

SCAN

DVD

biblem

elektromonter

**Е.А. Аржанников
А.М. Чухин**

**МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ
ПОВРЕЖДЕНИЯ
НА ЛИНИЯХ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

**ПРИЛОЖЕНИЕ К ЖУРНАЛУ
ЭНЕРГЕТИК**

ПЛАН ПУБЛИКАЦИЙ

“Библиотечки электротехника”

В первой половине 1999 г. увидят свет следующие выпуски приложения к журналу “Энергетик”

1. **Шмурьев В.Я.** Цифровые реле защиты.
2. **Пуляев В.И., Усачев Ю.В.** Цифровая регистрация аварийных событий в энергосистемах.
3. **Ишкин В.Х.** Волоконно-оптические системы связи.

Подписывайтесь на журнал “Энергетик” и приложение “Библиотечка электротехника”

**ЗАВЕРШАЕТСЯ ПОДПИСНАЯ КАМПАНИЯ
НА ПЕРВОЕ ПОЛУГОДИЕ 1999 г.**

В России подписку на журнал “Энергетик” и его приложение “Библиотечка электротехника” должны оформить в любом почтовом отделении связи. Оба издания можно найти в объединенном каталоге Госкомсвязи РФ “Подписка-99” (Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы).

Индексы журнала “Энергетик”:

71108 — для предприятий и организаций;

71259 — для индивидуальных подписчиков.

Индексы “Библиотечки электротехника”

— приложения к журналу “Энергетик”:

88983 — для предприятий и организаций;

88982 — для индивидуальных подписчиков.

“Энергетик” и “Библиотечка электротехника” включены также в подписные каталоги других стран СНГ по договорам с АО “Агентство по распространению зарубежных изданий” (АРЗИ).

Справки, где принимается подписка в этих государствах, по телефонам АРЗИ в Москве:
(095) 280-83-65, 280-94-65.

Библиотечка электротехника

— приложение к журналу “Энергетик”

Выпуск 3

Е.А. Аржанников

А.М. Чухин

**МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ
ПОВРЕЖДЕНИЯ
НА ЛИНИЯХ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Москва

НТФ “Энергопрогресс”, “Энергетик”

1998

Главный редактор журнала “Энергетик” А.Ф. ДЬЯКОВ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

“Библиотеки электротехника”

В.А. Семенов (*председатель*), И.И. Батюк (*зам. председателя*),
Б.А. Алексеев, К.М. Антипов, Г.А. Безчастнов, А.Н. Жулев, В.А. Забегалов,
В.Х. Ишкин, Ф.Л. Коган, В.И. Кочкарев, Н.В. Лисицын, Л.Г. Мамиконянц,
Л.Ф. Плетнев, В.И. Пуляев, Ю.В. Усачев, М.А. Шабад

Аржанников Е.А., Чухин А.М.

А79 Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи. — М.: НТФ “Энергопрогресс”, 1998. — 64 с.: ил. (Библиотечка электротехника, приложение к журналу “Энергетик”; Вып. 3).

Брошюра содержит общую характеристику методов определения места короткого замыкания на линиях высокого напряжения, сведения о приборах, реализующих указанные методы. Особое внимание уделено двухсторонним и односторонним способам определения места повреждения (ОМП) по параметрам аварийного режима.

Рассчитана на специалистов, занятых проектированием и эксплуатацией устройств ОМП и электрических сетей, а также может быть использована студентами высших и средних учебных заведений.

Предисловие

Настоящая брошюра посвящена проблемам определения мест повреждения (ОМП) воздушных линий электропередачи (ВЛ) высоких напряжений. Отыскание мест повреждения ВЛ является важной задачей оперативно-диспетчерского управления энергосистемами.

Надежность энергоснабжения в большой степени зависит от времени восстановления поврежденных элементов энергооборудования. Общее время восстановления складывается из времени отыскания повреждения и времени проведения ремонтных работ, часто время отыскания повреждения гораздо больше времени самого ремонта.

Большинство коротких замыканий (КЗ) являются неустойчивыми и после отключения ВЛ быстродействующими релейными защитами (РЗ) самоликвидируются. Устройство автоматического повторного включения (АПВ) вводит ВЛ в работу. Отыскание места повреждения при этом затрудняется, так как во многих случаях после быстрого отключения от РЗ видимых следов КЗ на ВЛ не остается.

Для сокращения времени отыскания повреждения ВЛ оборудуются специальными приборами, фиксирующими место повреждения. Поскольку время отыскания повреждения напрямую зависит от точности ОМП, задача повышения точности ОМП является главной.

В брошюре рассмотрены методы ОМП одностороннего и двухстороннего измерений электрических величин. Предложены методы учета влияния взаимоиндукции ВЛ, расположенных в одном коридоре. Приведены характеристики основных типов приборов ОМП, серийно выпускаемых отечественной промышленностью.

Даны рекомендации по автоматизации процесса ОМП на базе персональных ЭВМ (ПЭВМ), обеспечивающей повышение точности измерений и оперативности получения результатов. Приведены варианты сопряжения устройств ОМП с ПЭВМ.

Внедрение современных средств и методов ОМП дает значительный технико-экономический эффект за счет сокращения перерывов в энергоснабжении, предотвращения перехода неустойчивых повреждений в устойчивые, снижения транспортных расходов на осмотр трасс ВЛ и т.д.

Главы 1—12, 15 написаны Е.А. Аржанниковым, главы 13, 14 и приложения — А.М. Чухиным.

Замечания и пожелания по данной брошюре просим направлять по адресу: 109280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23. Редакция журнала “Энергетик”.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ

Линии электропередач (ЛЭП) высокого напряжения (ВН) — довольно часто повреждаемые элементы энергосистемы (ЭЭС). Выход из работы ЛЭП сопровождается недоотпуском электроэнергии или снижением надежности, себестоимости и качества электроснабжения. Поэтому одной из важнейших задач линейных ремонтных служб предприятий электросетей является быстрейший поиск места повреждения и организация ремонтно-восстановительных работ.

Непросто обстоит дело с поиском места самоустраняющегося повреждения, при котором после АПВ ЛЭП остается в работе. Между тем ремонтным службам весьма полезна информация о таких повреждениях, поскольку обычно после них часть изоляторов в гирлянде оказываются пробитыми и на ЛЭП остается ослабленное место, которое в будущем способно привести к возникновению аварийного нарушения.

Поэтому необходимо искать место не только устойчивого, но и самоустраняющегося повреждения.

Сказанное предопределило широкое внедрение в ЭЭС методов и средств определения места повреждения (ОМП) на ЛЭП. Обычно они сводятся к определению места короткого замыкания (ОМКЗ). Внедрение приборов ОМП началось в нашей стране в 60-х годах и в настоящее время большинство ЛЭП напряжением 110 кВ и выше оснащено такими приборами. Внедряются приборы и на ЛЭП напряжением 6—35 кВ, хотя и значительно более медленными темпами.

Известно большое количество различных методов ОМП и ОМКЗ. На рис. 1 приведена взятая из [1] схема классификации методов ОМП.

Прежде всего методы делятся на дистанционные и топографические. При этом *топографические методы* подразумевают определение искомого места непосредственно при движении по трассе, и средства топографического отыскания места повреждения находятся в распоряжении поисковой бригады. *Дистанционные методы* подразумевают использование приборов и устройств, устанавливаемых на подстанциях (ПС) и указывающих расстояние до повреждения.

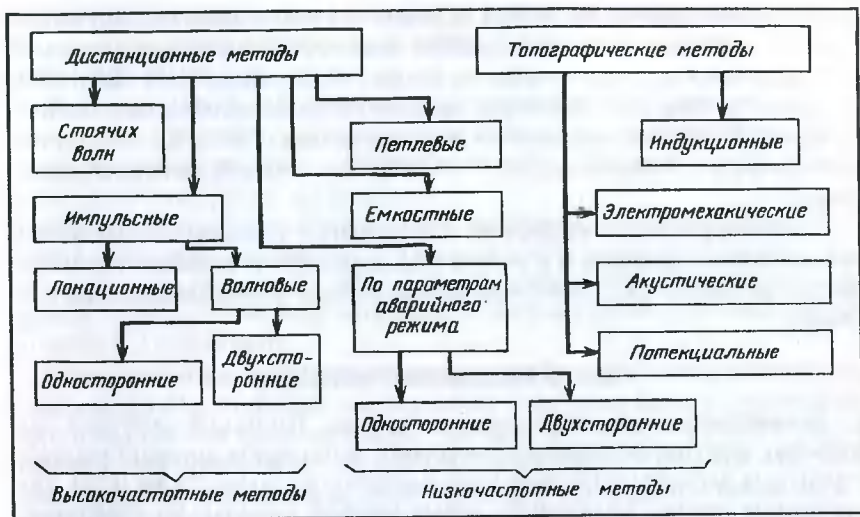


Рис. 1. Схема классификации методов ОМП

Другое деление методов — на *высокочастотные (ВЧ)* и *низкочастотные (НЧ) методы*. Под НЧ диапазоном подразумеваются частоты от нуля до нескольких килогерц. Под ВЧ — десятки килогерц.

Коротко охарактеризуем методы, перечисленные на рис. 1.

ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Индукционный метод основан на том, что поисковая бригада, двигаясь вдоль трассы кабельной ЛЭП (КЛ), улавливает специальными приборами характер изменения магнитного и электрического поля, создаваемого протекающим по ЛЭП током. Ток вырабатывается специальным генератором, подключаемым на ПС к уже отключенной КЛ.

Акустический метод основан на улавливании на трассе акустических (механических) колебаний, возникающих на поверхности грунта при искровом разряде в изоляции КЛ. Оператор с акустическим датчиком и усилителем перемещается в зоне 40 м, найденной каким-либо другим методом, и определяет место максимального уровня приема по индикатору. Искровой разряд создается посредством специальных устройств, подключаемых на конце ЛЭП после ее отключения.

Потенциальный метод основан на фиксации вдоль трассы электрических потенциалов, создаваемых протекающим по оболочке КЛ (или закрытого токопровода) током. В месте повреждения указанный потенциал имеет наибольшее значение.

Электромеханический метод основан на фиксации механических усилий, создаваемых за счет тока КЗ. Электромеханические указатели устанавливаются стационарно на опорах воздушных ЛЭП (ВЛ). При протекании тока КЗ у указателя выпадает блинкер, состояние которого проверяют после аварийного нарушения при обходе ВЛ. Метод используется в основном в сетях 6—10 кВ сельскохозяйственного назначения.

Таким образом, топографические методы и средства используются ремонтными службами и к работе служб релейной защиты (РЗ) отношения не имеют. Все топографические методы являются низкочастотными.

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ

Высокочастотные дистанционные методы. Принцип действия *импульсных* методов основан на измерении интервалов времени распространения электромагнитных волн (импульсов) по участкам ЛЭП. *Локационные* методы определяют время пробега специально генерируемого зондирующего импульса. *Волновые* методы определяют моменты прихода на ПС возникающих в месте повреждения ЛЭП электромагнитных волн.

Распространение волны (импульса) по ЛЭП — сложный процесс, зависящий от числа, взаимного расположения, материала и размера проводов и тросов, их удаленности от поверхности земли, от ее электропроводности. Волна перемещалась бы вдоль провода со скоростью света (300 м/мкс), если бы в проводе не было активных потерь и он располагался бы в вакууме над идеально проводящей поверхностью. В реальной ВЛ волна перемещается по петле фаза—земля со скоростью 275 м/мкс и по петле фаза—фаза со скоростью 296 м/мкс. В КЛ скорость распространения волны значительно ниже — 160 м/мкс и примерно одинакова для любой петли.

Локационные методы основаны на измерении времени между моментом послышки в ЛЭП зондирующего электрического импульса и моментом прихода к началу ЛЭП импульса, отраженного от места повреждения. За указанное время импульсы прошли путь, равный двойному расстоянию до места повреждения. Искомое расстояние равно:

$$L = tv / 2.$$

Устройства измерения — локационные искатели — рассмотрены в данной брошюре.

Волновой метод двухсторонних измерений основан на измерении времени между моментами достижения двух концов ЛЭП фронтами электромагнитных волн, возникающих в месте повреждения (волн разряда замкнувшейся на землю фазы). Необходимым условием реализации метода является синхронный счет времени на двух концах

ЛЭП с точностью до микросекунд. Для этого с одного конца на другой посылаются синхронизирующие сигналы, что само по себе является сложной технической задачей.

Волновые методы односторонних измерений используют либо измерение времени между приходами волн первого и второго отражений от места повреждения, либо разновременность прихода волн по каналу фаза—фаза и по каналу фаза—земля.

Метод стоячих волн предполагает измерение полного входного сопротивления поврежденной ЛЭП в широком диапазоне частот. Известно [1], что расстояние между резонансными частотами (максимумами и минимумами входного сопротивления) зависит от расстояния до места КЗ или обрыва.

Низкочастотные дистанционные методы. *Петлевой метод* основан на измерении сопротивления постоянному току жил кабеля, отключенного из-за пробоя фазы на землю. Переходное сопротивление в месте повреждения предварительно снижают прожиганием изоляции от специальных источников тока. Схема измерения собирается таким образом, чтобы сопротивления жил оказались в плечах уравновешенного моста, измерительный прибор (для контроля условий равновесия) — в одной диагонали моста, источник питания и переходное сопротивление — в другой диагонали. По найденным сопротивлениям жил до места пробоя определяют расстояние.

Емкостным методом можно определить емкость жилы от места измерения до места обрыва.

Дистанционным измерениям по параметрам аварийного режима посвящено основное содержание данной брошюры. Объясняется это как тем, что они, в отличие от других методов, исключительно широко распространены в сетях ВН, так и тем, что обеспечение эксплуатации устройств измерения (фиксирующих приборов) возложено на персонал служб РЗА (центральных служб ЭЭС и местных служб сетевых предприятий).

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА КЗ ПО ПАРАМЕТРАМ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА

Параметры аварийного режима это фиксированные (измеренные) во время КЗ токи и напряжения отдельных фаз или последовательностей. Методов ОМКЗ по параметрам аварийного режима много, однако все их можно разбить на методы двухстороннего и одностороннего измерения.

Двухсторонние измерения токов и напряжений при КЗ позволяют в дальнейшем рассчитать расстояние до места КЗ. Относительная простота приборов двухстороннего измерения привела к тому, что они получили исключительно широкое распространение в сетях ВН. Началом внедрения фиксирующих приборов в отечественную электроэнергетику можно считать конец 50-х — начало 60-х годов. К середине 80-х годов двухсторонние методы стали господствующими — практически все ЛЭП 110 кВ и выше оснащались фиксирующими приборами двухстороннего измерения. Однако в конце 80-х годов появились приборы одностороннего измерения, что привело к практическому прекращению выпуска приборов двухстороннего измерения. Следует отметить, что в зарубежной практике метод двухстороннего измерения никогда не применялся. Основы теории и практики двухстороннего измерения разработаны институтом ВНИИЭ, фирмой ОРГРЭС и Рижским опытным заводом “Энергоавтоматика” [1, 2, 3, 5]. Особо следует отметить труды Г.М. Шальта.

Основы теории одностороннего измерения разработаны в Ивановском государственном энергетическом университете (ИГЭУ) в 70—80-х годах и наиболее полно представлены в [6]. Приборы, реализующие метод одностороннего измерения, разработаны в Рижском техническом университете (РТУ) под руководством А.С. Саухатаса [9]. Однако в [6] материал трактуется с позиций классической теории дистанционной защиты (ДЗ). Более общий подход разработан в Чувашском университете в начале 90-х годов под руководством Ю.Я. Лямца [7]. Он рассматривает определение места КЗ как задачу диагностики ЛЭП и одну из задач идентификации параметров ЭЭС. В данном параграфе рассматривается именно этот подход.

Рассмотрим одиночную ЛЭП (рис. 2), на которой на расстоянии x от левой ЭЭС произошло КЗ. Предположим, что при КЗ зафиксированы по три тока и по три напряжения с каждого конца ЛЭП. Токи в

месте КЗ I_K могут быть вычислены как

$$\underline{I}_K = \underline{I}' + \underline{I}'' \quad (1)$$

Если бы было известно значение x , то можно было бы составить шесть уравнений (для трех фаз или для

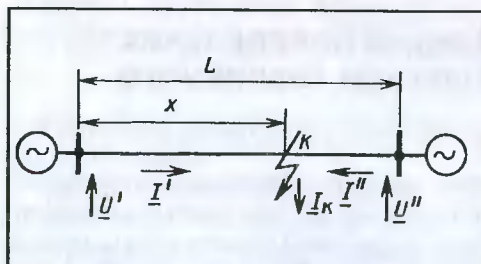


Рис. 2. Поясняющая схема одиночной ВЛ

трех последовательностей):

$$\underline{U}'_n - \Delta \underline{U}'_n - \Delta \underline{U}''_n + \underline{U}''_n = 0, \quad (2)$$

где n — индекс фазы (A , B или C) или индекс последовательности (1, 2 или 0); $\Delta \underline{U}'_n$, $\Delta \underline{U}''_n$ — падения напряжения на участке слева и справа от места КЗ соответственно.

Очевидно, независимы только три уравнения — уравнения для фаз преобразуются в уравнения для последовательностей и наоборот; коэффициенты уравнений комплексны, но неизвестное всего одно — расстояние x , и оно вещественно.

Падения напряжения для отдельных последовательностей равны:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \underline{U}'_1 &= x \underline{I}'_1 \underline{Z}_{1\text{уд}}; \Delta \underline{U}'_2 = x \underline{I}'_2 \underline{Z}_{1\text{уд}}; \Delta \underline{U}'_0 = x \underline{I}'_0 \underline{Z}_{0\text{уд}}; \\ \Delta \underline{U}''_1 &= (L-x) \underline{I}''_1 \underline{Z}_{1\text{уд}}; \Delta \underline{U}''_2 = (L-x) \underline{I}''_2 \underline{Z}_{1\text{уд}}; \Delta \underline{U}''_0 = (L-x) \underline{I}''_0 \underline{Z}_{0\text{уд}}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\underline{Z}_{1\text{уд}}$ и $\underline{Z}_{0\text{уд}}$ — удельные сопротивления ЛЭП в схемах прямой и нулевой последовательностей. Напомним, что удельное индуктивное сопротивление одиночной ЛЭП в схеме прямой последовательности равно примерно 0,4 Ом/км, в схеме нулевой последовательности — примерно 1,4 Ом/км.

Выражение для падения напряжения в фазе A можно получить, суммируя падения напряжения в схемах отдельных последовательностей:

$$\begin{aligned} \Delta \underline{U}'_A &= \Delta \underline{U}'_1 + \Delta \underline{U}'_2 + \Delta \underline{U}'_0 = x (\underline{I}'_1 \underline{Z}_{1\text{уд}} + \underline{I}'_2 \underline{Z}_{1\text{уд}} + \underline{I}'_0 \underline{Z}_{0\text{уд}}) = \\ &= x \underline{Z}_{1\text{уд}} (\underline{I}'_1 + \underline{I}'_2 + \underline{I}'_0 \underline{Z}_{0\text{уд}} / \underline{Z}_{1\text{уд}}) = \\ &= x \underline{Z}_{1\text{уд}} (\underline{I}'_1 + \underline{I}'_2 + \underline{I}'_0 + \underline{I}'_0 (\underline{Z}_{0\text{уд}} - \underline{Z}_{1\text{уд}}) / \underline{Z}_{1\text{уд}}) = x \underline{Z}_{1\text{уд}} (\underline{I}_A + \underline{k} \underline{I}_0). \end{aligned} \quad (4)$$

Вообще падение напряжения на любой фазе

$$\Delta \underline{U}_\phi = x \underline{Z}_{1\text{уд}} (\underline{I}_\phi + \underline{k} \underline{I}_0), \quad (5)$$

$$\text{где } \underline{k} = (\underline{Z}_{0\text{уд}} - \underline{Z}_{1\text{уд}}) / \underline{Z}_{1\text{уд}}. \quad (6)$$

Величина $\underline{k}$ называется в теории ДЗ коэффициентом компенсации по току нулевой последовательности (НП) и отражает разницу в падений напряжений в схемах прямой и нулевой последовательностей при протекании по ним одинакового по значению тока.

Существует несколько путей решения уравнений (2). Но самое общее решение задачи идентификации заключается в анализе изменения *целевой функции*, что позволяет исключить влияние многих случайных факторов. Общим критерием определения места КЗ служит условие достижения целевой функцией глобального минимума при множестве варьируемых параметров.

3. ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА КЗ ПО ДВУХСТОРОННЕМУ ИЗМЕРЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА

Двухсторонние измерения позволяют определить только место несимметричного КЗ с большим током. Место трехфазных КЗ, обрыва проводов и замыканий одной фазы на землю в сети с изолированной нейтралью рассматриваемыми методами определить невозможно. Теоретически можно было бы определить место двухфазного КЗ в сети 6—35 кВ, но практически это используется редко из экономических соображений.

Теорию двухстороннего ОМКЗ можно пояснить с помощью рис. 3, на котором приведена поясняющая схема одиночной ЛЭП (рис. 3, а), схема замещения обратной (ОП) или нулевой (НП) последовательности (рис. 3, б) и эпюра напряжений этой последовательности (рис. 3, в). Максимум напряжения находится в точке КЗ (источник ОП и НП находится в точке несимметрии). Отметим, что под U и I ниже понимаются модули (абсолютные значения) электрических величин, безотносительно к их фазе и направлению.

Предположим, что еще во время КЗ приборы зафиксировали (запомнили) четыре величины: U' , I' , U'' , I'' . Непосредственно из эпюры рис. 3, в можно записать выражения для напряжения в точке КЗ при

движении слева и справа (от шин левого и правого концов ЛЭП) к точке КЗ:

$$\left. \begin{aligned} U_K &= U' + I' n X_{\text{Л}}; \\ U_K &= U'' + I'' (1 - n) X_{\text{Л}}, \end{aligned} \right\} (7)$$

где $X_{\text{Л}}$ — сопротивление ЛЭП в схеме данной последовательности; $n X_{\text{Л}}$ — сопротивление от левого конца ЛЭП до места КЗ.

Обращаем внимание, что выражения записаны для модулей, но не для комплексов — в них не учтен сдвиг по фазе между током и напряжением.

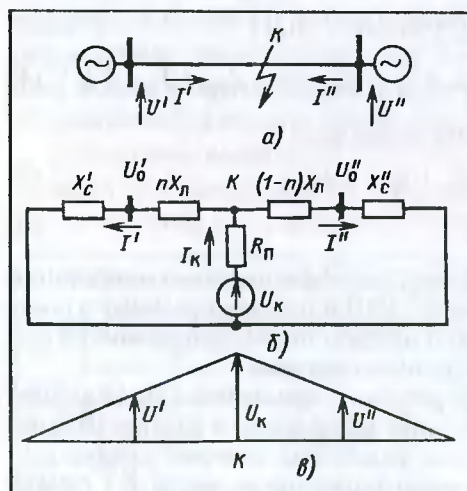


Рис. 3. К пояснению принципа двухстороннего ОМКЗ

Приравнивая правые части выражений и решая полученное уравнение относительно $n X_{\text{л}}$, получаем:

$$U' + I' n X_{\text{л}} = U'' + I''(1 - n) X_{\text{л}}; \quad (8)$$

$$n X_{\text{л}} (I' + I'') = U'' - U' + I'' X_{\text{л}};$$

$$n X_{\text{л}} = \frac{U'' - U' + I'' X_{\text{л}}}{(I' + I'')}. \quad (9)$$

Практически производится измерение величин НП или ОП, а решение ищется относительно расстояния до места КЗ:

$$l' = n L = n X_{\text{л}} / X_{\text{уд}},$$

где $X_{\text{уд}}$ — сопротивление 1 км ЛЭП в схеме данной последовательности; L — полная длина ЛЭП.

Расчетные формулы имеют вид:

$$l' = \frac{3U_0'' - 3U_0' + 3I_0'' X_{0\text{уд}} L}{(3I_0'' + 3I_0') X_{0\text{уд}}}; \quad l' = \frac{U_2'' - U_2' + I_2'' X_{1\text{уд}} L}{(I_2' + I_2'') X_{1\text{уд}}}. \quad (10)$$

Отметим ряд особенностей формул и самого метода расчета по двухстороннему измерению:

1) в формулах участвуют модули токов и напряжений. Фаза и направление токов не имеют значения. Это предопределяет относительную простоту выполнения фиксирующих приборов;

2) при выводе не учитывался вид КЗ: одной или двух фаз на землю при расчете по составляющим НП, а так же двухфазного без земли при расчете по составляющим ОП. Схема на рис. 3, б и эпюра на рис. 3, в не зависят от вида замыкания. Для расчетов не требуется знать вид КЗ, что позволяет приступить к расчетам немедленно после считывания показаний приборов;

3) в расчете не участвует переходное сопротивление в месте КЗ. Теоретически двухстороннее измерение полностью исключает влияние переходного сопротивления. Практически это верно до тех пор, пока из-за переходных сопротивлений значения токов и напряжений при КЗ не станут так малы, что приборы выйдут за пределы необходимой точности измерения. В частности, приборы плохо работают в рай-

онах вечной мерзлоты и в районах со скальным грунтом, где значительные проходные сопротивления при КЗ на землю затрудняют работу как РЗ ЛЭП, так и фиксирующих приборов;

4) на расчет не влияют составляющие токов нагрузочного режима. Объясняется это тем, что ведется фиксация величин ОП или НП, отсутствующих в нагрузочном режиме. Если бы фиксировались составляющие прямой последовательности, избавиться от влияния нагрузок было бы невозможно;

5) относительно несложные расчеты.

Все перечисленные особенности носят положительный характер, что и предопределило внедрение методов двухстороннего измерения. Отрицательна сама необходимость получения данных с двух концов ЛЭП, необходимость передачи данных с одного конца ЛЭП на другой или вышестоящему диспетчеру. Имеются системы с телепередачей данных и автоматическим проведением расчетов. Однако они относительно сложны и не получили широкого распространения. Все формулы выведены без учета активных сопротивлений ЛЭП, что само по себе вносит некоторую погрешность.

Для расчетов требуются фиксирующие амперметры на каждой ЛЭП и фиксирующие вольтметры на системах шин.

В ЭЭС преимущественное распространение получили методы определения места КЗ, основанные на измерении параметров НП, несмотря на то, что при этом невозможно определить место междуфазного КЗ. Подобное положение определяется следующими причинами:

высоким удельным весом КЗ на землю (однофазных и двухфазных), составляющих на ВЛ 80—90 % всех случаев КЗ;

независимостью сопротивления НП сетей, примыкающих к контролируемой ЛЭП, от токов нагрузки, что существенно при расчетах по показаниям двух или трех приборов;

простотой обеспечения измерений токов и напряжений НП (нет необходимости в использовании специальных фильтров ОП);

меньшей погрешностью фильтров НП по сравнению с фильтрами ОП (1,6—2 % против 4—6 %).

Необходимо, однако, отметить, что на ЛЭП, имеющих сложную электромагнитную связь между собой, а также на ЛЭП с большой долей двухфазных КЗ целесообразно использовать параметры ОП.

4. ДВУХСТОРОННЕЕ ИЗМЕРЕНИЕ НА ЛЭП СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Параллельные ЛЭП с взаимоиндукцией по всей длине. Поясняющая схема для двух параллельных ЛЭП и схема замещения НП приведены на рис. 4.

На этих схемах обозначены: $X_{уд м}$ — удельное сопротивление взаимоиндукции; $I'_п$, $I''_п$ — токи НП в поврежденной ЛЭП; $I'_н$, $I''_н$ — токи НП в неповрежденной ЛЭП. Участки ЛЭП, имеющие взаимоиндукцию, заменены в схеме замещения эквивалентными трехлучевыми звездами с выносом взаимной индукции в одну из ветвей звезды. Для этой схемы относительно напряжения U_K можно записать два уравнения:

$$\left. \begin{aligned} U_K &= U' + X_{уд м} L' (I'_п + I'_н) + (X_{уд} - X_{уд м}) L' I'_н; \\ U_K &= U'' + X_{уд м} (L - L') (I''_п - I''_н) + (X_{уд} - X_{уд м}) (L - L') I''_п. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Токи на двух концах неповрежденной ЛЭП имеют одинаковые значения: $I'_н = I''_н$. Для исключения этого тока из уравнений можно запи-

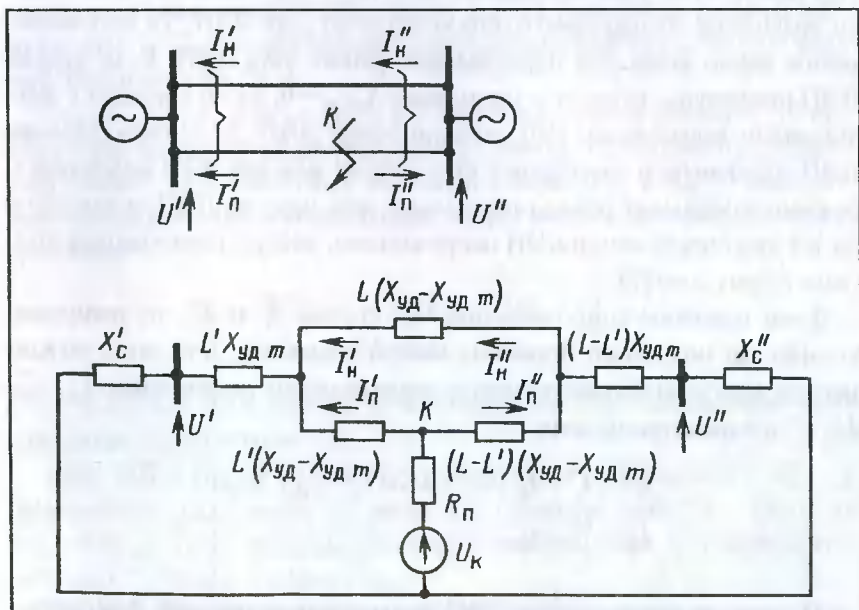


Рис. 4. Параллельные ВЛ с взаимной индукцией и их схема замещения НП

сать уравнение на основе обхода контура, образованного на схеме замещения двумя ЛЭП:

$$\begin{aligned} (X_{уд} - X_{уд\ m}) L' I_{\Pi}' - (X_{уд} - X_{уд\ m}) L I_{\Pi}' - \\ - (X_{уд} - X_{уд\ m}) (L - L') I_{\Pi}'' = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

или

$$L I_{\Pi}' = L' (I_{\Pi}' + I_{\Pi}'') - L I_{\Pi}'' . \quad (13)$$

Преобразуя четыре приведенные уравнения и учитывая, что приборы включены на утроенные токи и напряжения НП, можно получить выражение для определения расстояния L' до места КЗ:

$$L' = \frac{3U_0'' - 3U_0' + (X_{0\ уд} - X_{уд\ m}) L 3I_{0\ \Pi}''}{(X_{0\ уд} + X_{уд\ m}) (3I_{0\ \Pi}' + 3I_{0\ \Pi}'')} . \quad (14)$$

Для расчета по этому выражению требуются показания четырех фиксирующих приборов. В приборах на неповрежденной ЛЭП нет необходимости. Однако следует помнить, что при выводе выражения (14) исключение тока неповрежденной ЛЭП произведено после записи уравнения обхода замкнутого контура из двух ЛЭП. То есть выражение верно лишь при параллельной работе двух ЛЭП. Если вторая ЛЭП отключена, то следует принимать $X_{уд\ m} = 0$, и (14) совпадет с аналогичным выражением (10) для одиночной ЛЭП. Если параллельная ЛЭП отключена и заземлена с двух сторон или две ЛЭП находятся в режиме раздельной работы по концам, или одна из ЛЭП включается на КЗ при опробовании ЛЭП напряжением, следует пользоваться другими формулами [2].

Если известны сопротивления НП систем X_{Σ}' и X_{Σ}'' , то требуемое количество показаний приборов можно сократить. Для этого нужно использовать зависимости между измеряемыми величинами I_{Π}' , I_{Π}'' , U' , U'' и параметрами сети:

$$\left. \begin{aligned} U' &= (I_{\Pi}' + I_{\Pi}) X_{\Sigma}' ; \quad U'' = (I_{\Pi}'' - I_{\Pi}) X_{\Sigma}'' ; \\ I_{\Pi}' &= \frac{U'}{X_{\Sigma}'} - I_{\Pi} . \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Иногда на параллельных ЛЭП применяют включение фиксирующих амперметров на сумму и разность токов двух ЛЭП. В данной бро-

шюре этот метод не рассматривается, поскольку он редко применяется на практике.

Как следует из материалов данного параграфа, наличие взаимоиндукции в схеме НП заставляет увеличивать количество фиксирующих приборов и усложнять расчетные выражения. В принципе от этого можно избавиться, применяя включение приборов на составляющие не НП, а ОП — в схеме ОП нет взаимоиндукций.

ЛЭП с взаимоиндукцией на части длины. Рассматривается случай, когда ЛЭП длиной L имеет взаимоиндукцию с соседней ЛЭП не по всей длине, а на расстоянии L_m от ПС (часто ЛЭП от ПС идут в одном коридоре, а затем расходятся в разные стороны). Приводим без вывода расчетную формулу в предположении, что КЗ произошло за пределами участка с взаимной индукцией, а сам участок расположен вблизи левой ЭЭС:

$$L' = \frac{3U_0'' - 3U_0' + X_{0\text{ уд}} L 3I_{0\text{ п}}'' \pm X_{\text{уд м}} L_m 3I_{0\text{ н}}'}{X_{0\text{ уд}} (3I_{0\text{ п}}' + 3I_{0\text{ п}}'')} \quad (16)$$

Здесь все обозначения те же, что на рис. 4, дополнительно введен ток НП неповрежденной (соседней) ЛЭП $I_{\text{н}}'$. Однако он может в зависимости от режима совпадать по фазе с $I_{\text{п}}'$ (в расчетную формулу вводится знак “-”), а может находиться в противофазе (в расчетную формулу вводится знак “+”).

Если в зависимости от места КЗ направление тока меняется, то при известном значении сопротивления X_c' можно использовать следующий способ. При известных значениях токов $3I_{0\text{ п}}'$ и $3I_{0\text{ н}}'$, измеренных фиксирующими амперметрами, определяются два расчетных напряжения:

$$\left. \begin{aligned} 3U_{0\text{ п}1} &= X_c' (3I_{0\text{ п}}' - 3I_{0\text{ н}}') ; \\ 3U_{0\text{ п}2} &= X_c' (3I_{0\text{ п}}' + 3I_{0\text{ н}}') , \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

и эти значения сравниваются с напряжением $3U_0'$, измеренным фиксирующим вольтметром.

Если $3U_0' = 3U_{0\text{ п}1}$, то ток $3I_{0\text{ н}}'$ находится в противофазе с $3I_{0\text{ п}}'$, и при расчете расстояния до места КЗ ставится знак “+”. Если же $3U_0' = 3U_{0\text{ п}2}$, то направление тока противоположное; и нужно поставить знак “-” перед членом с $3I_{0\text{ н}}'$.

Для использования формулы (16) необходимо преодолеть ряд технических трудностей — обеспечить пуск фиксирующих приборов со-

седней ЛЭП при КЗ на данной ЛЭП, разобраться в направлениях токов.

ЛЭП с ответвлением. Влияние ответвления на определение места КЗ по параметрам НП будет сказываться, если на этом ответвлении имеется трансформатор, нейтраль которого заземлена. Тогда от нейтрали трансформатора ответвления потечет по ЛЭП ток НП. При определении места КЗ по параметрам ОП влияние ответвления мало, поскольку мал ток ОП нагрузки ответвления.

Выражения для определения расстояния до места КЗ будут различными в зависимости от места повреждения. На рис. 5 показана схема ЛЭП с КЗ на расстоянии от шин левой ПС, большем $L_{от}$. В этом случае ток $I'_{кБ} = I' + I_{от}$, и расстояние подсчитывается по выражению:

$$L' = L_{от} + \frac{X_{от}(3U_0'' - 3U_0') - X_{0уд} L_{от} X_{от} 3I_0' + X_{0уд} (L - L_{от}) X_{от} 3I_0''}{X_{0уд} [3U_0' + 3I_0'' X_{от} + (X_{от} + X_{0уд} L_{от}) 3I_0'']}. \quad (18)$$

Если КЗ произошло между шинами левой ПС и местом ответвления, то расчетная формула имеет вид:

$$\begin{aligned} L' &= \frac{(L_{от} + X_{от}/X_{уд}) 3U_0'' - X_{от} 3U_0'/X_{0уд} + \dots}{3U_0'' + X_{от} 3I_0' + \dots} \rightarrow \\ &\rightarrow \dots + \frac{[L X_{от} + X_{0уд} L_{от} (L - L_{от})] 3I_0''}{+ [X_{от} + X_{уд} (L - L_{от})] 3I_0'}. \end{aligned} \quad (19)$$

Кроме уже известных, в формулах появились новые параметры: $L_{от}$ — расстояние от левой ПС до места ответвления; $X_{от}$ — сопротивление НП ответвления.

При практических расчетах заранее неизвестно, на каком участке произошло КЗ. Поэтому определение места КЗ производится одним из двух способов.

По *первому способу* сначала рассчитывается L' по выражению (19). Если оказывается, что $0 < L' < L_{от}$, то это и есть действительное расстояние до места КЗ. Если же это условие не выполняется, то L' вычисляется по (18).

По *второму способу* вначале определяется поврежденный участок, а затем расстояние от его начала.

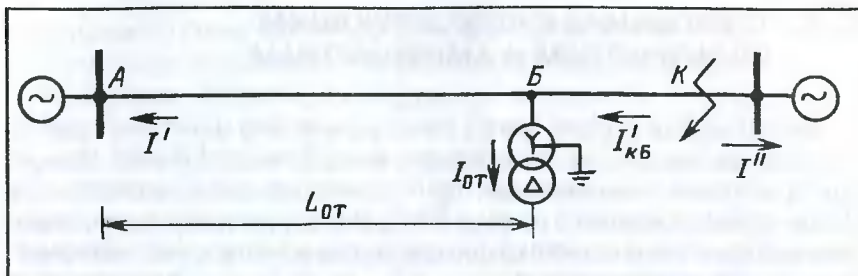


Рис. 5. Схема ВЛ с ответвлением

Чтобы определить, на каком участке произошло КЗ, достаточно вычислить напряжение в точке подключения ответвления по формулам:

вычисление “с левой стороны”:

$$3U_{0л}''' = 3U_0' + X_{уд} L_{от} 3I_0'; \quad (20)$$

вычисление “с правой стороны”:

$$3U_{0п}''' = 3U_0'' + X_{уд} (L - L_{от}) 3I_0''. \quad (20a)$$

Очевидно: если $U_{л}''' > U_{п}'''$, то замыкание произошло левее ответвления; если $U_{п}''' > U_{л}'''$, то замыкание произошло правее ответвления; если $U_{л}''' = U_{п}'''$, то точка КЗ лежит на ответвлении. После определения поврежденного участка он рассматривается как одиночная ЛЭП.

Если КЗ произошло на участке, лежащем правее ответвления, то этот участок можно считать одиночной ЛЭП, электрические величины в начале которой равны:

$$\left. \begin{aligned} 3U_0''' &= 3U_0' + X_{уд} L_{от} 3I_0'; \\ 3I_0''' &= 3I_0' + 3U_0''' / X_{от}. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Если КЗ произошло на участке, лежащем левее ответвления, то этот участок можно считать одиночной ЛЭП, электрические величины в конце которой равны:

$$\left. \begin{aligned} 3U_0''' &= 3U_0'' + X_{уд} (L - L_{от}) 3I_0''; \\ 3I_0''' &= 3I_0'' + 3U_0''' / X_{от}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Сформулированное правило и метод легко распространить на случай любого количества ответвлений от ЛЭП.

5. ТРЕБОВАНИЯ К ФИКСИРУЮЩИМ ВОЛЬТМЕТРАМ И АМПЕРМЕТРАМ

Фиксирующими вольтметрами и амперметрами называются измерительные приборы, которые обеспечивают измерение и длительное запоминание (фиксацию) значений напряжений и токов, существовавших в режиме КЗ на ВЛ. Структурная схема, принцип работы и характеристики фиксирующих вольтметров и амперметров определяются требованиями к этим приборам. Фиксирующие вольтметры и амперметры должны работать автоматически в режиме КЗ на ВЛ и правильно взаимодействовать с устройствами РЗ, аварийной сигнализацией ПС, а также с устройством автоматического повторного включения (АПВ).

Рассмотрим основные требования к фиксирующим вольтметрам и амперметрам [4].

Быстродействие. Фиксирующие вольтметры и амперметры должны запоминать значения напряжений и токов, существующих в режиме КЗ, до начала отключения выключателей поврежденной ВЛ. Объясняется это тем, что некоторые расчетные выражения верны лишь при всех включенных выключателях (например, выражение (14) для ОМКЗ на параллельных ЛЭП), так и тем, что прибор даст неправильные показания, если в процессе измерения электрические величины резко изменятся из-за отключения выключателей. Обычно время фиксации не должно превышать 0,1 с после начала КЗ, а в некоторых случаях — 0,06 с. При этом должна обеспечиваться одновременность фиксации электрических величин с обоих концов ВЛ, поскольку сами токи и напряжения меняются во времени (из сверхпереходных становятся переходными).

Отстроенность от свободных составляющих. Все приведенные выше выражения для расчета расстояния до места КЗ верны для действующих значений электрических величин на промышленной частоте 50 Гц.

Поэтому фиксирующие приборы должны быть отстроены от влияния свободных составляющих электромагнитного переходного процесса при КЗ. Для ЛЭП 110—220 кВ особо важна отстройка от апериодических составляющих; для ЛЭП 500—1150 кВ — от высших гармонических составляющих.

Кратность запоминания. Выпускавшиеся ранее фиксирующие вольтметры и амперметры являлись приборами с ограниченной емкостью памяти.

Объем памяти рассчитан на хранение информации только об одном измерении. Данные приборы являются однократными. При-

шедшие им на смену микропроцессорные приборы способны хранить информацию о нескольких предшествующих аварийных нарушениях.

Блокировка. Действие фиксирующих вольтметров и амперметров должно быть четко увязано с работой устройств РЗ и АПВ. При неустойчивом АПВ ВЛ режим КЗ возникает 2 раза со столь малым интервалом, что персонал не успевает считать показания приборов. Поэтому однократные фиксирующие приборы должны обеспечивать фиксацию при первом КЗ, а затем выводиться из действия, т. е. блокироваться и не реагировать на последующие КЗ до считывания показаний.

Селективность. Приборы имеют весьма чувствительные пусковые органы и часто при КЗ на одной из ЛЭП пускаются приборы и поврежденной, и соседних ЛЭП. Рассмотренная выше блокировка приводила бы к выводу из действия однократных фиксирующих приборов при КЗ на соседних ЛЭП. Поэтому должна быть предусмотрена возможность так называемого “селективного” включения, т. е. автоматического сброса показаний и деблокирования сработавших фиксирующих вольтметров и амперметров при отсутствии сигнала аварийной сигнализации ПС об аварийном отключении выключателя обслуживаемой ВЛ. Таким образом, правильная работа при КЗ только на обслуживаемой ВЛ обеспечивается за счет управления работой фиксирующих вольтметров и амперметров от системы аварийной сигнализации ПС. Если РЗ или выключатель откажут при КЗ на своей ВЛ, то откажут и ее фиксирующие приборы.

Длительность запоминания. Снятие показаний фиксирующих приборов на ПС, не оснащенных устройствами телемеханики или системами АСУ ТП, осуществляется дежурным персоналом. На ПС с постоянным дежурным персоналом эта операция может быть произведена в течение нескольких минут (или десятков минут) после КЗ. На ПС без постоянных дежурных для снятия показаний могут потребоваться часы. Между тем после аварии на ПС, особенно если она работает на переменном оперативном токе, может пропадать питание приборов. Поэтому прибор должен обладать энергонезависимой памятью. Приборы типа ФИП и ФИП-1 имеют механический счетчик импульсов. Приборы типа ЛИФП имеют счетчик двоично-десятичный с дублированием информации на двухпозиционных электромеханических реле. И в том, и в другом случае длительность энергонезависимого хранения информации безгранична. Микропроцессорные приборы тоже обеспечивают хранение информации не менее, чем на 10 ч (обычно с помощью предварительно заряженных конденсаторов).

Кратность диапазона. Возможные значения подлежащих фиксации напряжений и токов могут изменяться в широких пределах. Для фиксирующих амперметров отношение максимальных возможных значений (при близких КЗ) к минимальным возможным значениям (при

удаленных КЗ через большие переходные сопротивления) может быть достаточно велико. Поэтому кратность диапазона фиксирующих приборов должна быть не менее 50, а иногда даже 100.

Точность. Точность фиксирующих амперметров и вольтметров необходимо регламентировать допустимой относительной погрешностью фиксации во всем диапазоне измерений. Для обеспечения заданной точности определения места КЗ оказывается допустимым иметь максимальную относительную погрешность не более 5 % во всем диапазоне работы фиксирующих приборов.

Сопряжение с устройствами автоматического съема показаний. Фиксирующие приборы должны быть приспособлены для передачи своих показаний. Приборы типа ФИП и ЛИФП обеспечивают возможность связи с устройствами телемеханики. Микропроцессорные приборы в принципе могут включаться в систему АСУ ТП (см. 13).

Минимальное потребление мощности. По измерительному входу прибора потребление мощности должно быть минимальным для уменьшения нагрузки на измерительные трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН) с целью уменьшения их погрешности.

6. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ФИКСИРУЮЩИХ ПРИБОРОВ ДВУХСТОРОННЕГО ИЗМЕРЕНИЯ

В СССР были разработаны и выпущены фиксирующие приборы (ФП) более чем 20 конструкций. В них были использованы различные принципы запоминания значений электрических величин — магнитный, механический, электрический и т. д. Для приборов на электромеханической или на полупроводниковой элементной базе окончательно

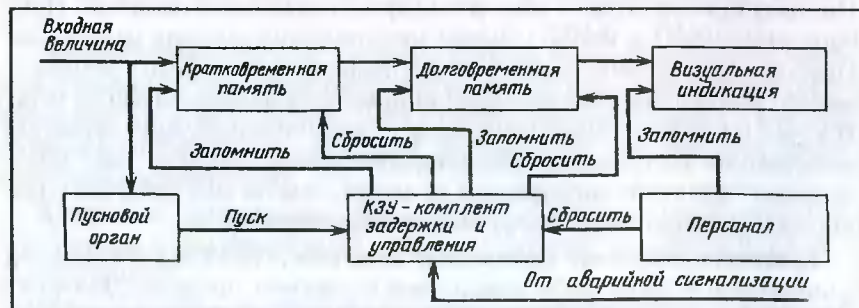


Рис. 6. Функциональная схема прибора и его внешние связи

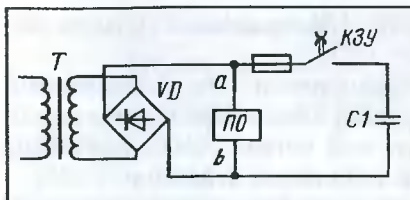
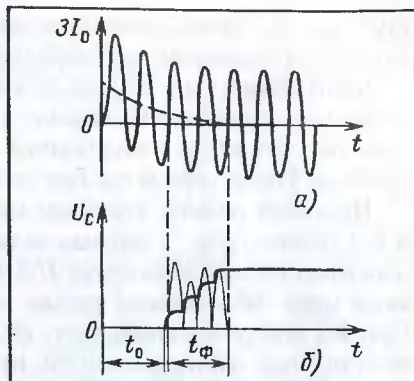


Рис. 7. Схема реализации кратковременной памяти в ФП

Рис. 8. Изменение электрических величин в кратковременной памяти:

a — входного тока $3I_0$; b — напряжения на $C1$ — U_C



утвердился электрический принцип, основанный на зарядке конденсатора. Он и положен в основу приборов типа ФИП и ЛИФП [5].

Функциональная схема ФП представлена на рис. 6. Входная величина (ток или напряжение) поступает на пусковой орган, который при превышении этой величиной определенной уставки приводит в действие комплект задержки и управления $KЗУ$ — элемент, управляющий в дальнейшем всей работой прибора. $KЗУ$ с небольшой задержкой по времени (временем отстройки) подключает входную величину к кратковременной памяти (запоминающему конденсатору) на определенное время — время фиксации. Очевидно, время фиксации должно закончиться еще до момента отключения $KЗ$. Дальнейшая работа ФП может идти в более медленном темпе.

При селективном пуске $KЗУ$ ожидает от аварийной сигнализации ПС сообщения об отключении данной ЛЭП. Если сообщение не придет, кратковременная память будет сброшена. Если сообщение придет, произойдет перенос информации из кратковременной в долговременную память. В приборах ФИП время отстройки регулируется в

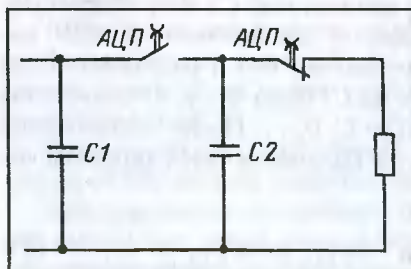


Рис. 9. Схема реализации перевода информации из кратковременной памяти в долговременную

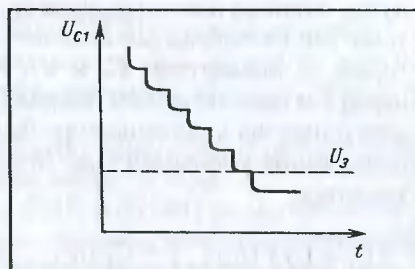


Рис. 10. Изменения напряжения на $C1$ при подключении считывающего устройства

пределах 30—80 мс, время фиксации 50—120 мс, время ожидания срабатывания аварийной сигнализации — 2—3 с.

Долговременная память энергонезависима и может хранить информацию практически бесконечно, пока лицо оперативного персонала не считает ее с индикатора и не даст сигнал сброса показаний прибора. После сброса прибор готов к повторному действию.

Принцип работы кратковременной памяти поясняется на рис. 7 и 8. Согласно рис. 7 входная величина через входной трансформатор поступает на пусковой орган *ПО*. В нормальном режиме входная величина мала (обусловлена только небалансом фильтров ОП или НП). При КЗ она резко возрастает, *ПО* срабатывает. При этом обеспечена естественная одновременность пуска приборов на двух концах ЛЭП. *ПО* приводит в действие КЗУ, который с временем отстройки подключает конденсатор *С1* на заряд от входной величины. При одинаковом времени отстройки на двух концах ЛЭП ФП начинают фиксацию одновременно.

На рис. 8 показано изменение во времени входного тока $3I_0$ и напряжения на конденсаторе U_C в том случае, если входной ток содержит значительную аperiодическую составляющую. Видно, что время отстройки совместно с замедленным зарядом конденсатора могут устранить влияние аperiодической составляющей, если она к концу времени фиксации затухнет. Постоянные времени затухания аperiодической составляющей вблизи электростанций (ЭС) равны 0,2—0,54 с, в глубине сетей 0,02—0,03 с. Следовательно, вблизи ЭС рассмотренный способ не гарантирует отстройки от аperiодической составляющей, в сетях — гарантирует. По окончании времени фиксации напряжение на конденсаторе пропорционально входной величине — фиксация завершена.

Принцип перевода информации из кратковременной памяти в долговременную пояснен на рис. 9 и 10. Согласно рис. 9 измерение напряжения на конденсаторе кратковременной памяти *С1* происходит путем периодического разряда его на конденсатор *С2*. В приборе предусмотрен своеобразный аналого-цифровой преобразователь *АЦП*, который то подключает *С2* к *С1*, то отключает его и разряжает. Если перед *i*-м подключением напряжение на *С1* было $U_{C1,i}$, то количество электричества в конденсаторе было $Q = C_1 U_{C1,i}$. После подключения напряжение уменьшится до $U_{C1,i+1}$, а количество электричества сохранится:

$$(C_1 + C_2) U_{C1,i+1} = C_1 U_{C1,i}, \text{ или } U_{C1,i+1} = U_{C1,i} \frac{C_1}{C_1 + C_2}. \quad (23)$$

Процесс снижения напряжения по мере подключения считывающего конденсатора пояснен на рис. 10. Он продолжается, пока напря-

Таблица 1. Технические характеристики приборов ФИП и ЛИФП

Прибор	Предел измерения тока, А		Кратность диапазона, отн. ед.	Входное сопротивление, Ом
	нижний	верхний		
ФИП	0,2	10	50	3,0
ФИП-1	0,4	20	50	0,8
ФИП-2	1,0	50	50	0,12
	2,0	100	50	0,05
ЛИФП	0,2	20	100	0,1
	0,4	40	100	0,08
	1,0	100	100	0,05
	2,0	200	100	0,05

жение на конденсаторе не снизится до некоторого наперед заданного значения U_3 . Можно показать, что число разрядов N для амперметра определяется формулой:

$$N \approx \alpha \ln (I_0 / I_{н.пр}), \quad (24)$$

где $\alpha = C_1 / C_2$, I_0 — значение входного (измеряемого) тока; $I_{н.пр}$ — нижний предел измерения фиксирующего амперметра.

Из формулы следует, что шкала прибора логарифмическая, что обеспечивает большую кратность диапазона измеряемых токов, но низкую точность при больших значениях измеряемой величины. Так производится преобразование в приборах ФИП. Полученное на индикаторе число разрядов приходится переводить в килоамперы с помощью градуировочных характеристик.

Приборы ЛИФП отличаются линейной шкалой, что и отмечено в первой букве сокращенного названия. Шкала становится линейной, если разряд конденсатора вести равными порциями электричества — импульсами постоянной длительности и постоянного по величине разрядного тока.

Технические данные приборов ФИП и ЛИФП приведены в табл. 1.

Фиксирующие амперметры отличаются от фиксирующих вольтметров количеством витков и сечением первичной обмотки входного трансформатора.

У фиксирующих вольтметров диапазон измеряемого напряжения от 5 до 250 В, входное сопротивление не менее 3,3 кОм.

В настоящее время приборы типа ФИП и ЛИФП не выпускаются. Но вместо них могут устанавливаться микропроцессорные приборы как предназначенные для одностороннего измерения, так и специально предназначенные для двухстороннего измерения.

Микропроцессорный прибор одностороннего измерения кроме основной информации — вида КЗ, времени, расстояния — выдает до-

полнительную — токи и напряжения всех последовательностей. В случае недостоверности информации о расстоянии (например, при наличии у ВЛ сложной взаимоиндукции), можно установить такие приборы на двух сторонах и считать расстояние по формулам двухстороннего измерения по составляющим обратной последовательности.

Специально для двухстороннего измерения выпускается микропроцессорный прибор ИМФ-2. Индикатор микропроцессорный фиксирующий ИМФ-2 предназначен для фиксации тока и напряжения НП сразу на трех ВЛ напряжением 110—750 кВ. Подключается к измерительным ТН к выводам $3U_0$ и к цепям переменного тока $3I_0$. Рабочий диапазон напряжений от 2 до 200 В, токов от 0,4 до 40 А или от 2 до 200 А в зависимости от номинала вторичных токов ТТ. Обеспечивает вывод на индикатор следующей информации:

номера ВЛ, на которой произошло КЗ и время от момента КЗ;

действующего значения тока НП поврежденной ВЛ;

действующего значения напряжения НП поврежденной ВЛ.

Сохраняется информация о четырех последних КЗ. Она может считываться в любом порядке по желанию оператора.

Время фиксации устанавливается в пределах 40—90 мс. Средняя аппаратная погрешность измерения значений тока и напряжения в рабочем диапазоне не превышает 3 %. Входное сопротивление токовых цепей не превышает 0,05 Ом. Потребление входных цепей напряжения не превышает $1,5 \text{ В} \cdot \text{А}$ на фазу при напряжении 58 В. Хранение информации обеспечивается на время до 10 ч после полного исчезновения оперативного тока.

7. УПРОЩЕННЫЕ СПОСОБЫ ОДНОСТОРОННЕГО ИЗМЕРЕНИЯ

Упрощенные способы одностороннего измерения используются в сетях 6—35 кВ, в которых на первый план выходят простота оборудования и малые затраты на приобретение и обслуживание приборов. Для примера рассмотрим три упрощенных способа.

Определение места повреждения по уровню тока КЗ. Способ применяется в сетях 6—10 кВ, в основном при наличии ВЛ, питающих сельскохозяйственную нагрузку. Отличительная особенность таких ВЛ сравнительно большая протяженность при малом сечении проводов (иногда даже стальных). Это приводит к резкому падению уровня тока КЗ по мере удаления места повреждения от питающей ПС.

Для приближенной оценки расстояния на питающей ПС на вводе от трансформатора устанавливаются приборы, фиксирующие при КЗ

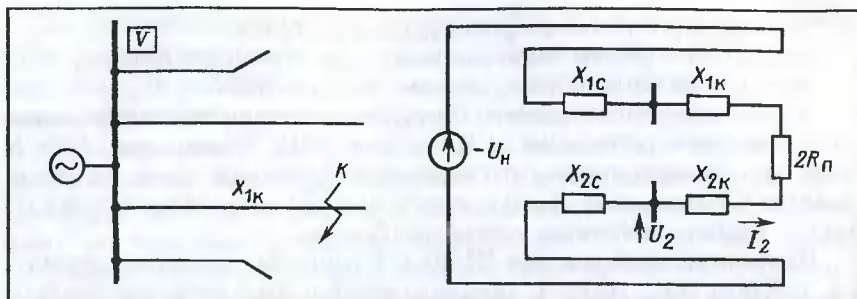


Рис. 11. Поясняющая схема и схема замещения аварийного режима при двухфазном КЗ на одной из ВЛ

значения фазных токов. Показания приборов сравниваются с заранее рассчитанными ожидаемыми токами при КЗ в различных точках ВЛ, на основании чего и делается вывод о расстоянии до точки замыкания. Очевидно, точность подобного способа ОМКЗ невелика (значение тока КЗ зависит от напряжения нагрузочного режима, от наличия переходного сопротивления, а при стальных проводах — и от нагрева провода), но какие-то выводы о расстоянии сделать можно.

Измерение напряжения обратной последовательности на питающей подстанции. Способ применяется в сетях 6—35 кВ на ВЛ с односторонним питанием. На питающей ПС ставится один фиксирующий вольтметр, измеряющий при КЗ напряжение ОП.

Схема замещения аварийного режима при двухфазном КЗ на ВЛ показана на рис. 11. В схеме имеется один источник ЭДС, равной напряжению предшествующего нагрузочного режима в точке КЗ. Если все сопротивления в схемах ОП равны соответствующим сопротивлениям в схеме прямой последовательности (ПП), то в месте КЗ напряжение ОП равно половине приложенной ЭДС, а ток ОП связан и известным напряжением U через сопротивление системы:

$$U_{2к} = U_n / 2 ; \quad (25)$$

$$I_2 = U_2 / X_{2с} . \quad (26)$$

Соотношения записаны для модулей величин, без учета знаков.

Учитывая сказанное, можно записать выражение для неизвестного сопротивления до места КЗ:

$$X_{2к} = \frac{0,5 U_n - U_2}{U_2} X_{2с} . \quad (27)$$

Обычно сопротивление ОП ЭЭС известно с достаточной точностью, и расчет можно производить. Очевидно, скудость исходной информации приводит к погрешностям из-за:

наличия переходного сопротивления в месте КЗ;
 неточности в определении напряжения нагрузочного режима;
 неучета в расчетной схеме нагрузок смежных ЛЭП.

Зато используется минимум оборудования (один вольтметр позволяет определять расстояние до КЗ на всех ЛЭП, отходящих от ПС). К тому же есть вероятность, что измерение произойдет даже при трехфазных КЗ, поскольку обычно трехфазное КЗ начинается с двухфазного, а приборы действуют достаточно быстро.

Применение приборов типа ИМФ-1. В настоящее время выпускаются приборы типа ИМФ-1, предназначенные для непосредственного определения расстояния до места КЗ на ВЛ напряжением 6—35 кВ протяженностью до 100 км с дополнительной фиксацией действующих значений токов КЗ, токов ПП и ОП, напряжений ПП и ОП. (Подробнее микропроцессорные приборы будут рассмотрены ниже).

Расчет расстояния до места КЗ производится по формуле:

$$L_k = U_{п.ф} (I_{п.ф} Z_{уд}) , \quad (28)$$

где $Z_{уд} = \sqrt{X_{уд}^2 + R_{уд}^2}$, $R_{уд}$ — удельное активное сопротивление ЛЭП в схеме ПП; $X_{уд}$ — удельное реактивное сопротивление ЛЭП в схеме ПП; $U_{п.ф}$ — действующее значение напряжения между поврежденными фазами; $I_{п.ф}$ — действующее значение разности токов поврежденных фаз ЛЭП.

Следует отметить, что при включении прибора на ТТ ВЛ возможны значительные погрешности из-за насыщения ТТ. При включении прибора на ТТ ввода питающего систему шин силового трансформатора возникает погрешность из-за токов неповрежденных ЛЭП.

8. НЕКОТОРЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ

Для понимания дальнейшего материала требуется знание основных положений теории. Поэтому приводим необходимый минимум сведений по дистанционному принципу РЗ.

Измерительные органы ДЗ — реле сопротивления реагируют на комплекс отношения напряжения к току: $\underline{Z} = \underline{U} / \underline{I}$. При трехфазном металлическом КЗ на одиночной ЛЭП (см. рис. 2) очевидно соотношение:

$$\underline{U}' = \underline{I}' Z_{1к} = \underline{I}' Z_{1уд} x ,$$

где x — расстояние до места КЗ; $Z_{1уд}$ — удельное сопротивление ВЛ в схеме ПП; $Z_{1к}$ — сопротивление ВЛ до места КЗ.

Поделив напряжение на ток, получаем $Z_{\text{уд}} x$, т. е. замер дистанционного устройства пропорционален расстоянию до места КЗ. Принято анализировать поведение дистанционных устройств в комплексной плоскости сопротивления “на зажимах”. Такая плоскость с осями R и jX показана на рис. 12. Сопротивления “на зажимах” при металлических КЗ лежат на “оси сопротивления ВЛ”, расположенной под углом $\varphi_{\text{л}}$ к оси R . Угол $\varphi_{\text{л}}$ определяется соотношением активной и индуктивной составляющей удельного сопротивления ВЛ. Некоторое представление о значении этого угла можно получить из табл. 2.4 [10]. Согласно указанной таблице угол $\varphi_{\text{л}}$ для ВЛ 110 кВ лежит в пределах от 35° (провод марки АС-50) до 78° (провод марки АСО-400), для ВЛ 220 кВ от 73° (провод марки АСО-240) до 84° (провод марки АСО-500), для ВЛ 500 кВ от 84° до 87° . Среднее значение $\varphi_{\text{л}}$ для 110 кВ равно 65° , для 220 кВ — 75° .

При КЗ “в направлении срабатывания” ДЗ вектор сопротивления на рис. 12 лежит в первом квадранте плоскости, при КЗ “за спиной” — в третьем квадранте плоскости; при переходе КЗ на смежные ЛЭП сопротивление уходит вверх за точку $Z_{1\text{л}}$.

На дистанционном принципе работают ДЗ ВЛ. Измерительный орган такой защиты от междуфазных КЗ содержит три реле сопротивления, включенные на три “петли междуфазных КЗ”: первое на напряжение U_{AB} и ток $(I_A - I_B)$, второе на U_{BC} и $(I_B - I_C)$, третье на U_{CA} и $(I_C - I_A)$. Измерительный орган ДЗ от КЗ на землю содержит три реле, включенных на три “петли фаза—земля”: U_{ϕ} и $(I_{\phi} + k I_0)$. Смысл такого включения ясен из выражения (2) — только оно обеспечивает при металлическом замыкании на землю замер, равный сопротивлению ВЛ до места КЗ в схеме ПП $Z_{1\text{к}}$, следовательно, дистанционный принцип сам по себе обеспечивает одностороннее измерение расстояния до места КЗ, но только при металлических замыканиях. При КЗ через переходное сопротивление пропорциональность между

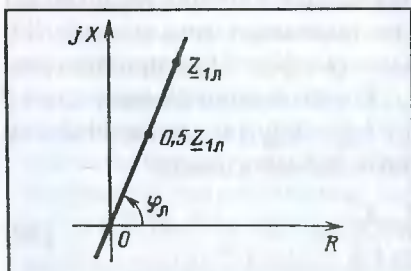


Рис. 12. Сопротивления на зажимах дистанционного устройства при металлических КЗ на ВЛ

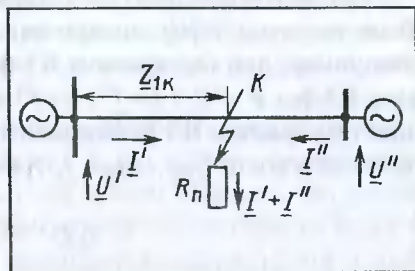


Рис. 13. Короткое замыкание через переходное сопротивление

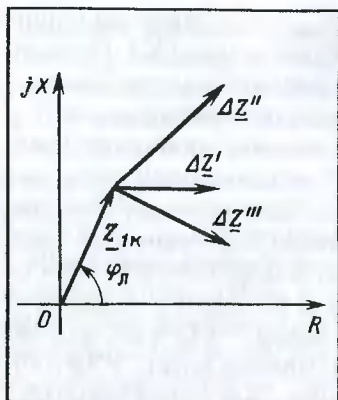


Рис. 14. Положение вектора $\Delta \underline{Z}$ на плоскости

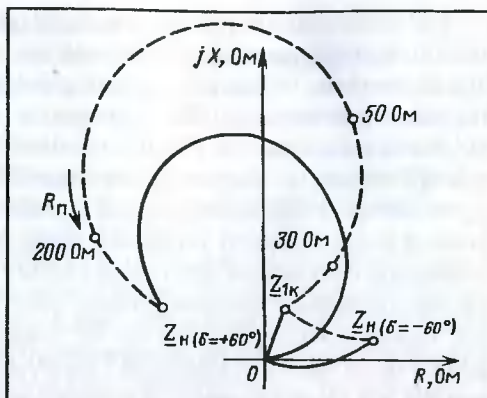


Рис. 15. Годографы сопротивлений на зажимах при однофазных КЗ через переходное сопротивление, изменяющееся от 0 до ∞

сопротивлением на зажимах и расстоянием исчезает. Напряжение $\underline{U}'$ в схеме рис. 13 можно получить сложением напряжения в точке K с падением напряжения в сопротивлении ВЛ $\underline{Z}_{1K}$: $\underline{U}' = (\underline{I}' + \underline{I}'') R_n + \underline{I}' \underline{Z}_{1K}$. Сопротивление, измеренное дистанционным устройством, равно:

$$\underline{Z} = \underline{U}' / \underline{I}' = \underline{Z}_{1K} + \frac{\underline{I}' + \underline{I}''}{\underline{I}'} R_n = \underline{Z}_{1K} + \Delta \underline{Z}. \quad (29)$$

Как видим, из-за переходного сопротивления появляется вектор $\Delta \underline{Z}$, значение которого определяется не только током своего конца ВЛ, но и током противоположного конца ВЛ. Однозначная зависимость между результатами измерения устройства и расстоянием до КЗ исчезает.

При некоторых видах КЗ ток в переходном сопротивлении может быть выражен через симметричные составляющие тока в точке КЗ. Например, при однофазном КЗ фазы A : $(\underline{I}' + \underline{I}'') = 3 \underline{I}_{0K}$, при двухфазном КЗ фаз B и C : $(\underline{I}' + \underline{I}'') = j\sqrt{3} \underline{I}_{2KA}$. С учетом этого формулу для $\Delta \underline{Z}$ при однофазном КЗ [в плоскости $\underline{U}_\phi / (\underline{I}_\phi + k \underline{I}_0)$] и для двухфазного КЗ [в плоскости $\underline{U}_{BC} / (\underline{I}_B - \underline{I}_C)$] можно переписать в виде:

$$\Delta \underline{Z}^{(1)} = \frac{3 \underline{I}_{0K} R_n}{\underline{I}_\phi + k \underline{I}_0}; \quad (30)$$

$$\Delta \underline{Z}^{(2)} = \frac{j\sqrt{3} \underline{I}_{2KA} R_n}{\underline{I}_B - \underline{I}_C}. \quad (31)$$

Направление вектора ΔZ зависит от фазных соотношений между входящими в формулы (30) и (31) токами (само R_{Π} имеет активный характер). Общая закономерность следующая (рис. 14). Если отсутствуют составляющие токов нагрузочного режима (например, КЗ на ВЛ с односторонним питанием), то вектор ΔZ горизонтален (вектор $\Delta Z'$ на рис. 14). На передающем конце ВЛ (например ВЛ отходит от ЭС) вектор уходит вниз (вектор $\Delta Z''$ на рис. 14). На приемном конце ВЛ вектор уходит вверх ($\Delta Z'''$ на рис. 14). Объясняется это тем, что с ростом переходного сопротивления сопротивление на зажимах стремится от точки $Z_{1к}$ к точке сопротивления в нагрузочном режиме Z_n .

Само сопротивление в нагрузочном (доаварийном) режиме равно отношению U_n/I_n и лежит в бесконечности на ненагруженной ВЛ (или ВЛ с односторонним питанием при пренебрежении ее нагрузкой), в первом квадранте на передающем конце ВЛ (выдача активной мощности эквивалентна положительным значениям R), во втором или даже третьем квадрантах на приемном конце ВЛ (прием активной мощности и выдача или прием реактивной).

При изменении переходного сопротивления от нуля до бесконечности конец вектора сопротивления на зажимах описывает дугу окружности, ограниченную точками $Z_{1к}$ и Z_n — годограф сопротивления. Вид таких годографов приведен на рис. 15 для ВЛ 220 кВ с параметрами, указанными в §2 данной брошюры. Приведены годографы при КЗ в начале ВЛ (сплошные линии) и в конце (пунктирные линии) для двух нагрузочных режимов — режим выдачи мощности с углом $\delta = \arg(E_2/E_1) = -60^\circ$ и режим приема мощности с $\delta = 60^\circ$ (где E_2 — ЭДС ЭЭС противоположного конца ВЛ и E_1 — ЭДС ЭЭС прилегающего конца ВЛ). Как видно из рис. 15, на передающем конце ВЛ годограф движется по короткой дуге окружности и не уходит из первого квадранта. На приемном конце ВЛ годограф движется по длинной дуге окружности и переходит из первого во второй квадрант. Плохо, что он при этом пересекает ось сопротивления ВЛ (при пересечении сопротивление на зажимах такое же, как при металлическом замыкании в весьма удаленной точке).

Плохо, что на приемном конце ВЛ годографы, соответствующие совсем разным точкам КЗ, пересекаются между собой — в точке пересечения по сопротивлению на зажимах нельзя отличить два разных места КЗ. Вообще при одностороннем измерении устройства на передающих концах ВЛ имеют гораздо меньшие погрешности, чем устройства на приемных концах.

Исключение влияния переходных сопротивлений и является основной трудностью при одностороннем измерении.

9. ТЕОРИЯ ОДНОСТОРОННЕГО ИЗМЕРЕНИЯ НА ЛИНИИ С ДВУХСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

Первым из приборов одностороннего измерения работающих на дистанционном принципе, был прибор ФИС, выпускавшийся в небольших количествах в начале 80-х годов. Проблема устранения влияния переходного сопротивления в нем решалась тем, что прибор реагировал на реактивную составляющую сопротивления “на зажимах”: $X = \text{Im} (U_{\phi} / (I_{\phi} + k I_0))$. Непосредственно из рис. 14 можно заключить, что влияние переходного сопротивления исключалось только либо на ненагруженных ВЛ, либо на ВЛ с односторонним питанием. Для расширения области применения делались попытки осуществлять измерение в режиме каскадного включения ВЛ при неуспешном АПВ. Однако это не являлось полноценным решением проблемы.

Положение изменилось только после появления разработки Рижского политехнического института (А.С. Саухатас) прибора МФИ, реализовавшего принципы, разработанные в [6]. Рассмотрим теоретические основы действия прибора.

Согласно формулам (30) и (31) и рис. 14, замер дистанционного устройства $\underline{Z}$ складывается из сопротивления ВЛ до места КЗ $\underline{Z}_{1к}$ и вектора $\Delta \underline{Z}$. Длины двух указанных векторов неизвестны. Но известны их направления: вектор $\underline{Z}_{1к}$ направлен вдоль оси сопротивления ВЛ; направление вектора $\Delta \underline{Z}$ можно найти почти точно. Для пояснения обратимся к формуле (30) для случая однофазного КЗ. Если считать

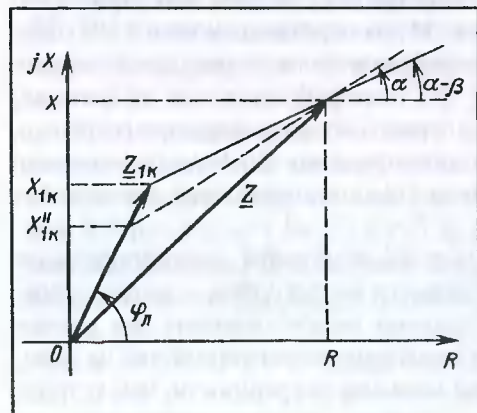


Рис. 16. К пояснению принципа одностороннего ОМКЗ

переходное сопротивление чисто активным, то направление $\Delta \underline{Z}$ определяется соотношением токов $I_{0к}$ и $(I_{\phi} + k I_0)$. Токи I_{ϕ} и I_0 можно измерить на данном конце ВЛ. Ток $I_{0к}$ существует только в месте замыкания. Однако к этому току весьма близок по фазе ток НП I_0 , поскольку токораспределение по схеме НП мало меняет фазу токов в отдельных элементах. Для угла, под которым вектор $\Delta \underline{Z}$

наклонен к горизонтали, можно написать формулу:

$$\begin{aligned}\arg \Delta Z &= \arg [I_{0к} / (I_{\phi} + k I_0)] = \\ &= \arg [I_0 / (I_{\phi} + k I_0)] - \arg [I_0 / I_{0к}] = \alpha - \beta,\end{aligned}\quad (32)$$

где $\alpha = \arg [I_0 / (I_{\phi} + k I_0)]$; $\beta = \arg [I_0 / I_{0к}]$.

Угол α может быть сосчитан по измерениям на одном конце. Угол β очень мал, им иногда можно пренебречь.

Графическое решение задачи определения $Z_{1к}$ пояснено на рис. 16. На комплексной плоскости построены вектор $\underline{Z}$ и ось сопротивления ВЛ. Затем через точку конца вектора ΔZ проведена прямая под углом $\alpha - \beta$ к горизонтали. Пересечение прямой с осью сопротивления дает точку конца вектора $\underline{Z}_{1к}$, в частности, реактивное сопротивление до места КЗ — $X_{1к}$.

Возможно получение аналитической формулы для $X_{1к}$ путем решения треугольника. Согласно [6] расчетная формула имеет вид:

$$X_{1к} = \frac{X - R \operatorname{tg}(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg} \varphi_{л} - \operatorname{tg}(\alpha - \beta)} \operatorname{tg} \varphi_{л}, \quad (33)$$

где $\operatorname{tg} \varphi_{л} = X_{л} / R_{л}$; X и R — составляющие вектора $\underline{Z}$.

В формуле известно все, кроме угла β , который нельзя измерить на одном конце ВЛ. Приближенное решение предполагает пренебрежение углом. Тогда аналитическая формула приобретает вид:

$$X_{1к}'' = \frac{X - R \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \varphi_{л} - \operatorname{tg} \alpha} \operatorname{tg} \varphi_{л}. \quad (34)$$

Графическая интерпретация приближенного решения показана на рис. 16: если через конец вектора $\underline{Z}$ провести прямую не под углом $(\alpha - \beta)$, а под углом α , то получим не точное решение $X_{1к}$, а приближенное $X_{1к}''$. Следовательно, одностороннее измерение оказалось возможным потому, что направление тока $I_{0к}$ приняли совпадающим с направлением тока I_0 .

В [7] введено понятие *опорного тока* — тока, близкого по фазе к току в переходном сопротивлении. Для однофазного КЗ это либо ток НП I_0 , либо ток ОП I_2 , либо аварийная составляющая тока ПП $I_1 - I_{н}$, либо аварийная составляющая тока фазы $I_{\phi} - I_{н}$. Для использования аварийных составляющих необходимо знание тока предшествующего нагрузочного режима $I_{н}$. Для этого ФП должен запоминать значение предшествующего тока, что в принципе возможно. Еще проще решается вопрос при использовании для расчета данных от цифровых осциллографов — осциллографы всегда записывают не только токи КЗ, но и несколько периодов величин предшествующего

режима. Использование аварийных составляющих возможно в предположении, что за время КЗ угол между ЭДС ЭЭС не успел значительно измениться — иначе в аварийную составляющую войдет и часть тока ПП, что приведет к погрешностям.

Из формулы (31) следует, что при замыкании двух фаз B и C без земли в качестве опорного следует принимать ток $j \underline{I}_{2KA}$. Тогда формулы (33) и (34) не изменятся, но анализ следует вести в плоскости сопротивления петли междуфазного КЗ. Например, при КЗ между фазами B и C :

$$\left. \begin{aligned} R &= \operatorname{Re} [\underline{U}_{BC} / (\underline{I}_B - \underline{I}_C)]; \\ X &= \operatorname{Im} [\underline{U}_{BC} / (\underline{I}_B - \underline{I}_C)]; \\ \alpha &= \arg [\underline{I}_{2A} / (\underline{I}_B - \underline{I}_C)] + 90^\circ ; \\ \beta &= \arg [\underline{I}_{2A} / \underline{I}_{2KA}] . \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

При КЗ двух фаз на землю опорный ток выделить не удастся, но из положения выходят тем, что ведут расчет по петле междуфазного КЗ, чем исключается влияние общего переходного сопротивления (на землю), но не исключается влияние фазных переходных сопротивлений. При КЗ трех фаз исключить влияние переходных сопротивлений при одностороннем измерении вообще не удастся.

10. ВАРИАНТЫ СПОСОБОВ ОДНОСТОРОННЕГО ИЗМЕРЕНИЯ

Техническая реализация одностороннего измерения возможна многими путями, но все они дают один и тот же результат. Перечислим некоторые известные варианты применительно к однофазным замыканиям.

Итерационный расчет. Сущность его заключается в постепенном приближении к искомой точке КЗ от некоторой начальной точки, взятой произвольно. Критериев, определяющих направление передвижения и конец поиска, может быть несколько. В [6] в качестве критерия предложено направление вектора

$$\Delta \underline{Z}_{\text{уд}} = \frac{3 \underline{I}_0}{\underline{C}_{0p} (\underline{I}_\phi + k \underline{I}_0)} , \quad (36)$$

$$\text{где } \underline{C}_{0p} = (\underline{Z}_{00} - \underline{Z}_{0c} - \underline{Z}_{0k}) / \underline{Z}_{00} = \underline{I}_0 / \underline{I}_{0k} \quad (37)$$

— коэффициент токораспределения по схеме НП; $\underline{Z}_{0c}$, $\underline{Z}_{0k}$, $\underline{Z}_{00}$ — сопротивления прилегающей ЭЭС, ВЛ до точки КЗ и суммарное сопротивление всей схемы НП.

Можно сказать, что $\Delta Z_{уд}$ — “кажущееся” с данного конца ВЛ сопротивление одного ома переходного сопротивления. В [6] показано, что если в ходе расчета принять слишком малое предполагаемое расстояние до места КЗ, то угол $\arg(\Delta Z / \Delta Z_{уд})$ положителен. Если расстояние преувеличено, угол отрицателен. При точном значении расстояния угол равен нулю.

Расчеты значений целевых функций при перемещении предполагаемого места КЗ вдоль ВЛ. В §2 уже описан способ идентификации параметров ВЛ, основанный на расчете значений целевых функций при перемещении предполагаемого места КЗ вдоль всей длины ВЛ. В качестве *прямой целевой функции* можно использовать значение реактивной мощности в точке КЗ. Однако для этого следует знать ток в переходном сопротивлении I_K , что возможно только при двухстороннем измерении. В [7] введено понятие *косвенной целевой функции*, когда ток в переходном сопротивлении заменяют близким ему по фазе током. Как показано в предыдущем параграфе, в качестве опорного можно взять токи НП или ОП, а также аварийную составляющую тока ПП либо тока фазы. Тогда:

$$\left. \begin{aligned} Q_0 &= \operatorname{Im} [\underline{U}_K \underline{I}_0] = 0; \\ Q_2 &= \operatorname{Im} [\underline{U}_K \underline{I}_2] = 0; \\ Q_{ав} &= \operatorname{Im} [\underline{U}_K \underline{I}_{ав}] = 0. \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

Можно построить графики изменения целевой функции при перемещении предполагаемого места КЗ вдоль ВЛ (см. рис. 3). Тогда точка КЗ определится по пересечению графика с осью ВЛ. Можно сразу сосчитать значение целевой функции в месте установки прибора и разделить его на потери реактивной мощности в 1 км ВЛ. Все равно результат будет один и тот же и точно совпадет с результатом расчета по формуле (34).

Определение места по мгновенным значениям токов и напряжений. Способы одностороннего ОМКЗ, рассмотренные выше, основаны на расчетах по интегральным параметрам электрических величин (токов, напряжений). Термин интегральные параметры появился с внедрением ЭВМ в технику РЗ для того, чтобы отличить мгновенные значения синусоидальных электрических величин i, u от характеризующих эти величины в любой момент времени параметров $\underline{I}, \underline{U}$. Употребляется термин в том смысле, что ЭВМ получает интегральные параметры путем измерения и обработки ряда мгновенных значений, т. е. после суммирования-интегрирования информации о мгновенных значениях.

Однако известны и способы ОМКЗ на основе операций с мгновенными значениями токов и напряжений. Первый из них предложен во Франции [8]. Основы его следующие.

Пусть однофазное КЗ через сопротивление R_{Π} произошло на расстоянии l на ВЛ с удельными параметрами $R_{уд}$, $L_{уд}$. Мгновенное значение напряжения на данном конце ВЛ равно:

$$u = l(R_{уд} i + L_{уд} \frac{di}{dt}) + R_{\Pi} i_k,$$

удельное падение напряжения на 1 км ВЛ равно:

$$\Delta u = R_{уд} i + L_{уд} \frac{di}{dt} = (i_{\phi} + k I_0) Z_{1уд}.$$

Если выбрать момент, когда ток в месте КЗ i_k равен нулю, то в формуле для напряжения исчезнет слагаемое, содержащее R_{Π} . Тогда получим простую формулу:

$$l = \frac{u}{\Delta u} \quad \text{при} \quad i_k = 0, \quad (39)$$

т. е. для определения расстояния достаточно измерить напряжение u и ток $i = (i_{\phi} + k i_0)$ в момент перехода тока i_k через нулевое мгновенное значение. Поскольку ток i_k неизвестен, достаточно взять почти совпадающий с ним по фазе ток i_0 . В [6] показано, что результат в точности совпадает с расчетом по интегральным значениям с применением формулы (34).

С учетом (39) просто понять формулу, по которой определяется расстояние до места однофазного КЗ в приборах МИР, ФПМ, ИМФ:

$$l = \frac{\text{Im} \left[\frac{U_{\phi}}{I_0} \right]}{\text{Im} \left[\frac{(I_{\phi} + k I_0) Z_{уд}}{I_0} \right]}. \quad (40)$$

В формуле измерение мгновенных значений u и Δu в момент перехода тока i_0 через нулевое мгновенное значение заменено на расчет проекции на мнимую ось, перпендикулярную вектору I_0 , интегральных величин $\underline{U}_{\phi}$ и $\underline{\Delta U}_{\phi}$.

Все перечисленные способы применимы и при двухфазных КЗ без земли при замене параметров петли фаза — земля на параметры петли фаза — фаза.

Учет взаимных индукций с другими ЛЭП. Выпускаемые в настоящее время ФП способны учесть взаимную индукцию с одной из параллельных ВЛ, для чего к прибору подводится ток НП этой ВЛ $I_{0п}$. При

наличии взаимоиנדукции по всей длине ВЛ в формуле (40) для расстояния до места однофазного КЗ вместо выражения $\underline{I}_\phi + k \underline{I}_0$ появляется выражение $\underline{I}_\phi + k \underline{I}_0 + k_m \underline{I}_{0п}$, где $k_m = X_m / X_1$ — коэффициент компенсации по току НП параллельной ВЛ. При других видах замыканий — трехфазных, двухфазных или двухфазных на землю — взаимоиנדукция не учитывается, поскольку весь расчет идет по петле междуфазного КЗ.

Если взаимоиנדукция имеется не по всей длине ВЛ, а лишь на начальном участке, то вначале расчет ведут с учетом взаимоиנדукции. Но если результат расчета окажется большим, чем длина участка с взаимоиנדукцией l_m , то производят пересчет с “мысленным переносом” прибора в точку конца участка с взаимоиנדукцией. Напряжение фазы в указанной точке:

$$\underline{U}_{\phi m} = \underline{U}_\phi - (\underline{I}_\phi + k \underline{I}_0 + k_m \underline{I}_{0п}) l_m \underline{Z}_{луд}, \quad (41)$$

токи всех фаз за пределами участка с взаимоиנדукцией те же, что и в месте измерения. Поэтому пересчет расстояния после “мысленного переноса” прибора не представляет трудностей.

Имеются программы, учитывающие до десяти взаимоиנדукций с разной протяженностью. Идея та же — расчет начинается с головного участка, который имеет максимальное число взаимоиנדукций; затем прибор “мысленно переносится” на начало новых участков, каждый из которых имеет меньшее число взаимоиנדукций, пока расстояние не окажется лежащим в пределах очередного рассмотренного участка.

Учет ответвлений с трансформаторами с заземленными нейтральными. Схема ВЛ с одним ответвлением приведена на рис. 5. Если нейтраль трансформатора незаземлена, то влиянием ответвления можно пренебречь, поскольку токи нагрузки много больше токов КЗ. При заземленной нейтрали расчет расстояния за ответвлением без учета подпитки от нейтрали будет неточен, поскольку указанная подпитка соизмерима с токами НП в месте измерения. В этом случае расчет также ведется с “мысленным переносом прибора”. Вначале расстояние считается по электрическим величинам в точке измерения без учета ответвления. Если подсчитанное расстояние меньше $L_{от}$, то расчет заканчивается, но если больше, то расчет повторяется с “переносом прибора” в точку ответвления. Напряжение НП в указанной точке $\underline{U}_{0Б} = \underline{U}_0 - \underline{I}_0 L_{от} \underline{Z}_{0уд}$; ток НП за точкой ответвления $\underline{I}_{0Б} = \underline{I}_0 - \underline{U}_{0Б} / j \underline{X}_{от}$. Напряжения и токи других последовательностей при переходе за точку ответвления не изменяются. Поэтому последовательность расчета после “переноса прибора” в точку *Б* остается той же, что и для ВЛ без ответвлений.

11. ПОГРЕШНОСТИ ОДНОСТОРОННЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ

Рассмотренные способы имеют ряд источников погрешностей. Некоторые из них общие с любыми устройствами, работающими на дистанционном принципе — неточность работы ТТ и ТН, влияние свободных составляющих переходного электромагнитного процесса, неточность знания параметров обслуживаемой ВЛ. Но есть и специфические источники методической погрешности — влияние взаимных индукций с другими ВЛ и влияние комплексности токораспределения по схеме НП.

Приборы МИР, ФПМ, ИМФ способны учесть влияние лишь одной взаимной индукции (у них есть входы для токов трех фаз обслуживаемой ВЛ и для тока НП еще одной ВЛ). Между тем из соображений экономии земли ВЛ от ПС обычно отходят коридорами, создавая многочисленные взаимоиндукции. Из всех взаимоиндукций приходится выбирать одну — наиболее сильно влияющую. Неучет остальных вызывает погрешности измерения.

Принципиально указанную погрешность можно устранить, создавая систему сбора информации от всех ВЛ, отходящих по данному коридору. Подобные системы известны, существуют компьютерные программы, ведущие расчеты по данным многих приборов. Еще проще решается проблема, если на ПС установлены цифровые осциллографы, собирающие информацию со всех присоединений ЭВМ, в которой сходится информация, способная учесть взаимное влияние всех ВЛ.

Проблема становится практически неразрешимой, если взаимные индукции появляются где-то в середине ВЛ (взаимное сближение ВЛ, отходящих от разных ПС) или если коридор с взаимными индукциями появляется на противоположной по отношению к прибору стороне ВЛ. Тогда приходится применять другие способы (например, устанавливать приборы на двух концах ВЛ и вести расчеты по двухстороннему измерению величин ОП).

Комплексность токораспределения по схеме НП — комплексность коэффициента токораспределения $C_{ор}$, определяемого выражением (37). Если коэффициент является комплексным числом, то ток НП в месте измерения не совпадает по углу с током в переходном сопротивлении. В общем случае этот угол всегда имеется, поскольку в схеме на рис. 2 сопротивление НП систем почти чисто индуктивно, а сопротивление ВЛ имеет значительную активную составляющую (из-за потерь активной мощности в земле).

С формальной точки зрения погрешность появляется потому, что, не имея точной информации о фазе тока в переходном сопротивлении, приборы вынуждены вести расчет не по точной формуле (33), а по приближенной формуле (34), не учитывающей угла $\beta = \arg(C_{ор})$.

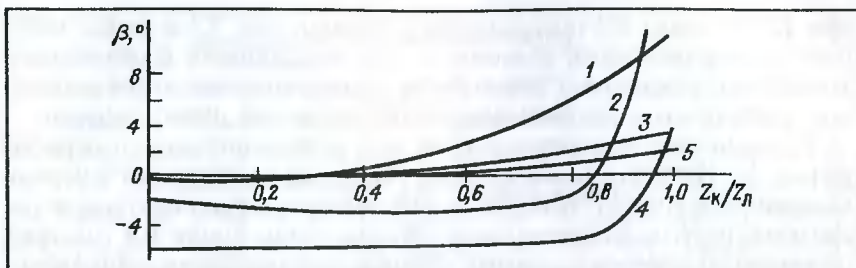


Рис. 17. Изменение угла β при удалении точки КЗ:

1 — $Z_{0c1} = j 1 \text{ Ом}$, $Z_{0c2} = j 10 \text{ Ом}$; 2 — $Z_{0c1} = j 10 \text{ Ом}$, $Z_{0c2} = j 1 \text{ Ом}$; 3 — $Z_{0c1} = j 10 \text{ Ом}$, $Z_{0c2} = j 100 \text{ Ом}$; 4 — $Z_{0c1} = j 100 \text{ Ом}$, $Z_{0c2} = j 10 \text{ Ом}$; 5 — $Z_{0c1} = j 1 \text{ Ом}$, $Z_{0c2} = j 10 \text{ Ом}$

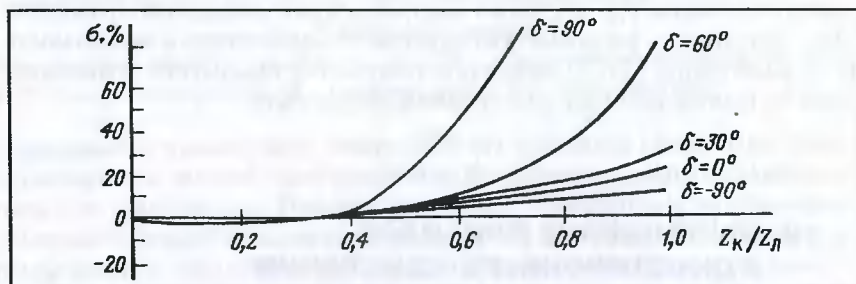


Рис. 18. Зависимость погрешности измерения от комплексности токораспределения

Сам угол β невелик. О значении этого угла можно судить по рис. 17, на котором показана его зависимость от расстояния при перемещении точки КЗ по одиночной ВЛ с сопротивлением $Z_{0Л} = 35 e^{j78^\circ} \text{ Ом}$.

Принят довольно широкий диапазон изменения сопротивления ЭЭС. При индуктивных сопротивлениях ЭЭС и активно-индуктивном сопротивлении ВЛ угол β при КЗ в начале ВЛ всегда отрицателен, при КЗ в конце ВЛ всегда положителен.

На ВЛ всегда имеется точка с $\beta = 0$, при КЗ в которой погрешность измерения равна нулю при любом переходном сопротивлении. Погрешность при КЗ в других точках зависит от переходного сопротивления, угла β и токов нагрузочного режима. Примеры зависимости погрешности от расстояния и от составляющих нагрузочного режима приведены на рис. 18. Рассматривалось КЗ через переходное сопротивление 30 Ом на ВЛ 220 кВ с параметрами, приведенными в §2 (см. рис. 15).

Токи нагрузочного режима определены углом между ЭДС ЭЭС $\delta = \arg(E_2/E_1)$. Отрицательные углы между ЭДС — передающий конец ВЛ. Положительные углы — приемный конец ВЛ. Видно, что

при КЗ в начале ВЛ погрешности невелики, при КЗ в конце могут быть весьма большими (положительные погрешности соответствуют заниженному результату расчета). На передающем конце ВЛ погрешности всегда малы, на приемном могут быть весьма значительными.

Причина больших погрешностей ясна из рассмотрения годографов на рис. 15. На передающем конце ВЛ годограф всегда лежит в первом квадранте, вектор ΔZ невелик, и погрешности от неучета угла в несколько градусов незначительны. На приемном конце ВЛ годограф переходит из первого квадранта комплексной плоскости сопротивлений во второй. Когда сопротивление на зажимах близко к оси сопротивления ВЛ, даже незначительная ошибка по углу приводит к большой погрешности расчета.

Известны пути уменьшения влияния комплексности токораспределения. Согласно [6] для этого следует решать совместно уравнения (33), зависимость расстояния от электрических величин и зависимость β от расстояния (35). В результате получается квадратное уравнение, один из корней которого дает искомое расстояние.

12. ВЫПОЛНЕНИЕ ПРИБОРОВ ОДНОСТОРОННЕГО ИЗМЕРЕНИЯ

ФП одностороннего измерения впервые были разработаны в начале 90-х годов в Рижском политехническом институте под руководством А.С. Саухатаса и начали выпускаться под названием МФИ (микропроцессорный фиксирующий импульсный прибор). В настоящее время различные заводы выпускают те же приборы под названиями МИР, ФПИМ, ИМФ, которые имеют минимальные различия в техническом исполнении и в алгоритмах. Рассматриваемые приборы явились первыми микропроцессорными устройствами, в массовом масштабе внедренными в отечественную энергетику. Сравнительная легкость их внедрения объясняется несовершенством прежде использовавшихся приборов двухстороннего измерения и несомненно большим удобством одностороннего измерения для оперативного персонала.

Структурная схема прибора представлена на рис. 19 [9]. Токи и напряжения контролируемой ВЛ $I_A, I_B, I_C, U_A, U_B, U_C$, а также ток НП одной параллельной ВЛ I_{m0} (при ее наличии) поступают на первичные обмотки промежуточных трансформаторов входного блока *БВ*. Кроме входных трансформаторов *БВ* содержит фильтры низких частот, назначение которых — предварительное подавление высших гармонических составляющих.

После предварительной обработки в *БВ* токи и напряжения поступают на входы мультиплексора *МП*, который по команде микроЭВМ

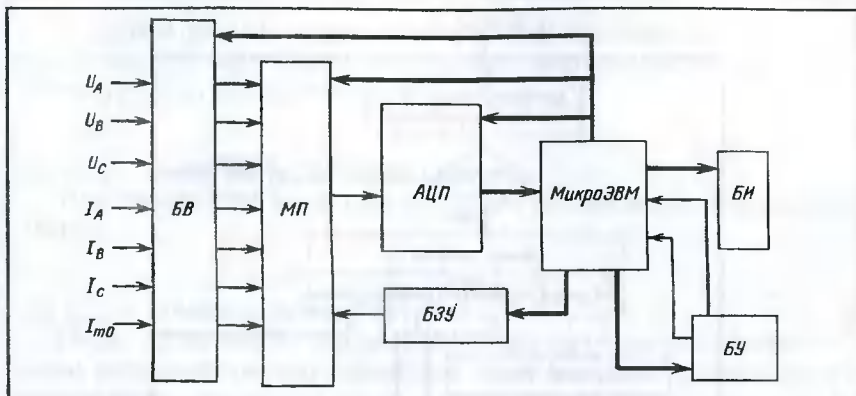


Рис. 19. Структурная схема ФП:

БВ — блок входной; МП — мультиплексор; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; БЗУ — блок задания уставок; БУ — блок управления; БИ — блок индикации

подключает к аналоговому входу АЦП тот или иной канал. При этом производится аналого-цифровое преобразование соответствующего тока или напряжения. Прибор делает по 23 дискретных мгновенных измерения каждой из семи входных величин за период. Кроме токов и напряжений к аналоговому входу АЦП подводятся выходные напряжения блока задания уставок БЗУ (информация о параметрах данной ЛЭП), регулируемые эксплуатирующим персоналом перед включением прибора. При регулировке имеется возможность индикации значений этих параметров (уставок) на цифровом табло блока индикации БИ, что позволяет задать значения параметров без применения измерительных приборов.

Блок управления БУ обеспечивает вывод результатов и значений уставок на цифровое табло, контроль исправности и принудительный пуск устройства. Блок управления содержит две кнопки управления, при помощи которых осуществляются указанные операции.

Структурная схема программной реализации прибора ФПМ представлена на рис. 20. При подаче оперативного питания осуществляется автоматический пуск выполнения программы работы ФПМ. Первым выполняемым программным блоком является блок контроля меток и сигналов управления. При этом осуществляется опрос положения кнопок управления, проверка наличия внешнего разрешающего сигнала (о факте отключения выключателя — аналог селективного пуска в приборах двухстороннего измерения), а также опрос содержимого одной из ячеек ОЗУ, куда при срабатывании прибора записывается определенный код (метка срабатывания $F1$). Наличие упомянутой метки свидетельствует, что до подачи оперативного питания устройство срабатывало, а информация еще не считана. Следующий программ-

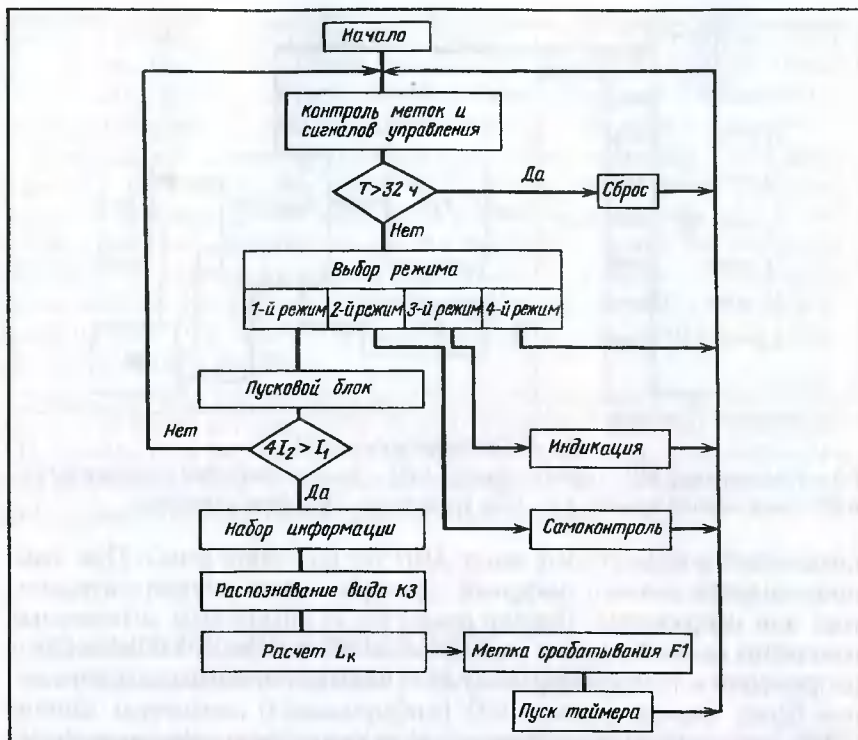


Рис. 20. Структура программного обеспечения ФПМ-01

ный блок реализует контроль состояния внутреннего таймера устройства, который запускается при срабатывании. Если после срабатывания прошло более 32 ч, то таймер останавливается и сбрасывается на нуль.

В зависимости от состояния таймера и результатов, полученных при выполнении блока контроля меток и сигналов управления, выбирается один из четырех возможных режимов работы.

Первый режим — режим контроля наличия условий пуска и, в случае их возникновения, выполнения основной функции ФПМ — расчета расстояния до места КЗ. Выбор первого режима возможен в следующих случаях:

после последнего срабатывания прошло более 32 ч;

после снятия показаний оперативным персоналом;

после предыдущего срабатывания в течение 10 с не происходило хотя бы кратковременной подачи разрешающего сигнала (РС) (третье условие обеспечивает возврат в состояние готовности приборов не отключавшихся ВЛ).

В первом режиме автоматический пуск прибора осуществляется при появлении хотя бы кратковременной несимметрии фазных токов (10 мс и более), удовлетворяющей условию:

$$4I_2 > I_1,$$

где I_1 , I_2 — токи ПП и ОП соответственно.

При трехфазном КЗ дополнительным условием срабатывания является:

$$I_1 > I_{\text{ном}},$$

где $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток ТТ.

После пуска прибор два периода фиксирует токи и напряжения, а затем выполняет расчеты. Контроль токов во время расчетов не осуществляется.

Второй и третий режимы — самоконтроля и индикации — выбираются при условии нажатия соответствующей кнопки управления. Функционирование блока индикации обеспечивает чтение результатов обработки информации. Блок самоконтроля обеспечивает проверку исправности всего программного обеспечения ФПМ. При его выполнении осуществляется чтение и последовательное суммирование кодов всего ППЗУ. После получения суммы производится ее сравнение с контрольным числом и в случае их совпадения делается вывод об исправности.

Четвертый режим — режим ожидания или блокировки. Выходом на осуществление этого режима служит совпадение следующих условий:

после срабатывания ФПМ прошло время менее 32 ч;

было зафиксировано появление РС;

не осуществлялось считывание результатов работы ФПМ.

Прибор ФПМ обеспечивает получение результатов при снижении или полном исчезновении напряжения оперативного питания на время не более 8 с с момента возникновения КЗ. В режиме хранения информации допускаются перерывы оперативного питания до 10 мин.

Распознавание вида КЗ и определение поврежденных фаз осуществляется по соотношению векторов симметричных составляющих токов контролируемой ВЛ. Последовательность решения задачи следующая.

1. Определяется, является ли КЗ трехфазным, или оно относится к классу несимметричных. КЗ считается трехфазным, если выполняются условия:

$$4I_2 < I_1 > I_{\text{ном}}, \quad (42)$$

где $I_{\text{ном}}$ — номинальный ток ТТ контролируемой ВЛ.

2. Если не выполняется условие (42), то устройство прекращает дальнейший анализ собранных данных и возвращается в исходное состояние (неселективный пуск).

3. Если не выполняется условие (42), то проверяется наличие двухфазного КЗ. КЗ будет сочтено двухфазным при выполнении условия:

$$6I_0 < I_2. \quad (43)$$

При этом осуществляется распознавание повредившихся фаз путем проверки выполнения фазовых соотношений между токами ОП и НП.

4. При невыполнении условий (42) и (43) фиксируется наличие замыкания на землю и осуществляется разделение однофазных замыканий на землю от двухфазных. Разделение этих двух видов замыканий осуществляется путем проверки фазовых соотношений между токами НП, ОП и ПП.

В зависимости от вида КЗ для определения расстояния до места повреждения используют различные выражения, в которые подставляются соответствующие значения токов и напряжений. Расстояние до места КЗ подсчитывается по выражению

$$L = Z / Z_{уд}. \quad (44)$$

Сопротивление до места трехфазного КЗ

$$Z = \frac{\operatorname{Re}(\underline{U}_{ab} / \underline{I}_c)}{\operatorname{Re}(\underline{I}_{ab} p / \underline{I}_c)}; \quad (45)$$

двухфазного КЗ (bc)

$$Z = \frac{\operatorname{Re}[(\underline{U}_b - \underline{U}_c) / \underline{I}_{2a}]}{\operatorname{Re}[(\underline{I}_b - \underline{I}_c) p / \underline{I}_{2a}]}, \quad (46)$$

однофазного КЗ

$$Z = \frac{\operatorname{Im}(\underline{U}_\phi / \underline{I}_0)}{\operatorname{Im}[(\underline{I}_\phi + k \underline{I}_0 + m \underline{I}_{0н}) p / \underline{I}_0]}, \quad (47)$$

где Re , Im — активная и реактивная составляющие электрических величин; $p = e^{j\varphi_n}$ — вектор поворота на угол, равный углу сопротивления ВЛ; $\underline{U}_\phi$, $\underline{I}_\phi$ — напряжение и ток поврежденной фазы; k — коэффициент компенсации по току НП своей ВЛ; $m = X_m / X_1$ — коэффициент компенсации по току НП параллельной ВЛ $\underline{I}_{0н}$; X_m — сопротивление взаимоиндукции параллельных ВЛ.

Как видно из приведенных формул, в качестве опорного тока для исключения влияния переходного сопротивления используется при однофазных КЗ ток НП, а при двухфазном КЗ ток ОП, повернутый на 90° (для чего взято соотношение активных, а не реактивных составляющих электрических величин). При КЗ двух фаз на землю расчет ведется по петле междуфазного КЗ, что исключает влияние общего переходного сопротивления (на землю), но не исключает влияние фазных переходных сопротивлений. При трехфазном КЗ берется просто реактивная составляющая сопротивления петли междуфазного КЗ, что исключает влияние переходного сопротивления только на ВЛ с односторонним питанием.

13. СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ПРИБОРОВ

Ранее были рассмотрены методы дистанционного ОМП и приборы, реализующие соответствующие алгоритмы. Наиболее технически совершенными являются микропроцессорные приборы типов МИР, ИФМ, ФПМ. Обслуживание приборов и снятие с них показаний можно существенно облегчить, если создать систему сбора показаний приборов в персональную ЭВМ. Собранную информацию можно использовать в системе АСУ ТП (например, для анализа функционирования РЗ) и для уточнения расстояния до места КЗ за счет учета взаимоиндукций с неповрежденными ВЛ. Для этого достаточно собрать показания приборов, установленных на ВЛ данного энергообъекта (распределустройства ЭС, ПС). Как указывалось, один прибор позволяет учесть взаимоиндукцию только одной ВЛ (обычно параллельной). При выходе с ПС, как правило, взаимоиндукцией связано большее количество ВЛ. Объединение информации от всех приборов, установ-

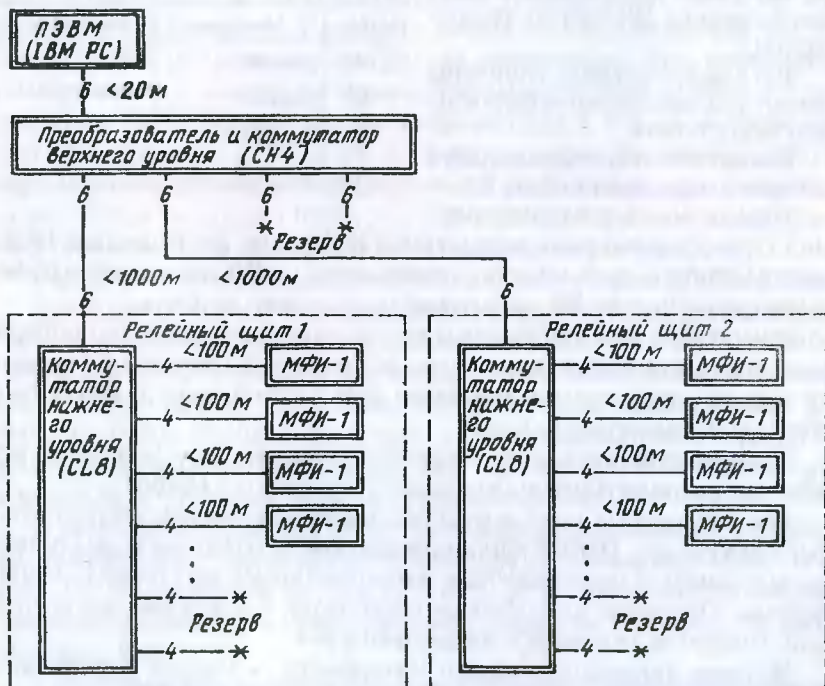


Рис. 21. Структурная схема системы сбора информации от приборов типа МФИ, МИР

Таблица 2. Распайка разъема, подключаемого к ПЭВМ через COM порт, разъем DB9F (PIN-9)

№	Название	Жилы кабеля
1	Вход <i>DCD</i>	} 1
2	Вход <i>RD</i>	
3	Выход <i>TD</i>	2
4	Выход <i>DTR</i>	3
5	Земля <i>SG</i>	4
6	Вход <i>DSR</i>	5
7	Выход <i>RTS</i>	6
8	Вход <i>CTS</i>	—
9	Вход <i>RI</i>	—

Примечание. На ПЭВМ вилка, на кабеле розетка.

Таблица 3. Распайка разъема, подключаемого к ПЭВМ через COM порт, разъем DB25F (PIN-25)

№	Название	Жилы кабеля
8	Вход <i>DCD</i>	} 1
3	Вход <i>RD</i>	
2	Выход <i>TD</i>	2
20	Выход <i>DTR</i>	3
7	Земля <i>SG</i>	4
6	Вход <i>DSR</i>	5
4	Выход <i>RTS</i>	6
5	Вход <i>CTS</i>	—
22	Вход <i>RI</i>	—
1	Земля <i>SG</i>	—

ленных на ВЛ, связанных взаимоиנדукцией, позволяет учесть их все (даже если взаимоиנדукцией связаны ВЛ разных напряжений).

Рассматриваемые приборы имеют еще несколько существенных недостатков:

недостаточно совершенный алгоритм определения вида КЗ;

упрощенный учет ответвлений (трансформаторов с заземленной нейтралью на отпаечных ПС) и невозможность учета наличия ответвлений на ВЛ, связанной взаимоиנדукцией с первой ВЛ, на которой установлены приборы;

трудности с восстановлением метрологии после ремонта приборов (масштабные коэффициенты по каналам токов и напряжений задаются в постоянной памяти приборов при изготовлении и могут быть сбиты при ремонтных работах).

Большинство указанных недостатков может быть устранено при наличии системы сбора информации от приборов в ПЭВМ.

Все микропроцессорные приборы имеют последовательный интерфейс для связи с ПЭВМ или контроллером. К сожалению, все приборы выполнены с нестандартным и отличающимся друг от друга интерфейсом. Описание интерфейсов отсутствует в заводской документации. Подробно этот вопрос рассмотрен в §14.

Наличие последовательного интерфейса позволяет осуществить сбор информации с приборов. Такие системы сбора информации были разработаны и реализованы для различных типов микропроцес-

Таблица 4. Разводка сигналов на разъеме МФИ-1 (МИР-1), разъем РП14-30а

№	Название	Жилы кабеля
B6	Вход <i>R+</i>	1
B7	Вход <i>R-</i>	2
A7	Выход <i>D+</i>	3
A6	Выход <i>D-</i>	4

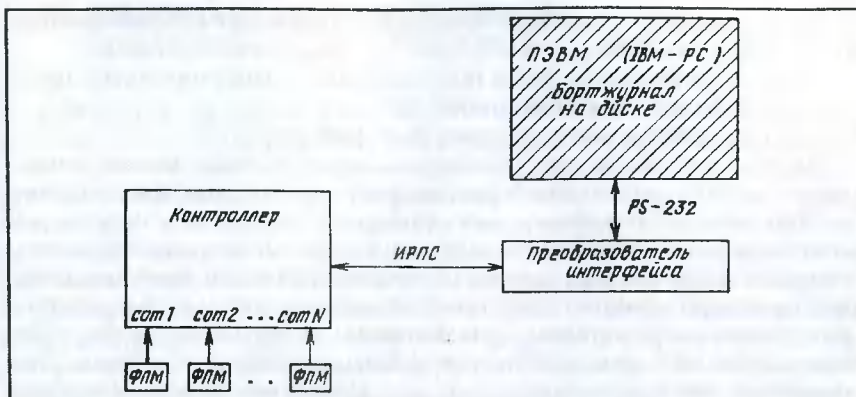


Рис. 22. Структура сбора информации для приборов типа ФПМ

сорных приборов. Упрощенная схема для приборов МФИ, МИФ приведена на рис. 21.

В этой структуре использованы электронные коммутаторы на восемь направлений. Коммутатор верхнего уровня может иметь от двух до восьми направлений. В примере коммутатор подсоединяет два релейных щита, расположенных в разных помещениях. Этот коммутатор подключается к одному из последовательных портов ПЭВМ шестизачильным (-6-) кабелем. Схемы подключения к 9 и 25-контактным разъемам приведены в табл. 2 и 3. Приборы подключаются к коммутатору нижнего уровня четырехжильным (-4-) кабелем, допускающим подключение до восьми приборов. Схема подключения применительно к приборам типа МФИ-1 (МИР-1) приведена в табл. 4.

Рассмотренная структура применима к приборам типа МИР и МФИ.

Приборы типа ФПМ не позволяют использовать подобную структуру из-за особенностей интерфейса. Если приборы МИР и МФИ “ждут” связи произвольное время (до нового срабатывания), то приборы ФПМ ожидают связи только 8—10 с после срабатывания. Для этих приборов необходимо иметь микропроцессорное устройство, имеющее возможность обратиться за 8—10 с ко всем имеющимся приборам. Структура такой системы приведена на рис. 22.

В качестве контроллера может быть использовано любое устройство, позволяющее иметь большое количество последовательных портов. Для контроллеров на базе ПЭВМ IBM PC выпускаются платы с восемью последовательными портами. Возможна установка нескольких таких плат.

Программное обеспечение системы выполняет следующие функции:

прием информации от приборов (через коммутатор или контроллер) и запись ее в архив;

корректировку показаний приборов с помощью коэффициентов, хранящихся в ПЭВМ;

расчет расстояния до места повреждения по одностороннему изменению с учетом до 10 взаимоиндукций;

архивацию и документирование информации;

ведение всех баз данных, необходимых для решения задачи (описание топологии, уставок приборов, корректирующих коэффициентов).

При расчетах показания всех приборов приводятся к одному моменту времени. Так как все приборы пускаются несинхронно, то комплексные значения всех токов и напряжений каждого прибора оказываются повернутыми на некоторый случайный угол по отношению к электрическим величинам, фиксированным другим прибором. Для совмещения векторов используются фиксированные приборами напряжения, так как на шинах с $U_{\text{ном}} \geq 110$ кВ всегда осуществляется параллельная работа систем шин.

В предыдущих параграфах рассмотрены достоинства метода ОМП двухстороннего измерения по токам и напряжениям ОП. На расчет по величинам ОП не влияют взаимные индукции, даже если они появляются и исчезают где-то в промежуточных точках ВЛ. Микропроцессорные приборы, установленные с двух концов ВЛ со сложными взаимоиндукциями, позволяют решить и эту задачу, поскольку в них рассчитываются величины ОП. Техническая трудность заключается в передаче информации с противоположного конца ВЛ. В системе предусмотрено два способа ввода информации. Первый — по каналу связи от системы сбора информации противоположного конца ВЛ. Второй — оперативным персоналом с клавиатуры ПЭВМ при получении информации (U_2 , I_2) по телефону. В этом случае расчет осуществляется двумя методами (одностороннего и двухстороннего измерений). Протокол работы системы приведен в приложении П1. Протокол соответствует передаче полной информации в систему, т. е. от приборов по обоим концам ВЛ.

Аналогичный подход может быть использован при наличии на объекте цифрового осциллографа (ЦО). Достоинством системы с ЦО является возможность использования предыстории для вычисления параметров предаварийного режима. Кроме того, знание мгновенных значений позволяет корректировать искажения кривой тока (погрешность ТТ). При сложных повреждениях (переходе одного вида КЗ в другой) можно рассчитывать место повреждения на участках осциллограммы, соответствующих данному виду КЗ. Кроме того, ЦО позволяют передавать информацию не по телефону (при отсутствии каналов связи), а на дискете, что значительно увеличивает достоверность данных. Существуют регистраторы аналоговых сигналов, аналогичные осциллографам, но с меньшим числом каналов и малым временем записи (80 мс — предшествующий и 50 мс — аварийный режимы). Эти регистраторы предназначены специально для решения задачи ОМП и обладают большинством достоинств ЦО. Существенным недостатком систем с ЦО является их высокая стоимость.

14. ИНТЕРФЕЙСЫ (СОПРЯЖЕНИЯ) ФИКСИРУЮЩИХ ПРИБОРОВ

Фиксирующие приборы (ФПМ, МФИ, МИР и др.) снабжены последовательным интерфейсом, через который после срабатывания прибор способен выдать сведения о расстоянии до места КЗ и о симметричных составляющих токов и напряжений во время аварийного нарушения. Для повышения достоверности данных сообщение прибора сопровождается контрольной суммой. В случае ошибки передачи информации прибор способен повторить свое сообщение. Во всех версиях прибора повтор можно запросить в течение 1 с после передачи. Существуют версии программного обеспечения приборов, способные воспринимать запрос повтора в любой момент времени. Некоторые версии программного обеспечения не ограничивают число повторов, другие при слишком большом числе повторов (например, более трех) блокируют работу с интерфейсом на длительное время (например, на 32 ч или до выключения и повторного включения прибора).

Первым серийно выпускаемым прибором был МФИ-1. Позже был освоен выпуск прибора ФПМ-1, схема которого скопирована с первого прибора. При этом, однако, были внесены изменения в программное обеспечение, в том числе изменен протокол интерфейса. Впоследствии были внесены существенные изменения в схемы и программное обеспечение прибора МФИ-1, в том числе введен еще один новый протокол интерфейса. Фактически новый прибор выпускался под тем же названием МФИ-1. Последним освоен выпуск прибора МИР, который очень близок к новой версии прибора МФИ-1 и даже не отличается от него по протоколу интерфейса. Ниже, чтобы различать два разных прибора с одинаковыми названиями, старую версию прибора МФИ-1 будем называть МФИ/РПИ, а новую версию прибора просто МФИ.

В приборах ФПМ и МФИ/РПИ сообщение прибора начинается запросом к приемнику, на который тот должен прореагировать за время, не превышающее 8 с. Получив запрос, приемник сообщает прибору о своей готовности принимать данные. В ответ прибор начинает передачу. Последний переданный байт является контрольной суммой всех переданных перед ним байтов. По окончании передачи прибор ждет около 1 с запрос на повтор. Если приемник такого запроса не выдал, то передача сообщения на этом заканчивается. При наличии запроса передача данных повторяется, начиная с установки запроса приемнику. Если приемник в течение 8 с не отреагирует на запрос прибора, последний прекратит работу с интерфейсом и уйдет в дежурный режим.

В приборе МФИ/РПИ можно вызвать повторную передачу прибора в любой момент, но не позже 32 ч после срабатывания. В приборе ФПМ принудительный повтор передачи по окончании сеанса связи, к сожалению, невозможен.

Фиксирующие приборы МФИ/РПИ и ФПМ отличаются количеством сообщений, передаваемых после срабатывания. Это различие заложено в программное обеспечение и обусловлено разными сроками создания его версий. Приборы МФИ, появившиеся несколько раньше других, передают одно сообщение, а ФПМ — два.

В приборах МФИ и МИР сообщение начинается запросом к приемнику. Запрос может стоять весьма долго (до 32 ч). Прибор находится в дежурном режиме, но готов в любой момент перейти на работу с интерфейсом. Получив запрос, приемник посылает прибору подтверждение своей готовности к приему. В ответ прибор передает одно сообщение. Последний переданный байт является контрольной суммой всех переданных перед ним байтов. По окончании передачи прибор ждет около 1 с запрос на повтор. Если приемник такого запроса не выдал, то передача сообщения на этом заканчивается. При наличии запроса передача данных повторяется, начиная с установки запроса приемнику. Запросы повтора передачи можно посылать не более 3 раз подряд, в ответ на четвертый запрос повтора прибор заблокирует свой интерфейс. Для возобновления работы с интерфейсом нужно ждать 32 ч или снять питание с прибора и потом включить его вновь. Если запроса повторной передачи во время сеанса связи не было, то потом вызвать повторную передачу данных из прибора МФИ (МИР), в отличие от МФИ/РПИ, уже нельзя.

Сообщение МФИ/РПИ содержит указание поврежденных фаз, время от момента аварийного нарушения до момента опроса, расстояние до места повреждения и симметричные составляющие токов и напряжений. Числа представлены в текстовом формате и выглядят в сообщении почти так же, как и на индикаторе, только в них опущены десятичные точки, разделяющие целые и дробные части. Поврежденные фазы помечены единицами, а неповрежденные нулями. Время представлено числом без знака, а расстояние, токи и напряжения — числами из четырех цифр со знаком. В сообщении используются как знак “—”, так и знак “+”, хотя последний на индикаторе прибора заменяется на пробел. Использование текстового формата числа всего с четырьмя цифрами и фиксированным положением запятой в некоторых случаях приводит к тому, что на индикаторе и в сообщении токи и напряжения представляются менее точно, чем внутри прибора.

Первое сообщение ФПМ весьма похоже на сообщение МФИ, однако в нем отсутствует указание времени от начала аварийного нарушения до момента опроса. Второе сообщение ФПМ содержит 15 чисел во внутреннем представлении прибора. Первое число — расстояние до места аварии, остальные — симметричные составляющие токов и напряжений в том порядке, как они шли в первом сообщении. Каждое число закодировано в трех байтах, в формате, используемом контроллером К1-20 (один из первых контроллеров на базе процессора К-580).

Второе сообщение не содержит никаких новых параметров по сравнению с первым, но отличается более высокой точностью представления чисел.

Сообщение приборов МФИ и МИР содержит заводской номер прибора, указание поврежденных фаз, расстояние до места аварийного нарушения, симметричные составляющие токов и напряжений и время, прошедшее от пуска прибора до момента его опроса. Заводской номер состоит из трех цифр, время кодируется четырьмя цифрами, токи и напряжения представлены трехбайтовыми двоичными числами с плавающей запятой в формате контроллера K1-20.

Форматы сообщений приборов приведены в приложении П2.

Сообщение прибора при передаче через интерфейс разбивается на байты. Каждый байт начинается стартовым битом (0) и заканчивается стоповым битом (1). Между стартовым и стоповым битами передается восемь информационных битов: первым — младший, последним — старший. Бит контроля четности не передается.

Уровни электрических сигналов интерфейса приборов МФИ/РПИ и ФПМ согласуются с уровнями логических ТТЛ микросхем. Используются три сигнальных провода (*BIT*, *RDY*, *RPT*) общий провод (*T-*) и провод (*T+*) для подачи питания +5 В на интерфейсную часть прибора, отделенную от всего остального прибора оптронной развязкой. Питание +5 В должен подавать приемник. Провод *BIT* служит для передачи от прибора к приемнику запроса на связь (логическая 1) и битов данных. Приемник, зафиксировав логическую 1 на проводе *BIT*, подтверждает свою готовность к связи, выставив логическую 1 на проводе *RDY*, и ждет данные. Прибор, обнаружив логическую 1 на *RDY*, начинает последовательную передачу по проводу *BIT*. После передачи на линии *BIT* устанавливается уровень логического 0 и прибор около 1 с анализирует состояние линии *RPT*. Если будет обнаружена логическая 1, то прибор повторит передачу последнего сообщения. Если единица не будет замечена, то прибор начнет передачу следующего сообщения, либо, если передано все, вернется в дежурный режим.

Уровни сигнала на линии *BIT* приборов МФИ/РПИ и ФПМ представлены в отрицательной логике, т. е. логической 1 соответствует низкий уровень напряжения, а логическому 0 высокий. На линии *BIT* стартовый бит передаваемой посылки имеет уровень 0, а стоповый 1, в этом смысле кодирование битов прямое. Уровни сигналов *RDY* и *RPT* представлены в положительной логике, т. е. единице соответствует высокий уровень напряжения, а нулю низкий. Временные диаграммы передачи сообщения из прибора в приемник (например в ЭВМ) показаны на рис. 23.

Уровни электрических сигналов интерфейса приборов МФИ и МИР соответствуют принятым по схеме "Токовая петля". Используются четыре провода *R+*, *R-*, *D+*, *D-*. По проводам *D+*, *D-* из прибора выдается запрос на связь и вся передаваемая информация. По проводам *R+*, *R-* в прибор поступает разрешение на передачу и команда принудительного пуска прибора. Питание токовых петель подается от приемника. Интерфейс гальванически развязан от прибора при помощи оптронов.

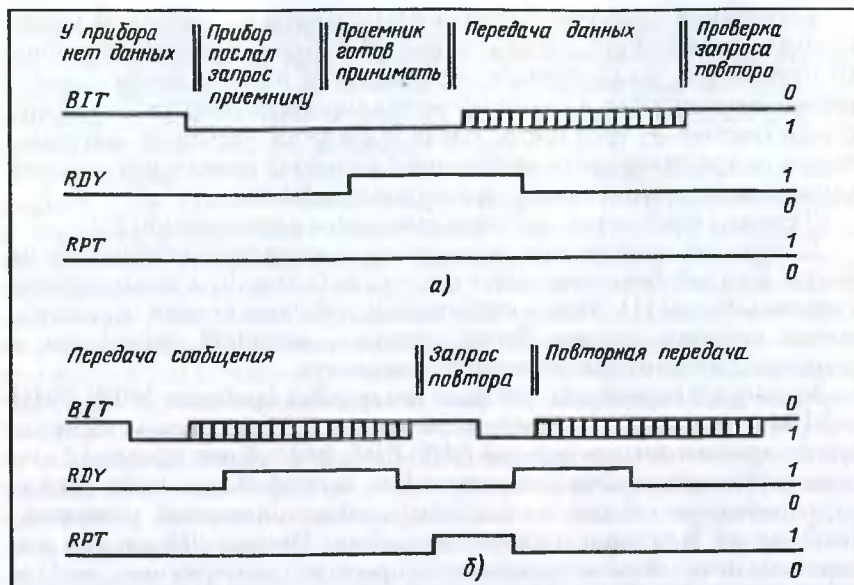


Рис. 23. Временные диаграммы интерфейса приборов МФИ/РПИ и МФМ:
а — передача данных без запроса повтора; б — запрос повторной передачи данных

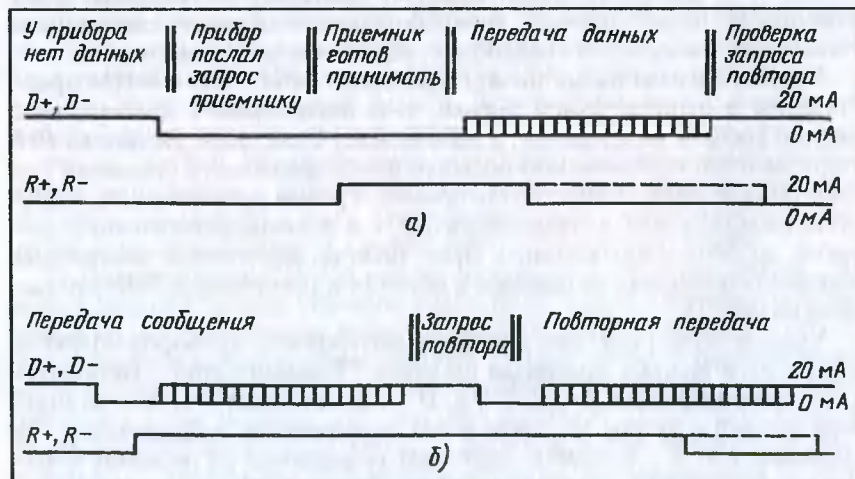


Рис. 24. Временные диаграммы интерфейса приборов МФИ и МИР:
а — передача данных без запроса повтора; б — запрос повторной передачи данных

В дежурном режиме в проводах $D+$, $D-$ протекает ток около 20 мА. Исчезновение этого тока воспринимается как запрос к приемнику. В ответ на запрос прибора приемник включает ток около 20 мА в проводах $R+$, $R-$ и начинает прием данных, передаваемых прибором. Если ток в R -проводах будет снят до окончания передачи или простоит не более 1 с после окончания, то прибор считает, что запроса на повторную передачу нет. Если ток в R -проводах простоит более 1 с по окончании передачи, то прибор считает, что запрошена повторная передача. Запрашивать повтор можно не более 3 раз подряд. В проводах $D+$, $D-$ стартовому биту байта соответствует наличие тока, а стоповому биту его отсутствие. Единичный бит в байте изображается наличием тока, а нулевой бит отсутствием, таким образом, по отношению к стартовым и стоповым битам информационные биты передаются в инверсном виде, принятые байты подлежат инверсии. Временные диаграммы сеанса связи показаны на рис. 24.

В ИГЭУ разработан расширитель интерфейса приборов МФИ/РПИ и ФПМ, который добавляет к стандартному набору еще два сигнала RUN и ADC . Сигнал RUN поступает к прибору от ПЭВМ и вызывает его принудительный пуск (имитация одновременного нажатия кнопок КОНТРОЛЬ и ИНДИКАЦИЯ). Время реакции прибора на этот сигнал не превышает долей секунды, однако, для надежного запуска прибора желательно иметь длительность сигнала порядка 1 с.

Сигнал используется для принудительного пуска прибора при его использовании в составе АСУ ТП. Сигнал ADC имеет уровень 1 в то время, когда прибор запустился и его АЦП набирает данные для расчетов. Длительность активного состояния этого сигнала порядка 50 мс. Сигнал используется в системах АСУ ТП для определения момента пуска прибора. Сигнал RUN , как и все входные сигналы прибора, описывается в положительной логике, а сигнал ADC , как и штатный выходной сигнал VIT , описывается в отрицательной логике. Временные диаграммы сигналов расширителя интерфейса показаны на рис. 25.

Приборы МФИ и МИР позволяют производить принудительный пуск через интерфейс без использования дополнительных аппаратных средств. Сигналом пуска для прибора является ток в R -проводах при

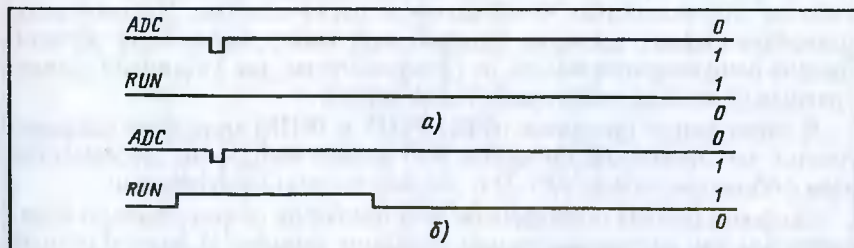


Рис. 25. Временные диаграммы работы расширителя интерфейса ФПМ и МФИ/РПИ:

a — срабатывание приборов при КЗ; b — принудительный дистанционный пуск прибора

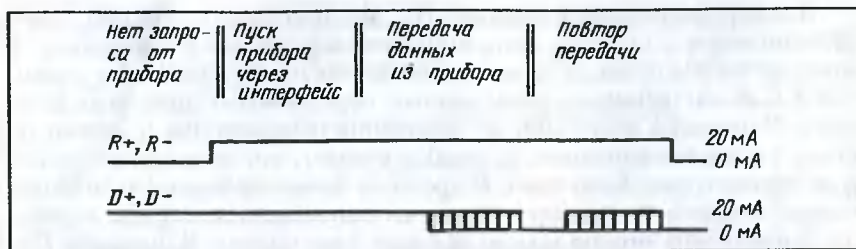


Рис. 26. Временные диаграммы дистанционного пуска приборов МФИ и МИР через интерфейс

наличии тока в D -проводах. Появление разрешающего пуск тока заставляет прибор перейти на измерение и обсчет токов и напряжений. Если на основании вычислений прибор решит, что на ВЛ было КЗ, то он выставит запрос на D -проводах, и данные с него можно считать обычным образом. Если прибор сочтет, что КЗ нет, то запроса на передачу в интерфейс не выставит, но в ответ на следующий сигнал принудительный пуск через интерфейс начнет передачу данных. Из-за ошибки в программном обеспечении прибора его сообщение нельзя принять без ошибок и почти всегда происходит хотя бы один запрос повторной передачи. К сожалению, не зная предыстории, нельзя сказать, как отреагирует прибор на появление тока в R -проводах при наличии тока в D -проводах. Может быть, начнется измерение и обсчет токов, а может быть — передача. Если удерживать ток в R -проводах достаточно долго (3—15 с), то передача начнется в любом случае. Если передача началась сразу в ответ на ток в R -проводах, то значит это данные, набранные неизвестно когда, если же передача началась с задержкой в несколько секунд, значит, прибор по сигналу “Пуск” провел измерения и вычисления. Временные диаграммы пуска прибора через интерфейс показаны на рис. 26. Принудительный пуск приборов МФИ и МИР происходит несколько быстрее, чем в приборах МФИ/РПИ и ФПМ, поскольку последние перед собственно пуском тратят время на проверку правильности контрольной суммы своего ПЗУ.

Внутри приборов МФИ и МИР программным путем формируется импульс длительностью 50—80 мс после пуска прибора. Импульс продолжается столько времени, сколько идет набор данных для обсчета. Выдача импульса из прибора не предусмотрена, но, установив дополнительный оптрон, можно выдать его наружу.

В интерфейсе приборов МФИ/РПИ и ФПМ неудачно выбраны уровни электрических сигналов, что делает интерфейс несовместимым с общепринятыми (RS-232, токовая петля) интерфейсами.

Скорость работы интерфейсов всех приборов не совпадает со стандартными для последовательной передачи данных. И даже у разных приборов одного типа она может быть разной. Подключение прибора к ПЭВМ возможно только через устройство согласования сигналов (УСС) и требует специализированного программного обеспечения.

15. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЛОКАЦИОННЫЕ ИСКАТЕЛИ

В соответствии с классификацией, приведенной на рис. 1, автоматические локационные искатели реализуют метод, который относится к дистанционным импульсным, т. е. определяют время пробега по ВЛ специально генерируемого зондирующего импульса. Время между посылкой в ВЛ зондирующего импульса и приходом отраженного от места повреждения отраженного импульса t определяет искомое расстояние:

$$l = tv/2.$$

Численные значения скорости пробега импульса v приведены в §1. Локационные искатели могут быть неавтоматическими и автоматическими. Неавтоматические искатели требуют сборки схемы измерений на отключенной ВЛ. Автоматические искатели запускаются при КЗ и посылают в ВЛ зондирующие импульсы еще во время горения дуги в месте повреждения.

Автоматический искатель должен быть постоянно подключен ко всем фазам ВЛ. Это осуществляется через существующие на ВЛ устройства высокочастотной (ВЧ) обработки — фильтры присоединения и конденсаторы связи. У ВЛ достаточно высокого класса напряжения (330 кВ и выше) обычно имеются ВЧ каналы по всем фазам. Они обеспечивают диспетчерскую связь, работу ВЧ РЗ, передачу команд проти-

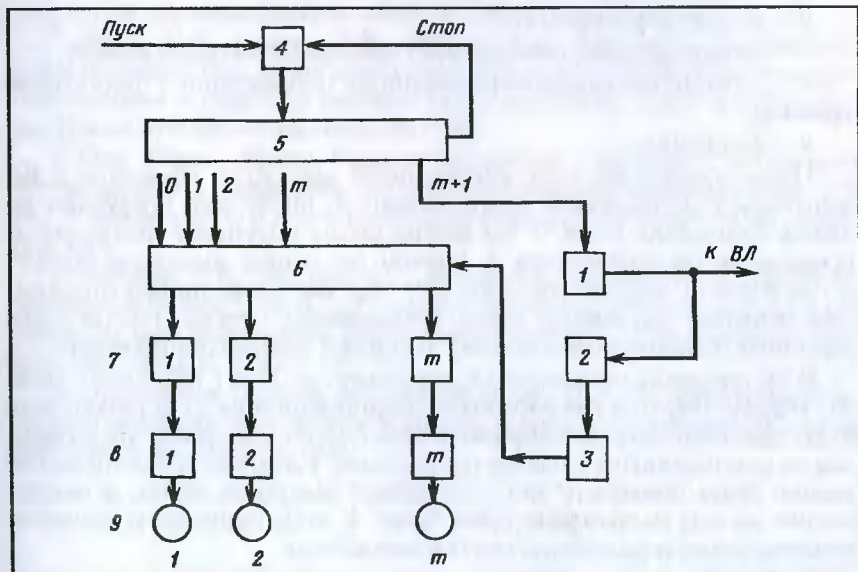


Рис. 27. Упрощенная структурная схема прибора ЛИДА

воаварийной автоматики (ПА), сигналов телемеханики и т. д. Эти каналы и может использовать автоматический искатель.

В нашей стране некоторое время выпускался искатель ЛИДА — Локационный Искатель Дискретный Автоматический. Согласно [1] он имеет следующие технические характеристики: максимальная дальность — 300 км; собственное время измерений — 30 мс; мощность зондирующего импульса — 25 кВт; частота зондирования — 3000 Гц; число ВЛ, обслуживаемых одним устройством, — 5.

Одна из самых сложных проблем в автоматических искателях — отстройка от ВЧ помех, создаваемых горячей на ВЛ во время КЗ дугой. Решается она тем, что искатель за время работы (0,04—0,08 с) посылает в ВЛ довольно много импульсов. С ВЛ приходят отраженные от места повреждения импульсы и импульсы помех. Однако все отраженные приходят через одно и то же время t после посылки зондирующих, а помехи случайно распределены по времени. Это позволяет отфильтровать помехи.

Упрощенная схема искателя ЛИДА приведена на рис. 27. Назначение блоков:

- 1 — формирование посылаемых в ВЛ зондирующих импульсов;
- 2 — усиление отраженных импульсов по закону, обратному закону их затухания в ВЛ;
- 3 — ограничение;
- 4 — формирование тактовых импульсов;
- 5 — временной распределитель импульсов;
- 6 — логические ячейки И;
- 7 — интегрирование (накопление) принимаемых напряжений;
- 8 — сравнение проинтегрированных напряжений с пороговым уровнем;
- 9 — индикация.

После пуска в ВЛ идут зондирующие импульсы. Принятые с ВЛ импульсы усиливаются и ограничиваются, после чего поступают на входы логических ячеек 6. На другие входы поступают импульсы от временного распределителя 5, причем последние импульсы “бегут” вдоль ячеек m каналов (принято $m = 50$). Чем позже придет отраженный импульс, тем больше номер открывшейся ячейки, тем на более удаленную накопительную ячейку 7 попадет импульс напряжения.

Если повреждение находится, например, на 12-м (из общего числа 50) участке ВЛ, то в каждом цикле зондирования на 12-й накопитель будут приходить отраженные импульсы, и за определенное число циклов на нем накопится большое напряжение. На другие накопительные ячейки будут приходить лишь случайные импульсы помех, и накопленное на них напряжение будет ниже. В этом принцип устранения влияния помех и выявления места повреждения.

В искателе заранее заложена дискретность — 50 каналов определяяют точность определения места КЗ в 2 %.

Список литературы

1. *Шалыт Г.М.* Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоиздат, 1982.
2. *Шалыт Г.М., Айзенфельд А.И., Малый А.С.* Определение мест повреждений линий электропередачи по параметрам аварийного режима/ Под ред. Г.М. Шалыта — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. *Айзенфельд А.И., Шалыт Г.М.* Определение мест короткого замыкания на линиях с ответвлением. М.: Энергия, 1977.
4. *Арицишевский Я.Л.* ОМП линий электропередачи в сетях с заземленной нейтралью. М.: Высш. школа, 1988.
5. *Айзенфельд А.И., Аронсон В.Н., Гловацкий В.Г.* Фиксирующие индикаторы тока и напряжения ЛИФП-А, ЛИФП-В, ФПН, ФПТ. М.: Энергоатомиздат, 1989.
6. *Аржанников Е.А.* Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике линий при замыканиях на землю. М.: Энергоатомиздат, 1985.
7. *Лямец Ю.Я., Антонов В.И., Ефремов В.А., Нудельман Г.С., Подшивалин Н.В.* Диагностика линий электропередачи // Электротехнические микропроцессорные устройства и системы: Межвузовский сб. научн. тр. / Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 1992.
8. *Суяр, Саркиз, Мутон.* Развитие принципов измерения и выполнения систем защиты и определение места повреждения для трехфазных ВЛ. — В кн.: Релейная защита и противоаварийная автоматика (СИГРЭ-74). М.: Энергия, 1976.
9. *Белотелов А.К., Саухатас А.С., Иванов И.А., Любарский Д.Р.* Алгоритмы функционирования и опыт эксплуатации микропроцессорных устройств определения мест повреждения линий электропередачи // Электрические станции, 1997, № 12. С. 7—12.
10. *Руководящие указания по релейной защите.* Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110—750 кВ. М.: Энергия, 1979.

ПРИЛОЖЕНИЕ III. Пример протокола ОМП

Повреждение на ЛЭП Восточная 1

Аварийное отключение от 10/06/97 19:07:32

Метод двухстороннего измерения

Расстояние до места повреждения 75 км

Метод одностороннего измерения

Со стороны ПС 1

Ответвление не влияет

Расстояние до места повреждения 75,71 км

КЗ на землю фазы А

Со стороны ПС 2

Ответвление не влияет

Расстояние до места повреждения 75,1 км

КЗ на землю фазы А

Показания приборов ПС 1

Расстояние до места повреждения 75,71 км

Токи активные:

ПП (IA1a) 0,3700

ОП (IA2a) 0,3700

НП (IA0a) 0,3700

Токи реактивные:

ПП (IA1p) 0,0000

ОП (IA2p) 0,0000

НП (IA0p) 0,0000

Напряжения активные:

ПП (UA 1a) 27,4300

ОП (UA 2a) -10,1000

НП (UA 0a) -9,3000

Напряжения реактивные:

ПП (UA 1p) 88,0000

ОП (UA 2p) -7,4200

НП (UA 0p) 8,0000

Токи параллельной ВЛ:

активный 0,0000

реактивный 0,0000

Показания приборов ПС 2

Расстояние до места повреждения 75,1 км

Токи активные:

ПП (IA1a) 0,1

ОП (IA2a) 0,1

НП (IA0a) 0,1

Токи реактивные:

ПП (IA1p) 0,23

ОП (IA2p) 0,23

НП (IA0p) 0,23

Напряжения активные:

ПП (UA1a) —68,5

ОП (UA2a) 6,4

НП (UA0a) 3,5

Напряжения реактивные:

ПП (UA1p) 12,3

ОП (UA2p) —2,1

НП (UA0p) —3,3

Токи параллельной ВЛ:

активный 0,0000

реактивный 0,0000

Параметры поврежденной ВЛ Восточная 1

Удельные сопротивления, Ом/км

реактивное ПП 0,5000

активное ПП 0,1

реактивное НП 2,0000

активное НП 0,25

Длина ВЛ 150,0 км

Номинальное напряжение ЛЭП 220 кВ

Длина до ЛЭП ответвления 0,0000 км

Активное сопротивление отпайки

(включая трансформатор отпайки) 0,0000 Ом

Реактивное сопротивление отпайки

(включая трансформатор отпайки) 0,0000 Ом

Номинальный первичный ток ТТ 300,000 А

ПРИЛОЖЕНИЕ П2. Форматы сообщений приборов

Сообщение МФИ/РПИ. Прибор МФИ/РПИ выдает на интерфейс только одно сообщение, имеющее вид строки символов. Пример такого сообщения показан ниже:

1110014+1426-0000+0000-0000+0000-0000+0000-0001-0000-0000-0001
-0462-0075+0000-0000

Расшифровка сообщения:

а) поврежденные фазы 111 — повреждены все три фазы (ABC);

б) время от срабатывания прибора до его опроса 0014 — 00 ч 14 мин;

в) расстояние до места КЗ +1426 — 142,6 км;

г) симметричные составляющие токов:

Re (I1) = —00,00 кА Im (I1) = +00,00 кА — прямая последовательность;

Re (I2) = —00,00 кА Im (I2) = +00,00 кА — обратная последовательность;

Re (I0) = —00,00 кА Im (I0) = +00,00 кА — нулевая последовательность;

д) симметричные составляющие напряжений:

$\text{Re}(U_1) = -000,1 \text{ кВ}$ $\text{Im}(U_1) = -000,0 \text{ кВ}$ — прямая последовательность;

$\text{Re}(U_2) = -000,0 \text{ кВ}$ $\text{Im}(U_2) = -000,1 \text{ кВ}$ — обратная последовательность;

$\text{Re}(U_0) = -046,2 \text{ кВ}$ $\text{Im}(U_0) = -007,5 \text{ кВ}$ — нулевая последовательность;

е) ток параллельной ВЛ:

$\text{Re}(I_m) = +00,00 \text{ кА}$; $\text{Im}(I_m) = -00,00 \text{ кА}$;

ж) контрольная сумма сообщения — числовое значение должно равняться сумме всех предшествующих ему байт по модулю 256.

Первое сообщение ФПМ. Прибор ФПМ выдает подряд два сообщения. Первое имеет вид строки символов, второе — двоичные трехбайтовые числа с плавающей запятой. Первое сообщение похоже на сообщение МФИ, только в нем не указано время. Пример сообщения приведен ниже:

111+0005-0010-0041+0040+0011-0030+0029-0081-0267-0192+0203
-0394-0151-0000+0000

Расшифровка сообщения:

а) поврежденные фазы 111 — повреждены все три фазы (ABC);

б) расстояние до места КЗ +0005 — расстояние 0,5 км;

в) симметричные составляющие токов:

$\text{Re}(I_1) = -00,10 \text{ кА}$ $\text{Im}(I_1) = -00,41 \text{ кА}$ — прямая последовательность;

$\text{Re}(I_2) = +00,40 \text{ кА}$ $\text{Im}(I_2) = +00,11 \text{ кА}$ — обратная последовательность;

$\text{Re}(I_0) = -00,30 \text{ кА}$ $\text{Im}(I_0) = +00,29 \text{ кА}$ — нулевая последовательность;

г) симметричные составляющие напряжений:

$\text{Re}(U_1) = -008,1 \text{ кВ}$ $\text{Im}(U_1) = -026,7 \text{ кВ}$ — прямая последовательность;

$\text{Re}(U_2) = -019,2 \text{ кВ}$ $\text{Im}(U_2) = +020,3 \text{ кВ}$ — обратная последовательность;

$\text{Re}(U_0) = -039,4 \text{ кВ}$ $\text{Im}(U_0) = -015,1 \text{ кВ}$ — нулевая последовательность;

д) ток параллельной линии:

$\text{Re}(I_m) = -00,00 \text{ кА}$; $\text{Im}(I_m) = +00,00 \text{ кА}$;

е) контрольная сумма сообщения — числовое значение должно равняться сумме всех предшествующих ему байт по модулю 256.

Второе сообщение ФПМ. Второе сообщение ФПМ содержит 15 двоичных чисел с плавающей запятой. Они отображают те же параметры, что и числа в первом сообщении, за исключением указания поврежденных фаз. От первого сообщения второе отличается более компактным и точным представлением чисел. Сообщение не имеет текстового представления, поэтому в нижеследующем примере оно приведено в виде последовательности шестнадцатеричных чисел:

03 2F E4 04 AA 3C 06 A9 26 06 28 EA 04 2D 2E 05 BC 7A 05 3A E4 07
A8 B4 09 A1 7D 08 B0 11 08 32 F8 09 B1 42 08 A5 EC 84 AE 06 84 2B EE C2 .

Каждое число представлено тремя байтами в формате с плавающей запятой. Первый байт содержит в старшем бите знак порядка (характеристики) числа. Знак “—” кодируется битом 1, а знак “+” битом 0. Остальные биты первого байта кодируют двоичный порядок числа. Второй байт числа содержит знак числа, признак переполнения и шесть старших битов мантиссы. Старший бит второго байта кодирует знак числа (“—” = 1, “+” = 0) второй по старшинству бит является признаком переполнения данного числа. Ноль означает отсутствие переполнения, а единица указывает на его наличие. Младшие шесть битов второго байта являются старшими битами мантиссы. Третий байт числа содержит восемь младших битов мантиссы.

Следует учесть, что в сообщении даны не сами значения, а величины, умноженные на десятичные константы. Токи умножены на 100, напряжения и расстояние на 10. При переводе двоичного числа с плавающей запятой в десятичное получается большое количество цифр, но верными являются далеко не все.

Расшифровка сообщения (с учетом масштабирования):

а) расстояние до места — 0,5986 км;

б) симметричные составляющие токов:

$\text{Re}(I_1) = -0,1056 \text{ кА}; \quad \text{Im}(I_1) = -0,4115 \text{ кА};$

$\text{Re}(I_2) = 0,4091 \text{ кА}; \quad \text{Im}(I_2) = 0,11295 \text{ кА};$

$\text{Re}(I_0) = -0,3024 \text{ кА}; \quad \text{Im}(I_0) = 0,2945 \text{ кА};$

в) симметричные составляющие напряжений:

$\text{Re}(U_1) = -8,141 \text{ кВ}; \quad \text{Im}(U_1) = -26,79 \text{ кВ};$

$\text{Re}(U_2) = -19,23 \text{ кВ}; \quad \text{Im}(U_2) = 20,39 \text{ кВ};$

$\text{Re}(U_0) = -39,41 \text{ кВ}; \quad \text{Im}(U_0) = -15,17 \text{ кВ};$

г) ток параллельной линии:

$\text{Re}(I_m) = -0,0449 \text{ кА}; \quad \text{Im}(I_m) = 0,0043 \text{ кА};$

д) контрольная сумма сообщения 0C2h (указана условно) должна равняться сумме всех предыдущих байтов по модулю 256.

Сообщение приборов МФИ и МИР. Приборы МФИ и МИР передают только одно сообщение. Оно состоит из 55 информационных байт и одного байта контрольной суммы. Оно содержит заводской номер прибора (три байта), указание поврежденных фаз (три байта), 15 трехбайтовых чисел с плавающей запятой (45 байт) и время от срабатывания прибора до его опроса. Сообщение не имеет текстового представления, поэтому в нижеследующем примере оно приведено в виде последовательности шестнадцатеричных чисел:

02 08 02 01 0F 0F 03 21 26 06 A9 DE 07 34 F4 06

A9 DA 07 34 C8 06 A9 64 07 34 D4 06 A1 1D 07 25

BC 06 A1 1D 07 25 BC 06 A1 1D 07 25 BC 81 2E 3C

00 A6 08 00 01 00 02

Каждое число представлено тремя байтами в формате с плавающей запятой. Первый байт содержит в старшем бите знак порядка (характеристики) числа. Знак “—” кодируется битом 0, а знак “+” битом 1. Остальные биты первого байта кодируют двоичный порядок числа. Второй байт числа содержит знак числа, признак переполнения и шесть старших битов мантиссы. Старший бит второго байта кодирует знак числа (“—” = 1, “+” = 0), второй по старшинству бит является признаком переполнения данного числа. Ноль означает отсутствие переполнения, а единица указывает на его наличие. Младшие шесть битов второго байта являются старшими битами мантиссы. Третий байт числа содержит восемь младших битов мантиссы.

Следует учесть, что в сообщении даны не сами значения, а величины, умноженные на десятичные константы. Токи умножены на 100, напряжения и расстояние на 10. При переводе двоичного числа с плавающей запятой в десятичное получается большое количество цифр, но верными являются далеко не все.

Расшифровка сообщения:

02 08 02 — заводской номер прибора N282;

01 0F 0F — (A или 100) повреждена только фаза A;

03 21 26 — расстояние от прибора до места повреждения 0,414 км;

06 A9 DE — I_{1a} активная составляющая тока ПП — 0,419 кА;
 07 34 F4 — I_{1p} реактивная составляющая тока ПП 1,059 кА;
 06 A9 DA — I_{2a} активная составляющая тока ОП — 0,419 кА;
 07 34 C8 — I_{2p} реактивная составляющая тока ОП 1,056 кА;
 06 A9 64 — I_{0a} активная составляющая тока НП — 0,414 кА;
 07 34 D4 — I_{0p} реактивная составляющая тока НП 1,057 кА;
 06 A1 1D — U_{1a} активная составляющая напряжения ПП 3,311 кВ;
 07 25 BC — U_{1p} реактивная составляющая напряжения ПП — 7,547 кВ;
 06 A1 1D — U_{2a} активная составляющая напряжения ОП — 3,311 кВ;
 07 25 BC — U_{2p} реактивная составляющая напряжения ОП 7,547 кВ;
 06 A1 1D — U_{0a} активная составляющая напряжения НП — 3,311 кВ;
 07 25 BC — U_{0p} реактивная составляющая напряжения НП 7,547 кВ;
 81 2E 3C — $I_{0п.а}$ активная составляющая тока НП параллельной
 линии 0,004 кА;
 00 A6 08 — $I_{0п.р}$ реактивная составляющая тока НП параллельной
 линии — 0,006 кА;
 00 01 00 02 — время от срабатывания до опроса прибора 01 ч:02 м;
 — контрольная сумма.

ПРИЛОЖЕНИЕ ПЗ. Разъемы приборов ФП

Разъем прибора МФИ/РПИ. Прибор МФИ имеет клеммник для подключения токовых цепей и тридцатиконтактный разъем РП14-30 для цепей напряжения и для последовательного интерфейса. Ниже приведено его описание:

A1 — блокировка
 A2 — общий
 A3 — сигнальный контакт
 A4 — сигнальный контакт
 A5 — не используется
 A6 — не используется
 A7 — не используется
 A8 — не используется
 A9 — нейтраль цепей напряжения
 A0 — напряжение фазы A
 B1 — питание “+” для интерфейса ($T+$)
 B2 — питание “-” для интерфейса ($T-$)
 B3 — разрешение передачи (RDY)
 B4 — запрос повтора передачи (RPT)
 B5 — выход передатчика (BIT)
 B6 — не используется
 B7 — не используется
 B8 — не используется
 B9 — не используется
 B0 — напряжение фазы B
 C1 — питание переменное 220 В

- C2 — не используется
- C3 — питание переменное 220 В
- C4 — не используется
- C5 — не используется
- C6 — не используется
- C7 — не используется
- C8 — не используется
- C9 — не используется
- C0 — напряжение фазы C

На приборе размещена розетка, на кабеле вилка.

Разъем прибора МФИ. Прибор МФИ имеет клеммник для подключения токовых цепей и 30-контактный разъем РП14-30 для цепей напряжения и для последовательного интерфейса. Ниже приведено его описание:

- A1 — U_a напряжение фазы A
- A2 — пусто
- A3 — пусто
- A4 — РС разрешение срабатывания
- A5 — Сл отмена ожидания блокировки
- A6 — D- выход интерфейса
- A7 — D+ выход интерфейса
- A8 — I8 выбор первичного тока ТТ
- A9 — I1 выбор первичного тока ТТ
- A0 — 0V общий провод
- B1 — U_b напряжение фазы B
- B2 — пусто
- B3 — C1 контакт сигнала срабатывания прибора
- B5 — пусто
- B6 — R+ вход интерфейса
- B7 — R- вход интерфейса
- B8 — I4 выбор первичного тока ТТ
- B9 — I2 выбор первичного тока ТТ
- B0 — 0V общий провод
- C1 — U_c напряжение фазы C
- C2 — * нейтраль трансформаторов напряжения
- C3 — пусто
- C4 — 220 В
- C5 — 220 В } переменное или постоянное питание
- C6 — MODE режим
- C7 — 80 мс
- C8 — U1 выбор первичного напряжения ТН
- C9 — U2 выбор первичного напряжения ТН
- C0 — 0V общий провод

На приборе размещена вилка, на кабеле розетка.

Разъем прибора МИР. Прибор МИР имеет клеммник для подключения токовых цепей и тридцатиконтактный разъем РП14-30а (повернутые контактные штыри) для цепей напряжения и для последовательного интерфейса. Ниже приведено его описание:

- A1 — U_a напряжение фазы A
- A2 — пусто
- A3 — пусто
- A4 — РС разрешение срабатывания
- A5 — Сл отмена ожидания блокировки

- A6* — *D* — выход интерфейса
- A7* — *D+* выход интерфейса
- A8* — *I8* выбор первичного тока ТТ
- A9* — *I1* выбор первичного тока ТТ
- A0* — 0V общий провод
- B1* — *U_b* напряжение фазы В
- B2* — пусто
- B3* — *C1* контакт сигнала срабатывания прибора
- B4* — *C2* контакт сигнала срабатывания прибора
- B5* — питание +5 V
- B6* — *R+* вход интерфейса
- B7* — *R* — вход интерфейса
- B8* — *I4* выбор первичного тока ТТ
- B9* — *I2* выбор первичного тока ТТ
- B0* — 0V общий провод
- C1* — *U_c* напряжение фазы С
- C2* — * нейтраль трансформаторов напряжения
- C3* — пусто
- C4* — 220 В
- C5* — 220 В } переменное или постоянное питание
- C7* — 80 мс
- C8* — *U1* выбор первичного напряжения ТН
- C9* — *U2* выбор первичного напряжения ТН
- C0* — 0V общий провод

На приборе размещена вилка, на кабеле розетка.

Разъем прибора ФПМ. Прибор ФПМ имеет отдельные клеммники для цепей тока и цепей напряжения. С клеммником напряжения конструктивно объединены цепи питания прибора и цепи сигнализации. Сигналы интерфейса и внутренние напряжения питания выведены на отдельный разъем РП15-15, помеченный как разъем телемеханики. Следует учитывать, что нумерация контактов на российском РП15-15 разьеме и его импортном аналоге DB-15F может не совпадать. Нумерация контактов дана именно для РП15-15.

- 01 — сброс микроконтроллера прибора
- 02 — питание “+” для интерфейса (*T+*)
- 03 — питание “-” для интерфейса (*T-*)
- 04 — разрешение передачи (*RDY*)
- 05 — запрос повтора передачи (*RPT*)
- 06 — выход передатчика (*BIT*)
- 07 — ноль аналоговых цепей прибора
- 08 — не используется (для расширенного интерфейса — сигнал принудительного дистанционного пуска *RUN*)
- 09 — питание +5
- 10 — питание -5 В
- 11 — питание +12 В
- 12 — питание -15 В
- 13 — питание +40 В
- 14 — питание накала индикатора
- 15 — не используется (для расширенного интерфейса сигнал срабатывания прибора ADC)

На приборе розетка, на кабеле вилка.

Содержание

Предисловие	3
1. Классификация методов определения места повреждения.....	4
2. Теоретические основы определения места КЗ по параметрам аварийного режима.....	7
3. Принципы определения места КЗ по двухстороннему измерению параметров аварийного режима.....	10
4. Двухстороннее измерение на ЛЭП сложной конфигурации	13
5. Требования к фиксирующим вольтметрам и амперметрам.....	18
6. Принципы выполнения фиксирующих приборов двухстороннего измерения.....	20
7. Упрощенные способы одностороннего измерения	24
8. Некоторые положения теории дистанционных защит	26
9. Теория одностороннего измерения на линии с двухсторонним питанием	30
10. Варианты способов одностороннего измерения	32
11. Погрешности одностороннего определения места повреждения	36
12. Выполнение приборов одностороннего измерения.....	38
13. Системы для определения места повреждения на основе микропроцессорных приборов	43
14. Интерфейсы (сопряжения) фиксирующих приборов.....	47
15. Автоматические локационные искатели	53
Список литературы.....	55
Приложение П1. Пример протокола ОМП	56
Приложение П2. Форматы сообщений приборов.....	57
Приложение П3. Разъемы приборов ФП	60

Библиотечка электротехника

Приложение к производственно-массовому журналу "Энергетик"

АРЖАННИКОВ ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ЧУХИН АНДРЕЙ МИХАЙЛОВИЧ

**Методы и приборы определения мест повреждения
на линиях электропередачи**

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

109280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23
Телефоны: 275-19-06; 275-00-23 доб. 22-47

Научный редактор **В.И. Пуляев**

Редактор **Л.Л. Жданова, Н.В. Ольшанская**

Худож.-техн. редактор **Т.Ю. Андреева**

Корректор **З.Б. Драновская**

Сдано в набор 10.10.98 Подписано в печать 03.11.98

Формат 60×88 $\frac{1}{16}$. Печать офсетная.

Печ. л. 4,0. Тираж 600 экз. Заказ **525**

Макет выполнен АО "Знак": 103012, Москва, Б. Черкасский пер., 2/10

Отпечатано типографией МЭИ: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 13.

Учебное пособие по релейной защите энергосистем

В Энергоатомиздате вышла книга Чернобровова Н.В., Семенова В.А. Релейная защита энергетических систем: Учебное пособие для средних профессиональных учебных заведений. — М.: 1998. — 800 с.: ил.

Авторы излагают теоретические основы техники современной релейной защиты. Рассматриваются требования, предъявляемые к устройствам релейной защиты (УРЗ), принципы построения измерительных и логических органов, а также схем релейной защиты, особенности их работы и выбор параметров.

В книге дано описание современных релейных защит, которые созданы и успешно эксплуатируются на линиях электропередачи 110, 220 кВ и ВЛ сверхвысокого напряжения, на крупных генераторах, трансформаторах и энергоблоках; уделено место высокочастотным защитами, а также защитами со сложными характеристиками, позволяющими оптимально решать очень сложную задачу — надежную отстройку защиты от нагрузки и качаний при сохранении достаточной чувствительности при коротких замыканиях.

Микропроцессорным комплексам для интегрированных систем управления подстанциями авторы уделили особое внимание.

В книге имеется раздел, посвященный элементам УРЗ с использованием интегральных микросхем, на базе которых отечественная промышленность выпускает современную релейную аппаратуру.

Книга рекомендована Минтопэнерго РФ в качестве учебного пособия для энергетических специальностей средних профессиональных учебных заведений.

Желающим приобрести книгу предлагаем обращаться в Энергоатомиздат по телефонам: (095) 235-94-38 — отдел распространения; (095) 925-02-12 — электроэнергетическая редакция. Факс (095) 235-91-58.

48

Об авторах



Евгений Александрович Аржанников — доктор техн. наук, и.о. профессора кафедры "Автоматическое управление электроэнергетическими системами" Ивановского государственного энергетического университета.

Автор ряда работ в области теории дистанционных защит, определения мест короткого замыкания на линиях и в области АСУ ТП энергообъектов. Наиболее крупная монография — "Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике линий при замыканиях на землю".



Андрей Михайлович Чухин — канд. техн. наук, доцент кафедры "Автоматическое управление электроэнергетическими системами" Ивановского государственного энергетического университета.

Автор ряда статей по использованию микропроцессорных фиксирующих приборов в системах автоматизированного анализа аварий в электрической части энергообъектов, опубликованных в журналах "Электрические станции", "Энергетик", "Промышленная энергетика". Занимается автоматизированным анализом совместно с Е.А. Аржанниковым более 10 лет.

Отыскание мест повреждения (ОМП) воздушных линий электропередачи — важная задача оперативно-диспетчерского управления энергосистемами.

Автоматизация процесса ОМП обеспечивает повышение точности измерений и оперативности получения результатов.