}_\Sigma = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2$ - суммарное сопротивление между ЭДС систем С1 и С2.

Значение \underline{Z}_Σ может быть определено из ограничений по максимальному и минимальному току АР (при наличии таких ограничений). Тем не менее, это сопротивление должно быть принято больше по модулю, чем, значение сопротивления замера в расчетном режиме при угле между ЭДС в 180° ($\underline{Z}_{расч}(\delta = 180^\circ)$), которое однозначно определяется по уставкам исследуемой характеристики ДО.

При моделировании АР зачастую требуется сменить расположение годографа сопротивления замера относительно исследуемой характеристики ДО. Например, вместо расположения годографа над верхней стороной области срабатывания в комплексной плоскости необходимо расположить его под нижним основанием ДО. Для этого достаточно изменить направление перетока мощности по линии в доаварийном режиме на противоположный (т.е. изменить соотношение модулей $\underline{E}_1, \underline{E}_2$) путем увеличения (уменьшения) угла между напряжением и током в месте установки защиты φ_p на 180° .

Здесь необходимо учитывать диапазон допустимых значений данного параметра (от 0° до 360°), вводимого в приложении «RL-модель энергосистемы».

В случае, если при заданных параметрах модели энергосистемы (рис. 4.1) требуется изменить направление траектории движения уже сформированного годографа вектора сопротивления замера (данное мероприятие, как правило, требуется для корректного определения сигналов «ускорение» и «торможение» системы в устройствах АЛАР, зависящих от знака скольжения между ЭДС систем), необходимо выбрать такой угол нагрузки φ_P , который позволяет получить вектор отношения ЭДС энергосистем, сопряженный аналогичному вектору в предыдущем режиме. Для этого достаточно «зеркально» отразить вектор тока нагрузки в доаварийном режиме относительно линии максимальной чувствительности. Здесь следует отметить, что данный приём наиболее удобно применять в том случае, если и углы сопротивлений энергосистем, и угол нагрузки φ_P равны углу максимальной чувствительности. В таком случае, изменение угла φ_P на малое значение ($\pm 0,5 \dots 1^\circ$) приводит к желаемому изменению характера асинхронного режима. Например, если в режиме «1» $\varphi_P = 70^\circ$, то в режиме «2» φ_P должен быть равен 71° или 69° . Здесь под режимами «1» и «2» подразумеваются режимы с одинаковыми исходными параметрами сети (кроме φ_P), годографы сопротивлений замера которых одинаковы и располагаются в одном и том же месте на комплексной плоскости, но направление движения сопротивлений замера различно.

В предыдущем абзаце указано ещё одно допущение – это приравнивание φ_P углу максимальной чувствительности. При этом сопротивление замера Z_P в доаварийном режиме располагается на линии максимальной чувствительности. Следовательно, амплитуду изменения сопротивления замера необходимо подобрать таким образом, чтобы конец сформированного вектора сопротивления замера располагался вне зон действия ДО. Определившись со значением Z_P (предпочтение следует

отдавать сопротивлению, большему, чем максимальное сопротивление срабатывания для рассматриваемой характеристики) и задаваясь произвольным значением доаварийного напряжения U_p , можно легко определить необходимый подаваемый доаварийный ток I_p .

Следует отметить, что в приложении «RL-модель энергосистемы» испытательного комплекса РЕТОМ-51(61) ввод параметров энергосистемы (рис.4.1), расчет годографа сопротивления, а также выдаваемых токов и напряжений осуществляется во вторичных значениях. Следовательно, если уставки характеристики исследуемого ДО заданы в первичных значениях, то в процессе подбора желаемого режима необходимо проводить дополнительные преобразования, связанные с учетом коэффициентов трансформации тока и напряжения измерительных трансформаторов. Связь между первичными и вторичными значениями сопротивлений выражается следующей формулой:

$$\underline{Z}_{зам(1)} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{I_2} \cdot \frac{K_{ТН}}{K_{ТТ}} = \underline{Z}_{зам(2)} \cdot \frac{K_{ТН}}{K_{ТТ}}, \quad (4.2)$$

где $\underline{Z}_{зам(1)}$, $\underline{Z}_{зам(2)}$ - измеряемое значение сопротивления, выраженное в первичных и вторичных величинах, соответственно;

\underline{U}_2 , \underline{I}_2 – соответственно векторы вторичных значений напряжения и тока, подведённые к дистанционному органу;

\underline{U}_1 , \underline{I}_1 – соответственно подведенные к ДО векторы значений напряжения и тока, пересчитанные в первичных величинах;

$K_{ТН}$, $K_{ТТ}$ – соответственно коэффициенты трансформации напряжения и тока измерительных трансформаторов.

Рассмотрим в качестве примера особенности подбора годографа асинхронного режима для характеристик ДО на примере устройства АЛАР (рис.4.3) производства АО «ИАЭС» со следующими уставками: $H = 26$ Ом (высота трапеций характеристик срабатывания ЧО и ГО), $L_{qO}^B = 70$ Ом

(длина верхнего основания характеристики срабатывания ЧО), $L_{\text{ЧО}}^H = 35$ Ом
 (длина нижнего основания характеристики срабатывания ЧО), $L_{\text{ЧО}}^B = 35$ Ом
 (длина верхнего основания характеристики срабатывания ГО),
 $L_{\text{ГО}}^H = 17,5$ Ом (длина нижнего основания характеристики срабатывания ГО),
 $\Delta Re = 0$ Ом (смещение характеристик срабатывания ЧО и ГО по вещественной оси), $\Delta Im = -8$ Ом (смещение характеристик срабатывания ЧО и ГО по мнимой оси), $\varphi_{\text{м.ч.}} = 70^\circ$ (угол наклона срединной линии характеристик срабатывания ЧО и ГО). Отметим, что уставки данного ДО задаются в первичных величинах, следовательно, необходимо учитывать коэффициенты трансформации $K_{\text{ТН}}$, $K_{\text{ТТ}}$, которые для рассматриваемого случая приняты равными 220000/100 и 2000/1, соответственно.

На первом этапе принимаем $Z_L = 0$ Ом и $\arg(Z_1) = \arg(Z_2) = \varphi_P = 70^\circ$ (рис. 4.1). Далее определяемся с желаемым расположением формируемого годографа – пусть он касается верхнего основания характеристики срабатывания в точке пересечения с ОНМ (рис. 4.2). В данной точке модуль сопротивления замера ($Z_{\text{расч}}(\delta = 180^\circ)$) во вторичных величинах равен 5,6 Ом (в первичных – 6,1 Ом, в рамках рассматриваемого примера значения в скобках приведены в первичных величинах). В таком случае, $Z_\Sigma = Z_1 + Z_2$ принимается больше полученного значения. Здесь важно отметить, что принимая малое значение Z_Σ , например, 7 Ом, пользователь моделирует АР с большой амплитудой тока, протекающего по линии в момент расхождения векторов ЭДС систем 1 и 2 на 180° , что, скорее всего, приводит к невозможности воспроизведения такого тока испытательным комплексом РЕТОМ-51(61) из-за его аппаратных ограничений. На рассматриваемом этапе принимаем $Z_\Sigma = 14$ Ом. Следующим шагом является определение параметров доаварийного режима, а именно U_P и I_P . Задаёмся модулем сопротивления замера в этом режиме (Z_P), равным, например, 72,7 Ом (80 Ом). Тогда разность $Z_P - Z_{\text{расч}}(\delta = 180^\circ) = 67,1$ Ом (73,9 Ом) характеризует диаметр желаемого годографа сопротивления, который в ряде

случаев, например при пересечении исследуемой характеристики ДО, должен быть больше длины верхнего основания. Задаёмся $U_P = 58$ В, тогда $I_P = 58/72,7 = 0,8$ А. Значения Z_1 и Z_2 на первом этапе принимаем одинаковыми и равными 7 Ом. Полученный годограф сопротивления замера при таких параметрах (годограф 1, рис. 4.3) пересекает характеристику срабатывания ДО. Для достижения желаемого расположения необходимо варьировать Z_1 и Z_2 , не меняя при этом их сумму, равную 14 Ом. При варьировании этих параметров годограф сопротивления перемещается вверх/вниз по линии максимальной чувствительности. Результат, приближенный к желаемому, получается при $Z_1 = 3$ Ом и $Z_2 = 11$ Ом (годограф 2, рис. 4.3). Движение сопротивления замера в рассматриваемом случае осуществляется против часовой стрелки. При необходимости смены направления движения необходимо принять $\varphi_P = 69^\circ$. Для смены местоположения годографа относительно рассматриваемой характеристики срабатывания достаточно принять φ_P равным 250° (годограф 3, рис. 4.3).

При моделировании АР помимо параметров сети (рис. 4.1) необходимо корректно задавать период асинхронного режима T_{AP} , в противном случае это может привести к отказу в срабатывании устройств АЛАР, работающих на дистанционном принципе, или к излишнему срабатыванию ДО, выполняющих функции релейной защиты. Общая проблема здесь кроется в разделении режимов КЗ и АР по величине скорости изменения сопротивления. То есть, если задано слишком малое значение T_{AP} , скорость изменения сопротивления может быть такова, что устройство может некорректно распознать режим. Для численного описания такого режима применяют параметр «частота скольжения отказа» ($f_{CK.O}$), значение которой измеряется в герцах и обратно пропорционально T_{AP} . Само значение данного параметра для конкретного ДО очень показательно, и чем больше $f_{CK.O}$, тем выше качество реализации ДО, то есть шире спектр его применения, что наиболее актуально для устройств АЛАР. Следует отметить, что для ДО разных производителей $f_{CK.O}$ может отличаться, и сравнение

этого показателя у ДО может играть решающую роль при выборе конкретного защитного оборудования.

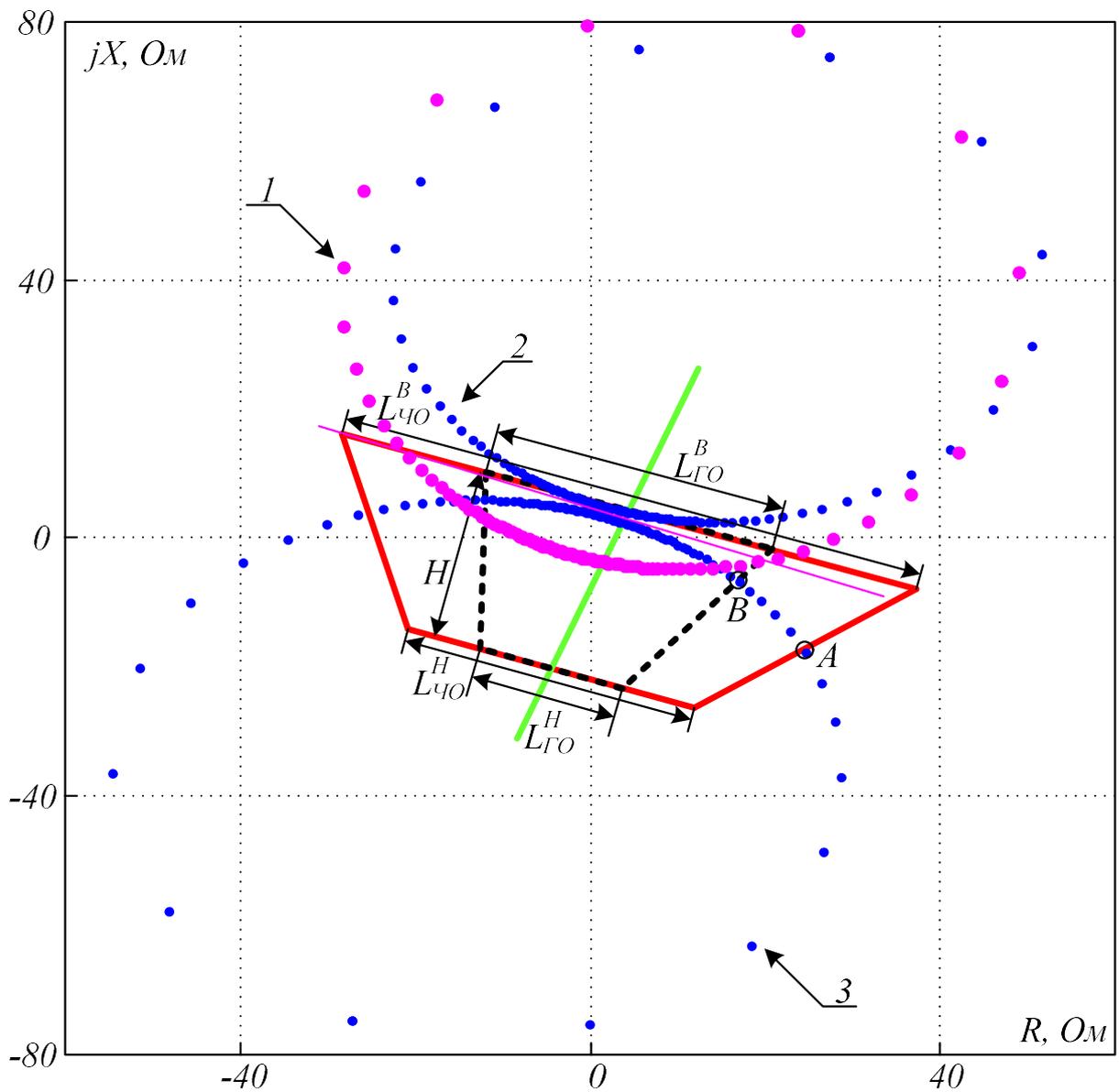


Рисунок 4.3 – Пример подбора годографов АР для АЛАР, работающего на дистанционном принципе (первичные значения)

1 – годограф сопротивления при $Z_1 = 7 \text{ Ом}$ и $Z_2 = 7 \text{ Ом}$ и $\varphi_p = 70^\circ$;

2 – годограф сопротивления при $Z_1 = 3 \text{ Ом}$ и $Z_2 = 11 \text{ Ом}$ и $\varphi_p = 70^\circ$;

3 – годограф сопротивления при $Z_1 = 3 \text{ Ом}$ и $Z_2 = 11 \text{ Ом}$ и $\varphi_p = 250^\circ$

Задача определения значения T_{AP} , при котором происходит отказ устройства, имеет несколько путей решения. Первый – итерационный метод (метод простого перебора, метод половинного деления и др.). Главный недостаток этого метода – большие затраты времени, так как каждый режим с новым значением T_{AP} необходимо воспроизводить при помощи испытательного комплекса, подавая сформированные сигналы на входы ДО и анализируя поведение устройства. Второй – определение искомого параметра уже после воспроизведения первого расчетного режима, так как подобрав желаемый режим, все параметры выражения (4.1) уже известны. Стоит отметить, что необходимость воспроизведения расчетного режима обусловлена необходимостью максимально точно определить координаты точек пересечения годографа АР и характеристики срабатывания ДО по осциллограмме, записанной защитным устройством (в программном обеспечении испытательного комплекса РЕТОМ-51(61) такая возможность отсутствует).

Суть второго метода заключается в определении времени Δt , за которое вектор $Z(\delta)$ на комплексной плоскости переходит от произвольно выбранной на годографе точки 1 до произвольно выбранной на годографе точки 2 (рис. 4.4). Подставив вместо точек 1 и 2 соответственно координаты точек пересечения годографа с характеристикой срабатывания ДО исследуемого устройства РЗА, можно по Δt определить время, в течение которого замер находился между двумя указанными точками, а на основании этой информации можно установить, при каких значениях периода асинхронного хода T_{AP} ДО корректно распознаёт моделируемый режим.

Принимая, что с течением времени угол фазового сдвига между энергосистемами δ изменяется по закону:

$$\delta = \frac{2\pi}{T_{AP}} t, \quad (4.3)$$

а векторы ЭДС \underline{E}_1 и \underline{E}_2 в произвольный момент времени определяются следующим образом:

$$\begin{cases} \underline{E}_2 = E_{2m} \cdot \exp\left(j \frac{2\pi}{T_{AP}} t + j\delta_{02}\right); \\ \underline{E}_1 = E_{1m} \cdot \exp(j\delta_{01}), \end{cases} \quad (4.4)$$

где δ_{01} и δ_{02} – начальные углы ЭДС двух энергосистем;

E_{1m} и E_{2m} – модули векторов ЭДС.

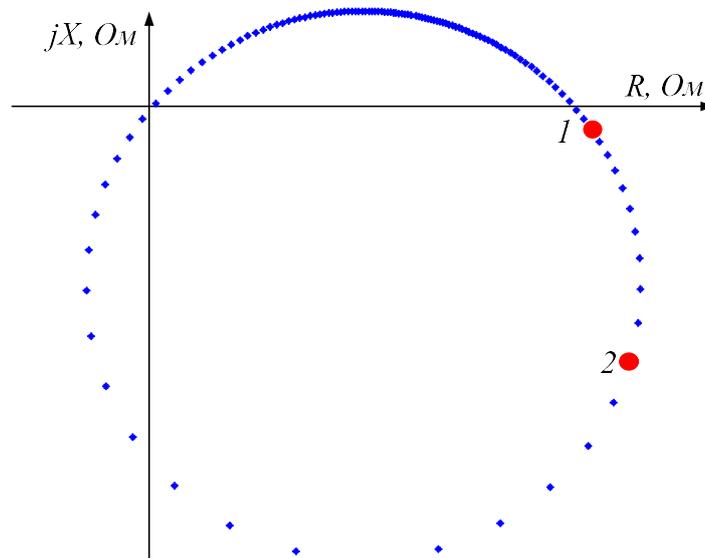


Рисунок 4.4 – Годограф сопротивления замера в АР
(пояснения к вопросу определения Δt)

Определим время, за которое, считая от начала АР (момент $t = 0$ с) годограф достигает точки 1 (рис. 4.4). Для этого, во-первых, подставляем (4.3) и (4.4) в (4.1):

$$\underline{Z}_p(t) = \frac{\underline{Z}_\Sigma}{1 - \underline{E}_2(t)/\underline{E}_1(t)} - \underline{Z}_1 = \frac{\underline{Z}_\Sigma}{1 - \frac{E_{2m}}{E_{1m}} \cdot \exp\left(j \frac{2\pi}{T_{AP}} t + j(\delta_{02} - \delta_{01})\right)} - \underline{Z}_1. \quad (4.5)$$

Преобразуя (4.5), получаем следующее выражение:

$$\frac{E_{1m}}{E_{2m}} \left(1 - \frac{\underline{Z}_{\Sigma}}{\underline{Z}_p(t) + \underline{Z}_1} \right) = \exp \left(j \frac{2\pi}{T_{AP}} t + j(\delta_{02} - \delta_{01}) \right). \quad (4.6)$$

Анализ выражения (4.6) показывает следующее. Левая часть его представляет собой некоторое комплексное число, изменяющееся с течением времени t и характеризующееся модулем и углом. Так как умножение на действительное число E_{1m}/E_{2m} не изменяет аргумента комплексного числа, стоящего в скобках, то справедливо следующее выражение:

$$\arg \left(1 - \frac{\underline{Z}_{\Sigma}}{\underline{Z}_p(t) + \underline{Z}_1} \right) = \frac{2\pi}{T_{AP}} t + (\delta_{02} - \delta_{01}). \quad (4.7)$$

Пусть с момента времени $t = 0$ с замер сопротивления достигает на годографе точки 1, обозначаем этот момент как t_1 . Аналогично обозначаем как t_2 момент времени, в который замер достигает точки 2. Для определения момента времени t_1 , используем формулу (4.7), выражая t из левой части уравнения:

$$t_1 = T_{AP} \frac{\arg \left(1 - \frac{\underline{Z}_{\Sigma}}{\underline{Z}_p(t_1) + \underline{Z}_1} \right) - (\delta_{02} - \delta_{01})}{2\pi}. \quad (4.8)$$

Подставив в уравнение (4.8) координаты точки 1 $Z_p(t_1)$, снятые опытным путём (точка пресечения годографа с одной из сторон характеристики срабатывания ДО), получим значение t_1 . Аналогичным образом получаем значение t_2 , подставляя в (4.8) координаты точки 2 в комплексной форме $Z_p(t_2)$.

В итоге, значение Δt определяем как модуль разности времён t_2 и t_1 :

$$\Delta t = T_{AP} \frac{\left| \arg \left(1 - \frac{\underline{Z}_{\Sigma}}{\underline{Z}_p(t_2) + \underline{Z}_1} \right) - \arg \left(1 - \frac{\underline{Z}_{\Sigma}}{\underline{Z}_p(t_1) + \underline{Z}_1} \right) \right|}{2\pi}. \quad (4.9)$$

Из (4.9) следует, что значение Δt не зависит от начального сдвига по фазе двух источников ЭДС и определяется только параметрами моделируемой энергосистемы (рис. 4.1), координатами точек пересечения с характеристикой срабатывания ДО и периодом АР. Как видно из (4.8), значения времён t_1 и t_2 , зависят от δ_{01} и δ_{02} , однако Δt от этих величин не зависит.

Вернемся к рассматриваемому примеру с параметрами, рассчитанными для формирования годографа сопротивления \mathcal{Z} (рис. 4.3). При воспроизведении данного режима устройство АЛАР надежно срабатывает лишь в том случае, если период моделируемого асинхронного хода меньше выставленной в терминале уставки $T_{ap.max}$ (максимальная длительность цикла асинхронного режима) и больше такого значения, при котором время от момента пересечения годографом сопротивления боковой стороны характеристики срабатывания ЧО (точка A , рис. 4.3) до момента пересечения с характеристикой срабатывания ГО (точка B , рис. 4.3) будет равно уставке $T_{отстр.КЗ}$ (время отстройки от КЗ). При значениях T_{AP} больших, чем $T_{ap.max}$, наблюдается недействие второй и третьей ступеней АЛАР за счёт сброса счётчиков циклов; при слишком малых значениях T_{AP} ($\Delta t \leq T_{отстр.КЗ}$) – блокировка устройства (несрабатывание), поскольку моделируемый режим распознаётся как короткое замыкание (рис. 4.5). Граничное значение T_{AP} , при котором происходит блокировка устройства ($T_{AP.min}$), определяется из выражения (4.9). Для расчёта $T_{AP.min}$ необходимо знать интервал времени нахождения сопротивления замера в зоне срабатывания ЧО, но вне зоны действия ГО ($\Delta t = T_{отстр.КЗ}$). Значение $T_{отстр.КЗ}$ для рассматриваемого случая принимается равным 20 мс. Графически по осциллограмме

воспроизведенного режима при T_{AP} , равном, например, 2 с, определяем, что $\underline{Z}_p(t_1) = 27,2 \cdot e^{-j0,62}$ Ом (точка A , рис. 4.3), $\underline{Z}_p(t_2) = 16,2 \cdot e^{-j0,37}$ Ом (точка B , рис. 4.3). Здесь значения модулей векторов сопротивлений указаны во вторичных величинах, а их аргументов – в радианах. Подставив все найденные параметры в выражение (4.9), определяем, что $T_{AP.min} = 0,385$ с. Полученное значение $T_{AP.min}$ характерно для годографа 3 и для рассмотренных в настоящем примере параметров ДО устройства АЛАР (рис. 4.3). При расчете уставок, пользуясь формулой (4.9) и имея расчетные годографы и параметры характеристики ДО, аналогичным образом можно определить значение $T_{AP.min}$ для конкретного устройства, то есть выявить условия, при которых наступает блокировка АЛАР по сопротивлению или ложная работа ступеней дистанционной защиты.

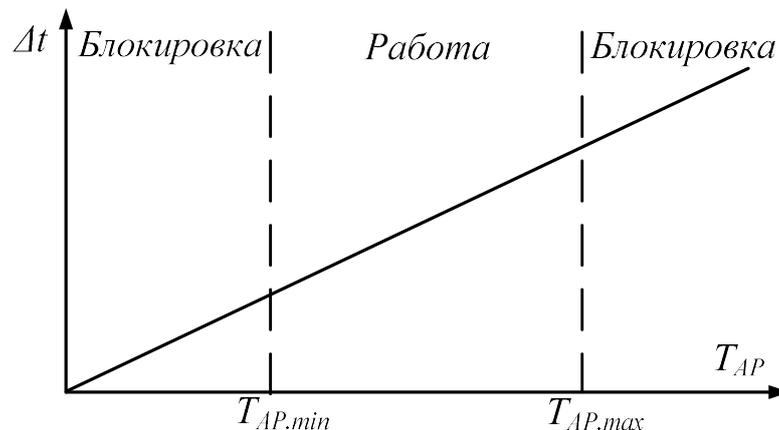


Рисунок 4.5 – Характер работы АЛАР на дистанционном принципе при разных значениях T_{AP}

4.3 Синтез проверочного режима, имеющего желаемую траекторию

Существенным ограничением при использовании приложения «RL-модель энергосистемы» специализированного программно-аппаратного комплекса РЕТОМ-51(61) с целью формирования проверочных аварийных асинхронных режимов является то, что необходимый набор параметров модели энергосистемы для задания расчетного (желаемого) режима, используемого для проверки функционирования ДО, даже с учётом ряда

ограничений и допущений можно определить ограниченным количеством способов. Одним из наиболее простых способов определения данного набора параметров является метод простого перебора – пользователь, изменяя один параметр модели энергосистемы в ту или иную сторону при неизменных других параметрах, оценивает характер изменения годографа сопротивления [87]. В качестве альтернативы можно привлекать методы оптимизации, например [88], где в качестве целевой функции необходимо использовать отклонение годографа сопротивления замера полученного АР от годографа в желаемом режиме, а в качестве критерия оптимальности – минимизация значений целевой функции (в идеальном случае – стремление к нулю).

Таким образом, задача моделирования годографа сопротивления в расчетном режиме с помощью приложения «RL-модель энергосистемы» весьма трудоёмка и не содержит средств, позволяющих значительно упростить выполнение проверок ДО, а об автоматизации таких проверок не может быть и речи. Для преодоления этого недостатка предлагается альтернативные методы формирования желаемого годографа сопротивления, которые значительно снижают трудоёмкость и повышают качество выполнения таких проверок, поскольку для однозначного определения местоположения этого годографа необходимо ввести только координаты центра и радиус окружности, форму которой описывает годограф в комплексной плоскости. Повышение качества выполнения проверок достигается тем, что обеспечивается однозначное соответствие между желаемым и получаемым годографами вектора сопротивления замера. По полученным параметрам, учитывая знак и частоту скольжения, определяются соответствующие значения входных токов и напряжений, подача которых на входы дистанционного органа обеспечивает получение желаемых годографов. В отличие от предлагаемого способа, применение приложения «RL-модель энергосистемы» позволяет получить годограф лишь приблизительно похожий на желаемый.

Моделирование асинхронного режима, соответствующего желаемой траектории сопротивления

Для используемой модели контролируемой сети (рис. 4.1), пренебрегая сопротивлением линии, зависимость сопротивления \underline{Z}_p , измеряемого ДО в месте установки РЗ (ПА), от времени описывается следующей системой уравнений [7]:

$$\begin{cases} \underline{Z}_p(t) = \frac{\underline{Z}_2 + q(t) \cdot \underline{Z}_1}{1 - q(t)}; \\ q(t) = \frac{\underline{E}_2(t)}{\underline{E}_1(t)}. \end{cases} \quad (1)$$

Принимаем, что в условиях АР вектор ЭДС \underline{E}_1 проворачивается относительно вектора \underline{E}_2 , то есть со временем изменяется фаза δ_1 вектора \underline{E}_1 относительно фазы δ_2 вектора \underline{E}_2 . При неизменном соотношении модулей ЭДС \underline{E}_1 и \underline{E}_2 годограф сопротивления, измеряемого дистанционным органом, подключённым в точке P (рис.4.1), в этих условиях соответствует окружности на комплексной плоскости с радиусом R_0 и центром в конце вектора \underline{Z}_0 (рис. 4.6).

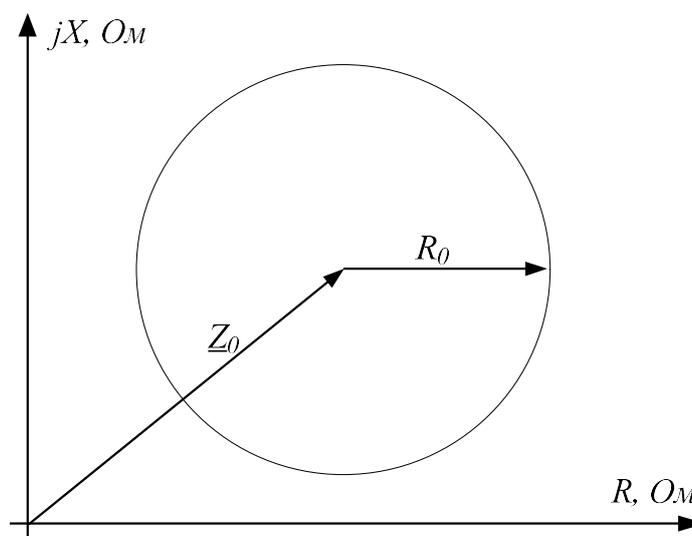


Рисунок 4.6 – Годограф сопротивления замера ДО в комплексной плоскости сопротивлений при АР

Значения R_0 , \underline{Z}_0 при этом определяются как [7]:

$$\begin{cases} \underline{Z}_0 = -\frac{q^2 \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}{q^2 - 1}; \\ R_0 = -\frac{q |\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2|}{|q^2 - 1|}; \\ q = \frac{|\underline{E}_2|}{|\underline{E}_1|} = \text{const.} \end{cases} \quad (4.10)$$

Для определения значений входных токов и напряжений, подача которых на входы дистанционного органа обеспечит формирование желаемого годографа, в первую очередь, необходимо определить параметры \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 схемы замещения, приведённой на рисунке 4.1, при которых годограф замера представляет собой окружность с желаемыми параметрами \underline{Z}_0 и R_0 . Пусть значения q , \underline{Z}_0 и R_0 заданы, тогда значения \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 можно определить, раскрывая модули в системе уравнений (4.10). Искомым значениям \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 удовлетворяют решения двух систем уравнений [89]:

$$\begin{cases} \begin{cases} -\underline{Z}_0(q^2 - 1) = q^2 \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2; \\ -R_0 |q^2 - 1| = q |\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2|; \end{cases} \\ \begin{cases} -\underline{Z}_0(q^2 - 1) = q^2 \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2; \\ R_0 |q^2 - 1| = q |\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2|. \end{cases} \end{cases} \quad (4.11)$$

Для первой системы уравнений из совокупности (4.11) решением являются следующие значения \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 :

$$\begin{cases} \underline{Z}_1 = \frac{-\underline{Z}_0(q^2 - 1) + \frac{R_0 |q^2 - 1|}{q}}{q^2 - 1}; \\ \underline{Z}_2 = -\frac{R_0 |q^2 - 1|}{q} - \underline{Z}_1. \end{cases} \quad (4.12)$$

Значения \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2 , полученные из второй системы уравнений из совокупности (4.11):

$$\begin{cases} \underline{Z}_1 = \frac{-\underline{Z}_0(q^2 - 1) - \frac{R_0 |q^2 - 1|}{q}}{q^2 - 1}; \\ \underline{Z}_2 = \frac{R_0 |q^2 - 1|}{q} - \underline{Z}_1. \end{cases} \quad (4.13)$$

Полученные выражения позволяют описать зависимость от времени векторных значений подведенного напряжения к реле $\underline{U}_p(t)$ и измеряемого тока $\underline{I}_p(t)$, которые в соответствии с принятой схемой замещения (рис. 4.1) определяются как:

$$\begin{cases} \underline{U}_p(t) = \underline{E}_1(t) - \underline{I}_p(t)\underline{Z}_1; \\ \underline{I}_p(t) = \frac{\underline{E}_1(t) - \underline{E}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}; \\ |\underline{E}_2| = q |\underline{E}_1|. \end{cases} \quad (4.14)$$

Принимаем, что угол δ_2 вектора ЭДС \underline{E}_2 остаётся неизменным, а угол δ_1 вектора ЭДС \underline{E}_1 изменяется с течением времени по закону

$$\delta_1(t) = \delta_{10} \pm \omega_{ap}t, \quad (4.15)$$

где δ_{10} – начальное значение фазы вектора \underline{E}_1 , рад;

ω_{ap} – частота скольжения, рад/с.

Выполняя математическое моделирование АР по формулам (4.12), (4.14), (4.15) либо по формулам (4.13)–(4.15), получаем комплексные значения параметров режима \underline{U}_p , \underline{I}_p для произвольного момента времени, по которым необходимо получить соответствующие мгновенные значения указанных электрических сигналов с целью их последующего воспроизведения средствами цифро-аналогового преобразования. Последовательность получения мгновенных значений из сформированных

комплексных значений электрических величин приведены ниже. В первую очередь создаются одномерные массивы комплексных значений векторов ЭДС \underline{e}_1 и \underline{e}_2 для каждого момента времени от нуля до момента t_m , соответствующего времени окончания моделирования исследуемого режима:

$$\begin{cases} \underline{e}_{1k} = \sqrt{2} |\underline{E}_1| e^{j(\omega_0 t_i \pm \omega_{ap} t_i + \delta_{10})}; \\ \underline{e}_{2k} = q \sqrt{2} |\underline{E}_1| e^{j(\omega_0 t_i + \delta_{20})}, \end{cases} \quad (4.16)$$

где ω_0 – круговая частота, соответствующая промышленной частоте сети, рад/с;

δ_{20} – начальное значение аргумента вектора \underline{E}_2 , рад;

j – мнимая единица;

k – порядковый номер элемента в массиве.

В системе (4.16) параметр t_i изменяется от 0 до t_m с шагом Δt , соответствующим частоте дискретизации f_s моделируемых сигналов. Повышение f_s увеличивает качество воспроизведения получаемых значений, так как при этом повышается количество точек моделируемого сигнала в единицу времени. Для получения качественного формируемого сигнала рекомендуется принимать значение f_s не менее 1200 Гц. Аналогичным образом по первым двум уравнениям системы (4.14) рассчитываются массивы комплексных значений тока и напряжения, измеряемых дистанционным органом, при значениях \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 , полученных по любой из групп формул (4.12), (4.13):

$$\begin{cases} \underline{u}_{pk} = \underline{e}_{1k} - \underline{i}_{pk} \underline{Z}_1; \\ \underline{i}_{pk} = \frac{\underline{e}_{1k} - \underline{e}_{2k}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}; \end{cases} \quad (4.17)$$

где \underline{u}_p , \underline{i}_p – соответственно массивы комплексных значений векторов тока и напряжения, подводимых к испытываемому устройству.

В соответствии с комплексным методом расчёта электрических цепей [90], мгновенные значения тока i_{pk} и напряжения u_{pk} определяются путём выделения мнимых составляющих комплексных значений токов и напряжений \underline{u}_p , \underline{i}_p , рассчитанных на предыдущем шаге:

$$\begin{cases} u_{pk} = \text{Im}[\underline{u}_{pk}]; \\ i_{pk} = \text{Im}[\underline{i}_{pk}]. \end{cases} \quad (4.18)$$

При использовании предложенной методики формирования входных сигналов защиты для получения желаемого годографа сопротивления замера в АР с заданными параметрами следует учитывать следующие особенности. Во-первых, значения комплексных сопротивлений, рассчитанные по формулам (4.12), (4.13) таковы, что рассматриваемый участок сети, связывающий две энергосистемы (рис.1), находится в режиме резонанса напряжений, то есть выполняется условие $\text{Im}[\underline{Z}_1] = -\text{Im}[\underline{Z}_2]$.

Во-вторых, при прочих равных условиях значения $\underline{U}_p(t)$ и $\underline{I}_p(t)$ получаются различными в зависимости от применённой формулы для расчёта \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 – (4.12) или (4.13), при этом значение активного сопротивления одного из сопротивлений \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 участка сети в ряде случаев может получиться отрицательным. Это обстоятельство, однако, не препятствует (с помощью формул (4.16)-(4.18)) получению массивов мгновенных значений токов и напряжений, которые нужно подвести к дистанционному органу для получения годографа сопротивления замера с указанными (желаемыми) характеристиками, поскольку в рассматриваемой методике используются только математические преобразования. Попытка же применить средства компьютерного моделирования («RL-модель энергосистемы» комплекса РЕТОМ, Simulink и др.) для задания асинхронного режима с рассчитанными согласно (4.12) или (4.13) отрицательными сопротивлениями \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 может либо вообще не позволить ввести данные значения, либо при их вводе привести к сбою программы-расчётчика используемой среды компьютерного моделирования из-за

нарушения устойчивости работы используемого алгоритма решения системы дифференциальных уравнений.

Для пояснения ещё одной особенности разработанной методики рассмотрим численный пример. Пусть $q = 0,95$, $\underline{Z}_0 = 75 + j50$ Ом, $R_0 = 80$ Ом, $\omega_{ap} = 3,14$ рад/с, $|\underline{E}_1| = 5$ В при $\delta_{10} = \delta_{20} = 0$ рад. Знак перед множителем ω_{ap} в формуле (4.16) принят таким, чтобы угол δ_l уменьшался со временем ($\omega_{ap} < 0$). Значения сопротивлений \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 рассчитываются по формуле (4.14) и составляют $\underline{Z}_1 = -(151,19 + j5)$ Ом и $\underline{Z}_2 = 159 + j5$ Ом. Полученный годограф имеет вид, приведённый на рисунке 4.7, где каждая выборка отмечена зелёным квадратом. Для наглядности отображения годографа на рисунке принято $f_s = 720$ Гц (при большем значении f_s рисунок будет перегружен информацией), также показано местоположение на комплексной плоскости первой выборки. Здесь стоит отметить, что $|\underline{E}_1| = 5$ В характеризует начальное значение напряжения при расчетах сопротивлений замера и ни в коем случае не отражает реальные процессы в энергосистеме. Годограф имеет заданный радиус, а центр окружности расположен в конце вектора \underline{Z}_0 . Большинство выборок, как видно из рисунка, расположены вблизи оси мнимых чисел jX , слева от точки с координатами конца вектора \underline{Z}_0 ; направление вращения годографа – против часовой стрелки, что обозначено стрелкой.

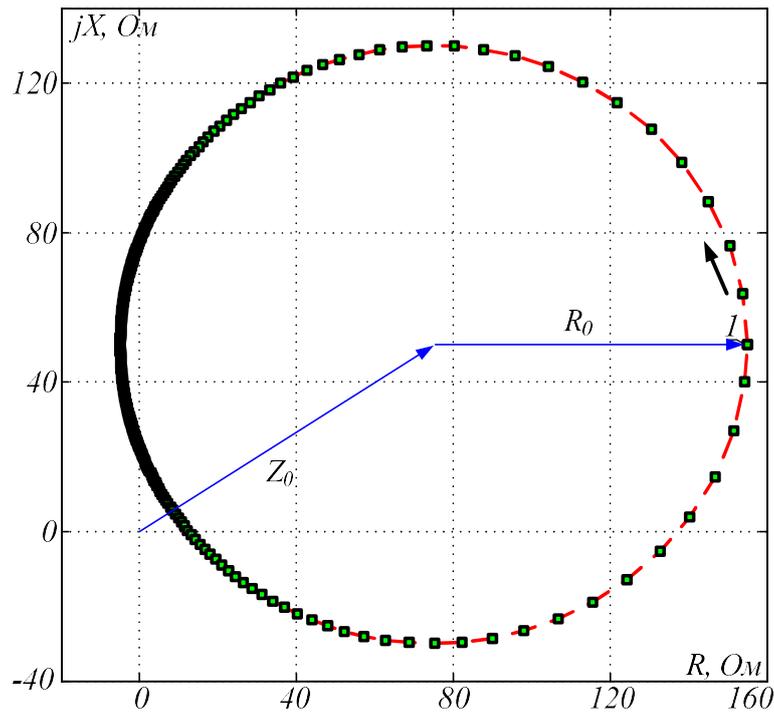


Рисунок 4.7 – Годограф сопротивления замера с заданными характеристиками. Вращение – против часовой стрелки, большинство выборок расположено слева от точки \underline{Z}_0 , $q = 0,95$, $\omega_{ap} < 0$

Оставляя неизменными радиус годографа и местоположение его центра, можно изменять такие параметры, как направление вращения, место на комплексной плоскости первой выборки (определяется параметрами δ_{10} , δ_{20} и q) и расположение большинства выборок на полученной окружности.

Так, при смене знака перед множителем ω_{ap} в формуле (4.15) форма полученного годографа остаётся прежней, однако изменяется направление его вращения на противоположное (по часовой стрелке для рассматриваемого случая). Иной результат получается, если задать значение $q > 1$, не изменяя знак перед ω_{ap} : новый годограф изменяет направление вращения, а большинство выборок находится справа от точки с координатами \underline{Z}_0 (рис. 4.8). Чтобы изменить направление вращения нового годографа и сохранить его форму, следует изменить знак перед множителем ω_{ap} .

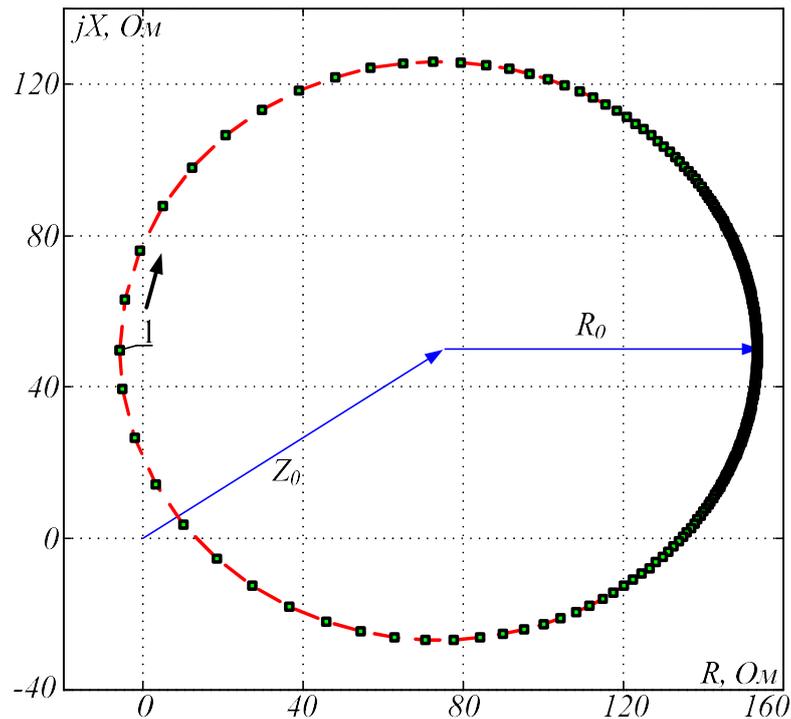


Рисунок 4.8 – Годограф сопротивления замера с заданными характеристиками. Вращение – по часовой стрелки, большинство выборок расположено справа от точки \underline{Z}_0 , $q = 1,05$, $\omega_{ap} < 0$

При моделировании асинхронных режимов реальных энергосистем характер годографа сопротивления замера отличается от рассмотренных выше: большинство выборок условно располагается сверху или снизу от точки с координатами \underline{Z}_0 . Под «условным» здесь понимается расположение большинства выборок годографа не строго под или над центром окружности, форму которого представляет моделируемый годограф, а в относительном смещении, фактически – симметрично относительно точки пересечения луча, выходящего из центра окружности, непосредственно с самим годографом в том месте, где векторы ЭДС энергосистем находятся в противофазе. Стоит отметить, сопротивления замера, располагаемые в близости от этой точки пересечения, характеризуют тот промежуток времени ΔP , на котором скорость изменения угла между векторами ЭДС минимальна. Поэтому годограф сопротивления, формируемый по вышеизложенной методике, в прямом виде применять для целей проверки ДО в системах

противоаварийной автоматики или релейной защиты путём имитации АР при любых значениях параметров \underline{Z}_0 , q , ω_{ap} , \underline{E}_l некорректно.

Добиться правильного распределения выборок на годографе можно в 2 этапа, производя следующие преобразования. Во-первых, при вычислении значений сопротивлений \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 по (4.12) или (4.13) необходимо вместо используемого ранее значения \underline{Z}_0 подставить в расчётные формулы его скорректированное значение \underline{Z}'_0 , равное

$$\underline{Z}'_0 = \underline{Z}_0 e^{j\varphi_{кор}} \quad (4.19)$$

где $\varphi_{кор}$ - угол корректировки, с помощью которого желаемое местоположение максимальной плотности точек на годографе смещается по годографу относительно изначально полученного местоположения.

Во-вторых, в расчётную формулу (4.14) необходимо подставлять не полученные по (4.12) или (4.13) значения сопротивлений \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 , а их скорректированные значения \underline{Z}'_1 , \underline{Z}'_2 , равные:

$$\begin{cases} \underline{Z}'_1 = \underline{Z}_1 e^{-j\varphi_{кор}} ; \\ \underline{Z}'_2 = \underline{Z}_2 e^{-j\varphi_{кор}} . \end{cases} \quad (4.20)$$

Рассмотрим пример. Допустим, необходимо получить годограф АР с центром в точке $\underline{Z}_0 = 75 + j50$ Ом и радиусом $R = 80$ Ом. Примем также $\varphi_{кор} = -45$ эл.град., а расчёт сопротивлений произведём по выражениям (4.13). Тогда в соответствии с рассмотренным выше порядком действий получаем:

$$\underline{Z}'_0 = \underline{Z}_0 e^{j\varphi_{кор}} = 88,4 - j17,7 \hat{=} \hat{i} . \quad (4.21)$$

Рассчитанные по (4.13) значения сопротивлений \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 равны:

$$\begin{cases} \underline{Z}_1 = -4,2 + j17,7 \text{ Ом}, \\ \underline{Z}_2 = 12,4 - j17,7 \text{ Ом}, \end{cases}$$

тогда скорректированные значения этих сопротивлений после преобразований (4.20) равны:

$$\begin{cases} \underline{Z}'_1 = -15,5 + j9,5 \text{ Ом}, \\ \underline{Z}'_2 = 21,3 - j3,7 \text{ Ом}. \end{cases}$$

Эти значения необходимо подставить в формулы (4.14)-(4.18) для получения мгновенных значений токов и напряжений. Годограф AP с заданными параметрами, полученный при рассмотренном $\varphi_{\text{кор}}$, изображён на рисунке 4.9.

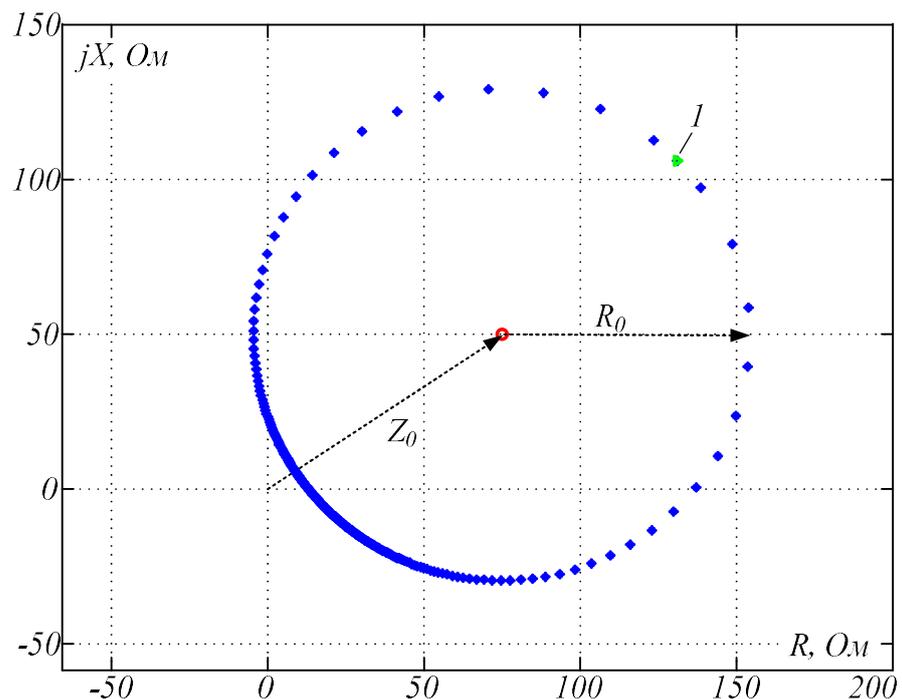


Рисунок 4.9 – Годограф сопротивления замера с заданными характеристиками, большинство выборок расположено снизу от точки \underline{Z}_0 ($\varphi_{\text{кор}} = -45$ градусов)

Как и прежде, направление вращения годографа можно изменять сменой знака множителя в формуле (4.15), при этом расположение участка с максимальной плотностью выборок остаётся неизменным. Аналогично

рассмотренным ранее примерам (рис. 4.7 и 4.8), для случая, представленного на рисунке 4.8, если задать значение $q > 0$, одновременно изменится направление вращения годографа и расположение участка с максимальной плотностью выборок (в данном случае участок с максимальной плотностью выборок расположится выше центральной точки).

Таким образом, для формирования годографа сопротивления замера в АР желаемой формы с использованием предложенной методики [89] необходимо выполнить следующее:

- определить в комплексной плоскости местоположение и размер окружности, которую должен описывать желаемый годограф сопротивления (\underline{Z}_0, R_0);
- задать соотношение модулей ЭДС \underline{E}_1 и $\underline{E}_2(q)$, от которого зависят максимальные значения формируемых сигналов тока и напряжения;
- задать начальные значения фаз векторов \underline{E}_1 и \underline{E}_2 (δ_{10}, δ_{20}), от которых зависит положение первой выборки формируемого годографа сопротивления;
- выбрать способ расчёта $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2$ (по выражениям (4.12) или (4.13));
- задать угол $\varphi_{кор}$ (при необходимости);
- задать значение и знак частоты скольжения (ω_{ap}).

Для практического применения предлагаемой методики важно контролировать амплитудные значения формируемого тока и напряжения, с одной стороны, с целью не превышения ими предельных возможностей испытательной установки, а с другой стороны – для недопущения подачи на устройство с функцией ДО низкоуровневых сигналов. Последнее может привести к появлению повышенных погрешностей в замере сопротивления и, как следствие, отклонению реальной траектории годографа сопротивления от желаемой. В таком случае, если в результате расчета сигналов тока и напряжения их амплитудные значения характерны вышеперечисленным случаям, то следует скорректировать один или несколько параметров, влияющих на эти значения, а именно q, E_1 или способ расчёта \underline{Z}_1 и \underline{Z}_2

(уравнению (4.12) или (4.13)). Таким образом, методика позволяет изменять параметры формируемых сигналов тока и напряжения, не изменяя конечную форму годографа.

Формирование массивов мгновенных значений тока и напряжения, обеспечивающих получение желаемой траектории сопротивления

При проверке ДО в асинхронном режиме в качестве расчётного (желаемого) режима наиболее целесообразно использовать такой, в котором конец вектора сопротивления замера в комплексной плоскости сопротивлений описывает окружность. Последняя описывается следующим выражением [91]:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_0 + R \cdot e^{j(\omega_{ap}t + \varphi_0)}, \quad (4.22)$$

где \underline{Z}_0 – координаты центра окружности, Ом;

R – радиус окружности, Ом;

$\omega_{ap} = 2\pi/T_{AP}$ – частота скольжения, рад/с;

T_{AP} – период АР, с;

φ_0 – некоторый начальный угол, рад.

Таким образом, для формирования годографа сопротивления замера в АР с принятым расположением в комплексной плоскости, необходимо задать параметры \underline{Z}_0 , R , φ_0 и ω_{ap} .

Здесь, аналогично предыдущему способу формирования проверочного асинхронного режима, при смене знака перед множителем ω_{ap} в формуле (4.22) форма получаемого годографа остаётся прежней, однако движение вектора замера сопротивления по нему изменяется на противоположное.

Далее выразим \underline{Z} через отношение подведённых к измерительному дистанционному органу напряжения \underline{U} и тока \underline{I} :

$$\frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \underline{Z}_0 + R \cdot e^{j(\omega_{\text{ap}} t + \varphi_0)}. \quad (4.23)$$

На следующем этапе произвольным образом задаётся амплитуда и фаза вектора тока или вектора напряжения, а оставшийся параметр определяется из уравнения (4.23). Так, если задать амплитуду и фазу подводимого тока \underline{I} , то подводимое напряжение \underline{U} определяется по выражению:

$$\underline{U} = \underline{I} \cdot \underline{Z}_0 + \underline{I} \cdot R \cdot e^{j(\omega_{\text{ap}} t + \varphi_0)}. \quad (4.24)$$

Аналогично, задаваясь произвольным образом амплитудой и фазой вектора \underline{U} , вектор \underline{I} можно определить по формуле:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_0 + R \cdot e^{j(\omega_{\text{ap}} t + \varphi_0)}}. \quad (4.25)$$

По полученным векторным значениям тока и напряжения можно сформировать массивы мгновенных значений фазных токов и напряжений, которые непосредственно должны подаваться на входы испытуемого устройства с дистанционным органом. Для реализации данного действия необходимо векторные значения тока и напряжения в фазе «А» приравнять произвольно принятому значению тока и напряжению, определённого по выражению (4.24) соответственно (в случае произвольного задания напряжения ток в фазе приравнивается значению из выражения (4.25)). Выбор параметра, задаваемого произвольно, осуществляет пользователь на начальном этапе расчётов, основываясь как на аппаратных возможностях испытательной установки, так и на минимально возможных измерениях испытуемого образца ДО. Для формирования векторных значений тока и напряжения в фазах «В» и «С» необходимо сдвинуть в каждый момент времени ток и напряжение фазы «А» на угол $-2\pi/3$ и $2\pi/3$

соответственно. Далее из векторных значений токов и напряжений в соответствии с комплексным методом расчёта электрических цепей формируются массивы мгновенных значений подаваемых токов и напряжений. Приведенные преобразования справедливы для случаев, когда дистанционный орган подключен на разность фазных токов и соответствующее линейное напряжение (используется в дистанционных защитах, реагирующих на междуфазные короткие замыкания), либо на ток и напряжение прямой последовательности (используется в устройствах АЛАР, контролирующих сопротивление замера), так как асинхронный режим по своей сути является симметричным и не вносит каких-либо искажений в замер вышеперечисленных ДО. Возможность возникновения АР в несимметричном режиме, что актуально для выключателей с пофазным приводом, в данной работе не рассматривается.

Возможность произвольного выбора амплитуды и фазы для одного из векторов \underline{U} , \underline{I} позволяет получать удобные для воспроизведения на испытательной установке значения фазных токов и напряжений при различных параметрах годографа АР. Здесь также необходимо отметить, что если параметры годографа сопротивления замера подбирались на основе уставок ДО, заданных в первичных значениях, то следует провести дополнительные преобразования, учитывающие коэффициенты трансформации ТТ и ТН, и определить фактически подведенные к исследуемому устройству с функцией ДО.

Особенностью описанного способа формирования входных параметров режима для получения годографа АР с заданными характеристиками является постоянная скорость перемещения вектора замера комплексного сопротивления по заранее обозначенной окружности. В таком случае выборки замера комплексного сопротивления распределяются по этой окружности равномерно (рис. 4.10). С помощью имитационного моделирования АР в энергосистеме (рис. 4.1), рассмотренного ранее, замеры комплексного сопротивления распределяются по годографу неравномерно –

максимальная плотность замеров наблюдается при минимальной скорости изменения угла между векторами ЭДС систем С1 и С2, т.е. при угле равном 180° .

На рисунке 4.11 приведены осциллограммы тока и напряжения, соответствующие годографу, изображённому на рисунке 4.10, которые демонстрируют отмеченную в методике особенность неизменности фазы и амплитуды одного из электрических сигналов – тока или напряжения. То есть, строго говоря, полученный режим не является АР, когда одновременно происходят периодические колебания амплитуды, подведённых к дистанционному органу тока и напряжения. Однако преимущество рассматриваемого метода формирования осциллограммы проверочного режима является возможность оценки как правильности функционирования, так и параметров срабатывания устройства блокировки при качаниях в дистанционных защитах, контролирующих скорость изменения сопротивления [92].

Предложенные алгоритмы формирования входных сигналов для проверки дистанционных органов активно используются при проверках и наладке устройств ПА, выполненных на базе шкафов комплекса противоаварийной автоматики многофункционального (КПА-М) [83]. Такое использование существенно сократило затрачиваемое время, в также повысило качество проведения наладочных и профилактических работ.

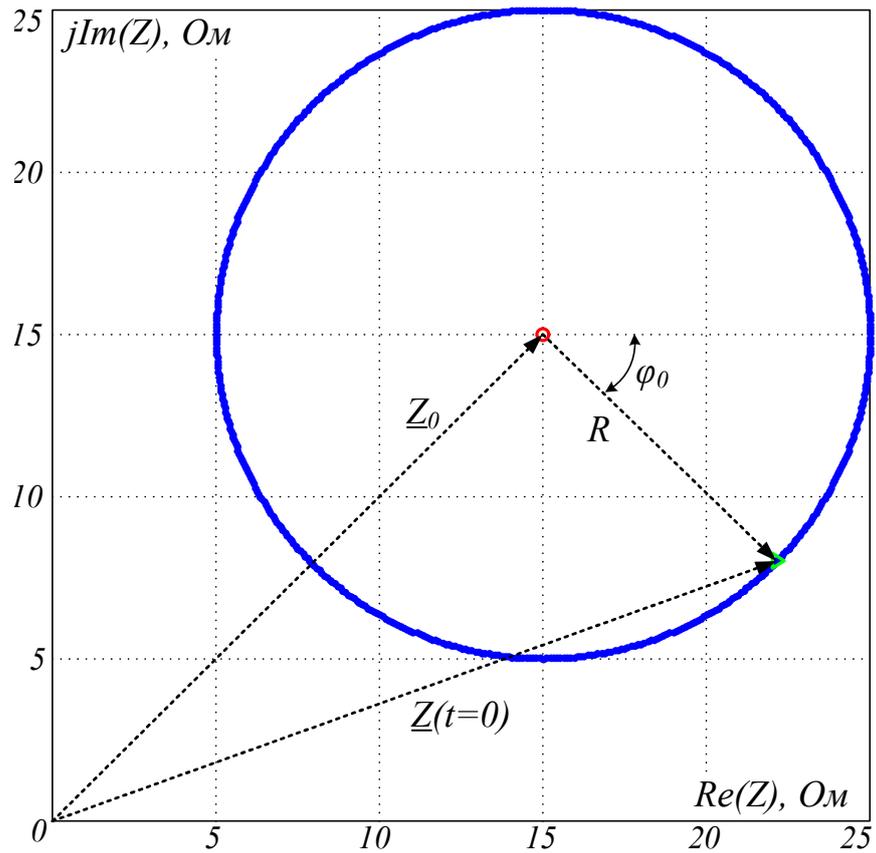


Рисунок 4.10 – Годограф сопротивления замера, полученный при неизменной амплитуде подаваемого к ДО тока

Радиус окружности $R=10$ Ом, координаты центра $Z_0=15+j15$ Ом,
начальный угол $\varphi_0 = -45^\circ$, период асинхронного хода $T_{AP} = 0,5$ с

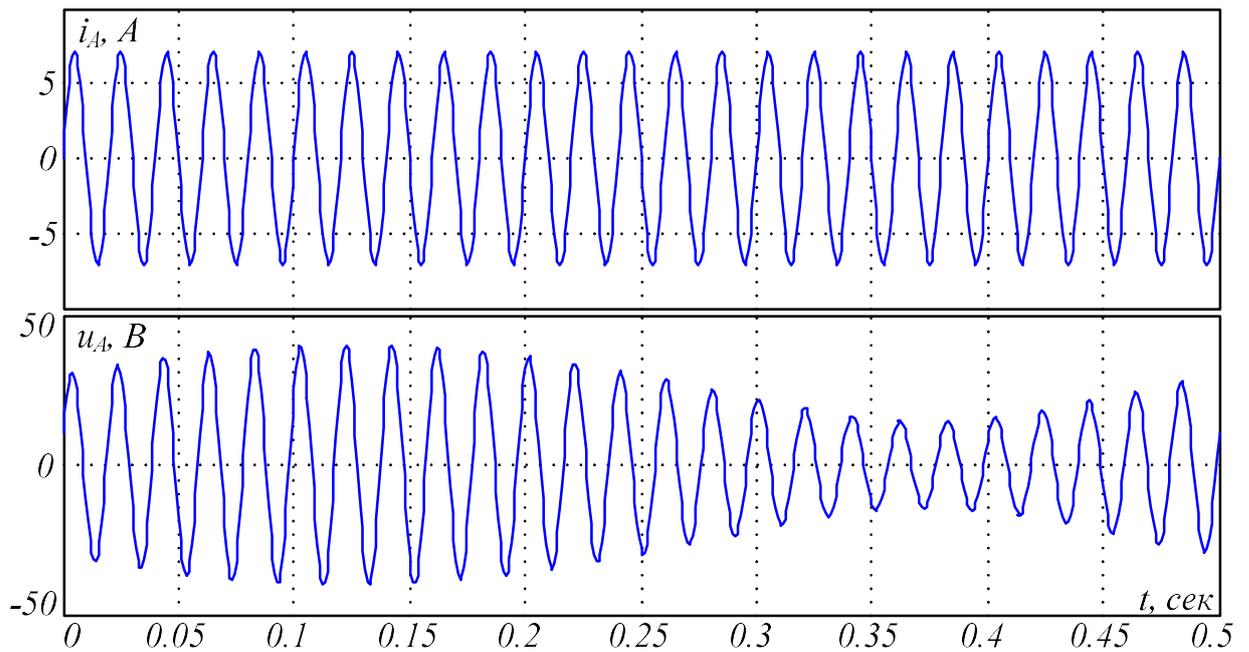


Рисунок 4.11 – Осциллограммы тока и напряжения, формируемые в рассматриваемом режиме

4.4 Особенности проверки устройства токовой блокировки при качаниях

Для предотвращения неправильной работы дистанционной защиты в АР и при качаниях производители РЗ, например [93], зачастую применяют блокировку при качаниях токовую (БКТ), контролирующую динамику изменения токов прямой и обратной последовательностей. По своей сути данная блокировка выполняет функцию разрешения работы защите при выявлении уровня приращения тока любой из указанных последовательностей выше заданной уставки. По этому признаку осуществляется распознавание режимов работы энергосистемы: при качаниях, асинхронном режиме и в нормальном рабочем режиме приращение тока на заданном промежутке времени мало, т.е. мала величина скорости изменения тока, а при коротком замыкании приращение тока прямой и/или обратной последовательности в единицу времени достаточно для выдачи команды на разрешение работы ДО от БКТ. Таким образом, БКТ не разрешает работать защите в АР (факт работоспособности БКТ проверяется при АР с годографом, пересекающим характеристику срабатывания ДО), однако при малых значениях периода АР приращение тока прямой последовательности может быть достаточным для срабатывания БКТ и, как следствие, защита может ложно сработать.

Таким образом, задача проверки БКТ сводится к определению такого периода моделируемого АР, при котором годограф сопротивления замера, пересекая зону действия ДО, вызывает срабатывание (ложное) защиты в целом.

Для корректной проверки БКТ необходимо, в первую очередь, уставку по току этой блокировки представить в удобном для анализа виде, то есть в виде определённого значения производной тока по времени. Так, в [93] для снятия блокировки защиты необходимо не только превышение приращения тока прямой последовательности ΔI_1 над уставкой срабатывания ΔI_{1cp} , но и фиксация этого превышения на протяжении времени Δt_{1cp} (производитель

рекомендует принимать значение Δt_{1cp} равным 5 мс), следовательно, с достаточной для качественного анализа точностью можно утверждать, что:

$$\left(\frac{dI_1}{dt}\right)_{cp} = \frac{\Delta I_{1cp}}{\Delta t_{1cp}}. \quad (4.26)$$

Далее необходимо выразить зависимость производной действующего значения моделируемого тока от времени. Для этого можно использовать модель энергосистемы, представленную на рисунке 4.1. В таком случае закон изменения тока во времени определяется по выражению:

$$\begin{aligned} \underline{I}_p(t) &= \frac{\underline{E}_1 - \underline{E}_2}{\underline{Z}_\Sigma} = \frac{E_1 \cdot \exp(j\delta_{10}) - E_2 \cdot \exp\left(j\delta_{20} + j\frac{2\pi}{T_{AP}}t\right)}{Z_\Sigma \cdot \exp(j\delta_Z)} = \\ &= \frac{E_1}{Z_\Sigma} \cdot \exp(j\delta_{10} - j\delta_Z) - \frac{E_2}{Z_\Sigma} \cdot \exp\left(j\delta_{20} - j\delta_Z + j\frac{2\pi}{T_{AP}}t\right), \end{aligned} \quad (4.27)$$

где δ_Z - угол полного сопротивления \underline{Z}_Σ , рад.

Дальнейшие действия рассмотрим на примере осциллограммы тока (рис. 4.12), которая получена в результате перевода в мгновенные значения результатов расчета по формуле (4.27), где принято, что $T_{AP} = 1$ с, $|\underline{E}_1| = 50$ В, $|\underline{E}_2| = 75$ В, $\delta_{10} = 50^\circ$, $\delta_{20} = 0^\circ$, $|\underline{Z}_\Sigma| = 70$ Ом, $\delta_Z = 81^\circ$. Характер изменения тока представляет собой биения, при этом минимальное значение тока не равно нулю, так как модули ЭДС $|\underline{E}_1|$ и $|\underline{E}_2|$ не равны между собой.

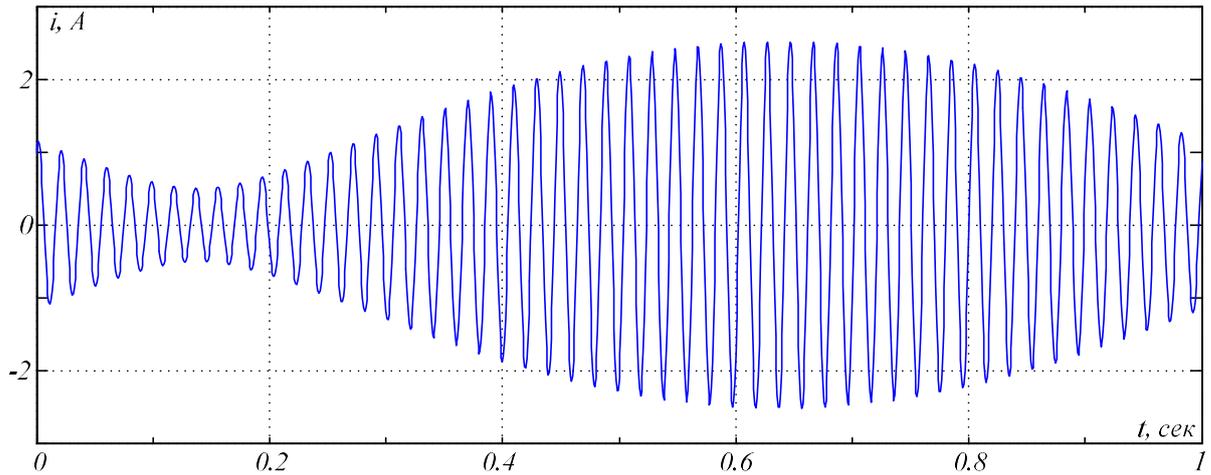


Рисунок 4.12 – Характер изменения мгновенных значений тока в АР

Средствами цифровой фильтрации сигнала, зная его мгновенное значение в каждый отсчет времени, на основе [53] можно рассчитать действующее значение моделируемого тока:

$$I = \frac{1}{N} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^N i_j^2},$$

где N – количество выборок (отсчётов) тока за период промышленной частоты;

i_j – мгновенное значение тока в j -ю выборку.

Зависимость вычисленного средствами цифровой фильтрации действующего значения тока от времени приведена на рисунке 4.13.

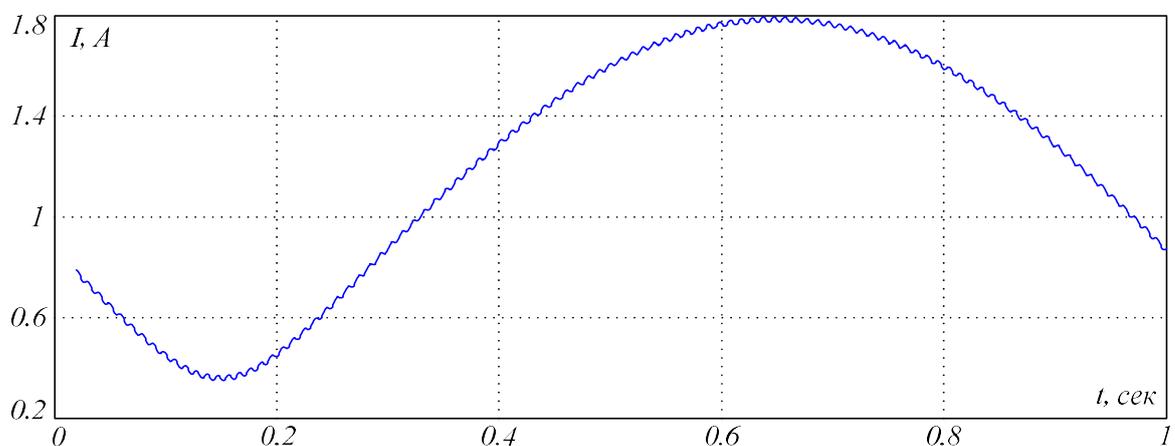


Рисунок 4.13 – Выделение действующего значения тока I_p в АР

Нетрудно показать, что действующее значение тока при АР для любого момента времени t можно вычислить как модуль тока, определённый по формуле (4.27), то есть

$$|\underline{I}_p(t)| = \sqrt{\left(\frac{E_1}{Z_\Sigma}\right)^2 + \left(\frac{E_2}{Z_\Sigma}\right)^2 - 2\frac{E_1 E_2}{Z_\Sigma^2} \cos\left(\delta_{10} - \delta_{20} - \frac{2\pi}{T_{AP}} t\right)}. \quad (4.28)$$

Выражение (4.28) получено применением теоремы косинусов из векторной диаграммы (рис. 4.14), составленной в общем виде для правой части уравнения (4.27).

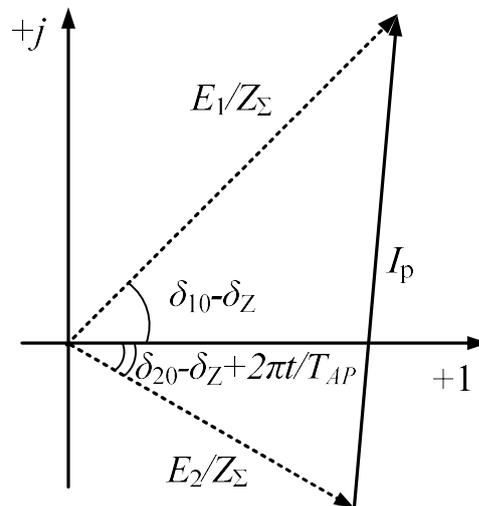


Рисунок 4.14 – Векторная диаграмма для определения модуля вектора \underline{I}_p

На рисунке 4.15 представлена осциллограмма модуля тока \underline{I}_p , рассчитанного в соответствии с (4.28). Её совпадение с осциллограммой действующего значения тока, полученного средствами цифровой фильтрации (рис. 4.13), свидетельствует о корректности проведенных расчётов.

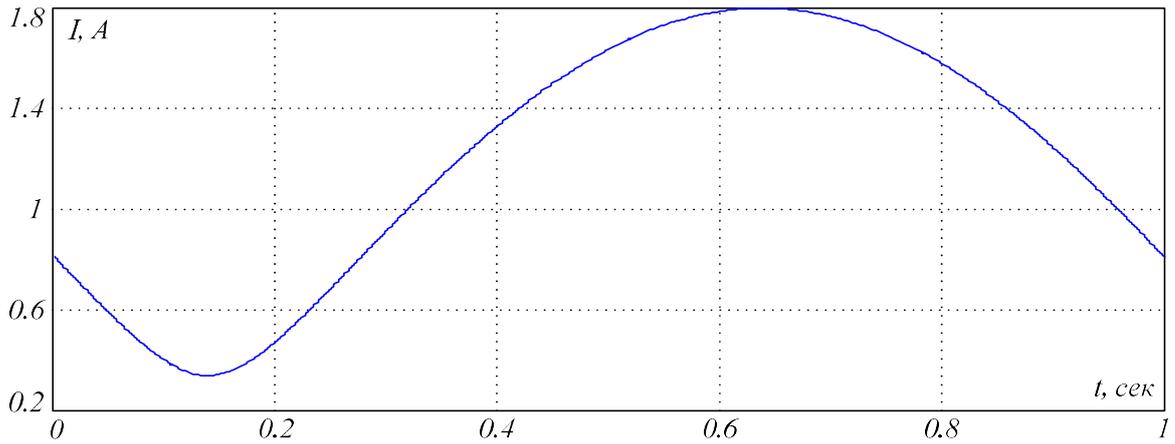


Рисунок 4.15 – Осциллограмма действующего значения тока I_p в АР

Для определения зависимости скорости изменения действующего значения тока от времени необходимо продифференцировать по времени выражение (4.28), в результате чего получаем:

$$\frac{d|I_p(t)|}{dt} = \frac{-\frac{2\pi}{T_{AP}} \cdot \frac{E_1 E_2}{Z_{\Sigma}^2} \sin\left(\delta_{10} - \delta_{20} - \frac{2\pi}{T_{AP}} t\right)}{\sqrt{\left(\frac{E_1}{Z_{\Sigma}}\right)^2 + \left(\frac{E_2}{Z_{\Sigma}}\right)^2 - 2 \frac{E_1 E_2}{Z_{\Sigma}^2} \cos\left(\delta_{10} - \delta_{20} - \frac{2\pi}{T_{AP}} t\right)}}. \quad (4.29)$$

Производная действующего значения тока в соответствии с (4.29) для рассматриваемого примера приведена на рисунке 4.16, и она совпадает с производной тока, полученной в результате численного дифференцирования, что также свидетельствует о правильности полученного выражения.

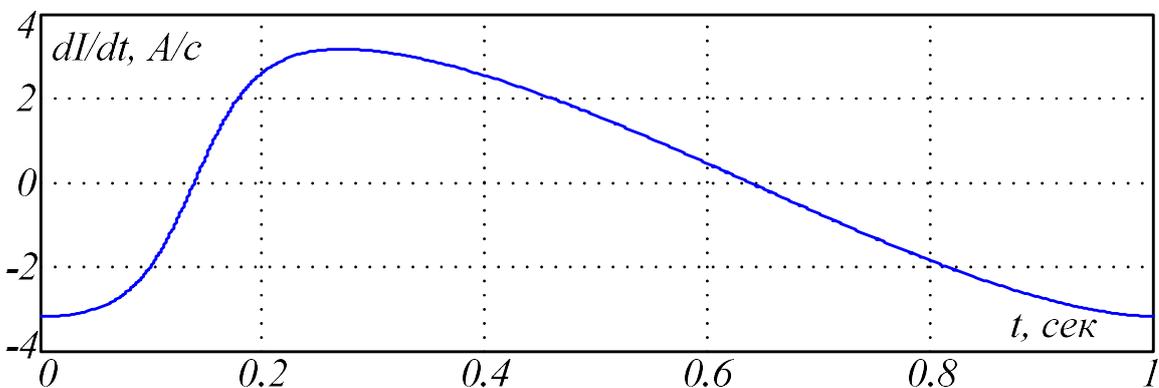


Рисунок 4.16 – Скорость изменения действующего значения тока I_p в АР

Чтобы использовать формулу (4.29) в целях проверки БКТ, работающей совместно с ДО, нужно знать момент времени t , для которого необходимо определить скорость изменения действующего значения тока. В контексте рассматриваемой задачи этот момент времени, на первый взгляд, должен соответствовать моменту входа конца вектора измеряемого сопротивления внутрь характеристики срабатывания, поэтому зная параметры этой характеристики, следует определить координаты точки пересечения моделируемого годографа с ней, а затем воспользоваться формулой (4.8) для определения t . Далее сравнивая вычисленную скорость изменения действующего значения тока с уставкой БКТ, определённой в соответствии с (4.26), делается вывод о возможности (невозможности) отказа в работе этой блокировки и, как следствие, срабатывания (несрабатывания) защиты.

С другой стороны, в [93] дополнительно к пусковому органу БКТ, содержащему орган сравнения приращения тока с уставкой и выдержку времени на срабатывание, добавляется элемент с регулируемой выдержкой времени, ограничивающий по длительности разрешение работы дистанционной защиты. Как правило, время разрешения работы от БКТ принимается больше на 0,1 с, чем время срабатывания второй ступени защиты. Из этого следует, что при срабатывании БКТ на любом временном промежутке моделируемого АР и попадании годографа в зону действия первой ступени дистанционной защиты формируется команда на отключение, так как при скорости изменения тока моделируемого АР, достаточной для работы БКТ, период АР не превышает уставку по времени деблокировки защиты. Следовательно, для проверки БКТ необходимо сравнивать максимально возможную скорость изменения действующего значения тока в моделируемом АР с уставкой БКТ, определённой в соответствии с (4.26). Для определения максимально возможной скорости изменения тока необходимо определить вторую производную по времени действующего значения тока

$$\frac{d^2|I_p(t)|}{dt^2} = \frac{4\pi^2}{T_{AP}^2} \cdot \frac{E_1 E_2}{Z_{\Sigma}^4} \cdot \frac{\cos\left(\delta_{10} - \delta_{20} - \frac{2\pi}{T_{AP}} t\right) \left(E_1^2 + E_2^2 - E_1 E_2 \cos\left(\delta_{10} - \delta_{20} - \frac{2\pi}{T_{AP}} t\right)\right) - Z_{\Sigma}^2}{\left(\left(\frac{E_1}{Z_{\Sigma}}\right)^2 + \left(\frac{E_2}{Z_{\Sigma}}\right)^2 - 2 \frac{E_1 E_2}{Z_{\Sigma}^2} \cos\left(\delta_{10} - \delta_{20} - \frac{2\pi}{T_{AP}} t\right)\right)^{3/2}}$$

и приравнять её нулю. Далее необходимо определить экстремумы скорости изменения тока, то есть те моменты времени, в которых эта скорость максимальна или минимальна. Однако определить время, когда скорость максимальна, можно и по выражению (4.29). Действительно, здесь значение является максимальным, когда и числитель максимален, то есть тогда, когда угол между ЭДС энергосистем равен $-\pi/2$:

$$\sin\left(\delta_{10} - \delta_{20} - \frac{2\pi}{T_{AP}} t\right) = -1,$$

$$t = \frac{T_{AP}\left(\delta_{10} - \delta_{20} + \frac{\pi}{2}\right)}{2\pi},$$

тогда

$$\frac{d|I_p(t)|}{dt} \max = \frac{2\pi \cdot E_1 E_2}{T_{AP} \cdot Z_{\Sigma} \cdot \sqrt{E_1^2 + E_2^2}}. \quad (4.30)$$

Для рассматриваемого примера максимальное значение скорости изменения тока, рассчитанное по выражению (4.30), равно 3,74 А/с, что соответствует его графической иллюстрации (рис. 4.16)

Отметим, что при малых значениях T_{AP} скорость изменения электрических сигналов тока и напряжения настолько велика, что устройства РЗ и ПА могут работать с погрешностью, которая приведёт к расхождению результатов замера $Z(\delta)$, действующего значения тока с расчётами численных

значений соответствующих величин по вышеприведённым формулам из-за инерционности работы цифровых фильтров, используемых в современных устройствах. Однако исследования показывают, что для значений T_{AP} , при которых, например в [94], требуется безотказная работа устройств ПА с функцией АЛАР, с указанной погрешностью можно практически не считаться.

Исследования устойчивости функционирования РЗ и ПА с функциями, содержащими дистанционный орган, в моделируемых АР безусловно необходимо проводить на реальных устройствах, а не на математических моделях этих защит, так как описать алгоритм работы микропроцессорного устройства защиты весьма проблематично – необходимо иметь полную достоверную информацию о применяемых методах цифровой фильтрации входных сигналов, о дополнительных способах отстройки от режимов, в которых устройство не должно срабатывать (если таковые имеются). Вся эта информация является коммерческой тайной производителей устройств РЗ и ПА, а техническая документация, поставляемая вместе с защитным оборудованием, содержит лишь краткую информацию о наиболее общих принципах действия.

В связи с этим, разработан программный модуль формирования осциллограммы сигналов тока и напряжения, необходимых для анализа работы ДО в асинхронном режиме, в формате COMTRADE [95], что является достаточным для воспроизведения средствами испытательного комплекса РЕТОМ-51(61). Особенности реализации данного программного модуля отражены в Приложении А.

Выводы по главе 4

1. Разработана методика определения параметров модели энергосистемы для формирования тестовых асинхронных режимов при проверках дистанционных органов с использованием испытательной установки РЕТОМ-51(61).

2. Предложен подход к определению диапазона допустимых значений периода асинхронного хода моделируемого режима при проверке устройств ПА и РЗ, использующих дистанционный принцип.

3. Разработаны алгоритмы, позволяющие формировать входные сигналы устройств релейной защиты и автоматики в виде токов и напряжений, подаваемых непосредственно на входы испытуемого объекта. Подаваемые на входы устройства сигналы позволяют проверять поведение дистанционных органов в асинхронных режимах работы контролируемого участка сети, в которых годограф вектора сопротивления замера имеет вид окружности.

4. Предложен подход к определению зоны несрабатывания в асинхронном режиме токовой блокировки дистанционной защиты при качаниях.

5. Предложенные подходы позволяют проверять дистанционные органы релейных защит и противоаварийной автоматики, не привязываясь к конкретному типу испытательной установки при наличии в ней поддержки воспроизведения зарегистрированных режимов, сохранённых в формате Comtrade.

6. Предложенные средства позволяют автоматизировать процесс подготовки входных сигналов для проведения испытаний, что существенно снижает трудоёмкость и повышает качество проведения наладочных и профилактических работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выполненной работе разработаны усовершенствованные методики по проверке и выбору параметров срабатывания дистанционных измерительных органов устройств релейной защиты и автоматики. При этом особое внимание уделено необходимости учета насыщения трансформаторов тока при анализе работы дистанционных органов. В целом при выполнении работы получены следующие результаты.

1. Разработана достаточно полная математическая модель комплекса «объект защиты – измерительные трансформаторы – измерительные органы защиты», позволяющая исследовать поведение защит в наиболее сложных режимах для исследования их устойчивости функционирования. Разработанные средства моделирования позволяют оценивать поведение измерительных дистанционных органов в переходных процессах с учётом влияния погрешностей трансформаторов тока, используемых защитой, и их взаимодействием в группе. Эти средства, с одной стороны, могут быть использованы для выбора характеристик срабатывания измерительных органов устройств РЗ на основании получаемых осциллограмм токов, напряжений, годографов вектора замера реле сопротивления в комплексной плоскости и осциллограмм выходных сигналов измерительных органов, а с другой стороны, позволяют проверять ТТ на соответствие требованию надёжной работы измерительных органов защиты при близких КЗ.

2. В работе показано, что использование традиционных методик расчета параметров срабатывания ступеней дистанционных защит при нетиповой конфигурации сети и использовании современного оборудования не позволяет учесть все особенности первичного защищаемого объекта. Автором предлагается внести корректировки в эти методики, в которых необходимо учитывать не только указания нормативно-технических актов, но и требования к установленному на объекте защиты оборудованию, поскольку условия допустимой работы, указанные в технической

документации на оборудование, часто оказываются более жесткими, чем в нормативно-технической документации. Более того, использование расширенных возможностей современных защит позволяет выбрать такой набор параметров срабатывания защит, который обеспечивает необходимые селективность и чувствительность их действия, а также в полной мере удовлетворяет требованиям, обусловленным особенностями современного, вновь устанавливаемого первичного оборудования электроэнергетических систем.

3. Предложен способ использования в ступени дистанционной защиты, установленной на трансформаторе блока, одновременно нескольких независимых измерительных органов с заданными характеристиками срабатывания. Такой способ не только позволяет получить необходимую чувствительность устройств и обеспечить надежную отстройку от нагрузочного режима, но и даёт проектировщику устройств РЗ дополнительный инструментарий, расширяющий возможности выбора уставок защит в сетях сложной конфигурации.

4. Автором предложено дополнять устройство АОПЧ (при наличии в нем ступеней по скорости изменения частоты) дистанционным блокирующим органом, который выявляет попадание сопротивления замера в область коротких замыканий, в которой необходимо вводить блокировку для ступеней АОПЧ. Использование дистанционного блокирующего органа позволяет повысить быстродействие АОПЧ в аварийных режимах, связанных с недопустимым повышением частоты, существенно уменьшить ущерб, вызываемый отключением оборудования на электрических станциях.

5. Разработаны алгоритмы, позволяющие формировать входные сигналы устройств релейной защиты и автоматики в виде токов и напряжений, подаваемых непосредственно на входы испытуемого объекта. Подаваемые на входы устройства сигналы позволяют проверять поведение дистанционных органов в асинхронных режимах работы контролируемого

участка сети, в которых годограф вектора сопротивления замера имеет вид окружности.

6. Предложена методика определения диапазона допустимых значений периода асинхронного хода моделируемого режима при проверке устройств ПА и РЗ, использующих дистанционный принцип.

7. Предложена методика определения зоны несрабатывания в асинхронном режиме токовой блокировки дистанционной защиты при качаниях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Циглер, Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение / Г. Циглер; пер. с англ.; под ред. А.Ф. Дьякова – М.: Энергоиздат, 2005 – 322 с.
2. Чернобровов, Н.В. Релейная защита энергетических систем: учеб. пособие для техникумов / Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов. – Москва: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
3. Федосеев, А.М. Основы релейной защиты / А.М. Федосеев. – М.-Л., Госэнергоиздат, 1961. – 440 с.
4. Фабрикант, В. Л. Дистанционная защита. Учеб. пособие для вузов. / В. Л. Фабрикант – М.: Высш. школа, 1978. - 215с.
5. Удрис, А. П. Релейная защита воздушных линий 110-220 кВ типа ЭПЗ-1636 / А.П. Удрис – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 141 с. – (Б-ка электромонтера; Вып. 602).
6. Шнеерсон Э.М. Динамика сложных измерительных органов релейной защиты / Э.М. Шнеерсон - М.: Энергоиздат, 1981.- 208 с.
7. Шнеерсон, Э.М. Цифровая релейная защита / Э.М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
8. Федосеев, А.М. Релейная защита электроэнергетических систем: учеб. для вузов / А.М. Федосеев, М.А. Федосеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.
9. Фокин, Г.Г. Панели дистанционных защит ПЗ-2/1 и ПЗ-2/2 / Г.Г. Фокин, М.Н. Хомяков. – М., Энергия, 1975. – 112 с. (Библиотека электромонтера. Вып.411).
10. Устройства дистанционной и токовой защит типов ШДЭ 2801, ШДЭ 2802 / А.Н. Бирг, Г.С. Нудельман, Э.К. Федоров и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988 г. – 144 с. (Библиотека электромонтера. Вып.612).
11. Микропроцессорное устройство защиты «Сириус-3-ЛВ-2» [Электронный ресурс] // Руководство по эксплуатации. БПВА.656122.080 РЭ. – АО «Радиус Автоматика». – Режим доступа: <https://www.rza.ru/upload/>

iblock/66a/rukovodstvo-po-ekspluatatsii-sirius_3_lv_02 - _redaktsiya-ot-11.02.19
_pdf. – Загл. с экрана.

12. ЭКРА.656453.049 РЭ. Шкаф дистанционной и токовой защиты линии типа ШЭ 2607 021021, ШЭ 2607 021 [Электронный ресурс] // Руководство по эксплуатации. – Чебоксары: ООО НПП «ЭКРА», 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с титул. экрана.

13. Устройство дифференциальной защиты линии с функцией дистанционной защиты SIPROTEC 7SD52/53 [Электронный ресурс] // Руководство по эксплуатации. Версия 4.60. – Siemens AG, 2008. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с титул. экрана.

14. D60 Line Distance Protection System [Электронный ресурс] // UR Series Instruction Manual. D60 Revision: 5.7x. – GE Multilin Inc., 2015. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с титул. экрана.

15. Шнеерсон Э.М. Дистанционные защиты / Э.М. Шнеерсон - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 446 с.

16. Быстродействующая автоматика ограничения повышения частоты / В. В. Васильев, А. А. Осинцев, Д. Н. Бородин, Е. И. Фролова // Релейная защита и автоматизация. - 2016. - № 2. - С. 22-27.

17. В. Kasztenny, J. Mazereeuw, K. Jones. CT saturation in industrial applications – analysis and application guidelines [Electronic resource] // GE Grid Solutions. – URL: <https://store.gegridsolutions.com/faq/Documents/General/GET-8501.pdf>. (date accessed 29.03.2019).

18. Кужеков С.Л. О координации функционирования трансформаторов тока и устройств релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем в переходных режимах коротких замыканий / С.Л. Кужеков, А.А. Дегтярев // Электротехника. – №12. – 2017. – С. 65-72.

19. Кужеков С.Л. Определение времени до насыщения трансформаторов тока в переходных режимах коротких замыканий / С.Л. Кужеков, А.А. Дегтярев, В.С. Воробьев, В.В. Москаленко // Электрические станции. – №1. – 2017. – С. 42-47.

20. Королев, Е. П. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты / Е. П. Королёв, Э. М. Либерзон. – М. : Энергия, 1980. – 208 с.

21. Стандарт организации. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ (НТП ПС) [Электронный ресурс]: СТО 56947007-29.240.10.028-2009. – Введ. 2009 – 04 – 13. – ОАО «ФСК ЕЭС», 2009. – 96 с. – Режим доступа: <http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.240.10.028-2009.pdf>. – Загл. с экрана.

22. Стандарт организации. Нормы технологического проектирования воздушных линий электропередачи напряжением 35-750 кВ [Электронный ресурс]: СТО 56947007-29.240.55.192-2014. – Введ. 2014 – 11 – 20. – ОАО «ФСК ЕЭС», 2014. – 72 с. – Режим доступа: http://www.fsk-ees.ru/about/management_and_control/test/STO_56947007-29.240.55.192-2014.pdf. – Загл. с экрана.

23. Дмитренко А.М. О методе повышения качества функционирования дифференциальных защит трансформаторов при использовании электромагнитных трансформаторов тока / А.М. Дмитренко, В.А. Наумов, А.В. Солдатов, Д.П. Журавлев // Релейная защита и автоматизация. – №1(30). – 2018. – С.46-51.

24. Свистунов Н.А. Выбор измерительных трансформаторов тока, используемых дифференциальной релейной защитой / Н.А. Свистунов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – №12-1. – 2017. – С.113-117.

25. Глазырин В.Е. Сопоставление отстроенности микропроцессорных дифференциальных защит генератора от внешних коротких замыканий при насыщениях трансформаторов тока / В.Е. Глазырин, А.А. Осинцев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – №1. – 2012. – С.364-367.

26. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем: учеб. для вузов / В. П. Тарасик. – Мн. : ДизайнПРО, 2004. – 640 с.

27. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука: пер. с англ. / Р. Шеннон. – М. : Мир, 1978. – 420 с.

28. Влияние переходных процессов в трансформаторах тока на поведение дистанционных органов / Е. И. Фролова, В. Е. Глазырин // Международная молодежная научно-техническая конференция «Управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах», [г. Новосибирск], 21–24 сент. 2011 г. : тез. докл.. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – С. 58–59.

29. Ледовских А. А. Влияние погрешностей трансформаторов тока на работу цифровых дистанционных защит / А. А. Ледовских, Е. И. Фролова, А. А. Осинцев // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. : в 9 ч., Новосибирск, 3–7 дек. 2018 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Ч. 4. – С. 136–139.

30. Osintsev A. A. Research of transients influence in current transformers on the distance protection operation [Electronic resource] / A. A. Osintsev, E. I. Frolova // 13 International forum on strategic technology (IFOST 2018) : proc., China, Harbin, 30 May – 1 June 2018. – Harbin : IEEE, 2018. – P. 914-920. - 1 flash card (CFP18786-USB). – Title with the label.

31. Manassah, J. T. Elementary mathematical and computational tools for electrical and computer engineers using MATLAB / J. T. Manassah. – CRC Press LLC, 2001. – 347 p.

32. M.H. Idrisa, S. Hardia, M.Z. Hasana, “Teaching Distance Relay Using Matlab/Simulink Graphical User Interface”, Malaysian Technical Universities Conference on Engineering & Technology 2012 MUCET, 2012.

33. Глазырин, В. Е. Исследование с использованием математических моделей влияния переходных процессов в трансформаторах тока на поведение дистанционных органов / В. Е. Глазырин, Е. И. Фролова // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. - 2012. – № 4. – С. 9-14.

34. Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С. А. Ульянов. – М. – Л. : Энергия, 1964. – 704 с.
35. Основы теории цепей: учеб. для вузов. Изд. 4-е перераб. / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов – М.: «Энергия», 1975. – 752 с.
36. Берман, А. П. Расчёт несимметричных режимов электрических систем с использованием фазных координат / А. П. Берман // Электричество. - 1985. – № 12. – С. 102-105.
37. Гусейнов, А. М. Расчёт в фазных координатах несимметричных установившихся режимов в сложных системах / А. М. Гусейнов // Электричество. - 1989. – № 8. – С. 1-7.
38. Лосев, С. Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем / С. Б. Лосев, А. Б. Чернин – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 528 с.
39. Якимчук, Н. Н. Применение метода фазных координат для анализа несимметричных режимов электроэнергетических систем: автореф., дис. канд. техн. наук / Якимчук Николай Николаевич, Санкт-Петербург, 2000 – 18 с.
40. Расчёты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ: Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.
41. Дроздов, А. Д. Электрические цепи с ферромагнитными элементами в релейной защите / А. Д. Дроздов [и др.] ; под ред. В. В. Платонова – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.
42. Наумов, В. А. Математические модели трансформатора тока в исследованиях алгоритмов дифференциальных защит / В. А. Наумов, В. М. Шевцов // Электр. станции – 2003. – № 3. – С. 51–56.
43. Guerra, F. F. Current transformer model / F. F. Guerra, W. S. Mota // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – Vol. 22, №1 – P. 187–194.

44. U.D. Annakkage, P.G. McLaren, E. Dirks, R.P. Jayasinghe, A.D. Parker, “A current transformer model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, pp. 57-61, 2000.
45. M. Kezunovic, “Experimental Evaluation of EMTP-based Current Transformer Models for Protective Relay Transient Study”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, issue. 1, pp. 405-413, 1994.
46. I.I. Litvinov, A.A. Osintsev, V.E. Glazirin, “Characteristic features of internal and external faults for use in differential protection”, Advances in Engineering Research, vol.133, pp. 425-432, 2017.
47. Осинцев, А. А. Разработка методов и средств повышения устойчивости функционирования дифференциальной защиты генератора: автореф., дис. канд. техн. наук / Осинцев Анатолий Анатольевич, Новосибирск, 2013 – 24 с.
48. Сопьяник, В. Х. Расчет на ПЭВМ переходных и установившихся процессов в трансформаторах тока и токовых цепях РЗ / В. Х. Сопьяник // Электрические станции – 2004. – № 2. – С. 48–52.
49. Прутик, А. Ф. Моделирование релейной защиты и автоматики в концепции всережимного моделирования электроэнергетических систем / А. Ф. Прутик // Современные техника и технологии : сб. тр. XVI междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых : в 3 т. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2010. – Т. 1. – С. 101–102.
50. Глазырин, В. Е. Моделирование переходных процессов в группах трансформаторов тока / В. Е. Глазырин, Г. Э. Торопов // Сб. науч. тр. НГТУ. – Новосибирск : Изд-во НГТУ. – 2000. – № 3(20). – С. 75–82.
51. Электротехническая энциклопедия: Т1 / под ред. А. Ф. Дьякова // – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 314 с.
52. Куликов, А. Л. Введение в методы цифровой релейной защиты высоковольтных ЛЭП: Учеб. пособие /–А. Л. Куликов, М. Ш. Мисриханов. – М.: Энергоатомиздат, 2007. –463 с.

53. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. для вузов / А. Б. Сергиенко. – 2-е изд.– СПб. : Питер, 2006. – 751 с.
54. ЭКРА.656116.166 ТО. Цифровые защиты генераторов, трансформаторов и блоков генератор-трансформатор электростанций [Электронный ресурс] // Техническое описание. – Чебоксары: ООО НПП «ЭКРА», 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с титул. экрана.
55. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем / А. М. Федосеев. – М. : Госэнергоиздат, 1952. – 480 с.
56. Реализация характеристик срабатывания дистанционных защит / А. А. Осинцев, Е. И. Фролова, А. Е. Гоженко // Новое в российской электроэнергетике : науч.-техн. электрон. журн. – 2017. – № 4. – С. 64–70.
57. Расчеты релейной защиты и автоматики фирм: «Siemens AG», «НПП ЭКРА», «АББ Автоматизация», «AREVA» и «General Electric» для воздушных и кабельных линий с односторонним питанием, напряжением 110-330 кВ [Электронный ресурс] // Методические указания. – Чебоксары: НПП «Селект», 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с титул. экрана.
58. Marchand, P. Graphics and GUIs with MATLAB / P. Marcand, T. Holland. – Chapman & Hall, 2003. – 523 p.
59. Консультационный центр MATLAB компании Softline [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/gui/index.php>. – Загл. с экрана.
60. Фролова Е. И. Применение резервной дистанционной защиты на блочном трансформаторе / Е. И. Фролова, А. А. Осинцев // Электрические станции. - 2016. - № 2. - С. 38-41 (Frolova E. I. Use of backup distance protection on a block transformer / E. I. Frolova, A. A. Osintsev // Power Technology and Engineering. - 2016. - Vol. 50, iss. 2. - P. 220–223).
61. Правила устройства электроустановок. – 6-е и 7-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ДЕАН, 2015. – 701 с.

62. Шабад, М. А. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. Экспериментальная и расчетная проверки: Конспект лекций / М. А. Шабад. – СПб.: ПЭИПК, 2010. – 64 с.

63. Влияние погрешностей трансформаторов тока на работу цифровых токовых защит / В. Е. Глазырин, А. А. Осинцев, Е. И. Фролова, А. А. Ледовских // Вестник Казанского государственного энергетического университета. - 2019. – Т. 11, № 2 (42). – С. 83–90.

64. Дистанционная защита линий 35-330 кВ: Руководящие указания по релейной защите. Вып. 7. – М.: Энергия, 1966. – 172 с.

65. Рекомендации по расчету уставок резервных защит ЛЭП ВН на базе шкафов НПП «ЭКРА» [Электронный ресурс] // Рекомендации по расчету уставок. – ООО НПП «ЭКРА», 2012. – Режим доступа: <https://www.ekra.ru/engine/download.php?id=3738>. – Загл. с экрана.

66. Методические указания по выбору уставок дистанционных защит от всех видов КЗ и токовых защит устройства MICOM P437 производства компании AREVA. – Харьков: Укрэнергопроект, 2008.

67. Неклепаев, Б. Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования [Текст]: Учеб. пособие для вузов/—Б. Н. Неклепаев, И. П. Крючков. – М.: Энергоатомиздат, 1989. –608 с.

68. Силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение от 45 до 330 кВ. Каталог продукции ЮжКабель [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://yuzhcable.com.ua/wp-content/uploads/2018/03/Каталог-Кабели-XLPE-45-330-кВ.pdf>. – Загл. с экрана.

69. Методические указания по расчетам и выбору уставок микропроцессорных защит ВЛ 110 – 220 (330) кВ и 500 (330) – 750 кВ от всех видов КЗ типов REL511 и REL521. Том № 23ТМ-Т2. ОАО «Энергосетьпроект». 2000 г.

70. Фролова Е.И. Проблема выбора уставок дистанционной защиты кабельных линий / Е.И. Фролова // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. - 2011. – № 1. – С. 113-118.

71. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств напряжением 6...750 кВ подстанций: Материалы для проектирования 407-03-456.87 / Минэнерго СССР: ВГПИ и НИИ «Энергосетьпроект», 1987. - Альбом 1. – 74 с.

72. Line distance protection REL670 [Электронный ресурс] // Technical manual, version 2.2 IEC. – ABB, 2019. – Режим доступа: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1MRK506370-UEN&Language Code=en&DocumentPartId=&Action=Launch>. – Загл. с экрана.

73. Фролова Е. И. Применение дистанционной защиты от междуфазных коротких замыканий на блоках линия - трансформатор. / Е. И. Фролова, В. Е. Глазырин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2012. - № 1. - С. 396-400.

74. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ: Руководящие указания по релейной защите. Вып. 13А. – М.: Энергия, 1985. – 112 с.

75. Багинский, Л.В. Релейная защита электрических сетей от междуфазных коротких замыканий: Учеб. пособие / Л.В. Багинский – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 107 с.

76. Фролова Е. И. Выбор параметров срабатывания дистанционной защиты кабельно-воздушных линий. / Е. И. Фролова // Современные техника и технологии: сборник трудов 18 международной конференции. - Томск: Изд-во ТПУ, 2012. - Том 1. - С. 123-124.

77. A Novel Approach for Improvement of Power Swing Blocking and Deblocking Functions in Distance Relays / I. Tekdemir, B. Alboyaci // IEEE Transactions on Power Delivery. - 2017. - Vol. 32, iss. 4. - P. 1986–1994. - DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2600638.

78. Detection of symmetrical faults by distance relays during power swings / S. Lotfifard, J. Faiz, M. Kezunovic // IEEE Transactions on Power Delivery. - 2010. - Vol. 25, iss. 1. - P. 81-87. - DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2035224.

79. Distance relay with out-of-step blocking function using wavelet transform / S. M. Brahma // IEEE Transactions on Power Delivery. - 2007. - Vol. 22, iss. 3. - P. 1360-1366. - DOI: 10.1109/TPWRD.2006.886773.

80. A new algorithm to stabilize distance relay operation during voltage-degraded conditions / M. Sharifzadeh, H. Lesani, M. Sanaye-Pasand // IEEE Transactions on Power Delivery. - 2014. - Vol. 29, iss. 4. - P. 1639-1647. - DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2285502.

81. An advanced method for testing of distance relay operating characteristic / M. Kezunovic, Y.Q. Xia, Y. Guo, C.W. Fromen, D.R. Sevcik // IEEE Transactions on Power Delivery. - 1996. - Vol. 11, iss. 1. - P. 149-157. - DOI: 10.1109/61.484011.

82. New algorithms to test distance relays / A. Dierks, D. Kehrberg // Proceedings from the Seventh International Conference on Developments in Power System Protection. pp. 205-208 April 2001. – DOI: 10.1049/cp:20010136.

83. Комплекс противоаварийной автоматики многофункциональный КПА-М-03.04.05.05.06.09.11.15.-10001-УХЛ4 [Электронный ресурс] // Руководство по эксплуатации. – АО «ИАЭС», 2017. – Режим доступа: http://iaes.ru/uploads/pages/files/iaes_local_re208.pdf. – Загл. с экрана.

84. РЕТОМ-61. Комплекс программно-технический измерительный [Электронный ресурс] // Руководство по эксплуатации. БРГА.441323.017 РЭ. – НПП «Динамика». – Режим доступа: <http://dynamics.com.ru/userfiles/file/support/retom-61o.pdf>. – Загл. с экрана.

85. Глазырин, В. Е. О выборе параметров модели энергосистемы для комплексной дистанционной проверки автоматики ликвидации асинхронного режима / В. Е. Глазырин, О. В. Танфильев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2014. – № 4. – С. 323-325

86. Гоник, Я.Е. Автоматика ликвидации асинхронного режима / Я.Е. Гоник, Е.С. Иглицкий. М.: Энергоатомиздат, 1988. –112 с.

87. Проверка дистанционного органа устройств РЗ и ПА в асинхронном режиме стандартными средствами испытательного комплекса «РЕТОМ» / В. Е. Глазырин, А. А. Осинцев, И. И. Литвинов, Е. И. Фролова // Электрические станции – 2017. – № 11. – С. 32–37 (Verification of distance relay of relay protection and emergency control automation equipment in asynchronous mode by standard devices of the RETOM test complex / V. E. Glazyrin, A. A. Osintsev, I. I. Litvinov, E. I. Frolova // Power Technology and Engineering. - 2018. – Vol. 52, iss. 2. – P. 242-247. - DOI: 10.1007/s10749-018-0939-8).

88. Аоки, М. Введение в методы оптимизации / М. Аоки. М.: Наука, 1977. – 344 с.

89. Способ получения годографа асинхронного режима с заданными характеристиками для проверки работы дистанционного органа / В. Е. Глазырин, И. И. Литвинов, А. А. Осинцев, Е. И. Фролова // Электрические станции. - 2018. - № 6. - С. 36-41 (Method of obtaining the hodograph of an asynchronous mode with given characteristics for testing the operation of a distance relay / V. E. Glazyrin, I. I. Litvinov, A. A. Osintsev, E. I. Frolova // Power Technology and Engineering. - 2018. - Vol. 52, iss. 4. - P. 491–495. - DOI: 10.1007/s10749-018-0979-0).

90. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 1. – 4-е изд. / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2003. –463 с.

91. Способ проверки правильности функционирования дистанционного органа в асинхронном режиме [Электронный ресурс] / А. А. Осинцев, Е. И. Фролова, И. И. Литвинов, Ф. В. Поддубняк // Новое в российской электроэнергетике : науч.-техн. электрон. журн.. - 2018. – № 12. – С. 56–61.

92. Automation of distance relay testing [Electronic resource] / V. E. Glazyrin, I. I. Litvinov, A. A. Osintsev, E. I. Frolova // 20 International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2019 :

conf. proc., Altai Republic, Erlagol, 29 June – 3 July, 2019. – IEEE, 2019. – P. 711–715. - Mode of access: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8823241>. - Title from screen - ISBN 978-1-7281-1753-9. - DOI: 10.1109/EDM.2019.8823241.

93. Микропроцессорная защита линии 6-35 кВ типа «Бреслер ШЛ 2606.17» [Электронный ресурс] // Руководство по эксплуатации. АИПБ.656467.002-06.171 РЭ. – ООО «ИЦ Бреслер», 2006 г. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с титул. экрана.

94. Стандарт организации. Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Автоматика ликвидации асинхронного режима. Нормы и требования [Электронный ресурс]: СТО 59012820.29.020.008-2015. – Введ. 2015 – 12 – 24. – Москва, 2015. – 82 с. – Режим доступа: https://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/st_rza_alar_241215.pdf. – Загл. с экрана.

95. IEEE Standart Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems [Электронный ресурс]: IEEE Std C37.111-1999. – Approved 18 March 1999. – Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/document/798772/>. – Загл. с экрана.

96. СМС 353. The Universal Relay Test Set and Commissioning Tool [Электронный ресурс] // Product brochure. – OMICRON. – Режим доступа: <https://www.omicronenergy.com/ru/download/document/0056076E-AA6E-4E77-975F-FE459785B7C3/>. – Загл. с экрана.

ПРИЛОЖЕНИЕ А ОСОБЕННОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В АНАЛОГОВУЮ ФОРМУ СИГНАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ

Для проверки реальных устройств с функцией ДО необходимо использовать специализированное оборудование, позволяющее воспроизводить аналоговые сигналы тока и напряжение произвольной формы, полученные при моделировании. К минимальным техническим требованиям такого оборудования необходимо отнести 3 независимых канала по току, и 3 – по напряжению, а также, как минимум, канал дискретного ввода, необходимый для фиксации факта срабатывания защиты. К таким устройствам можно отнести, например, измерительные программно-технические комплексы РЕТОМ-61, OMICRON CMC 356 [84, 96]. В составе программного обеспечения, поставляемого вместе с вышеуказанными комплексами, содержится модуль, предназначенный для воспроизведения любого процесса, записанного в Comtrade-формате, масштабирования исходных данных и установки временных параметров при воспроизведении, фиксации реакции проверяемого устройства на приложенное воздействие, записи результатов работы в архив и вывода их на печать [84].

Формат файлов осциллограмм Comtrade [95] является общемировым форматом, созданным для удобства обмена, воспроизведения и анализа осциллограмм аварийных режимов. Несмотря на дату введения данного формата (1999 г.) он продолжает оставаться актуальным, так как большинство цифровых систем регистрации аварийных событий, которые также могут интегрироваться и в сложные комплектные устройства РЗА для фиксации поведения этих устройств в аварийных условиях, как правило, сохраняет аварийные осциллограммы и события в своём собственном формате. В связи с этим, в дополнение к программному обеспечению цифровых устройств регистрации производители предоставляют специализированные программы преобразования записанных данных в формат Comtrade.

При создании файлов стандарта COMTRADE используется кодировка ASCII. В каждом случае регистрации аварийного события формируется два обязательных типа связанных с ним файлов: конфигурация и данные. Кроме того, может формироваться необязательный файл типа "заголовок".

Имена файлов представляются в форме "xxxxxxxx.ууу". Часть имени ("xxxxxxxx") используется для идентификации записанного в событии. Часть ".ууу" используется как расширение для идентификации типа файла: ".cfg" для конфигурации, ".dat" для данных, ".hdr" для заголовка.

Файл конфигурации является неотъемлемой частью осциллограммы и предназначен для чтения компьютерной программой и поэтому должен содержать информацию в определенном формате. Данные в файле конфигурации представляют собой информацию, необходимую компьютерной программе для правильной интерпретации данных переходного процесса.

Файл разделен на строки, запятые используются для разделения элементов в пределах строки. Для пропущенных данных разделительные запятые сохраняются без пробела между ними. Информация в файл должна заноситься в определённом порядке, отклонение от которого приведет к неправильному истолкованию компьютером.

Конфигурационный файл [95] начинается с названия и идентификатора станции:

station_name, id,

где station_name – уникальное название регистратора, id – уникальный номер регистратора.

Следующая строка содержит количество и тип каналов, как они встречаются в записи данных:

$$NN, nnt, nnt,$$

где NN – общее количество каналов, nn – номер канала, t – тип входа (A – аналоговый, D – дискретный).

Далее в файле следует группа строк, содержащих информацию о каналах. Каждому каналу соответствует строка вида:

$$nn, id, p, ccccc, uc, a, b, skew, min, max,$$

где nn, id – номер и идентификатор канала, p – идентификатор фазы канала, ccccc – контролируемая цепь, uc – единица измерения в канале (V, A, и т.д.), a, b – коэффициенты усиления и смещения записанной величины, skew – сдвиг времени (в μc) в канале с начала отсчета, min, max – нижняя и верхняя границы диапазона для выборок рассматриваемого канала.

После того, как введена информация о всех каналах тока, на следующей строке выводится частота сети в Гц (50). Последующие строки содержат информацию об общем количестве частот дискретизации (nrates) с последующим списком, содержащим каждую частоту дискретизации (sssssn) и номер последней выборки для данной скорости (endsampn).

Частота дискретизации, используемая для сохранения осциллограмм в формате Comtrade, как правило, принимается равной 1200 Гц. Именно такая частота опроса наиболее часто используется в регистраторах аварийных событий. Однако в зависимости от периода моделируемого асинхронного хода пользователь должен оценивать необходимость изменения частоты дискретизации: при малых периодах AP необходимо увеличить частоту дискретизации. Уменьшение частоты дискретизации ниже 1200 Гц нежелательно, так как могут произойти незапланированные искажения формы тока и напряжения при преобразовании цифрового сигнала в

аналоговый и, как следствие, непредсказуемое поведение исследуемой защиты.

Две предпоследние строки содержат информацию о дате и времени: первая строка – для первого значения в файле данных, вторая – для момента пуска. Последняя строка конфигурационного файла содержит идентификатор типа данных – ASCII или BIN.

Пример полученного при моделировании AP по вышеприведённым методикам файла конфигурации "Test_OhmRele.cfg":

```
OhmRele_Testing, 00
6, 6A, 0D
1, IrA, ,, A, 0.001, 0, 0, -2048, 2048
2, UrA, ,, V, 0.001, 0, 0, -2048, 2048
3, IrB, ,, A, 0.001, 0, 0, -2048, 2048
4, UrB, ,, V, 0.001, 0, 0, -2048, 2048
5, IrC, ,, A, 0.001, 0, 0, -2048, 2048
6, UrC, ,, V, 0.001, 0, 0, -2048, 2048
50
1
1200, 3601
17/01/09, 14:11:18.185997
17/01/09, 14:11:18.185997
ASCII
```

Второй неотъемлемой частью файла формата Comtrade является файл данных, который содержит фактические величины данных переходного процесса. Чтобы данные считывались компьютерной программой, они должны точно соответствовать формату, определенному в конфигурации. Файл данных должен содержать значения данных в строках и столбцах, где каждая строка разделена на $(n+2)$ колонок, где n – количество каналов в записи. Количество строк данных меняется в зависимости от длины записи и таким образом определяет размер файла.

1-й столбец содержит номера выборок данных – целые числа (от 1 до последней выборки, например 123). Вторая колонка отображает времена соответствующих выборок в микросекундах, также целые числа. Третья и остальные колонки содержат величины, которые представляют аналоговые и дискретные сигналы (их значения в момент выборки). Единицы, в которых представлены значения аналоговых сигналов (токов и напряжений) записаны в файле конфигурации, в строке принадлежащей сигналу, номер которого в списке сигналов данного сеанса регистрации соответствует номеру его колонки в файле данных. Каждой выборке соответствует отдельная строка. Выборки отделяются друг от друга переходом на новую строку.

Значения данных записываются в целочисленном формате, состоящем из шести цифр, разделяемых запятыми. Отсутствующие значения представляются 999999. Метка конца файла данных "1A" (шестнадцатеричное число) помещается в конце записи файла на новой строке.

Ниже приведен фрагмент примера файла данных, полученного при сохранении результатов моделирования AP, " Test_OhmRele.dat". Он полностью соответствует ранее рассмотренному файлу конфигурации:

```

1,      0,      0,      0,      0,      0,      0,      0
2,      833,    -10,    -106,    0,     -295,    0,     400
...
3601,  3000000, 4454,  59589, -3013,  12305, -1441, -71894
1A

```

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б СВИДЕТЕЛЬСТВА О
ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019612506

**«ПОЛУЧЕНИЕ ГОДОГРАФА АСИНХРОННОГО РЕЖИМА
С ЗАДАНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НА КОМПЛЕКСНОЙ
ПЛОСКОСТИ»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»
(RU)*

Авторы: *Литвинов Илья Игоревич (RU), Осинцев Анатолий
Анатольевич (RU), Фролова Екатерина Игоревна (RU), Поддубняк
Федор Валерьевич (RU)*

Заявка № **2019611254**

Дата поступления **12 февраля 2019 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **21 февраля 2019 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019612683

**«ПОЛУЧЕНИЕ КРУГОВОГО ГОДОГРАФА ВЕКТОРА
СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ НЕИЗМЕННОМ
ДЕЙСТВУЮЩЕМ ЗНАЧЕНИИ ТОКА»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»
(RU)*

Авторы: *Литвинов Илья Игоревич (RU), Осинцев Анатолий
Анатольевич (RU), Фролова Екатерина Игоревна (RU)*

Заявка № 2019611491

Дата поступления 18 февраля 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 февраля 2019 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019612684

**«ПОЛУЧЕНИЕ КРУГОВОГО ГОДОГРАФА ВЕКТОРА
СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ НЕИЗМЕННОМ
ДЕЙСТВУЮЩЕМ ЗНАЧЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»
(RU)*

Авторы: *Литвинов Илья Игоревич (RU), Осинцев Анатолий
Анатольевич (RU), Фролова Екатерина Игоревна (RU)*

Заявка № 2019611492

Дата поступления 18 февраля 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 февраля 2019 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ившин



ПРИЛОЖЕНИЕ В АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ



ООО «НСК-ПРОЕКТ»

Юридический адрес: 630024, г. Новосибирск, ул. Мира, 65/2

Фактический адрес: 630083, г. Новосибирск, ул. Большевистская, 135/2

Почтовый адрес: 630083, г. Новосибирск, ул. Большевистская 135/2, а/я 10

ИНН 5402536658 КПП 540301001

тел./ факс (383) 363 56 54

www.nskproekt.ru, e-mail: nsk@nskproekt.ru

УТВЕРЖДАЮ

Управляющий ООО «НСК-ПРОЕКТ»

Ю. В. Какоша

2018 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт подтверждает, что результаты, полученные в ходе выполнения научно-исследовательской работы Екатерины Игоревны Фроловой, использованы в ООО «НОВОСИБИРСКСТРОЙКОМПЛЕКС-ПРОЕКТ».

Использование результатов НИР соискателя заключается в применении предложенного способа расчета параметров срабатывания дистанционной защиты от междуфазных КЗ на блоке линия-трансформатор в рамках выполнения проектной/рабочей документации:

1. Реконструкция релейной защиты ПС 220 кВ Усинская;
2. Подстанция 110 кВ «Вертковская нов.»

Главный инженер проекта

И. С. Маскевич

(подпись)

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора по производству

ООО УК «РусЭнергоМир»

Д. В. Минибаев

«19» апреля 2018 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы

Фроловой Екатерины Игоревны

Теоретические и практические результаты диссертационной работы Е. И. Фроловой, представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, использованы в рабочем процессе проектирования релейной защиты электрооборудования электроэнергетических систем группы компаний «РусЭнергоМир» в части решения проблемы обеспечения дальнего резервирования дистанционной защитой от междуфазных коротких замыканий на блоке генератор – трансформатор.

Особенный интерес представляет предложенный способ выполнения измерительного органа защиты и расчет его параметров срабатывания, а также решения по выполнению такого измерительного органа на базе типовых устройств релейной защиты.

Главный инженер проекта



О. Г. Агеенко

(подпись)



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КОТЭС»
 630049, Новосибирск, ул. Кропоткина, 96/1, каб. 305
 Тел.: +7 (383) 328-08-09, факс: +7 (383) 319-05-06
 e-mail: office@cotes-group.com, www.cotes-group.com
 ОКПО 84987193 ОГРН 1085402006062
 ИНН 5402494461 КПП 540201001

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор АО «КОТЭС», к.э.н.



А. В. Мильто

2018 г.

АКТ

об использовании научных и практических результатов кандидатской
 диссертационной работы
 Фроловой Екатерины Игоревны

Результаты, полученные в рамках выполнения диссертационной работы Фроловой Е. И., задействованы в рабочем процессе электротехнического отдела АО «КОТЭС».

Использование результатов научно-исследовательской работы соискателя заключается в следующем:

1. Применение математической модели комплекса «объект защиты - измерительные трансформаторы - измерительные органы защиты» для оценки поведения измерительных дистанционных органов в переходных процессах с учётом влияния погрешностей защитных трансформаторов тока.
2. Выполнение расчетов параметров срабатывания дистанционных защит от междуфазных коротких замыканий согласно предложенным способам на кабельно-воздушных линиях и блоках линия - трансформатор.

Главный специалист ЭТО


 (подпись)

Н. Э. Морозова