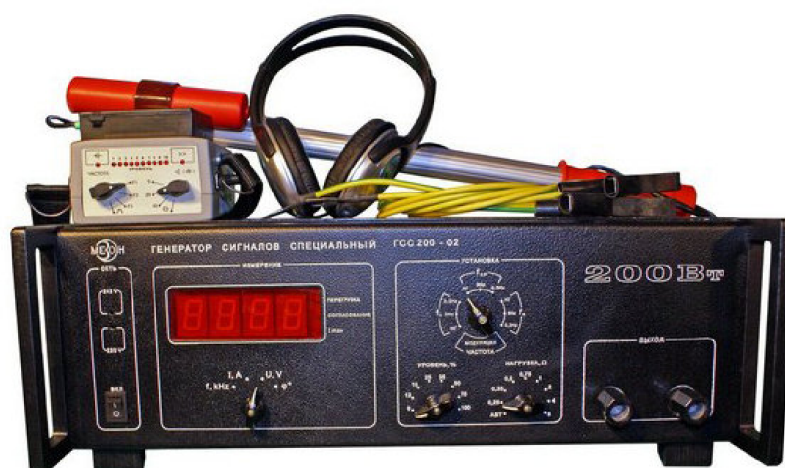


**Е.А. Аржанников, А.М. Чухин**

## МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЛИНИИ

# Учебное пособие



1998

УДК 621.315.1

**Аржанников Е.А., Чухин А.М.** Методы и приборы определения места короткого замыкания на линиях: Учебное пособие/ Ивановский государственный энергетический университет Иваново, 1998.- 74 с.

Пособие предназначено для использования при изучении курса "Автоматизация электроэнергетических систем". Возможно использование пособия студентами других специальностей электроэнергетического профиля при изучении аналогичных курсов, а также инженерами и техниками служб релейной защиты при прохождении ими курсов повышения квалификации. Пособие содержит общую характеристику методов определения места короткого замыкания на линиях высокого напряжения, сведения о приборах, реализующих указанные методы. Особое внимание уделено двусторонним и односторонним способам определения места повреждения по параметрам аварийного режима.

Разделы 13,14 и приложения написаны Чухиным А.М. и ориентированы в основном на инженеров- эксплуатационников, проходящих переподготовку.

## СОДЕРЖАНИЕ

1.КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ..	4
2.ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА.....	8
3.ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПО ДВУСТОРОННЕМУ ИЗМЕРЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА .....	12
4. ДВУСТОРОННИЙ ЗАМЕР НА ЛИНИЯХ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ.....	16
5.ТРЕБОВАНИЯ К ФИКСИРУЮЩИМ ВОЛЬТМЕТРАМ И АМПЕРМЕТРАМ .	21
6. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ФИКСИРУЮЩИХ ПРИБОРОВ ДВУСТОРОННЕГО ЗАМЕРА .....	24
7.УПРОЩЕННЫЕ СПОСОБЫ ОДНОСТОРОННЕГО ЗАМЕРА.....	28
8. НЕКОТОРЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ .....	31
9.ТЕОРИЯ ОДНОСТОРОННЕГО ЗАМЕРА НА ЛИНИИ С ДВУСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ .....	35
10.ВАРИАНТЫ СПОСОБОВ ОДНОСТОРОННЕГО ЗАМЕРА .....	38
11.ПОГРЕШНОСТИ ОДНОСТОРОННЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ЗАМЫКАНИЯ.....	42
12.ВЫПОЛНЕНИЕ ПРИБОРОВ ОДНОСТОРОННЕГО ЗАМЕРА .....	44
13. СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ЗАМЫКАНИЯ НА ОСНОВЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ПРИБОРОВ .....	50
14. ИНТЕРФЕЙСЫ ФИКСИРУЮЩИХ ПРИБОРОВ .....	56
15.АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЛОКАЦИОННЫЕ ИСКАТЕЛИ .....	63
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	66
ПРИЛОЖЕНИЕ П1. ФОРМАТЫ СООБЩЕНИЙ ПРИБОРОВ .....	67
ПРИЛОЖЕНИЕ П2 . РАЗЪЕМ ПРИБОРА МФИ / РПИ .....	71

## **1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ**

Линии электропередач высокого напряжения - довольно часто повреждаемые элементы электроэнергетической системы. Выход из работы линии всегда сопровождается или 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. До появления в энергосистемах приборов определения места повреждения (начало 60-х годов) поиск повреждения совершался путем обходов, объездов, иногда облетов на вертолете трассы линии. На это тратилось значительное время, поскольку линии имеют большую протяженность (до сотен километров), а трасса часто идет по труднопроходимой местности. К тому же место повреждения иногда плохо различимо даже с близкого расстояния - на гирлянде изоляторов после перекрытия часто не остается значительных следов обгорания.

Еще сложнее обстоит дело с поиском места самоустраняющегося повреждения, при котором после АПВ линия остается в работе. Между тем ремонтным службам весьма полезна информация о таких повреждениях, поскольку обычно после них часть изоляторов в гирлянде оказывается пробитыми и на линии остается ослабленное место, которое в будущем способно привести к возникновению аварии. Известен случай, когда сверхответственная линия отключалась три раза с промежутком в несколько недель, пока не было найдено дерево с обгоревшими ветвями, которые при сильном ветре сближались с проводом. Поэтому необходимо искать место не только устойчивого, но и самоустраняющегося повреждения.

Сказанное предопределило широкое внедрение в электроэнергетику методов и средств определения места повреждения (ОМП) на линии. Однако обычно они сводятся к определению места короткого замыкания (ОМКЗ) разрывы проводов без замыкания бывают редко и определить их место по соотношению каких-либо электрических величин довольно сложно. Внедрение приборов определения места повреждения началось в нашей стране в 60-х годах и в настоящее время большинство линий напряжением 110 кВ и выше оснащено такими приборами. Идет внедрение приборов и на напряжениях 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.

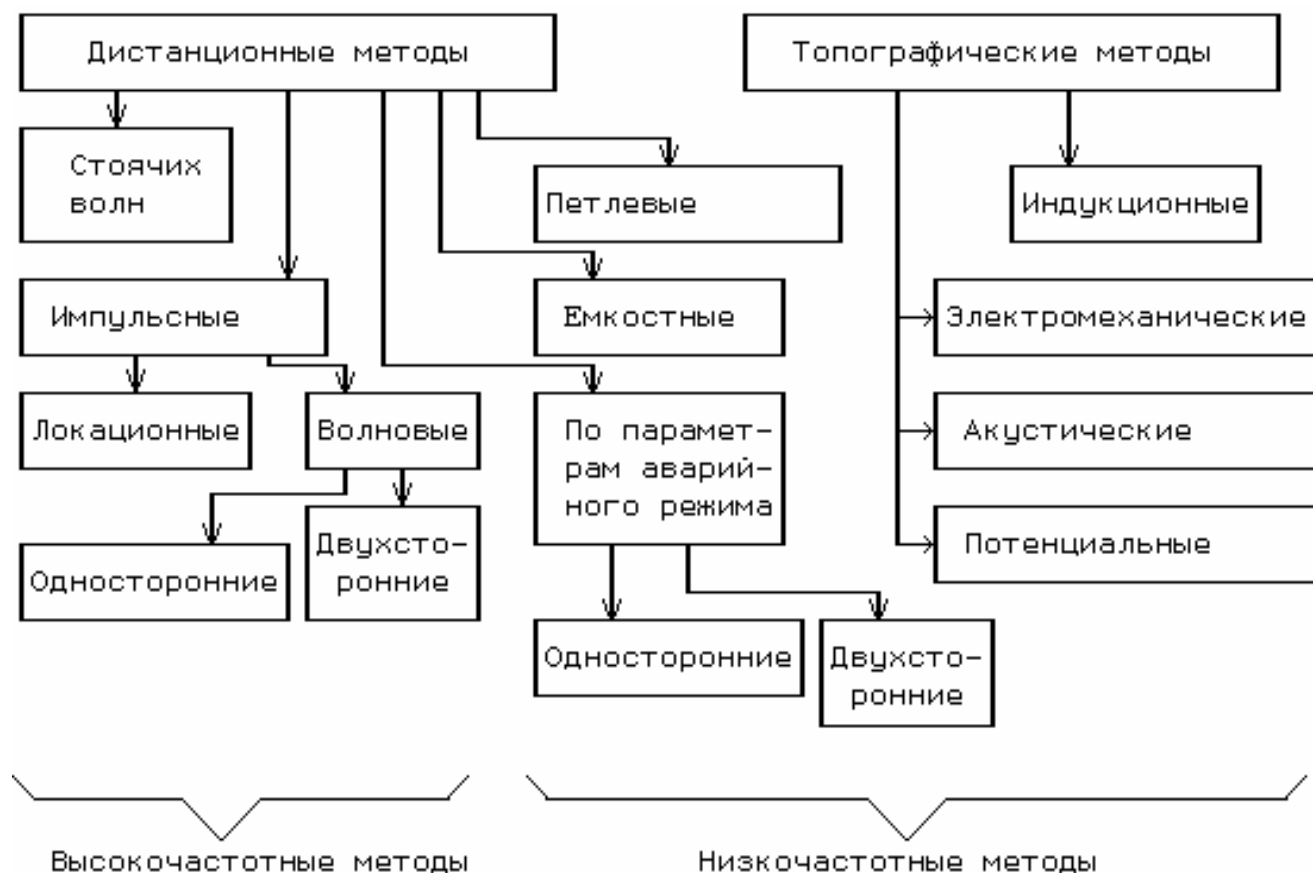


Рис.1. Схема классификации методов ОМП

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 и указывающих расстояние до повреждения.

Другое деление методов - на высокочастотные и низкочастотные. Под низкочастотным диапазоном подразумеваются частоты от нуля до нескольких килогерц. Под высокочастотным - десятки килогерц.

Коротко охарактеризуем методы, приведенные на рисунке 1.

#### **ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ**

**ИНДУКЦИОННЫЙ** метод основан на том, что поисковая бригада, двигаясь вдоль трассы кабельной линии, улавливает специальными приборами характер изменения магнитного и электрического поля, создаваемого

протекающим по линии током. Ток вырабатывается специальным генератором, подключаемым на подстанции к уже отключенной линии.

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

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

*ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ* метод основан на фиксации механических усилий, создаваемых за счет тока короткого замыкания. Электромеханические указатели устанавливаются стационарно на опорах воздушных линий. При протекании тока КЗ у указателя выпадает блинкер, состояние которого проверяют после аварии при обходе линии. Метод используется в основном в сетях 6-10 кВ сельскохозяйственного назначения.

Как видим, топографические методы и средства используются ремонтными службами и к работе служб релейной защиты отношения не имеют.

### *ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ*

Принцип действия *ИМПУЛЬСНЫХ* методов основан на измерении интервалов времени распространения электромагнитных волн (импульсов) по участкам линии. *ЛОКАЦИОННЫЕ* методы определяют время пробега специально генерируемого зондирующего импульса. *ВОЛНОВЫЕ* методы определяют моменты прихода на подстанцию возникающих в месте повреждения линии электромагнитных волн.

Распространение волны (импульса) по линии - 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 воздушной линии волна перемещается по петле фаза-земля со скоростью  $v=275$  м/мкс и по петле фаза-фаза со скоростью  $v=296$  м/мкс. В кабельной линии скорость распространения волны значительно ниже - 160 м/мкс и примерно одинакова для любой петли.

Локационные методы основаны на измерении времени между моментом послышки в линию зондирующего электрического импульса и моментом прихода к

началу линии импульса, отраженного от места повреждения. За указанное время импульсы прошли путь, равный двойному расстоянию до места повреждения. Искомое расстояние равно:

$$L = t * v / 2.$$

Устройства измерения - локационные искатели - будут рассмотрены в 15-м разделе данной работы.

Волновой метод *ДВУСТОРОННИХ* измерений основан на измерении времени между моментами достижения двух концов линии фронтами электромагнитных волн, возникающих в месте повреждения (волн разряда замкнувшейся на землю фазы). Необходимым условием реализации метода является синхронный счет времени на двух концах с точностью до микросекунд. Для этого с конца на конец посылаются хронизирующие 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 линии 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 работы. Объясняется это как тем, что они, в отличие от других методов, исключительно широко распространены в высоковольтных сетях, так и тем, что обеспечение эксплуатации устройств измерения (фиксирующих приборов) возложено на персонал служб РЗА (центральных служб энергосистем и местных служб сетевых предприятий).

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПО ПАРАМЕТРАМ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА

Параметры аварийного режима - фиксированные (измеренные) во время КЗ токи и напряжения отдельных фаз или последовательностей. Методов ОМКЗ по параметрам аварийного режима множество, однако все их можно разбить на методы двустороннего и методы одностороннего замера.

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

Основы теории одностороннего замера разработаны в Ивановском энергоуниверситете в 70-80 годах Е.А. Аржанниковым и наиболее полно отражены в [6]. Приборы, реализующие односторонний замер разработаны в Рижском техническом университете под руководством А.С.Саухатаса [9]. Однако в [6] материал трактуется с позиций классической теории дистанционной защиты. 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 линии и одну из задач идентификации параметров энергосистемы. В данном параграфе рассматривается именно этот подход.

Рассматривается одиночная линия рис.2, на которой на расстоянии  $x$  от левой системы произошло КЗ. Предположим, что при КЗ фиксированы по три тока и по три напряжения с каждого конца линии. Токи в месте КЗ ( $I_f$ ) могут быть вычислены:  $I_f = I' + I''$ .

Если бы было известно  $x$ , то можно было бы составить шесть уравнений (для трех фаз или для трех последовательностей):



$$\underline{U}_v' - \Delta \underline{U}_v' + \Delta \underline{U}_v'' - \underline{U}_v'' = 0, \quad (1)$$

где  $v$  - индекс фазы (А, В или С) или индекс последовательности (1,2 или 0);  
 $\Delta \underline{U}'$ ,  $\Delta \underline{U}''$  - падения напряжения на участке слева от места КЗ и на участке  
справа от места КЗ.

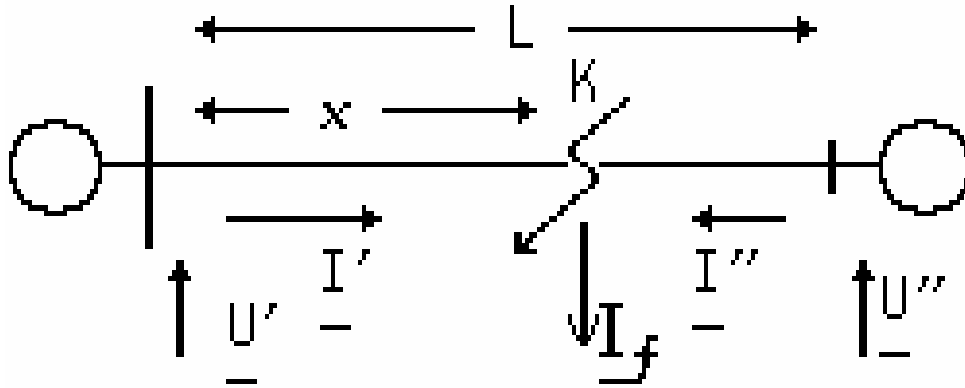


Рис.2. Поясняющая схема одиночной линии.

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:

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

где  $\underline{Z}_{1уд}$  и  $\underline{Z}_{0уд}$  - удельные сопротивления линии в схемах прямой и нулевой последовательностей. Напомним, что удельное индуктивное сопротивление одиночной линии 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 А можно получить суммируя падения напряжения в схемах отдельных последовательностей:

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

Вообще падение напряжения на любой фазе

$$\Delta \underline{U}_\phi = x \underline{Z}_{1уд} (\underline{I}_\phi + \underline{K} \underline{I}_0), \quad (2)$$

где

$$\underline{K} = (\underline{Z}_{0уд} - \underline{Z}_{1уд}) / \underline{Z}_{1уд} \quad (3)$$

Величина  $\underline{K}$  называется в теории дистанционной защиты коэффициентом компенсации по току нулевой последовательности и отражает разницу в падении напряжений в схемах прямой и нулевой последовательностей при протекании по ним одинакового по величине тока.

Существует несколько путей решения уравнений (1). 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. Простейшей целевой функцией может служить *невязка* уравнений (1), то есть отличие правой части уравнения от нуля. Для получения значений невязок следует изменять значение  $x$  от нуля до  $L$  и строить зависимость модуля правой части  $\sigma$  от предполагаемого расстояния  $\sigma(x)$ .

Подобные зависимости показаны на рис.3 для однофазного замыкания фазы А на расстоянии в 60 км на линии с параметрами:  $U=220$  кВ,  $L=100$  км,  $\underline{Z}_{1уд} = 0.107 + j0.408$  Ом/км,  $\underline{Z}_{0уд} = 0.257 + j1.33$  Ом/км. Прилегающая система:  $\underline{Z}_{1с}' = j20$  Ом,  $\underline{Z}_{0с}' = j20$  Ом. Система противоположного конца линии:  $\underline{Z}_{1с}'' = j40$  Ом,  $\underline{Z}_{0с}'' = j80$  Ом. Угол между ЭДС систем в доаварийном режиме равен нулю, замыкание металлическое.

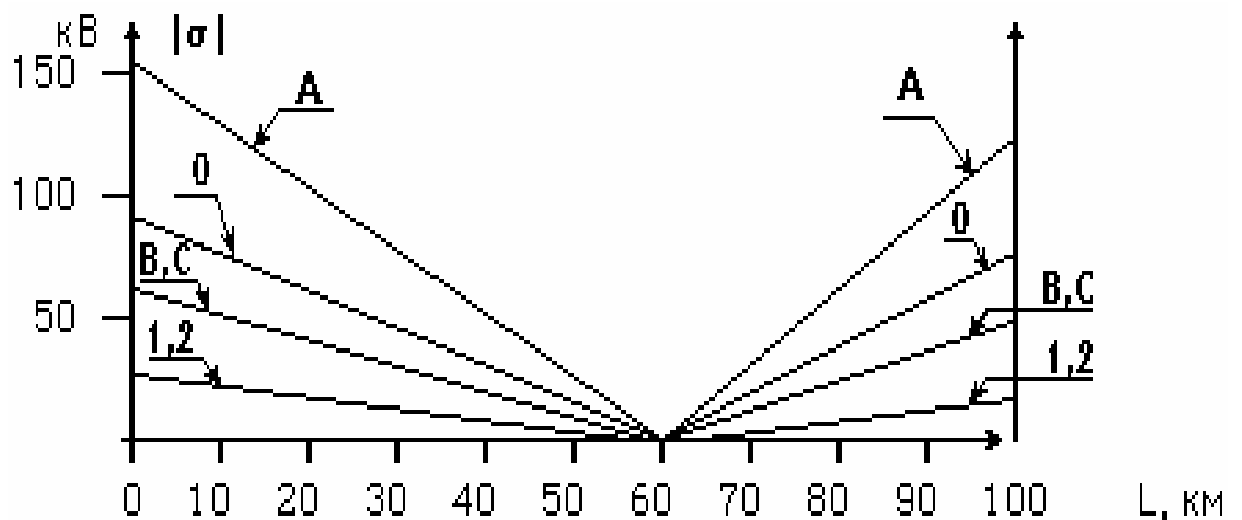


Рис.3. Зависимость невязок уравнений (1) от предполагаемого расстояния до места замыкания

Уравнений (1) шесть, поэтому на рисунке показаны 6 зависимостей, хотя некоторые из них совпадают между собой. Все зависимости прямолинейны. Около прямых показана их принадлежность к уравнению для фазных величин (А, В или С) или к уравнению для симметричных составляющих (1, 2 или 0). Как видим, невязки уравнений для фаз В и С совпадают между собой, то же имеет место для уравнений для прямой и обратной последовательностей. Причина ясна - угол наклона отрезка постоянен и определяется падением напряжения на одном километре линии в схеме данной последовательности; поскольку удельные сопротивления линии для токов прямой и обратной последовательностей равны, графики  $\sigma(x)$  для этих последовательностей совпадают. Место КЗ определяется по любому из уравнений однозначно - в точке  $x=60$  км все невязки равны нулю. Для уменьшения влияния погрешностей измерения электрических величин нужно стремиться использовать характеристики, имеющие наибольшую крутизну. На рис.3 это характеристика для поврежденной фазы А или для нулевой последовательности 0.

В принципе функций невязки может быть множество. В [7] предложена самая универсальная - реактивная мощность в месте КЗ  $Q$ . Она соответствует предположению, что все переходные сопротивления в месте КЗ резистивны (активны). Тогда естественно, что

$$Q_f = \text{Im} [\underline{U}_f \underline{I}_f^*] = 0. \quad (4)$$

Здесь индекс  $f$  соответствует точке замыкания (от английского слова fault). До этого в теории дистанционной защиты и в теории ОМКЗ по [6] всегда использовалась предпосылка - переходное сопротивление активно, напряжение в точке КЗ совпадает по фазе с током в переходных сопротивлениях. При однофазных и двухфазных КЗ эти предпосылки совпадают. Однако преимущество выражения (4) в том, что оно верно и в общем случае двухфазного КЗ на землю или трехфазного КЗ через произвольные сопротивления в каждой фазе. То есть критерий (4) обладает большей общностью, чем ранее используемые критерии.

Для использования (4) в качестве целевой функции при определении расстояния следует:

- определить ток (или систему трех токов)  $\underline{I}_f = \underline{I}' + \underline{I}''$  ;
- задаваясь значениями расстояния  $x$  от 0 до  $L$  подсчитывать значения напряжения (или системы трех напряжений)  $\underline{U}_x = \underline{U}' - \Delta \underline{U}$ ;
- для каждого  $x$  подсчитывать реактивную мощность по (5) и строить ее зависимость  $\sigma_q(x)$ . Точка, в которой реактивная мощность обратится в нуль, соответствует месту КЗ.

Расчет следует вести для всех трех фаз одновременно, если вид КЗ неизвестен; расчет можно вести только для поврежденной фазы, если известно, что замыкание однофазное. Ясно, что при однофазном замыкании подсчет тока  $I_f$  неповрежденных фаз даст нулевой результат. Следовательно, и в общем случае, и в случае известного вида КЗ в системе (1) нет лишних уравнений.

Несмотря на кажущуюся простоту, реализация рассмотренного способа технически затруднена из-за необходимости фиксации шести комплексных величин на каждом конце линии. Даже в случае наличия соответствующих устройств следует "привязать" показания устройств с двух концов линии к единой временной оси отсчета. Предположим, что на каждом конце линии устройства фиксируют фазу шести электрических величин, отсчитывая их от напряжения фазы А или от напряжения прямой последовательности фазы А. Но между этими напряжениями на двух концах линии тоже есть угол, который неизвестен. Придется либо синхронизировать "внутренние часы" двух устройств с точностью до долей микросекунды (до 1-2 электрических градусов), либо как-то привязывать две векторные диаграммы (например, по току неповрежденной фазы). В любом случае получается очень непростая техническая система. Поэтому нам до сих пор неизвестны попытки использования критерия (4) непосредственно. Усилия разработчиков всегда были направлены на то, чтобы либо обойтись измерениями с одной стороны, либо измерять на двух сторонах только модули электрических величин, но не их фазовые углы. Ниже и будут рассмотрены практически используемые методы двустороннего и одностороннего замера.

Отметим дополнительно, что все рассматриваемые ниже методы пригодны только тогда, когда через место КЗ протекают достаточно большие токи, которые могут создать в линии заметные падения напряжения. Они непригодны при однофазных замыканиях в сети с изолированной нейтралью, где ток замыкания слишком мал.

### **3. ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПО ДВУСТОРОННЕМУ ИЗМЕРЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ АВАРИЙНОГО РЕЖИМА**

Двусторонние измерения позволяют определить только место несимметричного КЗ с большим током. Место трехфазных коротких замыканий, 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 двустороннего ОМКЗ можно пояснить с помощью рис.4, на котором приведена поясняющая схема одиночной линии (рис.4а), схема замещения обратной или нулевой последовательности (рис.4б) и эпюра напряжений этой последовательности (рис.4в). Максимум напряжения находится в точке КЗ (источник обратной и нулевой последовательности 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 фиксировали (запомнили) четыре величины:  $U', I', U'', I''$ . Непосредственно из эпюры рис 4в можно записать выражения для напряжения в точке КЗ при движении "слева" и "справа" (от шин левого и правого концов линии) к точке КЗ:

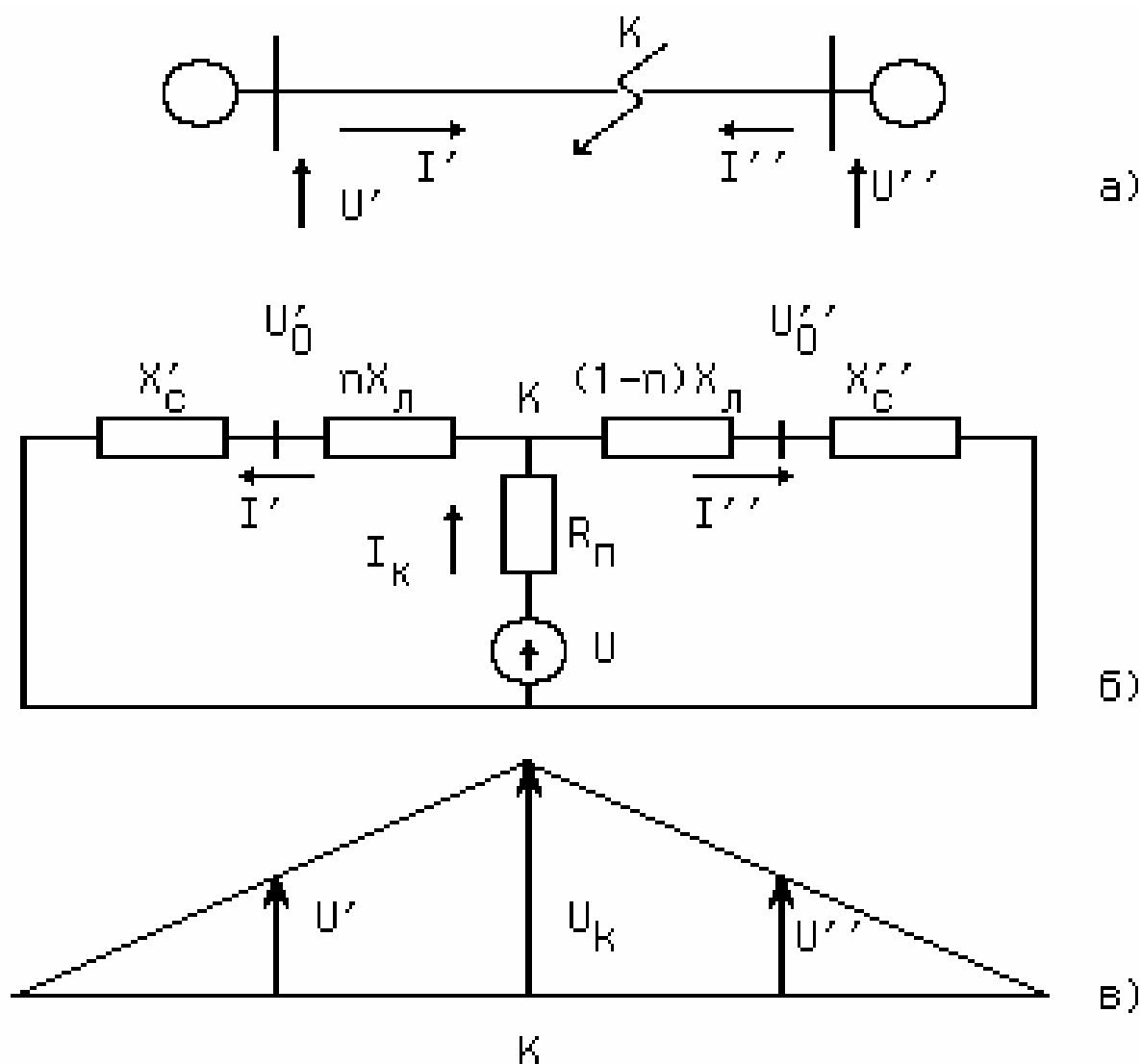


Рис.4. К пояснению принципа двустороннего ОМКЗ

$$U_k = U' + I' * nX_{\text{л}} ;$$

$$U_k = U'' + I'' * (1-n)X_{\text{л}} .$$

Здесь  $X_{\text{л}}$  - сопротивление линии в схеме данной последовательности,  
 $nX_{\text{л}}$  - сопротивление от левого конца линии 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.

Приравняв правые части выражений и решая полученное уравнение относительно  $nX_{\text{л}}$ , получаем:

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

$$nX_{\text{л}} * (I' + I'') = U'' - U' + I''X_{\text{л}}.$$

$$nX = \frac{U'' - U' + I''X_{\text{л}}}{(I' + I'')} \quad (5)$$

Практически производится замер величин нулевой или обратной последовательностей, а решение ищется относительно расстояния до места КЗ :  
 $l' = n * L = n * X_{\text{л}} / X_{\text{уд}}$  , где  $X_{\text{уд}}$  - сопротивление одного километра линии в схеме данной последовательности,  $L$  - полная длина линии.

Расчетные формулы имеют вид:

$$l' = \frac{3U_0'' - 3U_0' + 3I_0''X_{0\text{уд}}L}{(3I_0' + 3I_0'')X_{0\text{уд}}} ; \quad l' = \frac{U_2'' - U_2' + I_2''X_{1\text{уд}}L}{(I_2' + I_2'')X_{1\text{уд}}} \quad (6)$$

Отметим ряд особенностей формул и самого метода расчета по двустороннему замеру:

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 короткого замыкания: одной или двух фаз на землю при расчете по составляющим нулевой последовательности или даже двухфазного без земли при расчете по составляющим обратной последовательности. Схема рис.4б и эпюра рис.4в 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. На рис.4б переходное сопротивление оказалось вне контура, для которого составлялось уравнение. Теоретически двусторонний замер 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 районах вечной мерзлоты и в районах со скальным грунтом, где значительные переходные сопротивления при КЗ на землю затрудняют работу и защит линии, и фиксирующих приборов.

4) На расчет не влияют составляющие токов нагрузочного режима. Объясняется это тем, что ведется фиксация величин обратной или нулевой последовательностей, отсутствующих в нагрузочном режиме. Если бы фиксировались составляющие прямой последовательности, избавиться от влияния нагрузок было бы невозможно. Строго говоря, от нагрузок зависит напряжение в точке КЗ в доаварийном режиме, которое определяет величину всех составляющих других последовательностей. В частности, при качаниях указанное напряжение может настолько снизиться, что приведет к отказу приборов. Однако при разумных значениях токов нагрузочного режима их влияние на двусторонний замер отсутствует.

5) Расчеты относительно не сложны и доступны даже низкоквалифицированному персоналу.

Все перечисленные особенности носят положительный характер, что и предопределило внедрение методов двустороннего замера. Отрицательна сама необходимость получения данных с двух концов линии, необходимость передачи данных с конца на конец или вышестоящему диспетчеру. Имеются системы с телепередачей данных и автоматическим проведением расчетов. Однако они относительно сложны и не получили широкого распространения. Кроме того, все формулы выведены без учета активных сопротивлений линии, что само по себе вносит определенную погрешность.

Для расчетов требуются фиксирующие амперметры на каждой линии и фиксирующие вольтметры на системах шин. Иногда можно уменьшить количество приборов с учетом связи между током и напряжением:  $U' = I' * X_C'$ ;  $U'' = I'' * X_C''$ . В простейших случаях сопротивления систем хорошо известны и стабильны, особенно в схеме нулевой последовательности. Однако в сложно-замкнутой сети понятие сопротивлений систем теряет простоту и уменьшение количества приборов приводит к появлению множества расчетных формул - каждая коммутация в сети приводит к изменению формулы. Поэтому целесообразно ориентироваться на расчет по четырем замерам.

В настоящее время в энергосистемах преимущественное распространение получили методы определения места КЗ, основанные на измерении параметров нулевой последовательности, несмотря на то, что при этом невозможно определить место междуфазного замыкания. Подобное положение определяется следующими причинами:

- высоким удельным весом коротких замыканий на землю (однофазных и двухфазных), составляющих на воздушных линиях 80-90% всех случаев КЗ;
- независимость сопротивления нулевой последовательности сетей, примыкающих к контролируемой ЛЭП, от токов нагрузки, что существенно при расчетах по показаниям двух или трех приборов;
- простотой обеспечения измерений токов и напряжений нулевой последовательности (нет необходимости в использовании специальных фильтров обратной последовательности);
- меньшей погрешностью фильтров нулевой последовательности по сравнению с фильтрами обратной последовательности (1,6 - 2% против 4 - 6%).

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

Допустимость отказа от определения места междуфазных КЗ объясняют тем, что с ростом класса напряжения линии вероятность междуфазных КЗ в промежуточных точках линии уменьшается. С увеличением напряжения увеличиваются расстояния между фазами. Трудно представить себе причину перекрытия по воздуху между фазами на линии 500 кВ при расстоянии между проводами в 11 метров. В сетях 110 кВ и выше 85% всех КЗ - однофазные. Междуфазные КЗ происходят в основном на самих подстанциях, когда нет необходимости в поиске места повреждения.

## **4. ДВУСТОРОННИЙ ЗАМЕР НА ЛИНИЯХ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ**

### **4.1. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ С ВЗАИМОИНДУКЦИЕЙ ПО ВСЕЙ ДЛИНЕ**

Поясняющая схема двух параллельных линий и схема замещения нулевой последовательности приведены на рис.5.

На этих схемах обозначены:  $X_{m\text{уд}}$  - удельное сопротивление взаимоиנדукции;  $I_{n'}$ ,  $I_{n''}$  - токи нулевой последовательности в поврежденной линии;  $I_{n'}$ ,  $I_{n''}$  - токи нулевой последовательности в неповрежденной линии.



Участки линий, имеющие взаимную индукцию, заменены на схеме замещения эквивалентными трехлучевыми звездами с выносом взаимной индукции в одну из ветвей звезды.

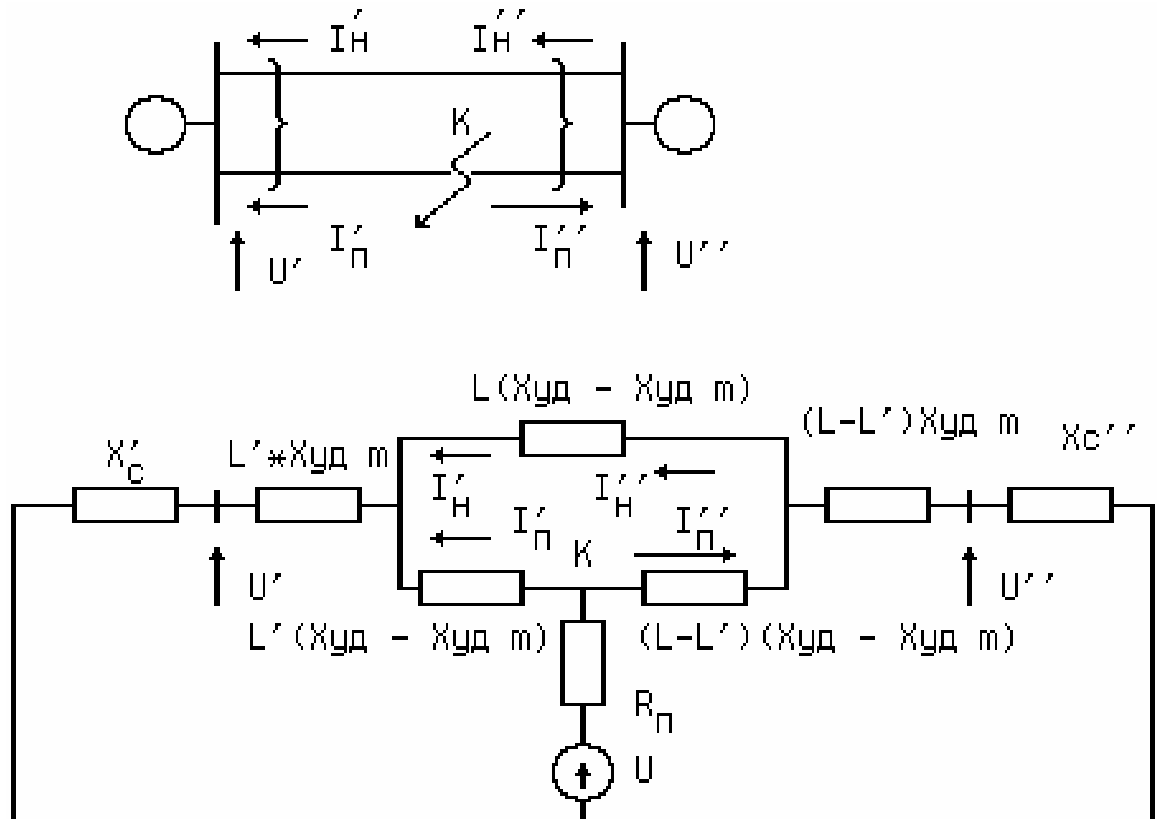


Рис.5. Параллельные линии с взаимной индукцией и их схема замещения нулевой последовательности

Для этой схемы относительно напряжения  $U_K$  можно записать два уравнения:  $U_K = U' + X_{уд\ m} * L' * (I_{П'} + I_{Н'}) + (X_{уд} - X_{уд\ m}) * L' * I_{П'}$ ;

$$U_K = U'' + X_{уд\ m} * (L - L') * (I_{П''} - I_{Н''}) + (X_{уд} - X_{уд\ m}) * (L - L') * I_{П''}.$$

Токи на двух концах неповрежденной линии имеют одинаковые значения:  $I_{Н'} = I_{Н''}$ . Для исключения этого тока из уравнений, можно записать уравнение на основе обхода контура, образованного на схеме замещения двумя линиями:

$$(X_{уд} - X_{уд\ m}) * L' * I_{П'} - (X_{уд} - X_{уд\ m}) * L' * I_{Н'} - (X_{уд} - X_{уд\ m}) * (L - L') * I_{П''} = 0$$

или:

$$L * I_{Н'} = L' * (I_{П'} + I_{П''}) - L * I_{П''}.$$

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

$$L' = \frac{3U''_0 - 3U'_0 + (X_{0\text{ уд}} + X_{\text{уд m}}) * L * 3I_{0п''}}{(X_{0\text{ уд}} + X_{\text{уд m}}) * (3I_{0п'} + 3I_{0п''})} \quad (7)$$

Для расчета по этому выражению требуются показания четырех фиксирующих приборов. В приборах на неповрежденной линии нет необходимости. Однако следует помнить, что при выводе (7) исключение тока неповрежденной линии произведено после записи уравнения обхода замкнутого контура из двух линий. То есть выражение верно лишь при параллельной работе двух линий. Если вторая линия отключена, то следует принимать  $X_{\text{уд m}} = 0$  и (7) совпадет с аналогичным выражением (6) для одиночной линии. Если параллельная линия отключена и заземлена с двух сторон, или две линии находятся в режиме раздельной работы по концам, или одна из линий включается на короткое замыкание при опробовании линии напряжением, следует пользоваться совсем другими формулами [2].

Если известны сопротивления нулевой последовательности систем ( $X_{с'}$  и  $X_{с''}$ ), то требуемое количество показаний приборов можно сократить. Для этого нужно использовать зависимости между измеряемыми величинами  $I_{п'}$ ,  $I_{п''}$ ,  $U'$ ,  $U''$  и параметрами сети:

$$U' = (I_{п'} + I_{н}) * X_{с'}; U'' = (I_{п''} - I_{н}) * X_{с''};$$

$$I_{п'} = \frac{U'}{X_{с'}} - I_{н}.$$

Иногда на параллельных линиях применяют включение фиксирующих амперметров на сумму и разность двух линий. В данном пособии этот метод не рассматривается, поскольку он редко применяется на практике.

Как следует из материалов данного раздела, наличие взаимоиндукции в схеме нулевой последовательности заставляет увеличивать количество фиксирующих приборов и усложнять расчетные выражения. В принципе от этого можно избавиться, применяя включение приборов на составляющие не нулевой, а обратной последовательности - в схеме обратной последовательности нет взаимоиндукций.

#### 4.2. ЛИНИЯ С ВЗАИМОИНДУКЦИЕЙ НА ЧАСТИ ДЛИНЫ

Рассматривается случай, когда линия длиной  $L$  имеет взаимоиндукцию с соседней линией не по всей длине, а на расстоянии  $L_m$  от подстанции (часто

линии от подстанции 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 системы:

$$L' = \frac{3U''_0 - 3U'_0 + X_{0 \text{ уд}} * L * 3I_{0п''} \pm X_{\text{уд м}} * L_m * 3I_{0н'}}{X_{0 \text{ уд}} * (3I_{0п'} + 3I_{0п''})} \quad (8)$$

Здесь все обозначения те же, что на рис.5, дополнительно введен ток нулевой последовательности неповрежденной (соседней) линии  $I_{н'}$ . Однако он может в зависимости от режима совпадать по фазе с  $I_{п'}$  (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  $3I_{0п'}$  и  $3I_{0н'}$ , замеренных фиксирующими амперметрами, определяются два расчетных напряжения:

$$\begin{aligned} 3U_{0п1} &= X_c' * (3I_{0п'} - 3I_{0н'}) \\ 3U_{0п2} &= X_c' * (3I_{0п'} + 3I_{0н'}) , \end{aligned}$$

и эти значения сравниваются с напряжением  $3U'_0$ , замеренным фиксирующим вольтметром.

Если  $3U'_0 = 3U_{0п1}$ , то ток  $3I_{0н'}$  находится в противофазе с  $3I_{0п'}$  и при расчете расстояния до места КЗ в (4) ставится знак "+". Если же  $3U'_0 = 3U_{0п2}$ , то направление тока противоположное; и в выражении (4) нужно поставить знак "-" перед членом с  $3I_{0н'}$ .

Для использования формулы (8) необходимо преодолеть ряд технических трудностей - обеспечить пуск фиксирующих приборов соседней линии при КЗ на данной линии, разобраться в направлениях токов.

#### 4.3. ЛИНИЯ С ОТВЕТВЛЕНИЕМ

Влияние ответвления на определение места КЗ по параметрам нулевой последовательности будет сказываться, если на этом ответвлении имеется трансформатор, нейтраль которого заземлена. Тогда от нейтрали трансформатора ответвления потечет по линии ток нулевой последовательности. При ОМКЗ по параметрам обратной последовательности влияние ответвления мало, поскольку мал ток обратной последовательности нагрузки ответвления.

Выражения для определения расстояния до места КЗ будут различными в зависимости от места повреждения. На рис.6 показана схема линии с КЗ на

расстоянии от шин левой подстанции, большем  $L_{OT}$ . В этом случае ток  $I'_{KB} = I' + I_{OT}$  и расстояние подсчитывается по выражению:

$$L' = L_{OT} + \frac{X_{OT} * (3U''_0 - 3U'_0) - X_{0уд} * L_{OT} * X_{OT} * 3I'_0 + X_{0уд} * (L - L_{OT}) * X_{OT} * 3I''_0}{X_{0уд} * [3U'_0 + 3I''_0 * X_{OT} + (X_{OT} + X_{0уд} * L_{OT}) * 3I''_0]} \quad (9)$$

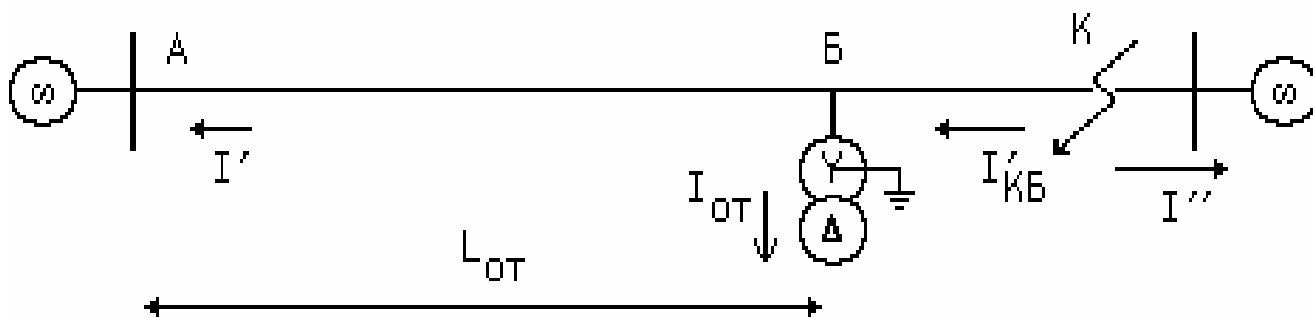


Рис.6. Схема линии с ответвлением

Если КЗ произошло между шинами левой подстанции и местом ответвления ( $L' < L_{OT}$ ), то расчетная формула имеет вид:

$$L' = \frac{(L_{OT} + X_{OT}/X_{уд}) * 3U''_0 - X_{OT} * 3U'_0/X_{уд} + [L * X_{OT} + X_{уд} * L_{OT} * (L - L_{OT})] * 3I''_0}{3U''_0 + X_{OT} * 3I'_0 + [X_{OT} + X_{уд} * (L - L_{OT})] * 3I''_0} \quad (10)$$

Кроме уже известных, в формулах появились параметры:

$L_{OT}$  - расстояние от левой подстанции до места ответвления;

$X_{OT}$  - сопротивление нулевой последовательности ответвления.

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

По первому способу сначала  $L'$  рассчитывается по выражению (10). Если оказывается, что  $0 < L' < L_{OT}$ , то это и есть действительное расстояние до места КЗ. Если же это условие не выполняется, то  $L'$  вычисляется по (9).

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

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

Вычисление "с левой стороны" :  $3U_{0\text{ л}}''' = 3U_0' + X_{\text{уд}} * L_{\text{от}} * 3I_0'$  ;

Вычисление "с правой стороны":  $3U_{0\text{ п}}''' = 3U_0'' + X_{\text{уд}} * (L - L_{\text{от}}) * 3I_0''$  .

Предлагаем читателю самому (проще всего из рассмотрения эпюр напряжений) доказать правило : если  $U_{\text{л}}''' > U_{\text{п}}'''$ , то замыкание произошло левее ответвления; если  $U_{\text{п}}''' > U_{\text{л}}'''$ , то замыкание произошло правее ответвления; если  $U_{\text{л}}''' = U_{\text{п}}'''$ , то точка КЗ лежит на ответвлении.

После определения поврежденного участка он рассматривается как одиночная линия.

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

$$3U_0''' = 3U_0' + X_{0\text{ уд}} * L_{\text{от}} * 3I_0'; \quad 3I_0''' = 3I_0' + 3U_0''' / X_{\text{от}} .$$

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

$$3U_0''' = 3U_0'' + X_{0\text{ уд}} * (L - L_{\text{от}}) * 3I_0'' ; \quad 3I_0''' = 3I_0'' + 3U_0''' / X_{\text{от}} .$$

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

## 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 высоковольтной линии (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 коротких замыканий на ВЛ и правильно взаимодействовать с устройствами релейной защиты, системой аварийной сигнализации подстанции, 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 как тем, что некоторые расчетные выражения верны лишь при всех включенных выключателях (например, выражение (7) для ОМКЗ на параллельных линиях), так и тем, что прибор даст неправильные показания, если в процессе замера 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 линий 110-220 кВ особо важна отстройка от апериодических составляющих; для линий 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 в одном замере. Данные приборы являются однократными. Пришедшие им на смену микропроцессорные приборы способны хранить информацию о нескольких предшествующих авариях.

**БЛОКИРОВКА.** Действие фиксирующих вольтметров и амперметров должно быть четко увязано с работой устройств релейной защиты и автоматического повторного включения. При неуспешном АПВ ВЛ режим КЗ возникает два 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.

Правильная работа однократных фиксирующих вольтметров и амперметров в цикле неуспешного АПВ достигается за счет блокировки их действия после первого срабатывания. В принципе от блокировки можно отказаться, если обеспечено автоматическое быстрое считывание (например, устройствами телемеханики).

**СЕЛЕКТИВНОСТЬ.** Приборы имеют весьма чувствительные пусковые органы и часто при КЗ на одной из линий пускаются приборы и поврежденной, и соседних линий. Рассмотренная выше блокировка приводила бы к выводу из действия однократных фиксирующих приборов при КЗ на соседних ВЛ. 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 подстанции 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 подстанции. Если релейная защита или выключатель откажут при КЗ на своей ВЛ, то откажут и ее фиксирующие приборы.

**ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ЗАПОМИНАНИЯ.** Снятие показаний фиксирующих приборов на подстанциях, не оснащенных устройствами телемеханики или системами АСУ ТП, осуществляется дежурным персоналом. На подстанциях с постоянным дежурным персоналом эта операция может быть произведена в течение нескольких минут (или десятков минут) после КЗ. На подстанциях без постоянных дежурных для снятия показаний могут потребоваться часы. Между тем после аварии на подстанции, 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 часов (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 ОМКЗ 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, хотя практическая реализация данной возможности и не проста (см. раздел 13).

**МИНИМАЛЬНОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ МОЩНОСТИ.** По измерительному входу прибора потребление мощности должно быть минимальным для уменьшения нагрузки на измерительные трансформаторы тока и напряжения с целью уменьшения их погрешности.

## **6. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ФИКСИРУЮЩИХ ПРИБОРОВ ДВУСТОРОННЕГО ЗАМЕРА**

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

Функциональная схема фиксирующего прибора представлена на рис.7. Входная величина (ток или напряжение) поступает на пусковой орган, который при превышении этой величиной определенной уставки приводит в действие комплект задержки и управления (КЗУ)- элемент, управляющий в дальнейшем всей работой прибора. КЗУ 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 короткого замыкания. Дальнейшая работа прибора может идти в более медленном темпе.



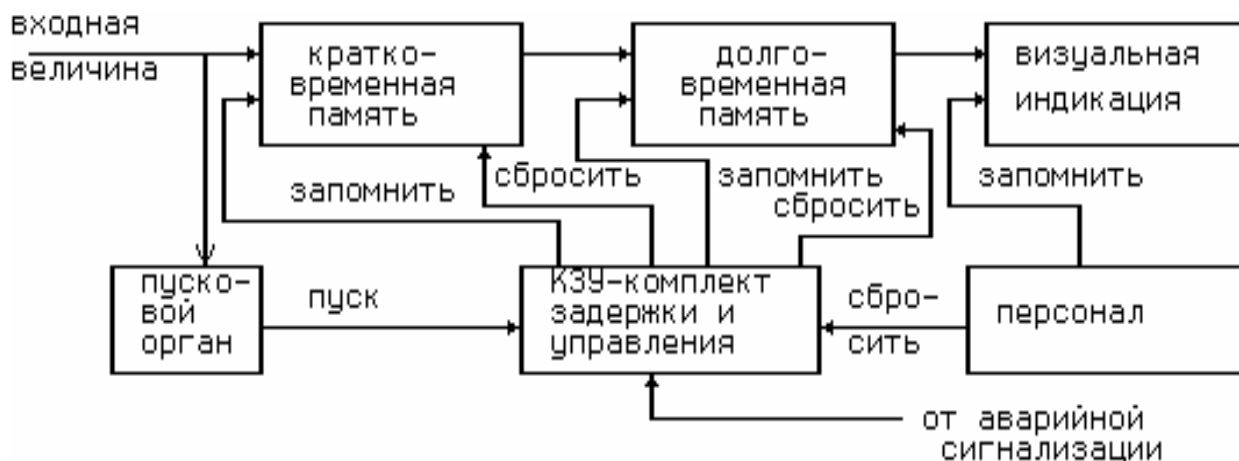


Рис.7. Функциональная схема прибора и его внешние связи

При селективном пуске КЗУ ожидает от аварийной сигнализации подстанции сообщения об отключении данной линии. 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 пределах 30-80 мс, время фиксации 50-120 мс, время ожидания от аварийной сигнализации – 2-3 секунды.

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 рисунками 8 и 9. Согласно рис.6 входная величина через входной трансформатор поступает на пусковой орган (ПО). В нормальном режиме входная величина мала (обусловлена только небалансом фильтров обратной или нулевой последовательности). При КЗ она резко возрастает, пусковой орган срабатывает. При этом обеспечена естественная одновременность пуска приборов на двух концах линии. ПО приводит в действие КЗУ, который с временем отстройки подключает конденсатор С1 на заряд от входной величины. При одинаковом времени отстройки на двух концах линии приборы начинают фиксацию одновременно.

На рис.9 показано изменение во времени входного тока ( $I_{\text{вх}}$ ) и напряжения на конденсаторе ( $U_c$ ) в случае, когда входной ток содержит значительную апериодическую составляющую. Видно, что время отстройки совместно с замедленным зарядом конденсатора могут устранить влияние апериодической составляющей, если она к концу времени фиксации затухнет. Согласно данным (Электротехнический справочник, т.3, кн.1, Энергоатомиздат, 1988, табл.35.5) постоянные времени затухания апериодической составляющей вблизи станций равны 0,2-0,54 с, в глубине сетей 0,02-0,03 с. Следовательно, вблизи станций рассмотренный способ не гарантирует отстройки от апериодической 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 рисунками 10 и 11. Согласно рис.10 измерение напряжения на конденсаторе кратковременной памяти C1 происходит путем периодического разряда его на конденсатор C2. В приборе предусмотрен своеобразный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), который то подключает C2 к C1, то отключает его и разряжает. Если перед  $i$ -м подключением напряжение на C1 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:

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

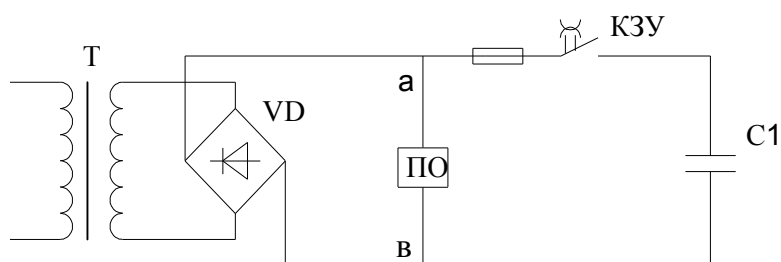


Рис. 8

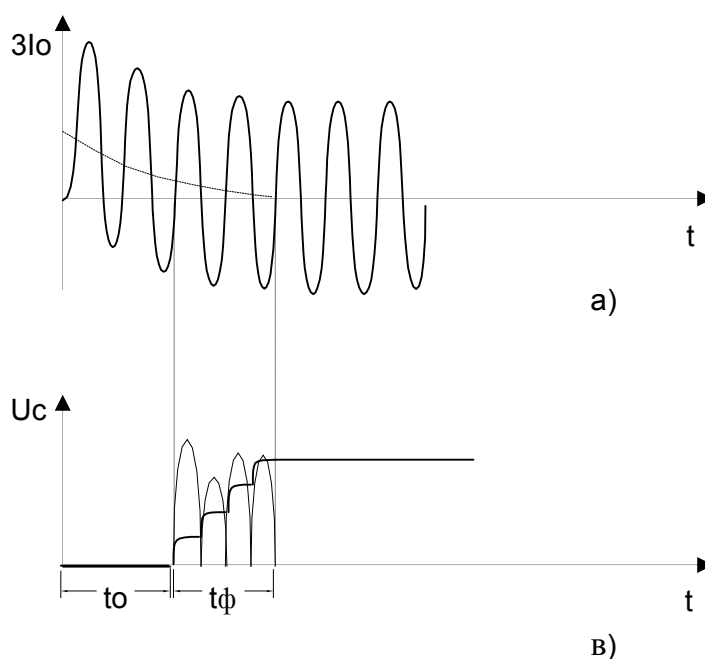
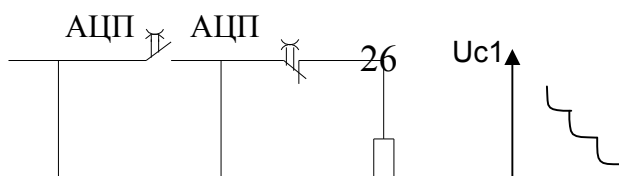


Рис. 9.



Процесс снижения напряжения по мере подключения считывающего конденсатора пояснен рисунком 11. Он продолжается, пока напряжение на конденсаторе не снизится до некоторого наперед заданного значения  $U_k$ . Можно показать, что число разрядов  $N$  для амперметра определяется формулой:

$$N \cong \alpha * \ln (I_0 / I_{н.пр.}), \quad (11)$$

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 таблице 1.

Таблица 1

Прибор	Предел измерения тока, А		Кратность диапазона, о.е.	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

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 замера, так и специально предназначенные для двустороннего замера.

Микропроцессорный прибор одностороннего замера кроме основной информации – вида КЗ, времени, расстояния – выдаёт дополнительную – токи и напряжения всех последовательностей. В случае недостоверности информации о расстоянии (например, при наличии у линии сложной взаимоиндукции) можно установить такие приборы на двух сторонах и считать расстояние по формулам двустороннего замера по составляющим обратной последовательности.

Специально для двустороннего замера выпускается микропроцессорный прибор ИМФ-2. Индикатор микропроцессорный фиксирующий ИМФ-2 предназначен для фиксации тока и напряжения нулевой последовательности сразу на трех воздушных линиях напряжением 110-750 кВ. Подключается к измерительным трансформаторам напряжения к выводам  $3U_0$  и к цепям переменного тока  $3I_0$ . Рабочий диапазон напряжений от 2 до 200 В, токов – либо от 0,4 до 40 А, либо от 2 до 200 А в зависимости от номинала вторичных токов трансформаторов тока. Обеспечивает вывод на индикатор следующей информации:

- номер линии, на которой произошло КЗ и время от момента КЗ;
- действующее значение тока нулевой последовательности поврежденной линии;
- действующее значение напряжения нулевой последовательности поврежденной линии.

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 ВА на фазу при напряжении 58 В. Хранение информации обеспечивается на время до 10 часов после полного исчезновения оперативного тока.

## **7. УПРОЩЕННЫЕ СПОСОБЫ ОДНОСТОРОННЕГО ЗАМЕРА**

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

**7.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ПО УРОВНЮ ТОКА КЗ.** Способ применяется в сетях 6-10 кВ, в основном при наличии воздушных линий, питающих сельскохозяйственную нагрузку. Отличительная особенность таких линий - 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 подстанции.

Для приближенной оценки расстояния на питающей подстанции на вводе от трансформатора устанавливаются приборы, фиксирующие при КЗ величины фазных токов. Показания приборов сравниваются с заранее рассчитанными ожидаемыми токами при КЗ в различных точках линий, на основании чего и делается вывод о расстоянии до точки замыкания. Очевидно, точность подобного ОМКЗ невелика, (величина 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.

**7.2. ЗАМЕР НАПРЯЖЕНИЯ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ НА ПИТАЮЩЕЙ ПОДСТАНЦИИ.** Способ применяется в сетях 6-35 кВ на линиях с односторонним питанием. На питающей подстанции ставится один фиксирующий вольтметр, измеряющий при КЗ напряжение обратной последовательности.

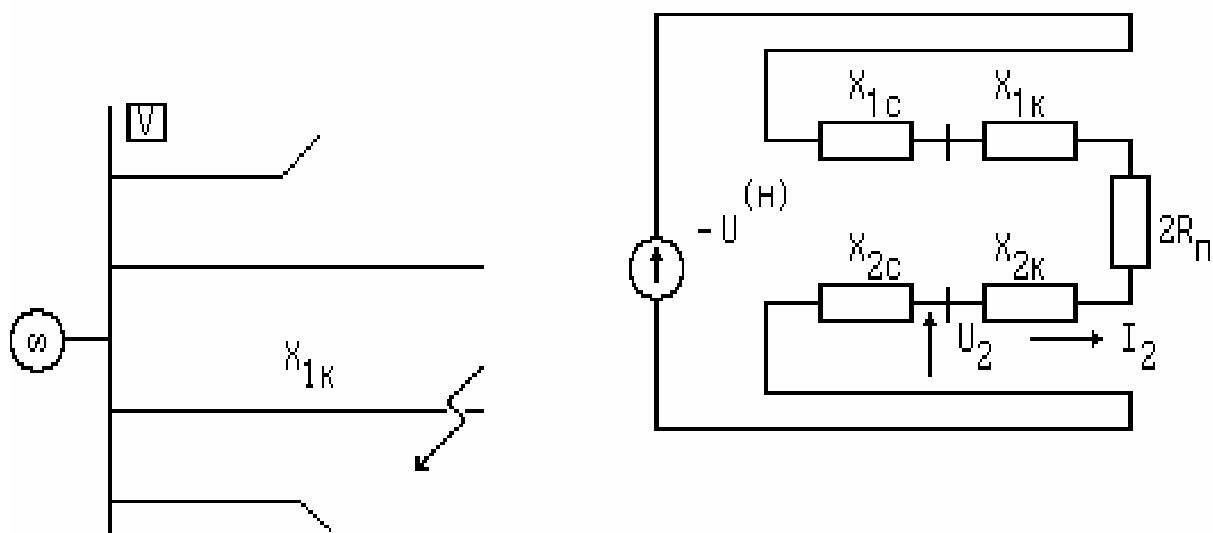


Рис.12. Поясняющая схема и схема замещения аварийного режима при двухфазном КЗ на одной из линий

Схема замещения аварийного режима при двухфазном КЗ на линии показана на рис.12. В схеме имеется один источник ЭДС, равной напряжению предшествующего нагрузочного режима в точке КЗ. Если все сопротивления в схемах обратной последовательности равны соответствующим сопротивлениям в схеме прямой последовательности, то в месте КЗ напряжение обратной последовательности равно половине приложенной ЭДС, а ток обратной последовательности связан и известным напряжением  $U$  через сопротивление системы:

$$U_{2K} = U^{(H)} / 2 ; \quad I_2 = U_2 / X_{2C}$$

(Соотношения записаны для модулей величин, без учета знаков).

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

$$X_{2K} = \frac{0,5U^{(H)} - U_2}{U_2} * X_{2C}. \quad (12)$$

Обычно сопротивление обратной последовательности системы известно с достаточной точностью и можно производить расчет. 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 линий.

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

**7.3. ПРИМЕНЕНИЕ ПРИБОРОВ ТИПА ИМФ-1.** В настоящее время выпускаются приборы типа ИМФ-1, предназначенный для непосредственного определения расстояния до места короткого замыкания на воздушных линиях напряжением 6 – 35 кВ протяженностью до 100 км с дополнительной фиксацией действующих значений токов короткого замыкания, токов прямой и обратной последовательностей, напряжения прямой и обратной последовательностей. (Несколько подробнее микропроцессорные приборы будут рассмотрены ниже).

Расчет расстояния до места КЗ в приборах производится по формуле:

$$L_{кз} = U_{пф} / ( I_{пф} * Z_{уд} ) , \quad \text{где} \quad (13)$$

$$Z_{уд} = \sqrt{X_{уд}^2 + R_{уд}^2}$$

$R_{уд}$  - удельное активное сопротивление линии в схеме прямой последовательности,

$X_{уд}$  - удельное реактивное сопротивление линии в схеме прямой последовательности,

$U_{пф}$  - действующее значение напряжения между поврежденными фазами,

$I_{пф}$  - действующее значение разности токов поврежденных фаз линии.

Следует отметить, что при включении прибора на трансформаторы тока линии возможны значительные погрешности из-за насыщения трансформаторов тока. При включении прибора на трансформаторы тока ввода питающего систему шин силового трансформатора возникает погрешность из-за токов неповрежденных линий. Известны разработки по снижению указанных погрешностей.

## 8. НЕКОТОРЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ

Для понимания дальнейшего материала требуется знание основных положений теории дистанционных защит. Поэтому приводим необходимый минимум сведений по дистанционному принципу релейной защиты.

Измерительные органы дистанционных защит - реле сопротивления реагируют на комплекс отношения напряжения к току:  $\underline{Z} = \underline{U} / \underline{I}$ . При трехфазном металлическом КЗ на одиночной линии рис.2 очевидно соотношение:  $\underline{U}' = \underline{I}' * \underline{Z}_{1К} = \underline{I}' * \underline{Z}_{1УД} * x$ ,

где  $x$  - расстояние до места КЗ,

$\underline{Z}_{1УД}$  - удельное сопротивление линии в схеме прямой последовательности,

$\underline{Z}_{1К}$  - сопротивление линии до места КЗ. Поделив напряжение на ток, получаем  $\underline{Z}_{1УД} * x$ , то есть 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.13. Сопротивления "на зажимах" при металлических КЗ лежат на "оси сопротивления линии", расположенной под углом  $\phi_L$  к оси  $R$ . Угол  $\phi_L$  определяется соотношением активной и индуктивной составляющей удельного сопротивления линии. Некоторое представление о значении этого угла можно получить из таблицы 2-4 "Руководящих указаний по релейной защите", вып. 11, "Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 100-750 кВ". Согласно указанной

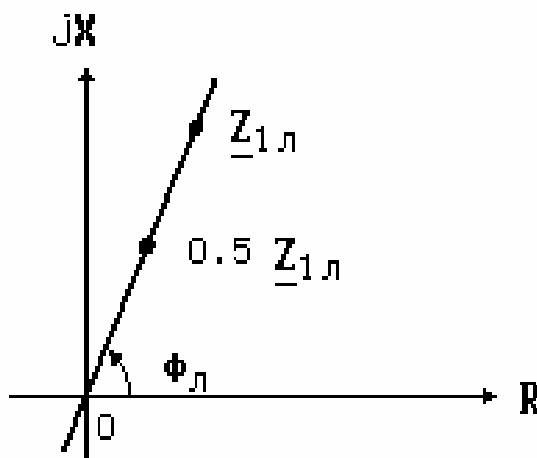


Рис.13. Сопротивления на зажимах дистанционного устройства при металлических КЗ на линии

таблице угол  $\phi_L$  для линий 110 кВ лежит в пределах от  $35^\circ$  (провод АС-50) до  $78^\circ$  (провод АСО-400), для линий 220 кВ от  $73^\circ$  (провод АСО-240) до  $84^\circ$  (провод АСО-500), для линий 500 кВ от 84 до 87 градусов. Среднее значение для 110 кВ равно  $65^\circ$ , для 220 кВ –  $75^\circ$ .

При КЗ "в направлении срабатывания" дистанционной защиты сопротивления на рис.13 лежат в первом квадранте плоскости, при КЗ "за



спиной" - в третьем квадранте плоскости; при переходе КЗ на смежные линии сопротивление уходит вверх за точку  $\underline{Z}_{1Л}$ .

На дистанционном принципе работают дистанционные защиты линий. Измерительный орган такой защиты от междуфазных КЗ содержит три реле сопротивления, включенные на три "петли междуфазных КЗ": первое на напряжение  $\underline{U}_{AB}$  и ток  $(\underline{I}_A - \underline{I}_B)$ , второе на  $\underline{U}_{BC}$  и  $(\underline{I}_B - \underline{I}_C)$ , третье на  $\underline{U}_{CA}$  и  $(\underline{I}_C - \underline{I}_A)$ . Измерительный орган дистанционной защиты от КЗ на землю содержит три реле, включенных на три "петли фаза-земля":  $\underline{U}_\Phi$  и  $(\underline{I}_\Phi + K\underline{I}_0)$ . Смысл такого включения ясен из выражения (2) – только оно обеспечивает при металлическом замыкании на землю замер, равный сопротивлению линии до места КЗ в схеме прямой последовательности  $\underline{Z}_{1К}$ .

Как видим, дистанционный принцип сам по себе обеспечивает односторонний замер расстояния до места КЗ, но только при металлических замыканиях. При КЗ через переходное сопротивление пропорциональность между сопротивлением на зажимах и расстоянием исчезает. Напряжение  $\underline{U}'$  в схеме рис.14 можно получить сложением напряжения в точке К с падением напряжения в сопротивлении линии  $\underline{Z}_{1К}$ :  $\underline{U}' = (\underline{I}' + \underline{I}'')\underline{R}_\Pi + \underline{I}' \underline{Z}_{1К}$ . Сопротивление, измеренное дистанционным устройством, равно:

$$\underline{Z} = \underline{U}' / \underline{I}' = \underline{Z}_{1К} + \frac{\underline{I}' + \underline{I}''}{\underline{I}'} \underline{R}_\Pi = \underline{Z}_{1К} + \Delta \underline{Z} \quad (14)$$

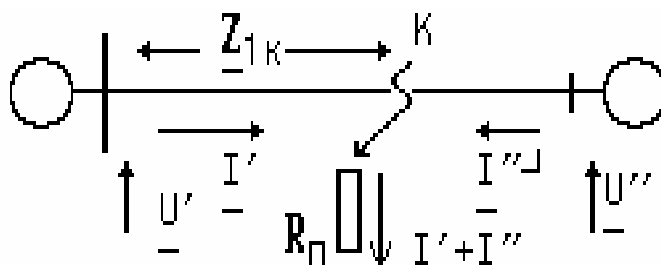


Рис.14. КЗ через переходное сопротивление

Как видим, из-за переходного сопротивления появляется вектор  $\Delta \underline{Z}$ , величина которого определяется не только током своего конца линии, но и током противоположного конца линии. Однозначная зависимость между замером 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 А :  $(\underline{I}' + \underline{I}'') = 3\underline{I}_{0K}$  , при двухфазном КЗ фаз В и С :  $(\underline{I}' + \underline{I}'') = j\sqrt{3} \underline{I}_{2KA}$  . С учетом этого формулу для  $\Delta Z$  при однофазном КЗ (в плоскости  $\underline{U}_\Phi / (\underline{I}_\Phi + \underline{K}\underline{I}_0)$  ) и для двухфазного КЗ (в плоскости  $\underline{U}_{BC} / (\underline{I}_B - \underline{I}_C)$  ) можно переписать в виде:

$$\Delta Z^{(1)} = \frac{3\underline{I}_{0K} R_\Pi}{\underline{I}_\Phi + \underline{K}\underline{I}_0} ; \quad (15)$$

$$\Delta Z^{(2)} = \frac{j\sqrt{3} \underline{I}_{2KA} R_\Pi}{\underline{I}_B - \underline{I}_C} . \quad (16)$$

В дальнейшем указанные формулы помогут нам определить если не величину, то хотя бы направление вектора  $\Delta \underline{Z}$ .

Направление вектора  $\Delta \underline{Z}$  зависит от фазных соотношений между входящими в формулы (15) и (16) токами (само  $R_\Pi$  имеет активный характер). Общая закономерность следующая (рис.15). Если отсутствуют составляющие токов нагрузочного режима (например, КЗ на линии с односторонним питанием), то вектор  $\Delta \underline{Z}$  горизонтален (вектор  $\Delta \underline{Z}'$  на рис.15). На передающем конце линии (например, линия отходит от станции) вектор уходит вниз (вектор  $\Delta \underline{Z}''$  на рис.15). На приемном конце линии вектор уходит вверх ( $\Delta \underline{Z}'''$  на рис.15). Объясняется это тем, что с ростом переходного сопротивления сопротивление на зажимах стремится от точки  $\underline{Z}_{1K}$  к точке сопротивления в нагрузочном режиме  $\underline{Z}^{(H)}$ .

Само сопротивление в нагрузочном (доаварийном) режиме равно отношению  $\underline{U}^{(H)} / \underline{I}^{(H)}$  и лежит в бесконечности на ненагруженной линии (или линии с односторонним питанием при пренебрежении ее нагрузкой), в первом

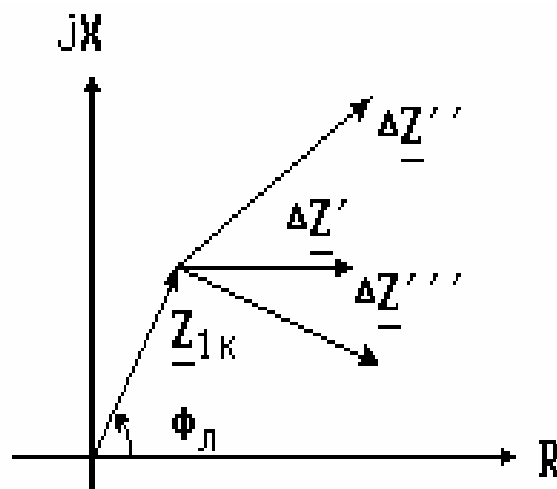


Рис.15. Положение вектора  $\Delta \underline{Z}$  на плоскости

квадранте на передающем конце линии (выдача активной мощности эквивалентна положительным значениям  $R$ ), во втором или даже третьем квадрантах на приемном конце линии (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  $\underline{Z}_{1K}$  и  $\underline{Z}^{(H)}$  - годограф сопротивления. Вид таких годографов приведен на рис.16 для линии 220 кВ с параметрами, указанными в разделе 2 данной работы. Приведены годографы при КЗ в начале линии (сплошные чертежные линии) и в конце (пунктирные чертежные линии) для двух нагрузочных режимов - режим выдачи мощности с углом  $\psi = \arg(\underline{E}_2 / \underline{E}_1) = -60^\circ$  и режим приема мощности с  $\delta = 60^\circ$  ( $\underline{E}_2$  и  $\underline{E}_1$  - ЭДС системы противоположного конца линии и ЭДС системы прилегающего конца линии). Как видно из рисунка, на передающем конце линии годограф движется по короткой дуге окружности и не уходит из первого квадранта. На приемном конце линии годограф движется по длинной дуге окружности и переходит из первого во второй квадрант. Плохо, что он при этом пересекает ось сопротивления линии - при пересечении сопротивление на зажимах такое же, как при металлическом замыкании в весьма удаленной точке.

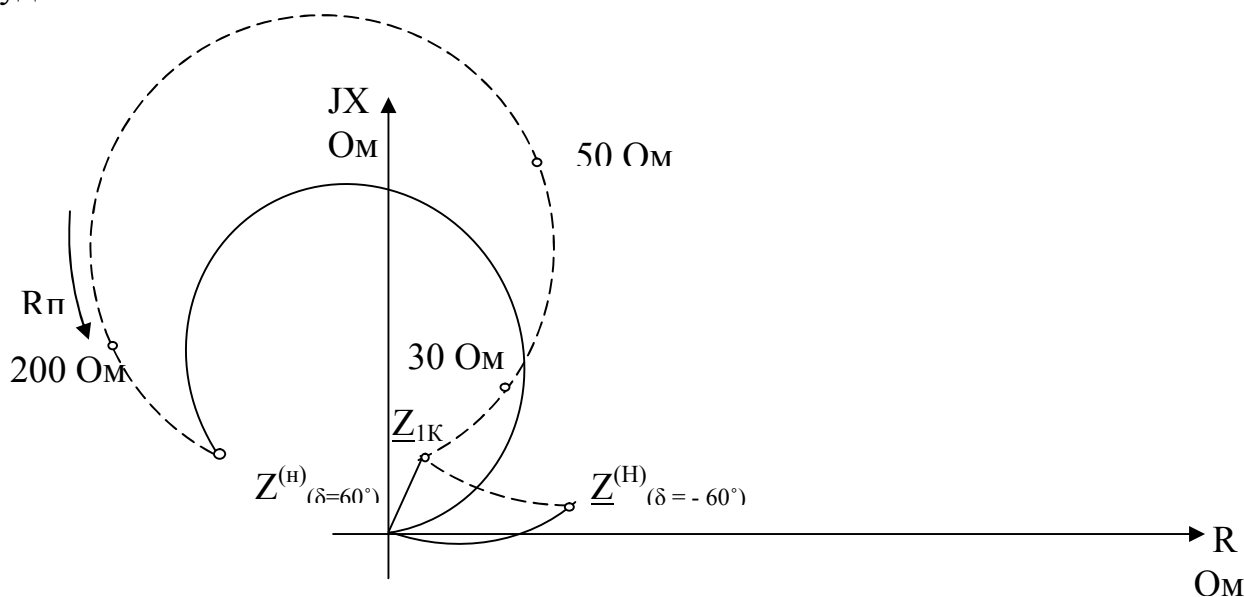


Рис.16.Годографы сопротивлений на зажимах при однофазных КЗ через переходное сопротивление, изменяющееся от 0 до  $\infty$ .

Плохо, что на приемном конце линии 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 замере устройства на передающих концах линии имеют гораздо меньшие погрешности, чем устройства на приемных концах.

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

## 9. ТЕОРИЯ ОДНОСТОРОННЕГО ЗАМЕРА НА ЛИНИИ С ДВУСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

Первым из приборов одностороннего замера, 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":  $X = \text{Im} ( \underline{U}_\phi / ( \underline{I}_\phi + \underline{K}\underline{I}_0 ) )$ . Непосредственно из рис.15 можно заключить, что влияние переходного сопротивления исключалось только либо на ненагруженных линиях, либо на линиях с односторонним питанием. Для расширения области применения делались попытки осуществлять замер в режиме каскадного включения линии 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 (15) и (16) и рисунку 15, замер дистанционного устройства  $\underline{Z}$  складывается из сопротивления линии 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 линии; направление вектора  $\Delta\underline{Z}$  можно найти почти точно. Для пояснения обратимся к формуле (15) для случая однофазного короткого замыкания. Если считать переходное сопротивление чисто активным, то направление  $\Delta\underline{Z}$  определяется соотношением токов  $\underline{I}_{0К}$  и  $(\underline{I}_\phi + \underline{K}\underline{I}_0)$ . Токи  $\underline{I}_\phi$  и  $\underline{I}_0$  можно измерить на данном конце линии. Ток  $\underline{I}_{0К}$  существует только в месте замыкания. Однако к этому току весьма близок по фазе ток нулевой последовательности  $\underline{I}_0$ , поскольку токораспределение по схеме нулевой последовательности мало меняет фазу токов в отдельных элементах. Для угла, под которым вектор  $\Delta\underline{Z}$  наклонен к горизонтали, можно написать формулу:

$$\arg \Delta\underline{Z} = \arg[\underline{I}_{0К}/(\underline{I}_\phi + \underline{K}\underline{I}_0)] = \arg[\underline{I}_0/(\underline{I}_\phi + \underline{K}\underline{I}_0)] - \arg[\underline{I}_0/\underline{I}_{0К}] = \alpha - \beta,$$

$$\text{где } \alpha = \arg[\underline{I}_0 / (\underline{I}_\Phi + \underline{K}\underline{I}_0), \quad \beta = \arg[\underline{I}_0 / \underline{I}_{0K}] \quad (17)$$

Угол  $\alpha$  может быть сосчитан по измерениям на одном конце линии. Угол  $\beta$  очень мал, им иногда можно пренебречь.

Графическое решение задачи определения  $\underline{Z}_{1K}$  пояснено на рис.17. На комплексной плоскости построены вектор  $\underline{Z}$  и ось сопротивления линии. Затем через точку конца вектора  $\Delta \underline{Z}$  проведена прямая под углом  $\alpha - \beta$  к горизонтали. Пересечение прямой с осью сопротивления дает точку конца вектора  $\underline{Z}_{1K}$ , в частности, реактивное сопротивление до места КЗ -  $X_{1K}$

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

$$X_{1K} = \frac{X - R \operatorname{tg}(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg} \phi_L - \operatorname{tg}(\alpha - \beta)} \operatorname{tg} \phi_L, \quad (18)$$

где  $\operatorname{tg} \phi_L = X_L/R_L$ ,  $X$  и  $R$  – составляющие вектора  $\underline{Z}$ .

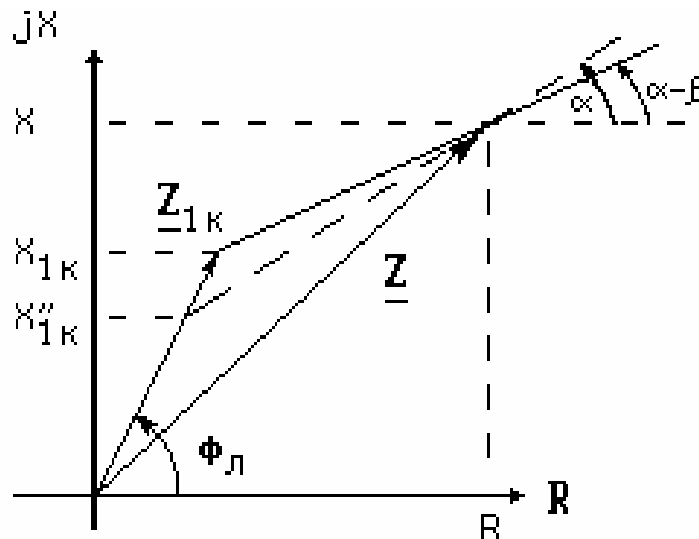


Рис.17 К пояснению принципа одностороннего ОМКЗ

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

$$X_{1K}'' = \frac{X - R \operatorname{tg}(\alpha)}{\operatorname{tg} \phi_L - \operatorname{tg}(\alpha)} \operatorname{tg} \phi_L, \quad (19)$$

Графическая интерпретация приближенного решения показана на рис.17: если через конец вектора  $\underline{Z}$  провести прямую не под углом  $(\alpha - \beta)$ , а под углом  $\alpha$ , то получим не точное решение  $X_{1K}$ , а приближенное  $X_{1K}''$ . Следовательно, односторонний замер оказался возможным потому, что направление тока  $\underline{I}_{0K}$  приняли совпадающим с направлением тока  $\underline{I}_0$ .

В[7] введено понятие *опорного тока* - тока, близкого по фазе к току в переходном сопротивлении. Для однофазного КЗ это либо ток нулевой последовательности  $\underline{I}_0$ , либо ток обратной последовательности  $\underline{I}_2$ , либо аварийная составляющая тока прямой последовательности  $\underline{I}_1 - \underline{I}^{(H)}$ , либо аварийная составляющая тока фазы  $\underline{I}_\Phi - \underline{I}^{(H)}$ . Для использования аварийных составляющих необходимо знание тока предшествующего нагрузочного режима  $\underline{I}^{(H)}$ . Для этого прибор 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 систем не успел значительно измениться - иначе в аварийную составляющую войдет и часть тока прямой последовательности, что приведет к погрешностям.

Из формулы (16) следует, что при замыкании двух фаз (В и С) без земли в качестве опорного следует принимать ток  $j\underline{I}_{2KA}$ . Тогда формулы (18) и (19) не изменятся, но анализ следует вести в плоскости сопротивления петли междуфазного КЗ. Например, при КЗ между фазами В и С:

$$\begin{aligned} R &= \operatorname{Re} [\underline{U}_{BC} / (\underline{I}_B - \underline{I}_C)], & X &= \operatorname{Im} [\underline{U}_{BC} / (\underline{I}_B - \underline{I}_C)] \\ \alpha &= \arg[\underline{I}_{2A} / (\underline{I}_B - \underline{I}_C)] + 90^\circ, & \beta &= \arg[\underline{I}_{2A} / \underline{I}_{2KA}]. \end{aligned} \quad (20)$$

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 замере вообще не удастся.

## 10. ВАРИАНТЫ СПОСОБОВ ОДНОСТОРОННЕГО ЗАМЕРА

Техническая реализация одностороннего замера возможна многими путями, но все 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

$$\Delta \underline{Z}_{уд} = \frac{3 \underline{I}_0}{\underline{C}_{0P} (\underline{I}_\Phi + K \underline{I}_0)}, \quad (21)$$

$$\text{где } \underline{C}_{0P} = (\underline{Z}_{00} - \underline{Z}_{0C} - \underline{Z}_{0K}) / \underline{Z}_{00} = \underline{I}_0 / \underline{I}_{0K} \quad (22)$$

-коэффициент токораспределения по схеме нулевой последовательности,  $\underline{Z}_{0C}$ ,  $\underline{Z}_{0K}$ ,  $\underline{Z}_{00}$  - сопротивления прилегающей системы, линии до точки КЗ и суммарное сопротивление всей схемы нулевой последовательности.

Можно сказать, что  $\Delta \underline{Z}_{уд}$  - "кажущееся" с данного конца линии сопротивление одного Ома переходного сопротивления. В [6] показано, что если в ходе расчета принять слишком малое предполагаемое расстояние до предполагаемого места КЗ, то угол  $\arg(\Delta \underline{Z} / \Delta \underline{Z}_{уд})$  положителен. Если расстояние преувеличено, угол отрицателен. При точном значении расстояния угол равен нулю. Особенно целесообразно применять итерационные расчеты на длинных линиях, где с удалением точки КЗ меняется и значение, и фаза тока нулевой последовательности.

*РАСЧЕТЫ ЗНАЧЕНИЙ ЦЕЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПРЕДПОЛАГАЕМОГО МЕСТА КЗ ВДОЛЬ ЛИНИИ.* В разделе 2 уже описан способ идентификации параметров линии, основанный на расчете значений целевых функций при перемещении предполагаемого места КЗ вдоль всей длины линии. В качестве прямой целевой функции можно использовать значение реактивной мощности в точке КЗ - по выражению (4). Однако для этого следует знать  $\underline{I}_f$  - ток в переходном сопротивлении, что возможно только при двустороннем замере. 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 нулевой или обратной последовательностей, можно взять аварийную составляющую тока прямой последовательности либо тока фазы. Тогда выражение (4) приобретает вид:

$$\begin{aligned} & * \\ Q_0 &= \text{Im} [\underline{U}_f \underline{I}_0] = 0 ; \end{aligned}$$

$$* \\ Q_2 = \text{Im} [\underline{U}_f \underline{I}_2 ] = 0 ; \quad (23)$$

$$* \\ Q_{ав} = \text{Im} [\underline{U}_f \underline{I}_{ав} ] = 0 .$$

Можно строить графики изменения целевой функции при перемещении предполагаемого места КЗ вдоль линии (как на рис.3). Тогда точка КЗ определяется по пересечению графика с осью линии. Можно сразу сосчитать значение целевой функции в месте установки прибора и поделить его на потери реактивной мощности в одном километре линии. Все равно результат будет один и тот же и точно совпадет с результатом расчета по формуле (19).

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА КЗ ПО МГНОВЕННЫМ ЗНАЧЕНИЯМ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ.** Способы ООМКЗ, рассмотренные выше, основаны на расчетах по интегральным параметрам электрических величин (токов, напряжений). Термин интегральные параметры появился с внедрением ЭВМ в технику релейной защиты 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 замера и обработки ряда мгновенных значений, т.е. после суммирования - интегрирования информации о мгновенных значениях.

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

Пусть однофазное КЗ через сопротивление  $\underline{R}_\Pi$  произошло на расстоянии  $l$  на линии с удельными параметрами  $R_{уд}, L_{уд}$ . Мгновенное значение напряжения на данном конце линии равно:  $u = l (R_{уд} i + L_{уд} \frac{di}{dt}) + R_\Pi i_K$ ; удельное падение напряжения на одном километре линии равно:  $\Delta u \equiv R_{уд} i + L_{уд} \frac{di}{dt} = (i_\Phi + K i_0) \cdot Z_{1уд}$ .

Если выбрать момент, когда ток в месте КЗ  $i_K$  равен нулю, то в формуле для напряжения исчезнет слагаемое, содержащее  $R_\Pi$ . Тогда получаем простую формулу:

$$l = \frac{u}{\Delta u} \quad \Bigg| \quad i_K = 0. \quad (24)$$

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 (19).

С учетом (24) просто понять формулу, по которой определяется расстояние до места однофазного КЗ в приборах МИР, ФПМ, ИМФ:

$$l = \frac{\operatorname{Im} \left[ \frac{\underline{U}_\Phi}{\underline{I}_0} \right]}{\operatorname{Im} \left[ \frac{(\underline{I}_\Phi + \underline{K} \underline{I}_0) \underline{Z}_{\text{уд}}}{\underline{I}_0} \right]}. \quad (25)$$

В формуле замер мгновенных значений  $u$  и  $\Delta u$  в момент перехода  $i_0$  через нулевое мгновенное значение заменен на расчет проекции на мнимую ось, перпендикулярную вектору  $\underline{I}_0$ , интегральных величин  $\underline{U}_\Phi$  и  $\Delta \underline{U}_\Phi$ .

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 ЛИНИЯМИ.** Выпускаемые в настоящее время приборы способны учесть взаимную индукцию с одной из параллельных линий, для чего к прибору подводится ток нулевой последовательности этой линии  $\underline{I}_{0\text{ II}}$ . При наличии взаимоиндукции по всей длине линии в формуле (25) для расстояния до места однофазного КЗ вместо  $(\underline{I}_\Phi + \underline{K} \underline{I}_0)$  появляется  $(\underline{I}_\Phi + \underline{K} \underline{I}_0 + \underline{K}_m \underline{I}_{0\text{ II}})$ , где  $\underline{K}_m = X_m / X_1$  - коэффициент компенсации по току нулевой последовательности параллельной линии. При других видах замыканий - трехфазных, двухфазных или двухфазных на землю взаимоиндукция не учитывается, поскольку весь расчет идет по петле междуфазного КЗ.

Если взаимоиндукция имеется не по всей длине линии, а лишь на начальном участке, то вначале расчет ведут с учетом взаимоиндукции. Но если результат расчета окажется большим, чем длина участка с взаимоиндукцией  $l_m$ , то производят пересчет с "мысленным переносом" прибора в точку конца участка с взаимоиндукцией. Напряжение фазы в указанной точке равно

$$\underline{U}_{\Phi m} = \underline{U}_\Phi - (\underline{I}_\Phi + \underline{K} \underline{I}_0 + \underline{K}_m \underline{I}_{0\text{ II}}) l_m \underline{Z}_{\text{уд}},$$

токи всех фаз за пределами участка с взаимоиндукцией те же, что и в месте замера. Поэтому пересчет расстояния после "мысленного переноса" прибора не представляет трудностей.

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

**УЧЕТ ОТВЕТВЛЕНИЙ С ТРАНСФОРМАТОРАМИ С ЗАЗЕМЛЕННЫМИ НЕЙТРАЛЯМИ.** Схема линии с одним ответвлением приведена на рис.6. Если

нейтраль трансформатора не заземлена, то влиянием ответвления можно пренебречь, поскольку токи нагрузки много больше токов короткого замыкания. При заземленной нейтрали расчет расстояния за ответвлением без учета подпитки от нейтрали будет неточен, поскольку указанная подпитка соизмерима с токами нулевой последовательности в месте замера. В этом случае расчет также ведется с "мысленным переносом прибора". Вначале расстояние считается по электрическим величинам в точке замера без учета ответвления. Если подсчитанное расстояние меньше  $L_{OT}$ , то расчет заканчивается. Но если больше, то расчет повторяется с "переносом прибора" в точку ответвления. Напряжение нулевой последовательности в указанной точке равно  $\underline{U}_{0Б} = \underline{U}_0 - \underline{I}_0 L_{OT} \underline{Z}_0$  уд : ток нулевой последовательности за точкой ответвления равен  $\underline{I}_{0Б} = \underline{I}_0 - \underline{U}_{0Б} / jX_{OT}$ . 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 линии без ответвлений.

## 11. ПОГРЕШНОСТИ ОДНОСТОРОННЕГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ЗАМЫКАНИЯ

Рассмотренные способы имеют ряд источников погрешностей. Некоторые из них общие с любыми устройствами, работающими на дистанционном принципе - неточность работы трансформаторов тока и трансформаторов напряжения, влияние свободных составляющих переходного электромагнитного процесса, неточность знания параметров обслуживаемой линии. Но есть и специфические источники методической погрешности - влияние взаимных индукций с другими линиями и влияние комплексности токораспределения по схеме нулевой последовательности.

Влияние взаимоиндукций сказывается, если этих взаимоиндукций больше, чем может учесть прибор. Приборы МИР, ФПМ, ИМФ способны учесть влияние лишь одной взаимной индукции (у них есть входы для токов трех фаз обслуживаемой линии и для тока нулевой последовательности еще одной линии). Между тем из соображений экономии земли линии от подстанции обычно отходят коридорами, создавая многочисленные взаимоиндукции. Из всех взаимоиндукций приходится выбирать одну - наиболее сильно влияющую. Неучет остальных вызывает погрешности замера.

Принципиально указанную погрешность можно устранить создавая систему сбора информации от всех линий, отходящих по данному коридору.

Подобные системы известны и существуют компьютерные программы, ведущие расчеты по данным многих приборов. Еще проще решается проблема, если на подстанции установлены цифровые осциллографы, собирающие информацию со всех присоединений. Компьютер, в который сходится информация, способен учесть взаимное влияние всех линий.

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

Комплексность токораспределения по схеме нулевой последовательности - комплексность коэффициента токораспределения  $\underline{C}_{0p}$ , определяемого выражением (22). Если коэффициент является комплексным числом, то ток нулевой последовательности в месте замера имеет угол с током в переходном сопротивлении. В общем случае этот угол всегда имеется, поскольку в схеме рис.2 сопротивление нулевой последовательности систем почти чисто индуктивно, а сопротивление линии 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 (18), а по приближенной формуле (19), не учитывающей угла  $\beta = \arg(\underline{C}_{0p})$ .

Сам угол  $\beta$  невелик. О значении этого угла можно судить по рис.18, на котором показана его зависимость от расстояния при перемещении точки КЗ по одиночной линии с сопротивлением  $\underline{Z}_{0Л} = 35 e^{j78^\circ} \text{ Ом}$ .

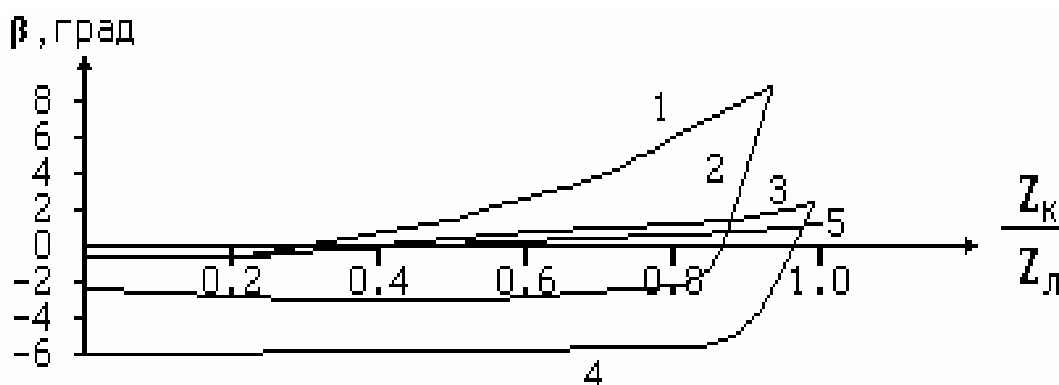


Рис.18.Изменение угла и при удалении точки КЗ:

1-  $\underline{Z}_{0c1} = j1 \text{ Ом}$ ,  $\underline{Z}_{0c2} = j10 \text{ Ом}$ ; 2-  $\underline{Z}_{0c1} = j10 \text{ Ом}$ ,  $\underline{Z}_{0c2} = j1 \text{ Ом}$ ;

3-  $\underline{Z}_{0c1} = j10 \text{ Ом}$ ,  $\underline{Z}_{0c2} = j100 \text{ Ом}$ ; 4-  $\underline{Z}_{0c1} = j100 \text{ Ом}$ ,  $\underline{Z}_{0c2} = j10 \text{ Ом}$ ;

$$5- Z_{0c1} = j1 \text{ Ом}, Z_{0c2} = j10 \text{ Ом}$$

Принят довольно широкий диапазон изменения сопротивления систем (с1-прилегающая к месту установки устройства система, с2- система противоположного конца линии). При индуктивных системах и активно-индуктивной линии угол  $\beta$  при КЗ в начале линии всегда отрицателен, при КЗ в конце линии всегда положителен.

На линии всегда имеется точка с  $\beta=0$ , при КЗ в которой погрешность замера равна нулю при любом переходном сопротивлении. Погрешность при КЗ в других точках зависит от величины переходного сопротивления, от значения угла  $\beta$  и от токов нагрузочного режима. Примеры зависимости погрешности от расстояния и от составляющих нагрузочного режима приведены на рис.19. Рассматривалось КЗ через переходное сопротивление в 30 Ом на линии 220 кВ с параметрами, приведенными в разделе 2 (см. также рис.3 и рис.16).

Токи нагрузочного режима определены углом между ЭДС систем ( $\delta = \arg(\underline{E}_2/\underline{E}_1)$ ). Отрицательные углы между ЭДС - передающий конец линии. Положительные углы - приемный конец линии. Видно, что при КЗ в начале линии погрешности невелики, при КЗ в конце могут быть весьма большие (положительные погрешности соответствуют заниженному результату расчета). На передающем конце линии погрешности всегда малы, на приемном могут быть весьма значительными.

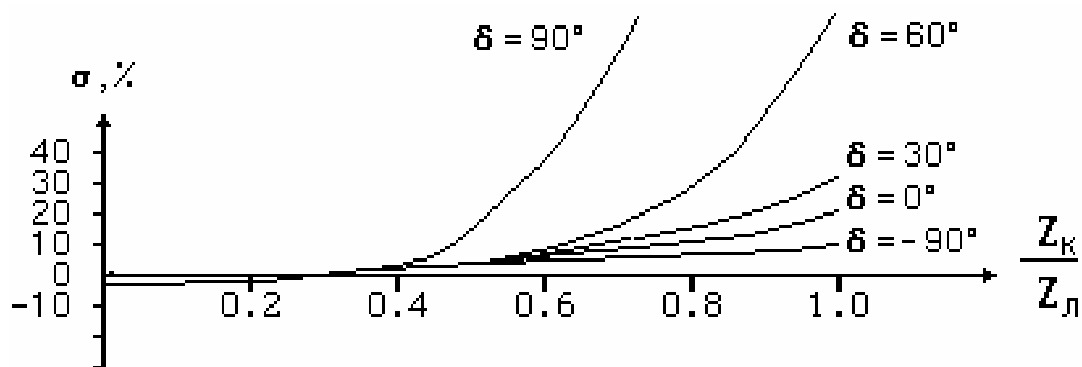


Рис.19. Погрешности замера от комплексности токораспределения

Причина больших погрешностей ясна из рассмотрения годографов рис.16. На передающем конце линии годограф всегда лежит в первом квадранте, вектор  $\Delta Z$  невелик и погрешности от неучета угла величиной в несколько градусов незначительны. На приемном конце линии годограф переходит из первого во второй квадрант комплексной плоскости сопротивлений. Когда

сопротивление на зажимах близко к оси сопротивления линии, даже незначительная ошибка по углу приводит к большой погрешности расчета.

Известны пути уменьшения влияния комплексности токораспределения. Согласно [6] для этого следует решать совместно уравнения (18) зависимость расстояния от электрических величин и (22) - зависимость  $\beta$  от расстояния. В результате получается квадратное уравнение, один из корней которого дает искомое расстояние.

Другой путь - предложенное в [7] использование прямой целевой функции. Однако уже указано, что это возможно только при двустороннем замере.

## 12. ВЫПОЛНЕНИЕ ПРИБОРОВ ОДНОСТОРОННЕГО ЗАМЕРА

Приборы одностороннего замера 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, ФПМ, ИМФ - приборы имеют минимальные различия в техническом исполнении и в алгоритмах. Рассматриваемые приборы явились первыми микропроцессорными устройствами, в массовом масштабе внедренными в отечественную энергетику. Объясняется сравнительная легкость их внедрения несовершенством прежде существовавших приборов двустороннего замера и несомненно большим удобством одностороннего замера для оперативного персонала.

*СТРУКТУРНАЯ СХЕМА* прибора представлена на рис.20 [9]. Токи и напряжения контролируемой линии  $I_A, I_B, I_C, U_A, U_B, U_C$ , а также ток нулевой последовательности одной параллельной линии  $I$  (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.

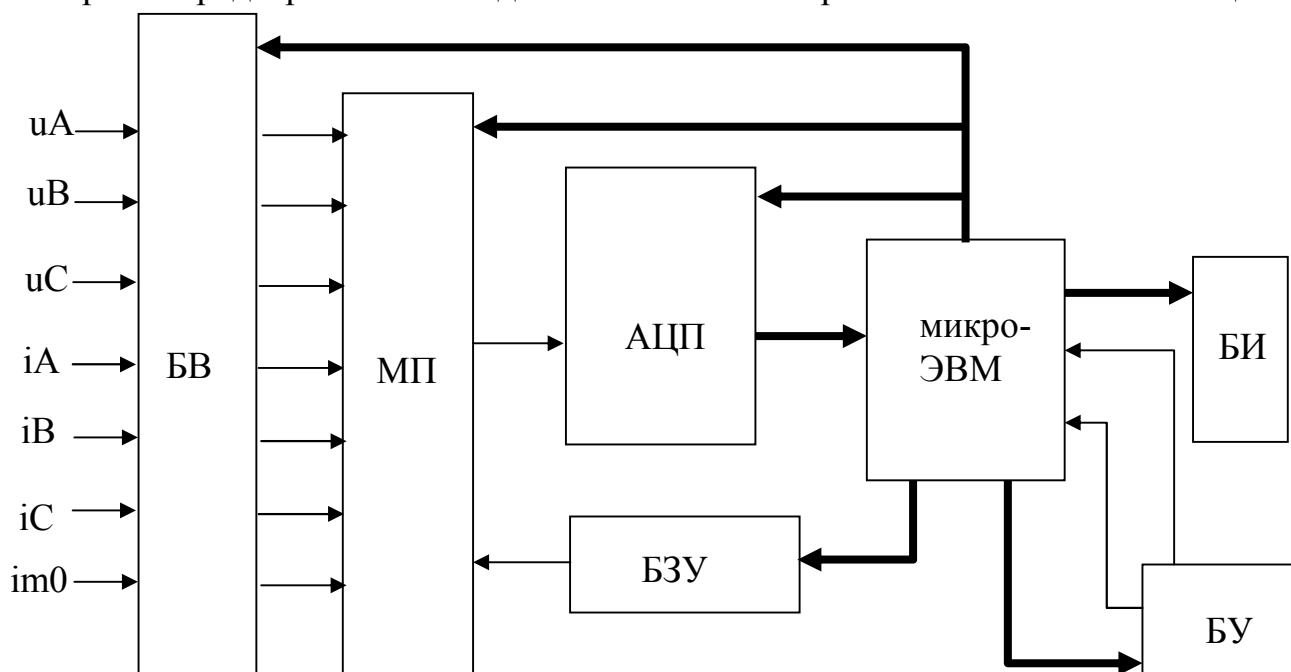


Рис.20. Структурная схема прибора

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

После предварительной обработки в блоке БВ токи и напряжения поступают на входы мультиплексора МП, который по команде микро-ЭВМ подключает к аналоговому входу аналого-цифрового преобразователя АЦП тот или иной канал. При этом производится аналого-цифровое преобразование соответствующего тока или напряжения. Прибор успевает сделать по 23 дискретных мгновенных замера каждой из семи входных величин за период. Кроме токов и напряжений к аналоговому входу АЦП подводятся выходные напряжения блока задания уставок (информации о параметрах данной линии) БЗУ, 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. БУ содержит две кнопки управления, при помощи которых осуществляются указанные операции.

*СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ* прибора ФПМ представлена на рис.21. При подаче оперативного питания осуществляется автоматический пуск выполнения программы работы ФПМ. Первым выполняемым программным блоком является блок контроля меток и сигналов управления. При выполнении этого блока осуществляется опрос кнопок управления, состояния внешнего разрешающего сигнала (о факте отключения выключателя - аналог селективного пуска в приборах двустороннего замера), а также 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 программный блок реализует контроль состояния внутреннего таймера устройства, который запускается при срабатывании. Если после срабатывания прошло время более 32 часов, то таймер останавливается и сбрасывается на ноль

В зависимости от состояния таймера и результатов, полученных при выполнении блока контроля меток и сигналов управления, выбирается один из 4-х 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:

1. после последнего срабатывания прошло более 32 часов;
2. после снятия показаний оперативным персоналом;
3. после предыдущего срабатывания в течении 10 сек не происходило хотя бы кратковременной подачи разрешающего сигнала РС (третье условие обеспечивает возврат в состояние готовности приборов не отключавшихся линий).

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

$$4 * I_2 > I_1,$$

где  $I_1$ ,  $I_2$  - токи прямой и обратной последовательности соответственно.

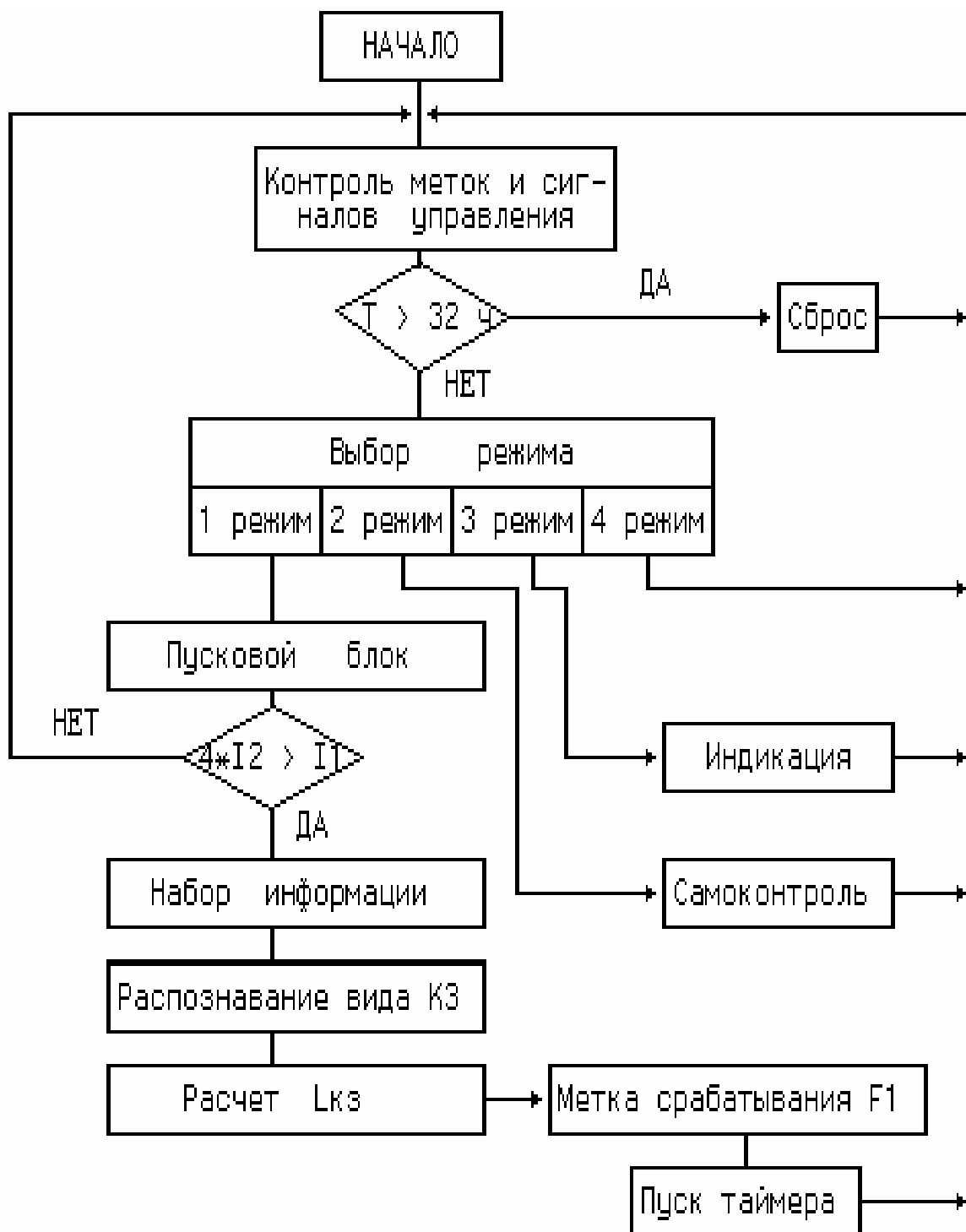


Рис.21. Структура программного обеспечения ФПМ-01

При трехфазном КЗ дополнительным условием срабатывания является:

$$I_1 > I_n,$$

где  $I_n$  - номинальный ток измерительных трансформаторов тока.



После пуска прибор два периода фиксирует токи и напряжения. 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:

1. после срабатывания ФПМ прошло время менее 32 часов;
2. было зафиксировано появление разрешающего сигнала РС;
3. 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 линии. Последовательность решения задачи следующая.

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

$$4 * I_2 < I_1 > I_n , \quad (26)$$

где  $I_n$  - номинальный ток трансформаторов тока контролируемой линии.

2. Если не выполняется только правая часть (26), то устройство прекращает дальнейший анализ собранных данных и возвращается в исходное состояние (неселективный пуск).

3. Если не выполняется левая часть (26), то проверяется наличие двухфазного КЗ. КЗ будет сочтено двухфазным при выполнении условия:

$$6 * I_0 < I_2 . \quad (27)$$

При этом осуществляется распознавание повредившихся фаз путем проверки выполнения фазовых соотношений между токами обратной и нулевой последовательностей.

4. При невыполнении (26) и (27) фиксируется наличие замыкания на землю и осуществляется разделение однофазных замыканий на землю от

двухфазных замыканий на землю. Разделение этих двух замыканий осуществляется путем проверки фазовых соотношений между токами нулевой, обратной и прямой последовательностей.

В зависимости от вида короткого замыкания для определения расстояния до места повреждения используются различные выражения, в которые подставляются соответствующие величины токов и напряжений. Расстояние подсчитывается по выражению

$$L = Z / Z_{\text{уд.}}$$

Сопротивление до места трехфазного КЗ:

$$Z = \text{Re} (\underline{U}_{ab}/\underline{I}_c) / \text{Re} (\underline{I}_{ab} * \underline{P}/\underline{I}_c);$$

$$\text{двухфазного КЗ(bc)} \quad Z = \text{Re} [(\underline{U}_b - \underline{U}_c)/\underline{I}_{2a}] / \text{Re} [(\underline{I}_b - \underline{I}_c) * \underline{P}/\underline{I}_{2a}];$$

$$\text{однофазного КЗ} \quad Z = \text{Im} (\underline{U}_{\phi}/\underline{I}_0) / \text{Im} [(\underline{I}_{\phi} + k * \underline{I}_0 + m * \underline{I}_0 \text{ пар}) * \underline{P}/\underline{I}_0];$$

где:

$\text{Re}, \text{Im}$  - активная и реактивная составляющие электрических величин,

$\underline{P} = e^{j\phi_L}$  - вектор поворота на угол, равный углу сопротивления линии,

$\underline{U}_{\phi}, \underline{I}_{\phi}$  - напряжение и ток поврежденной фазы,

$k$  - коэффициент компенсации по току нулевой последовательности своей линии,

$m = X_m/X_1$  - коэффициент компенсации по току нулевой последовательности параллельной линии ( $\underline{I}_0 \text{ пар}$ ),

$X_m$  - сопротивление взаимной индукции параллельных линий.

Как видно из приведенных формул, в качестве опорного тока для исключения влияния переходного сопротивления используется при однофазных КЗ ток нулевой последовательности, а при двухфазном КЗ ток обратной последовательности, повернутый на 90 градусов (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 линиях с односторонним питанием.

### **13. СИСТЕМЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ЗАМЫКАНИЯ НА ОСНОВЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ПРИБОРОВ**

Выше 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 ЭВМ. Собранную информацию можно использовать в системе АСУ ТП (например, для анализа функционирования защит), можно использовать и для уточнения расстояния до места КЗ за счет учета взаимоиндукций с неповрежденными линиями. Для этого достаточно собрать показания приборов, установленных на ЛЭП данного энергообъекта (распределительная станция, п/ст). Как указывалось, один прибор позволяет учесть взаимоиндукцию только одной ЛЭП (обычно параллельной). При выходе с п/ст, как правило, взаимоиндукцией связано большее количество ЛЭП. Объединение информации от всех приборов, установленных на линиях, связанных взаимоиндукцией, позволяет учесть их все (даже если взаимоиндукцией связаны линии разных напряжений).

Рассматриваемые приборы имеют еще несколько существенных недостатков:

- несовершенный алгоритм определения вида к.з.;
- упрощенный учет ответвлений (трансформаторов с заземленной нейтралью на отпаечных п/ст) и невозможность учета наличия ответвлений не на обслуживаемой прибором линии, а на связанной с ней взаимоиндукцией;
- 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 ЭВМ.

Все микропроцессорные приборы имеют последовательный интерфейс для связи с ЭВМ 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 разделе 14.

Наличие последовательного интерфейса позволяет осуществить сбор информации с приборов. Такие системы сбора информации были разработаны и

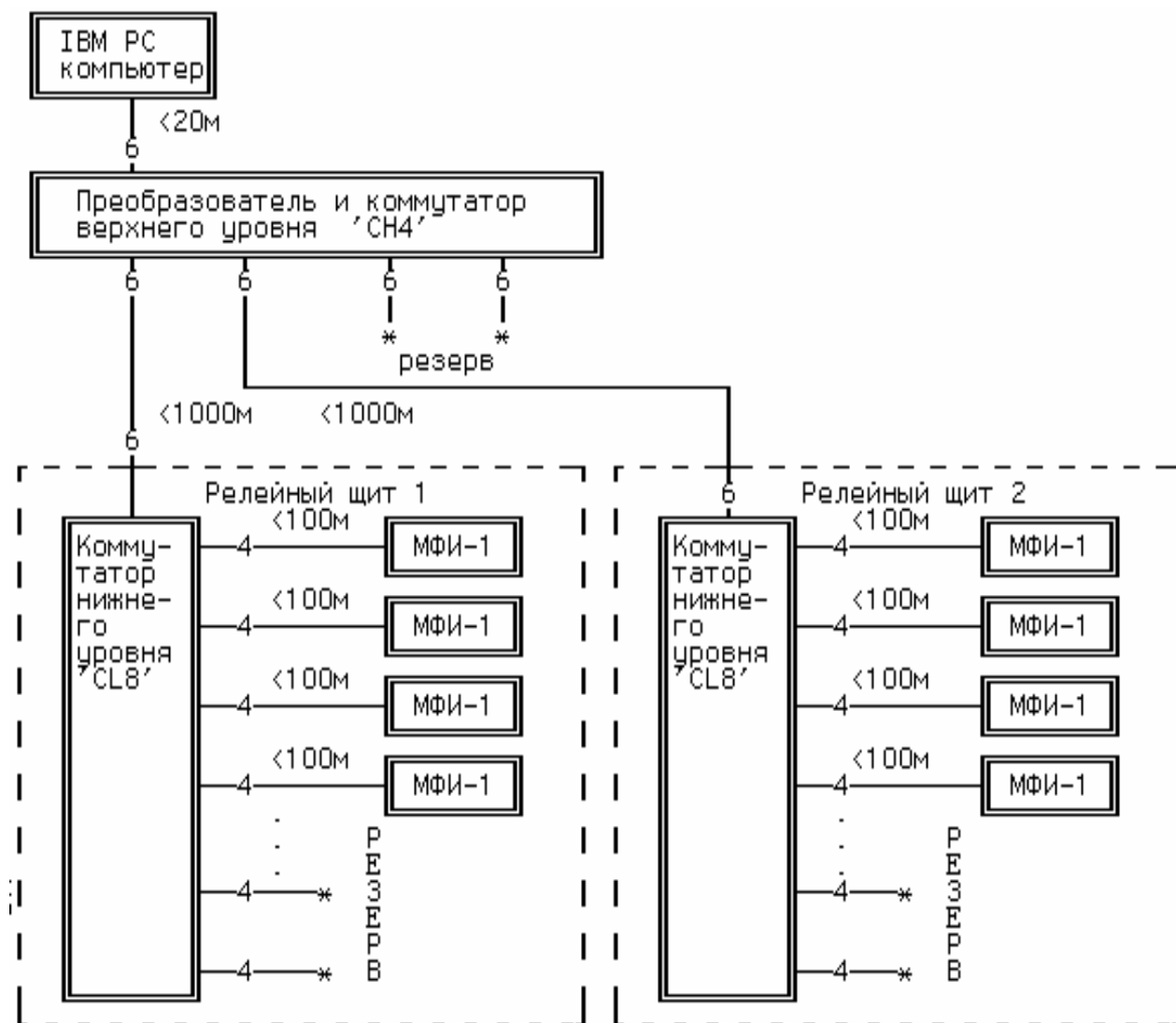


Рис.22. Структурная схема системы сбора информации  
от приборов типа МФИ, МИР

реализованы для различных типов микропроцессорных приборов. Упрощенная схема для приборов МФИ, МИР приведена на рисунке 22.

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 ЭВМ. Схема подключения к 9-ти и 25-ти контактным разъемам приведены в таблицах 2 и 3. Приборы подключаются к коммутатору нижнего уровня, допускающему подключение до восьми приборов. Схема подключения применительно к приборам типа МФИ-1 (МИР-1) приведена в таблице 4

Таблица 2

Распайка разъема, подключаемого к компьютеру  
через COM порт, разъем DB9F (PIN-9)

№	Название	кабель
1	Вход DCD	ЖИЛА КАБЕЛЯ 1
2	Вход RD	ЖИЛА КАБЕЛЯ 1
3	Выход TD	ЖИЛА КАБЕЛЯ 2
4	Выход DTR	ЖИЛА КАБЕЛЯ 3
5	SG	ЖИЛА КАБЕЛЯ (ИЛИ ЭКРАН) 4
6	Вход DSR	ЖИЛА КАБЕЛЯ 5
7	Выход RTS	ЖИЛА КАБЕЛЯ 6
8	Вход CTS	НЕ ПОДКЛЮЧЕН *
9	Вход RI	НЕ ПОДКЛЮЧЕН *

На компьютере вилка, на кабеле розетка.

Таблица 3

Распайка разъема, подключаемого к компьютеру  
через COM порт, разъем DB25F (PIN-25)

№	Название	кабель
8	Вход DCD	ЖИЛА КАБЕЛЯ 1
3	Вход RD	ЖИЛА КАБЕЛЯ 1
2	Выход TD	ЖИЛА КАБЕЛЯ 2
20	Выход DTR	ЖИЛА КАБЕЛЯ 3
7	SG	ЖИЛА КАБЕЛЯ (ИЛИ ЭКРАН) 4
6	Вход DSR	ЖИЛА КАБЕЛЯ 5
4	Выход RTS	ЖИЛА КАБЕЛЯ 6
5	Вход CTS	НЕ ПОДКЛЮЧЕН *
22	Вход RI	НЕ ПОДКЛЮЧЕН *
1	SG	НЕ ПОДКЛЮЧЕН *
9	пусто	НЕ ПОДКЛЮЧЕН *
...	...	НЕ ПОДКЛЮЧЕН *
19	пусто	НЕ ПОДКЛЮЧЕН *
21	пусто	НЕ ПОДКЛЮЧЕН *
23	пусто	НЕ ПОДКЛЮЧЕН *
24	пусто	НЕ ПОДКЛЮЧЕН *
25	пусто	НЕ ПОДКЛЮЧЕН *

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

№	Название	Кабель
B6	Вход R+	ЖИЛА КАБЕЛЯ 1 _____
B7	Вход R-	ЖИЛА КАБЕЛЯ 2 _____
A7	Выход D+	ЖИЛА КАБЕЛЯ 3 _____
A6	Выход D-	ЖИЛА КАБЕЛЯ 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 8-10с после срабатывания. Для этих приборов необходимо иметь микропроцессорное устройство, имеющее возможность обратиться за 8-10с ко всем имеющимся приборам. Структура такой системы приведена на рис. 23.

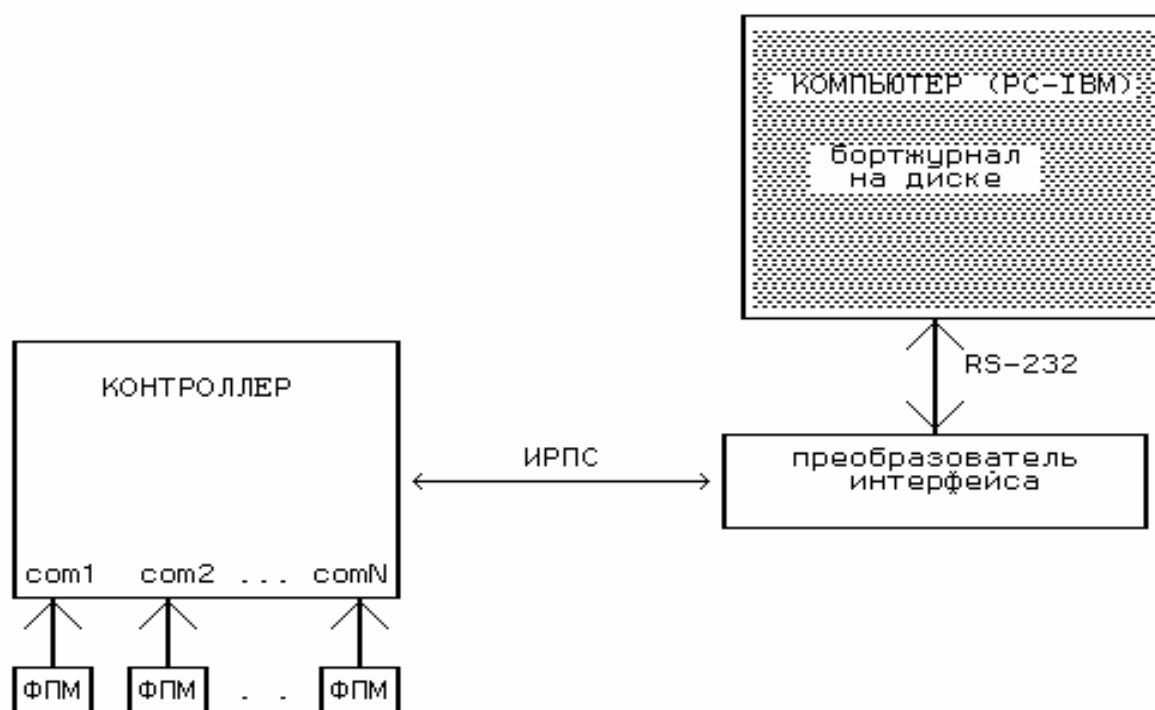


Рис.23. Структура сбора информации для приборов типа ФПМ

В качестве контроллера может быть использовано любое устройство, позволяющее иметь большое количество последовательных (Com) портов. Для контроллеров на базе 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 ЭВМ;
- расчет расстояния до места повреждения по одностороннему замеру с учетом до десяти взаимоиндукций;
- архивацию и документирование информации;
- ведение всех баз данных, необходимых для решения задачи (описание топологии, уставок приборов, корректирующих коэффициентов).

При расчетах производится приведение показаний всех приборов 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  $U_n \geq 110 \text{ кВ}$  всегда осуществляется параллельная работа систем шин.

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

### ***Пример протокола ОМП***

---

---

**Повреждение на линии Восточная 1**

---

---

**Авария от 10/06/97 19:07:32**

**Метод двухстороннего замера.**  
Расстояние до места повреждения 75.00 км.

**Метод одностороннего замера.**

Со стороны ПСТ Подстанция 1  
Ответвление не влияет  
Расстояние до места повреждения 75.71 км.  
замыкание на землю фаз А0  
Со стороны ПСТ Подстанция 2  
Ответвление не влияет  
Расстояние до места повреждения 75.1 км.  
замыкание на землю фаз А0

---

Показания приборов подстанции Подстанция 1

---

Расстояние до повреждения 75.71  
Ток активный прямой (JA1a) 0.3700  
Ток реактивный прямой (JA1p) 0.0000  
Ток активный обратной (JA2a) 0.3700  
Ток реактивный обратной (JA2p) 0.0000  
Ток активный нулевой (JA0a) 0.3700  
Ток реактивный нулевой (JA0p) 0.0000  
Напряжение активное прямой (UA1a) 27.4300  
Напряжение реактивное прямой (UA1p) 88.0000  
Напряжение активное обратной (UA2a) -10.1000  
Напряжение реактивное обратной (UA2p) -7.4200  
Напряжение активное нулевой (UA0a) -9.3000  
Напряжение реактивное нулевой (UA0p) 8.0000  
Ток параллельной линии активный 0.0000  
Ток параллельной линии реактивный 0.0000

---

Показания приборов подстанции Подстанция 2

---

Расстояние до повреждения 75.1  
Ток активный прямой (JA1a) 0.1  
Ток реактивный прямой (JA1p) 0.23  
Ток активный обратной (JA2a) 0.1  
Ток реактивный обратной (JA2p) 0.23  
Ток активный нулевой (JA0a) 0.1  
Ток реактивный нулевой (JA0p) 0.23  
Напряжение активное прямой (UA1a) -68.5  
Напряжение реактивное прямой (UA1p) 12.3  
Напряжение активное обратной (UA2a) 6.4  
Напряжение реактивное обратной (UA2p) -2.1  
Напряжение активное нулевой (UA0a) 3.5  
Напряжение реактивное нулевой (UA0p) -3.3  
Ток параллельной линии активный 0.0000  
Ток параллельной линии реактивный 0.0000

---

Параметры поврежденной линии Восточная 1

---



Удельное реактивное сопротивление пр. последовательности 0.5000 Ом/км  
Удельное активное сопротивление пр. последовательности 0.1 Ом/км  
Удельное реактивное сопротивление нул. последовательности 2.0000 Ом/км  
Удельное активное сопротивление нул. последовательности 0.25 Ом/км

Длина линии 150.0 км  
Номинальное напряжение линии 220 кВ  
Длина до линии ответвления 0.0000 км  
Активное сопротивление отпайки (включая тр-тор отпайки) 0.0000 Ом  
Реактивное сопротивление отпайки (включая тр-тор отпайки) 0.0000 Ом  
Номинальный первичный ток тр-ра тока 300.000 А

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 трансформаторов тока). При сложных повреждениях (переходе одного вида к.з. в другой) можно рассчитывать место повреждения на участках осциллограммы, соответствующих данному виду к.з. 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 (80мс - предшествующий и 50мс 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 ФИКСИРУЮЩИХ ПРИБОРОВ**

Фиксирующие приборы ФПМ, МФИ, МИР и т.д. снабжены последовательным интерфейсом, через который после срабатывания прибор способен выдать сведения о расстоянии до места короткого замыкания и о симметричных составляющих токов и напряжений во время аварии. Для повышения достоверности данных сообщение прибора сопровождается контрольной суммой. В случае ошибки передачи прибор способен повторить свое сообщение. Во всех версиях прибора повтор можно запросить в течении одной секунды после передачи. Существуют версии программного обеспечения приборов, способные воспринять 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 часа или до выключения и повторного включения прибора).

Исторически первым серийно выпускаемым прибором был МФИ-1. Позже освоили выпуск прибора ФПМ-1, схема которого скопирована с первого прибора, однако были внесены изменения в программное обеспечение, в том числе изменен протокол интерфейса. Потом 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 восемь секунд. 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 секунды 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. В случае если приемник в течении восьми секунд 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 часов после срабатывания. В приборе ФПМ принудительный повтор передачи по окончании сеанса связи к сожалению невозможен.

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

В приборах МФИ и МИР сообщение начинается запросом к приемнику. Запрос может стоять весьма долго (до 32 часов). 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 секунды 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 трех раз подряд, в ответ на четвертый запрос повтора прибор заблокирует свой интерфейс. Для возобновления работы с интерфейсом нужно ждать 32 часа 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 отличии от МФИ/РПИ уже нельзя.

Сообщение МФИ/РПИ содержит указание поврежденных фаз, время от момента аварии 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 время от начала аварии до момента опроса. Второе сообщение ФПМ содержит пятнадцать 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 K1-20 (один из первых контроллеров на базе процессора K-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 аварии, 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 П1.

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 некоторой натяжкой) с уровнями логических ТТЛ микросхем. Используются три сигнальных провода (BIT, RDY, RPT) общий провод (Т-) и провод (Т+) для подачи питания +5В на интерфейсную часть прибора, отделенную от всего остального прибора оптронной развязкой. Питание +5В должен подавать приемник. Провод BIT служит для передачи от прибора к приемнику запроса на связь (логическая 1) и битов данных. Приемник, заметив 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 секунды 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 единице соответствует низкий уровень напряжения, а логическому нулю высокий. На линии BIT стартовый бит передаваемой посылки имеет уровень ноль а стоповый единицу, 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 компьютер) показаны на рис 24.

Уровни электрических сигналов интерфейса приборов МФИ и МИР соответствуют принятым в интерфейсе "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.



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 одной секунды.

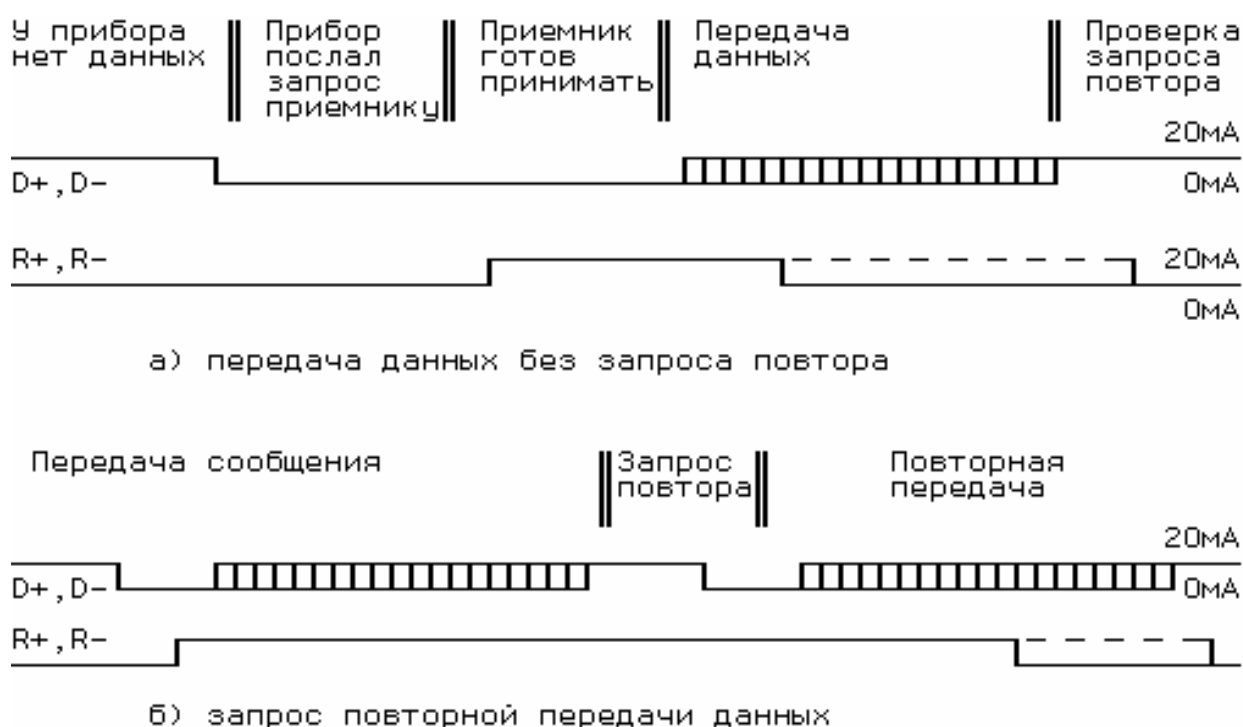


Рис.25. Временные диаграммы интерфейса приборов МФИ и МИР.

Сигнал используется для принудительного пуска прибора при его использовании в составе АСУТП. Сигнал ADC имеет уровень лог.1 в то время когда прибор запустился и его аналого-цифровой преобразователь набирает данные для расчетов. Длительность активного состояния этого сигнала порядка 50 мс. Сигнал используется в системах АСУТП 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 ВIT, описывается в отрицательной логике. Временные диаграммы сигналов расширителя интерфейса показаны на рис.26

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 наличии тока в D проводах. Появление разрешающего пуск R тока заставляет прибор перейти на измерение и обсчет токов и напряжений. Если на основании вычислений прибор

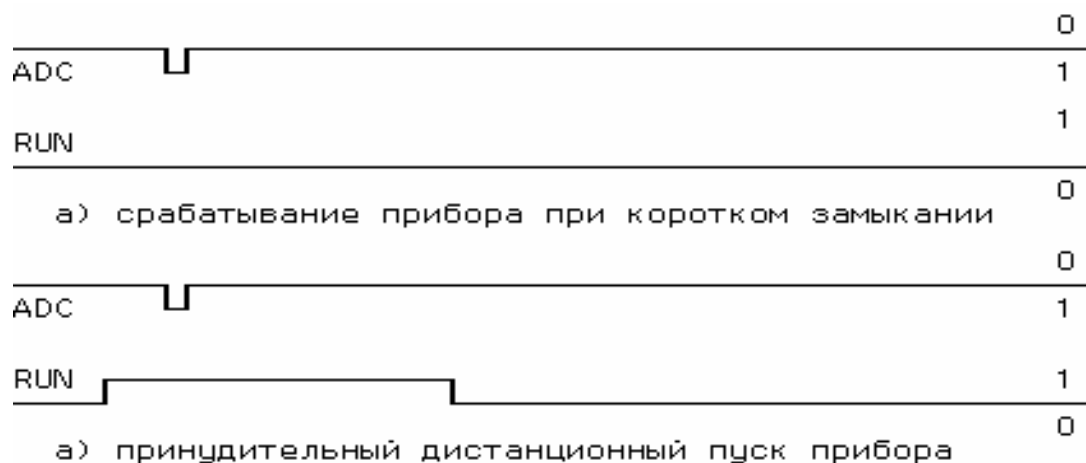


Рис.26. Временные диаграммы работы расширителя интерфейса ФПМ и МФИ/РПИ.

решит, что на линии было короткое замыкание, то он выставит запрос на D проводах и данные с него можно считать обычным образом. Если прибор сочтет, что короткого замыкания нет, то запроса на передачу в интерфейс не выставит, но в ответ на следующий сигнал принудительный пуск через интерфейса 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 начнется передача. Если удерживать ток в R проводах достаточно долго (3-15с) 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.27. 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 50-80мС 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 (C2, RS-232, токовая петля). Для подключения прибора к системам сбора данных необходима разработка специализированных контроллеров или плат расширения.

Схема интерфейсной части не обладает большой устойчивостью к разбросу параметров элементов. В принципе, некоторые (немногие) приборы могут не обеспечивать надежной передачи информации даже если все детали интерфейсов соответствуют техническим условиям.



Рис.27 . Временные диаграммы дистанционного пуска приборов МФИ и МИР через интерфейс.

В приборах МФИ и МИР уровни сигналов стандартные (0/20mA ), схемотехника интерфейса лучше проработана, однако, при высоких температурах в некоторых экземплярах приборов электронный ключ, соединенный с проводами D+ и D-, может иметь повышенную утечку в закрытом состоянии.

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

## 15. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЛОКАЦИОННЫЕ ИСКАТЕЛИ

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

$$l = t v / 2 .$$



Численные значения скорости пробега импульса  $v$  приведены в разделе 1. Реализующие метод локационные искатели могут быть неавтоматические и автоматические. Неавтоматические требуют сборки схемы измерений на отключенной линии и мало пригодны для воздушных линий. Низкое напряжение зондирующего импульса не пробьет даже небольших воздушных промежутков, то есть на отключенной линии не будет найдена гирлянда изоляторов, не выдерживающая рабочего напряжения. Поэтому и были разработаны автоматические искатели, которые сами пускаются при КЗ и посылают в линию зондирующие импульсы еще во время горения дуги в месте повреждения.

Автоматический искатель должен быть постоянно подключен ко всем фазам линии. Это осуществляется через существующие на линии устройства высокочастотной обработки - фильтры присоединения и конденсаторы связи. У линий достаточно высокого класса напряжения - 330 кВ и выше обычно имеются высокочастотные каналы по всем фазам - они обеспечивают диспетчерскую связь, работу высокочастотных защит, передачу команд противоаварийной автоматики, 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 линий, обслуживаемых одним устройством - 5.

Одна из самых сложных проблем в автоматических искателях отстройка от высокочастотных помех, создаваемых горячей на линии во время КЗ дугой. Решается она тем, что искатель за время работы (0,04 - 0,08 с) посылает в линию довольно много импульсов. С линии 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 отсеять помехи.

Упрощенная схема искателя ЛИДА приведена на рис.28. Назначение блоков:

1. формирование посылаемых в линию зондирующих импульсов;
2. усиление отраженных импульсов по закону, обратному закону их затухания в линии;
3. ограничение;
4. формирование тактовых импульсов;
5. временной распределитель импульсов;
6. логические ячейки "И";

- 

После пуска в линию идут зондирующие импульсы. Принятые с линии 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.

66

В искателе заранее заложена дискретность - 50 каналов определяют точность определения места замыкания 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 - 2е 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. Арцишевский 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.С., Иванов И.А., Любарский Д.Р. Алгоритмы функционирования и опыт эксплуатации микропроцессорных устройств определения мест повреждения линий электропередачи. Электрические станции, 1997, N 12, с.7-12

## ПРИЛОЖЕНИЕ П1. ФОРМАТЫ СООБЩЕНИЙ ПРИБОРОВ

### П1.1. 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 (АВС);
- б)время от срабатывания прибора до его опроса 0014 - 00 часов 14 минут;
- в)расстояние до места КЗ +1426 - расстояние 142.6 км ;
- г)симметричные составляющие токов :  
 $Re(I1)=-00.00кА$   $Im(I1)=+00.00кА$ ; прямая последовательность  
 $Re(I2)=-00.00кА$   $Im(I2)=+00.00кА$ ; обратная последовательность  
 $Re(I0)=-00.00кА$   $Im(I0)=+00.00кА$ ; нулевая последовательность ;
- д)симметричные составляющие напряжений :  
 $Re(U1)=-000.1кВ$   $Im(U1)=-000.0кВ$ ; прямая последовательность  
 $Re(U2)=-000.0кВ$   $Im(U2)=-000.1кВ$ ; обратная последовательность  
 $Re(U0)=-046.2кВ$   $Im(U0)=-007.5кВ$ ; нулевая последовательность ;
- е)ток параллельной линии :  
 $Re(Im)=+00.00кА$ ;  $Im(Im)=-00.00кА$
- ж)контрольная сумма сообщения "0000"

Вид символа, отображающего контрольную сумму, показан условно, числовое представление этого символа должно равняться сумме всех предшествующих ему байт по модулю 256.

### П1.2.Первое сообщение ФПМ

Прибор ФПМ выдает подряд два сообщения. Первое имеет вид строки символов, второе сообщение - двоичные трехбайтовые числа с плавающей запятой. Первое сообщение очень похоже на сообщение МФИ, только в нем нет времени. 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 (АВС);
- б)расстояние до места КЗ +0005 - расстояние 0.5км;
- в)симметричные составляющие токов:  
 $Re(I1)=-00.10кА$   $Im(I1)=-00.41кА$  ; прямая последовательность  
 $Re(I2)=+00.40кА$   $Im(I2)=+00.11кА$  ; 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 "XXXX"

вид символа, отображающего контрольную сумму, показан условно, числовое представление этого символа должно равняться сумме всех предшествующих ему байт по модулю 256.

### П1.3. 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 кз 0.5986 км;

б) симметричные составляющие токов :

$\text{Re}(I1)=-0.1056\text{кА}$        $\text{Im}(I1)=-0.4115\text{кА}$   
 $\text{Re}(I2)=0.4091\text{кА}$        $\text{Im}(I2)=0.11295\text{кА}$   
 $\text{Re}(I0)=-0.3024\text{кА}$        $\text{Im}(I0)=0.2945\text{кА}$  ;

в) симметричные составляющие напряжений:

$\text{Re}(U1)=-8.141\text{кВ}$        $\text{Im}(U1)=-26.79\text{кВ}$   
 $\text{Re}(U2)=-19.23\text{кВ}$        $\text{Im}(U2)=20.39\text{кВ}$   
 $\text{Re}(U0)=-39.41\text{кВ}$        $\text{Im}(U2)=-15.17\text{кВ}$  ;

г) ток параллельной линии:

$\text{Re}(I_m)=-0.0449\text{кА}$ ;       $\text{Im}(I_m)=0.0043\text{кА}$ ;

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

#### П1.4. 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), пятнадцать 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 - I1a активная составляющая тока прямой посл. -0.419 кА ;  
07 34 F4 - I1r реактивная составляющая тока прямой последовательности 1.059 кА ;  
06 A9 DA - I2a активная составляющая тока обратной последовательности -0.419 кА ;  
07 34 C8 - I2r реактивная составляющая тока обратной последовательности 1.056 кА ;  
06 A9 64 - I0a активная составляющая тока нулевой последовательности -0.414 кА ;  
07 34 D4 - I0r реактивная составляющая тока нулевой последовательности 1.057 кА ;  
06 A1 1D - U1a активная составляющая напряжения прямой последовательности 3.311 кВ ;  
07 25 BC - U1r реактивная составляющая напряжения прямой последовательности 7.547 кВ ;  
06 A1 1D - U2a активная составляющая напряжения обратной последовательности -3.311 кВ ;  
07 25 BC - U2r реактивная составляющая напряжения обратной последовательности 7.547 кВ ;  
06 A1 1D - U0a активная составляющая напряжения нулевой последовательности -3.311 кВ ;  
07 25 BC - U0r реактивная составляющая напряжения нулевой последовательности 7.547 кВ ;  
81 2E 3C - I0pa активная составляющая тока нулевой последовательности параллельной линии 0.004 кА;  
00 A6 08 - I0pr реактивная составляющая тока нулевой последовательности параллельной линии -0.006 кА;  
00 01 00 02 - время от срабатывания до опроса прибора 01ч:02 м;  
 - контрольная сумма.

## ПРИЛОЖЕНИЕ П2. 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 А
- 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 В
- 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 С

На приборе размещена розетка, на кабеле вилка.



### Разъем прибора МФИ

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 -  $U_a$  напряжение фазы А
- 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
- 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 С
- C2 - \* нейтраль трансформаторов напряжения
- C3 - пусто
- C4 - 220V
- C5 - 220V
- 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 А
  - 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 +5V
  - 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 - 220V
  - C5 - 220V
  - 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

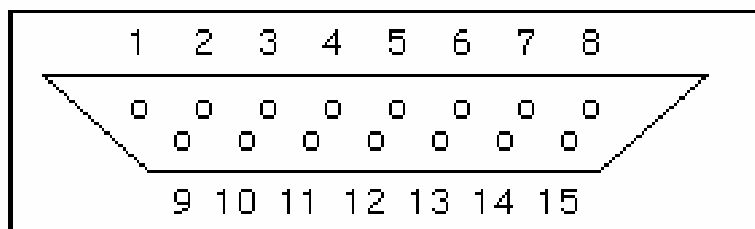
Прибор ФПМ имеет отдельные клеммники для цепей тока и цепей напряжения. С клеммником напряжения конструктивно объединены цепи питания прибора и цепи сигнализации. Сигналы интерфейса и внутренние напряжения питания выведены на отдельный разъем РП15-15, помеченный как разъем телемеханики. Следует учитывать, что нумерация контактов на

русском РП15-15 разъеме 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 В
- 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

Разъем РП15-15Г, розетка, вид со стороны отверстий:



Разъем DB-15F, розетка, вид со стороны отверстий:

