

Ю. П. Шкарин

**ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ТРАКТЫ
КАНАЛОВ СВЯЗИ ПО ЛИНИЯМ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Библиотечка электротехника

— приложение к журналу "Энергетик" План выпусков

Первая половина 2001 г.

Курбангалиев У. К. Самозапуск двигателей собственных нужд электростанций.

Овчинников В. В. Автоматическое повторное включение.

Кузнецов А. П., Лукоянов В. Ю. и др. Современные испытательные устройства для релейной защиты и автоматики.

Шабад М. А. Защита генераторов малой и средней мощности.

Иноземцев Е. К. Ремонт высоковольтных электродвигателей электростанций (две части).

Вторая половина 2001 г.

Шкарин Ю. П. Высокочастотные тракты каналов связи по линиям электропередачи.

Безчастнов Г. А., Красильников А. М. и др. Контроль состояния изоляции электрических машин.

Овчаренко Н. И. Аналоговые элементы комплексов релейной защиты и автоматики энергосистем.

Конюхова Е. А., Киреева Э. А. Надежность электроснабжения промышленных предприятий.

Таубес И. Р., Удрис А. П. Использование реле ДЗТ-21 и ДЗТ-23 для защиты трансформаторов.

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении связи по объединенному каталогу

"ПРЕССА РОССИИ". Том 1. Российские и зарубежные газеты и журналы.

Индексы "Библиотечки электротехника"

— приложения к журналу "Энергетик"

88983 — для предприятий и организаций; **88982** — для индивидуальных подписчиков.

Библиотечка электротехника

— приложение к журналу "Энергетик" Основана в июне 1998 г.

Выпуск 8(32)

Ю. П. Шкарин

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ТРАКТЫ КАНАЛОВ СВЯЗИ ПО ЛИНИЯМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

(часть 2)

Москва НТО "Энергопрогресс", "Энергетик"

2001

УДК 621.315.052.63(075.32)

ББК 31.27

Ш66

Главный редактор журнала "Энергетик" А. Ф. ДЬЯКОВ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

"Библиотечки электротехника"

В. А. Семенов (*председатель*), И. И. Батюк (*зам. председателя*), Б. А. Алексеев, К. М. Антипов, Г.

А. Безчастнов, А. Н. Жулев, В. А. Забегалов, В. Х. Ишкин, Ф. Л. Коган, В. И. Кочкарев, Н. В.

Лисицын, Л. Г. Мамиконянц, Л. Ф. Плетнев, В. И. Пуляев, Ю. В. Усачев, М. А. Шабад

Шкарин Ю. П.

Ш 66 Высокочастотные тракты каналов связи по линиям электропередачи (часть 2). — М.: НТФ

"Энергопрогресс", 2001. — 72 с.; ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу "Энергетик".

Вып. 8(32)].

В брошюре, состоящей из двух частей, изложены основные вопросы, связанные с анализом параметров, характеризующих высокочастотный тракт, достаточно полно приведены методы расчетов и измерений этих параметров. Приложения содержат перечень измерительных приборов, необходимых для измерений параметров ВЧ трактов и основные сведения о существующих программах расчета на ЭВМ параметров ВЧ тракта и помех от короны.

ISSN 0013-7278 © НТФ "Энергопрогресс", "Энергетик", 2001

Предисловие

По данным ИДУ БЭС РФ на начало 2000 г. около 50 % всего объема информации, необходимой для управления работой электроэнергетики России на всех иерархических уровнях управления, передавалось через каналы ВЧ связи по линиям электропередачи ЛЭП 35 кВ и выше. На уровнях управления АО-энерго и ниже удельный вес ВЧ каналов еще более высок. Примерно такое же положение имеет место и в странах СНГ. Такое широкое использование каналов ВЧ связи по ЛЭП (далее просто ВЧ каналов) в ведомственных сетях связи электроэнергетики России определяется, во-первых, их относительной дешевизной (используется уже существующая ЛЭП, соединяющая объекты, между которыми необходимо передавать информацию, и затраты на сооружение линии связи отсутствуют) и, во-вторых, высокой надежностью (благодаря высокой механической надежности самих ЛЭП). Следует отметить, что для передачи сигналов релейной защиты и противоаварийной автоматики использование ВЧ каналов является, как правило, единственно приемлемым решением, удовлетворяющим требованиям надежности и быстродействия, предъявляемым к этим каналам.

В последнее время в ведомственной сети связи электроэнергетики стали использоваться спутниковые каналы и каналы, использующие волоконно-оптические линии связи (ВОЛС). Тем не менее, представляется весьма вероятным, что в обозримом будущем ВЧ каналы будут достаточно широко использоваться при построении сети связи отрасли. Можно предположить, что ВЧ каналы будут использоваться на тех участках сети, где требуется передавать ограниченный объем информации и где применение других видов каналов, например, ВОЛС, оказывается экономически неоправданным. Кроме того, ВЧ каналы, как и в настоящее время, будут широко использоваться для передачи сигналов релейной защиты и противоаварийной автоматики.

По оценкам ЦЦУ ЕЭС РФ в ближайшие 10 лет ВЧ каналы останутся одним из основных видов каналов, используемых в ведомственной сети связи. В особой степени это относится к каналам релейной защиты и противоаварийной автоматики. Согласно этим оценкам объем информации, передаваемой по ВЧ каналам в 2010 г., по сравнению с 1999 г., уменьшится и составит примерно 30 % общего объема передаваемой информации, однако, абсолютное число ВЧ каналов по сравнению с 1999 г. увеличится. При этом ВЧ каналы будут строиться на аппаратуре нового поколения, которая имеет расширенные возможности, обусловленные переходом к новой элементной базе и цифровым методам обработки и передачи информации.

Надежность и достоверность передачи информации по ВЧ каналу в значительной степени зависит от того, насколько соответствуют нормам параметры ВЧ тракта, и насколько эти параметры остаются стабильными во времени как при эксплуатационно возможных переключениях на ЛЭП, так и при изменении погодных условий. Поэтому при проектировании, наладке и эксплуатации ВЧ каналов важной задачей является правильный выбор схемы присоединения к ЛЭП, который обеспечивал бы наилучшие параметры ВЧ тракта этого канала. Кроме того, столь же важной задачей является правильное определение (путем расчетов или измерений) параметров ВЧ тракта и выявление и устранение причин отклонения параметров ВЧ тракта от норм с помощью анализа результатов расчета или измерения.

Вопросы, связанные с расчетами и измерениями параметров ВЧ трактов и анализом причин отклонения этих параметров от желаемых значений рассматривались в [1 — 5]. Однако, все эти книги были изданы давно и стали библиографической редкостью. Кроме того, книги [1] и [2] предназначались для достаточно подготовленных читателей, имеющих инженерное образование.

Поэтому, с учетом того, что ВЧ каналы в ближайшей перспективе останутся одним из основных видов каналов в ведомственной сети связи, возникла необходимость издания брошюры для специалистов среднего звена. При этом изложение вопросов в брошюре должно производиться на достаточно популярном уровне и, в то же время, основные вопросы, связанные с анализом параметров, характеризующих ВЧ тракт, и расчетом и измерением этих параметров, должны рассматриваться достаточно полно. Имеется в виду, что при необходимости более подробного рассмотрения тех или иных вопросов, затронутых в брошюре, читатель может обратиться к упомянутой выше литературе.

Брошюра разбита на две части.

В первой части помещены первые четыре главы, в которых:

приводятся общие сведения о ВЧ трактах и методах их организации;

рассматриваются процессы, происходящие при передаче сигналов по однородным и неоднородным линиям электропередачи, и даются принципы выбора оптимальных схем присоединения к

ЛЭП;

рассматриваются электрические помехи, существующие на выходе ВЧ тракта и воздействующие на приемники ВЧ каналов по ЛЭП.

Во второй части помещены гл. 5 и 6, в которых рассматриваются упрощенные методы расчетов параметров ВЧ трактов и методы измерений этих параметров. Кроме того, помещены приложения, в которых приведены примерный перечень измерительных приборов, необходимых для измерений параметров ВЧ трактов и его элементов, и основные сведения о существующих программах расчета на ЭВМ параметров ВЧ тракта и помех от короны.

Нумерация страниц в обеих частях брошюры для удобства пользования принята сквозной.

Замечания и пожелания по брошюре

просим направлять по адресу:

109280, Москва, ул. Автозаводская, 14/23.

Редакция журнала "Энергетик".

Автор

ГЛАВА ПЕРВАЯ

Общие сведения о ВЧ трактах и методах их организации

1.1. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О КОНСТРУКЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Приведем вначале некоторые сведения по конструкции воздушных линий электропередачи (ВЛ), так как эта конструкция оказывает существенное влияние на условия передачи сигналов по ВЛ.

Линии электропередачи, как правило, выполняются трехфазными, т.е. имеют три изолированных провода, называемые фазами, по которым передается электроэнергия промышленной частоты. Векторы напряжения и тока промышленной частоты, подаваемые на каждый провод, сдвинуты один относительно другого на угол 120° и составляют симметричную трехфазную систему.

К опорам провода фаз подвешиваются на гирляндах изоляторов. Эта подвеска осуществляется или в горизонтальной плоскости (линия с горизонтальным расположением фаз, показанная на рис. 1.1, а) или по углам треугольника (рис. 1.1,б). Часто на одной опоре подвешивают провода двух линий электропередачи (две цепи ЛЭП). Такие линии называются двухцепными. Пример такой линии приведен на рис. 1.1, в.

В пролете между опорами провода провисают. Минимальное расстояние до земли в середине пролета нормируется с учетом электрической прочности линии и обеспечения безопасности нахождения вблизи линии и под ней. Разность между высотой подвеса провода на опоре и минимальным расстоянием до земли в середине пролета называется стрелой провеса $f_{\text{пров}}$ (рис. 1.2). Стрела провеса зависит от температуры воздуха. Она максимальна при высоких температурах воздуха и минимальна при низких температурах.

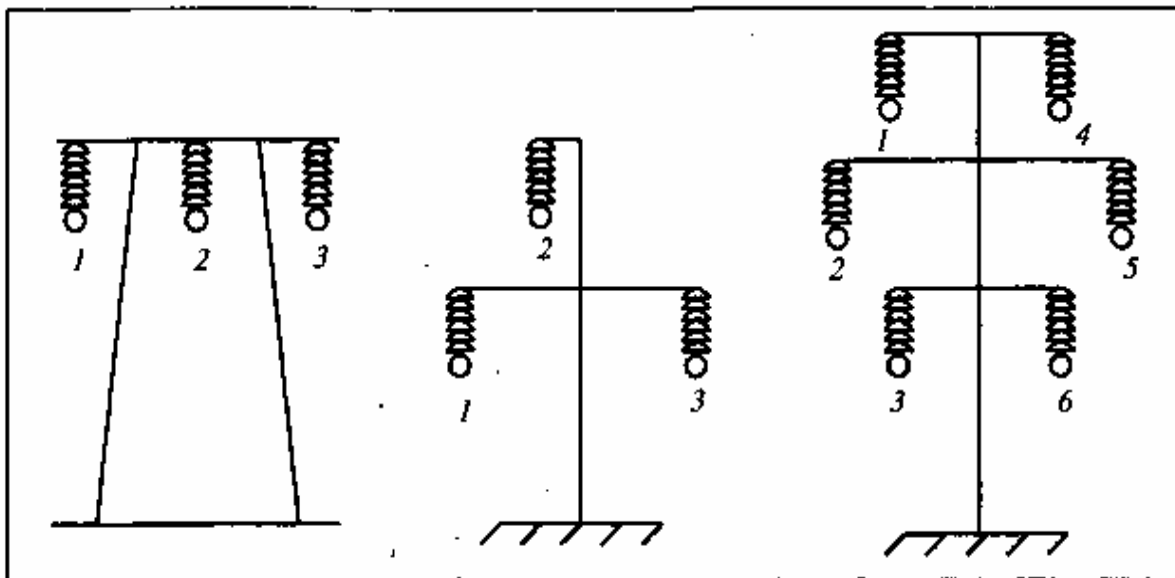


Рис. 1.1. Эскизы линии электропередачи:

а — с горизонтальным расположением проводов; б — с треугольным расположением проводов; в — двухцепной с подвеской проводов типа "бочка"

При расчетах параметров ВЧ трактов линия с провисающими проводами заменяется

линией с проводами, имеющими неизменную высоту подвеса над землей. Расчетная высота подвеса каждого из проводов над землей определяется по формуле:

$$h_p = h_{\max} - 0,75 f_{\text{пров}} \quad (1.1)$$

Каждая фаза ВЛ может состоять из одного провода или из нескольких проводов (расщепленная фаза). Диаметр используемых проводов находится, как правило, в пределах от 1,5 до 3,5 см. Расщепление фазы осуществляют на линиях напряжением 330 кВ и выше. Это делается для уменьшения напряженности электрического поля на поверхности проводов, составляющих фазу ВЛ, и снижения до допустимых пределов эффектов короны (частичных разрядов в воздухе вблизи поверхности проводов), определяющих потери мощности и радиопомехи. Примеры конструкции фазы, расщепленной на два провода (ВЛ 330 кВ) и на три провода (ВЛ 500 кВ), показаны на рис. 1.3.

Высота опоры, расстояние между фазами, длина гирлянды изоляторов, на которой подвешивается фаза, стрела провеса фаз и число проводов в расщепленной фазе зависят от номинального напряжения линии. В табл. 1.1 приведены примерные данные по конструкции линии с горизонтальным расположением проводов для разных классов напряжения.

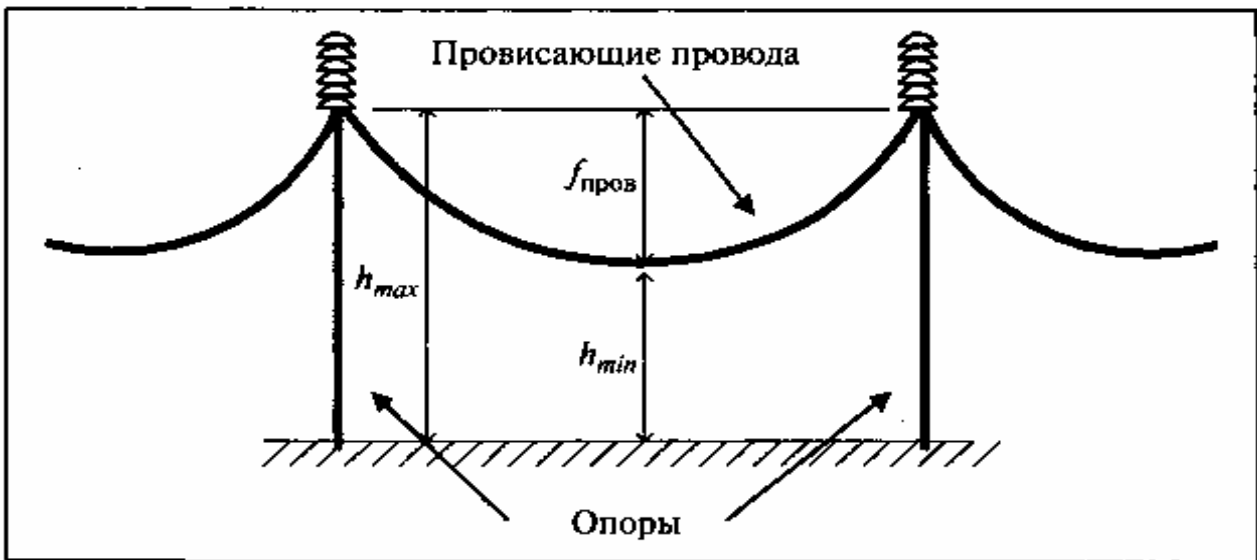


Рис. 1.2. Провисание проводов ВЛ в пролете между опорами .

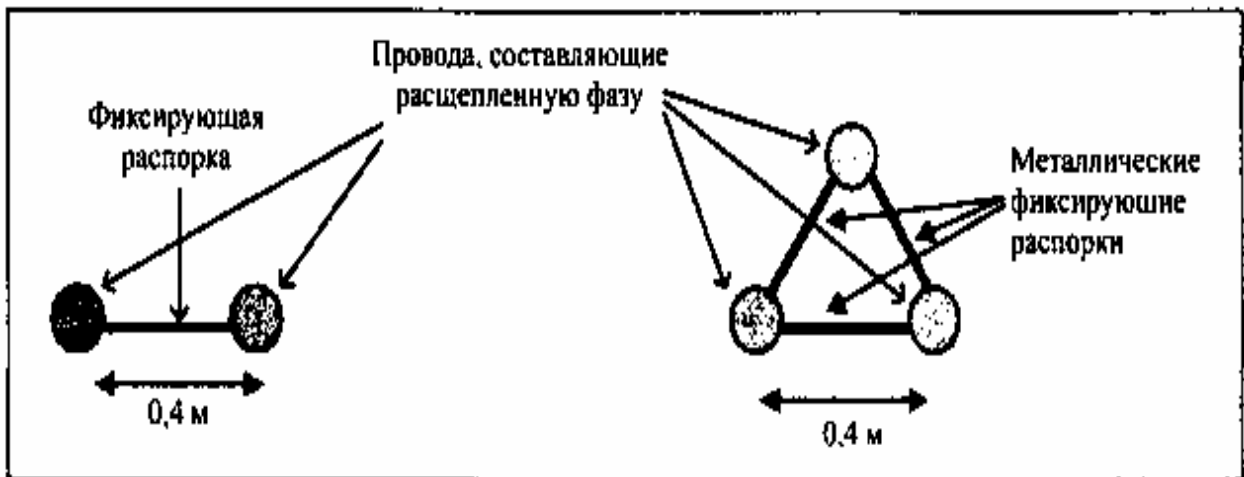


Рис. 1.3. Примеры конструкции расщепленной фазы

Если длина ВЛ превышает 100 км (обычно это линии напряжением 330 кВ и выше), в определенных местах трассы линии производят транспонирование ее фаз, т.е. изменение положения каждой из фаз на опоре. Это делается для симметрирования продольных сопротивлений и поперечных проводимостей фаз и уменьшения тем самым искажения симметрии системы фазных напряжений и токов частоты 50 Гц.

Типовая схема транспозиции, когда каждый из проводов на $1/3$ длины ВЛ располагается поочередно на каждом из мест подвески на опоре, приведена на рис. 1.4. Длина l_T участка линии между транспозициями называется шагом транспозиции.

Таблица 1.1. Примерные данные по конструкции линии с горизонтальным расположением проводов

Номинальное напряжение линии, кВ	Расстояние между смежными фазами, м	Высота подвеса проводов на	Минимальное расстояние до земли, м	Число проводов в расщепленной
220	5,8	15	8	1
330	8,2	16,5	8,5	2
500	11,5	18	10	3
750	16	28	13	4 или 5
1150	24,2	31	20	8

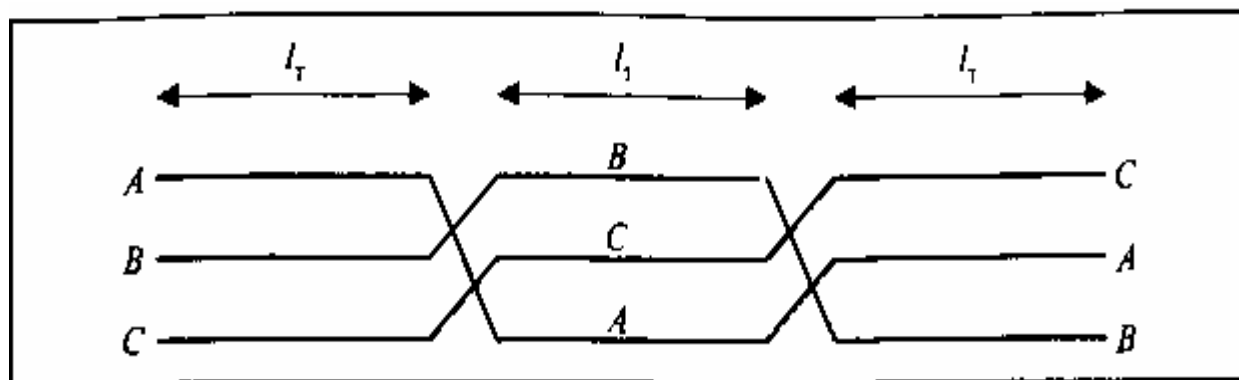


Рис. 1.4. Типовая схема транспозиции проводов ВЛ

Для защиты ВЛ от прямых ударов молний в фазные провода на опорах линий часто подвешивают один или два грозозащитных троса, располагающихся над фазными проводами. Как правило, в качестве грозозащитного троса используется стальной провод, который практически не оказывает влияния на передачу сигналов по фазам линии. Иногда на линиях 500 кВ и выше подвешивается проводящий грозозащитный трос, который изолирован от земли на всей длине ВЛ и используется для организации по нему каналов ВЧ связи. Наличие такого троса оказывает влияние на передачу сигналов по фазам линии и должно учитываться при расчетах ВЧ трактов.

1.2. ОСОБЕННОСТИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ, ВЛИЯЮЩИЕ НА УСЛОВИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПО НИМ ВЧ СИГНАЛОВ

Основными особенностями ВЛ, которые необходимо учитывать при анализе параметров ВЧ трактов являются:

достаточно большие расстояния между проводами ВЛ 35 кВ и выше (для линий различных классов напряжения эти расстояния изменяются от 3,5 до 25 м), соизмеримые с расстояниями между проводами ЛЭП и землей. Это обстоятельство приводит к значительному усложнению расчетной модели линии, которое обусловлено тем, что:

при этих условиях земля оказывает большое влияние на условия распространения сигналов по линии; несмотря на присоединение передатчика и приемника сигналов к одному проводу (схема провод-земля) или двум проводам (схема провод-провод), в передаче сигнала от одного конца линии к другому в той или иной мере участвуют все ее провода. Так, например, при присоединении к фазе одной из линий, подвешенных на двух-цепной опоре, в передаче сигнала участвуют все шесть фаз обеих линий;

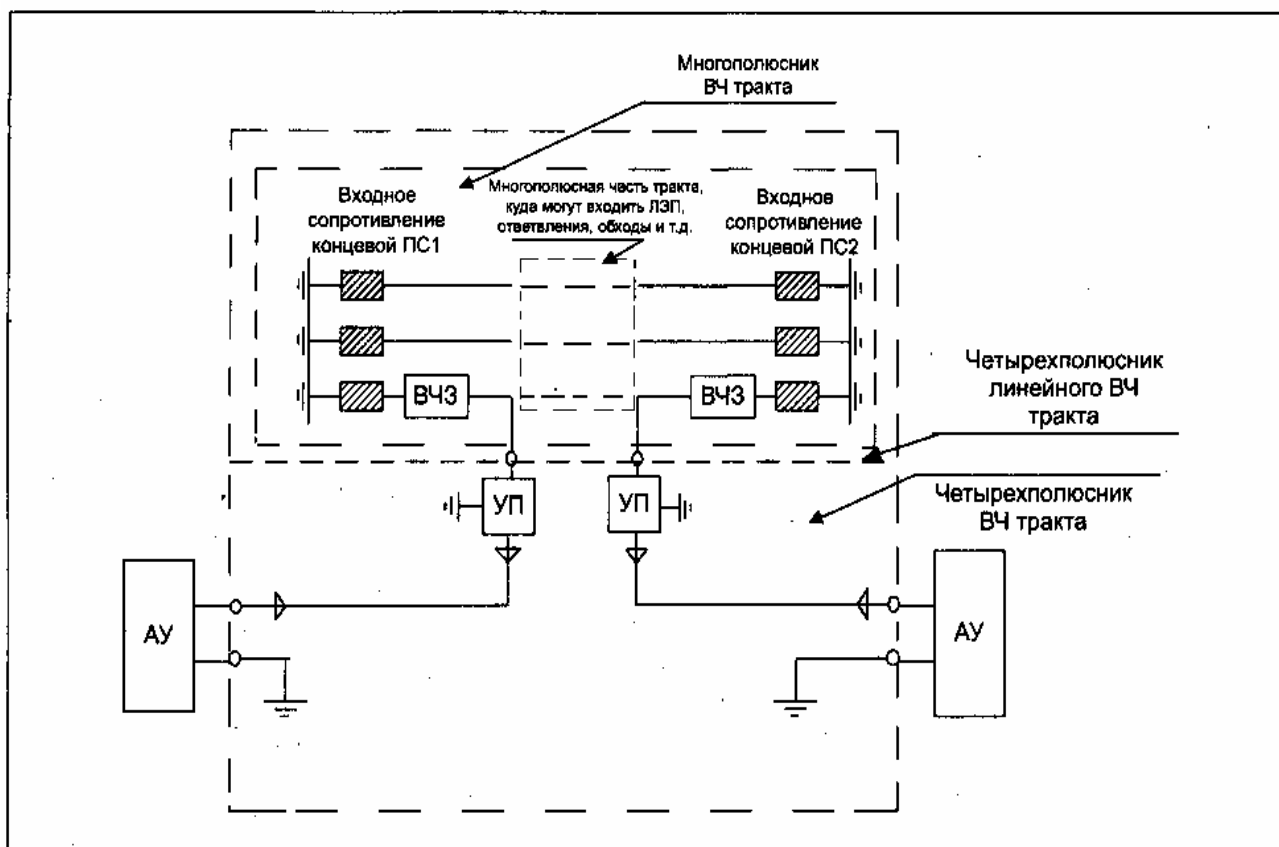
невозможно обеспечить распространение сигналов по ЛЭП без отражений, что вызывает появление стоячих волн, ухудшающих условия распространения сигналов. Это обуславливается как наличием на ЛЭП неустраняемых неоднородностей в виде ответвлений от ЛЭП к промежуточным подстанциям (ПС), так и практической невозможностью обеспечить согласование нагрузки на концах ЛЭП с ее волновым сопротивлением;

на проводах ЛЭП высокого напряжения имеют место коронирование проводов и частичные разряды в изоляции оборудования. Корона и частичные разряды в изоляции являются причиной появления в ВЧ каналах по ЛЭП постоянно действующих помех специфического вида с относительно высоким уровнем. Кроме того, в ВЧ каналах имеют место кратковременные помехи, обусловленные переходными процессами в ЛЭП при коротких замыканиях (КЗ) проводов и при переключениях (коммутациях) высоковольтного оборудования.

1.3. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ТРАКТ КАК СОСТАВНАЯ ЧАСТЬ КАНАЛА И ХАРАКТЕРИЗУЮЩАЯ ЕГО СИСТЕМА ПАРАМЕТРОВ

Любой канал связи можно условно разделить на две части — приемопередающую аппаратуру уплотнения и линию связи между этой аппаратурой. Роль линии связи в ВЧ каналах по ЛЭП выполняет ВЧ тракт по фазным проводам или грозозащитным тросам ЛЭП, связывающих подстанции, на которых устанавливается аппаратура уплотнения.

Основные особенности, отличающие ВЧ тракты от обычных проводных линий связи, определяются особенностями ЛЭП как среды передачи сигналов. Эти особенности обусловлены тем, что ЛЭП конструируется для передачи электроэнергии на промышленной частоте и лишь в той или иной мере может приспособиваться для передачи по ней ВЧ сигналов.



— **Рис. 1.5.** Одна из возможных схем организации ВЧ канала связи по ЛЭП с присоединением к ЛЭП по схеме фаза - земля

Разделение канала на две составляющие для канала ВЧ связи по ЛЭП показано на рис. 1.5.

Высокочастотным трактом называется составной четырехполюсник, заключенный между входом и выходом оконечной или промежуточной аппаратуры уплотнения АУ, который включает в себя:

многополюсники — многопроводные ЛЭП (воздушные или кабельные), ответвления от них; ПС с установленным на них высоковольтным оборудованием;

четырехполюсники — устройства присоединения УП, состоящие из фильтров присоединения (ФП) с конденсаторами связи (КС), ВЧ кабели, разделительные фильтры и т.д.;

двухполюсники — высокочастотные заградители ВЧЗ, разделительные контуры, являющиеся частным случаем разделительных фильтров.

Так как именно ЛЭП определяет условия передачи сигнала по ВЧ тракту, в общей схеме ВЧ тракта удобно выделить *линейный тракт*, который начинается и заканчивается в точках подключения устройств присоединения к проводам ЛЭП, как это показано на рис. 1.5.

Как и для любого четырехполюсника, условия передачи сигнала по ВЧ тракту достаточно полно описываются системой рабочих параметров, в которую входят *рабочее затухание и входное сопротивление*¹.

Рабочее затухание ВЧ тракта определяет степень ослабления синусоидального сигнала при передаче его от передатчика к приемнику. Оно одинаково для обоих направлений передачи сигнала, обозначается буквой *a* и определяется по формуле, дБ:

$$a = 10 \lg \left(\frac{P_1}{P_2} \right), \quad (1.2)$$

где P_1 — мощность, отдаваемая генератором на согласованную нагрузку (сопротивление

нагрузки равно внутреннему сопротивлению генератора), Вт; P_2 — мощность, выделяемая на сопротивлении нагрузки на одном из концов четырехполюсника при подключении к другому концу четырехполюсника генератора, Вт.

Входное сопротивление ВЧ тракта $Z_{ВХ}$ определяется для обоих концов тракта, так как оно, в общем случае, для разных концов тракта разное. Соответствие его внутреннему сопротивлению передатчика показывает степень согласования передатчика с трактом. Для каждого из концов тракта входное сопротивление определяется при подключении на противоположном конце тракта сопротивления нагрузки по формуле, Ом:

$$Z_{ВХ} = \frac{U_{ВХ}}{I_{ВХ}}, \quad (1.3)$$

где $U_{ВХ}$ — напряжение на входе ВЧ тракта, В; $I_{ВХ}$ — ток на входе ВЧ тракта, А.

¹ Кроме этих двух параметров при анализе условий передачи импульсных сигналов по ВЧ тракту используется такой параметр, как групповое время запаздывания, однако, рассмотрение этого параметра выходит за рамки брошюры.

1.4. СПОСОБЫ ПРИСОЕДИНЕНИЯ К ЛЭП

Все схемы присоединения к проводам (фазам или грозозащитным тросам) ЛЭП можно разделить на две группы:

присоединение между проводами и землей. Это, как правило, схемы фаза — земля, трос — земля и два троса — земля;

присоединение между проводами. Это, как правило, схемы фаза — фаза, трос — трос, внутрифазное или внутритросовое присоединение соответственно к изолированным проводам расщепленной фазы или троса.

Наиболее распространенными являются схемы присоединения фаза-земля (рис. 1.6) и фаза-фаза (рис. 1.7). На рис. 1.7 показаны два варианта соединения АУ с ФП при схеме присоединения фаза — фаза — с помощью двух коаксиальных ВЧ кабелей (обычно используемая схема) и одного коаксиального ВЧ кабеля. В последнем случае необходим дифференциальный трансформатор, который должен быть составной частью ФП.

Внутрифазное присоединение осуществляется, как правило, на линиях 330 кВ, у которых фаза расщеплена на два провода (две составляющие). При осуществлении такого присоединения все дистанционные распорки, устанавливаемые на фазах линии и удерживающие провода расщепленной фазы на определенном расстоянии один от другого

(обычно 40 см.), делаются не проводящими, а из изолирующего материала. При этом составляющие расщепленной фазы образуют двухпроводную линию, по которой организуется внутрифазный ВЧ тракт. На рис. 1.8 представлено внутрифазное присоединение к фазе линии с фазами, расщепленными на две составляющие.

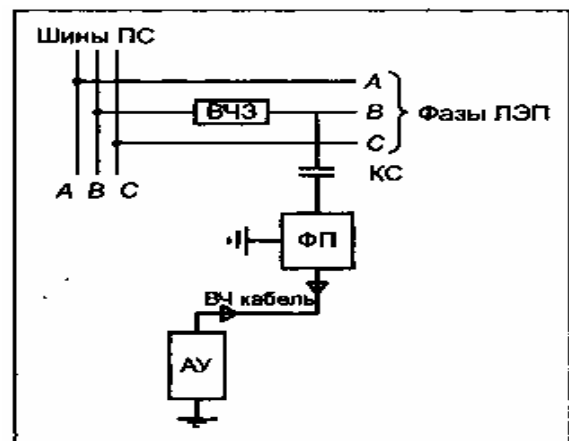


Рис. 1.6. Присоединение к линии по схеме фаза В — земля

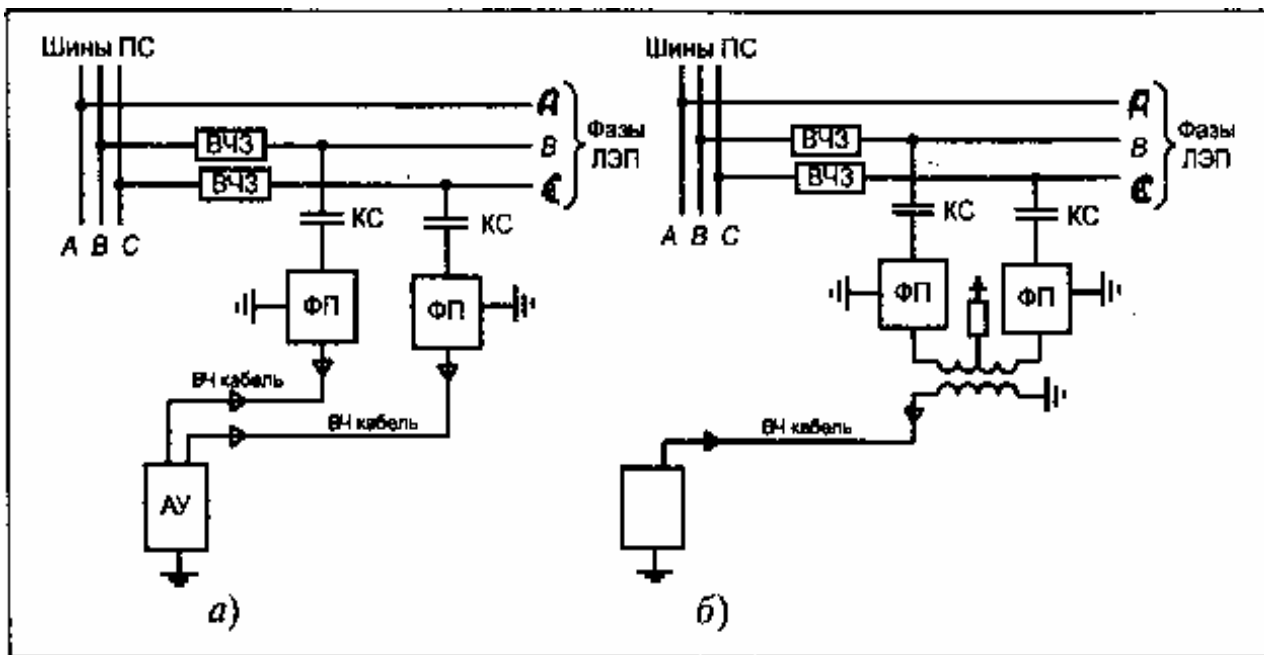


Рис. 1.7. Присоединение к линии по схеме фаза В — фаза С с двумя вариантами использования ВЧ кабелей

Присоединение по схеме трос - трос и два троса - земля используется, как правило, на линиях 500 — 750 кВ с двумя грозозащитными тросами.

Внутритросовое присоединение осуществляется, как правило, на линиях 1150 кВ, у которых грозозащитный трос расщеплен на два провода и все дистанционные распорки делаются из изоляционного материала. При этом составляющие расщепленного троса образуют двухпроводную линию, по которой и организуется внут-ритросовый ВЧ тракт.

Несмотря на то, что присоединение производится к одной или двум фазам (или тросам) ЛЭП, сигнал распространяется по всем ее проводам. Это обуславливается тем, что за счет электромагнитной связи, существующей между всеми проводами, линия работает

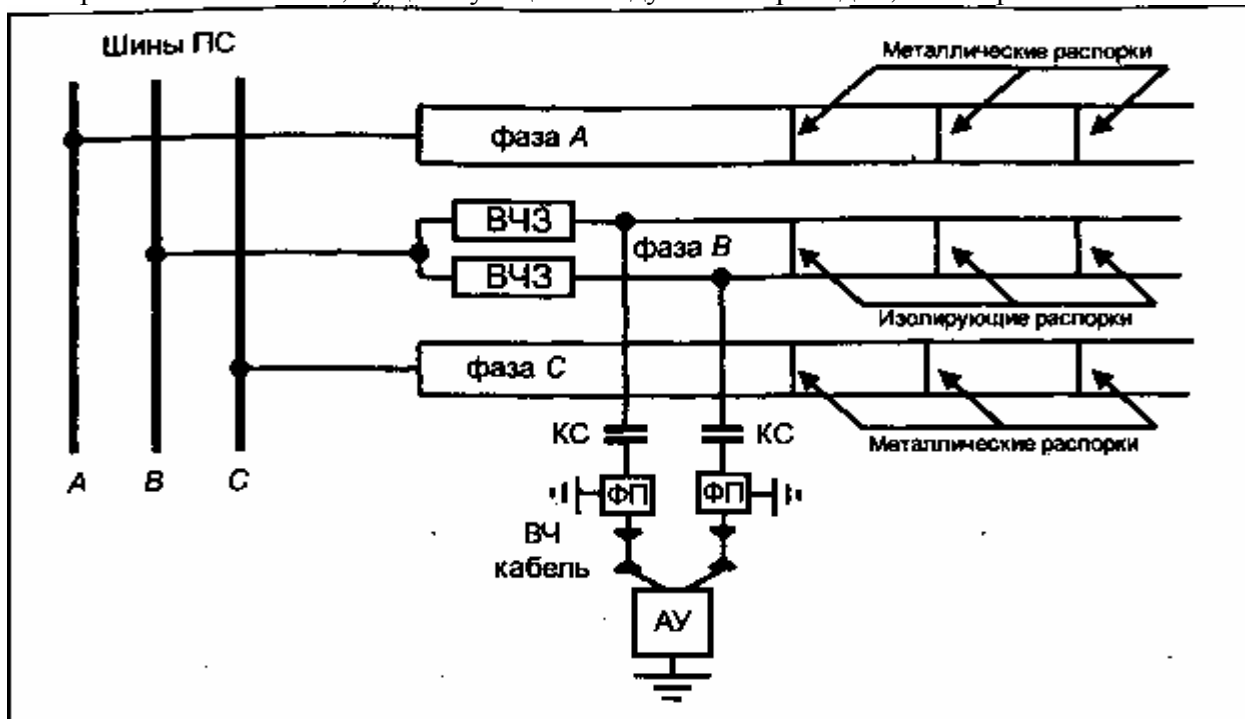


Рис. 1.8. Внутрифазное присоединение к фазе В линии с фазами, расщепленными на две составляющие (соединение АУ с ФП может осуществляться также в соответствии с рис. 1.7, б)

как направляющая система, в которой все фазы в той или иной степени участвуют в передаче сигнала от одного конца линии к другому.

Это обстоятельство приводит к двум последствиям.

Во-первых, параметры тракта зависят от того, какие фазы, ВЛ используются как рабочие, т.е. к каким фазам осуществляется присоединение.

Во-вторых, параметры ВЧ тракта зависят от того, на какие сопротивления нагружены как рабочие, так и нерабочие фазы на концах ВЛ, а эти сопротивления зависят от коммутационного состояния линии.

В связи с этим возникает проблема выбора оптимальных схем присоединения к линии, при которых затухание ВЧ тракта было бы минимально и в наименьшей степени подвержено влиянию внешних факторов (коммутационное состояние ЛЭП, температура окружающей среды и т.д.).

ГЛАВА ВТОРАЯ

Распространение сигналов по многопроводным линиям электропередачи

2.1. УСЛОВИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА ПО ОДНОРОДНОЙ СОГЛАСОВАННОЙ ЛЭП С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ФАЗ

Понятие о модальных составляющих. Для понимания механизма распространения сигнала по ЛЭП удобно при его рассмотрении исключить влияние отраженных от мест нарушения однородности линии волн, т.е. рассмотреть однородную полубесконечную линию. Однородной будем считать линию, у которой подвеска проводов на опоре и их тип не меняется на всей ее длине, и которая на всей своей длине проходит над землей с одинаковым удельным сопротивлением. То, что линия принята полубесконечной, позволяет не учитывать волны, отраженные от приемного конца линии, бесконечно далеко удаленного от передатчика и от места наблюдения.

Рассмотрим условия распространения сигнала на примере тракта, в схему которого входит линия с горизонтальным расположением проводов. Для линии с таким расположением проводов механизм распространения сигнала проявляется в наиболее наглядном виде, хотя все рассмотренные ниже явления характерны также и для линий с любым расположением проводов на опоре.

Присоединим источник сигнала (генератор) с частотой ω в начале линии к крайней фазе и заземлим две другие фазы, как это показано на рисунке 2.1, *а*. Далее будем, передвигаясь вдоль линии, измерять напряжения каждой из трех фаз относительно земли.

На рис. 2.2, *а* показано как модули напряжений фаз относительно земли зависят от расстояния x между местом измерения и началом линии.

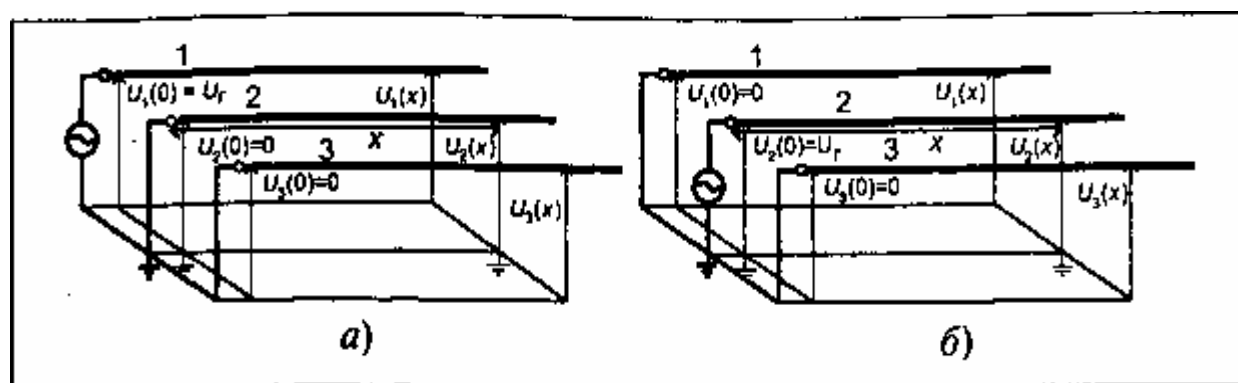


Рис. 2.1. Примеры присоединения источника сигнала к линии по схеме:
а — крайняя фаза — земля; *б* — средняя фаза — земля

Эти зависимости построены для случая присоединения по схеме крайняя фаза — земля к линии 220 кВ (рис. 2.1, *а*). Частота передаваемого сигнала принята равной $f = 300$ кГц.

Как видно из рис. 2.2, *а*, зависимость напряжения каждой из фаз от продольной координаты точки измерений получается достаточно сложной, причем соотношение между напряжениями разных фаз в каждой точке линии разное. Так, например, при удалении от начала линии более, чем на 40 км, напряжение на нерабочих фазах становится больше, чем на рабочей фазе. В точке $x = 80$ км напряжение на рабочей фазе оказывается примерно в 12

раз меньше, чем на нерабочих фазах.

Если выбрать другую частоту сигнала или, тем более, другую схему присоединения, то указанные зависимости будут другими. Это хорошо видно из рис. 2.2, б. На этом рисунке приведены зависимости от расстояния x между местом измерения и началом линии модуля напряжения разных фаз относительно земли, построенные для присоединения по схеме средняя фаза — земля (рис. 2.1, б) к той же линии 220 кВ и для той же частоты сигнала $f=300$ кГц.

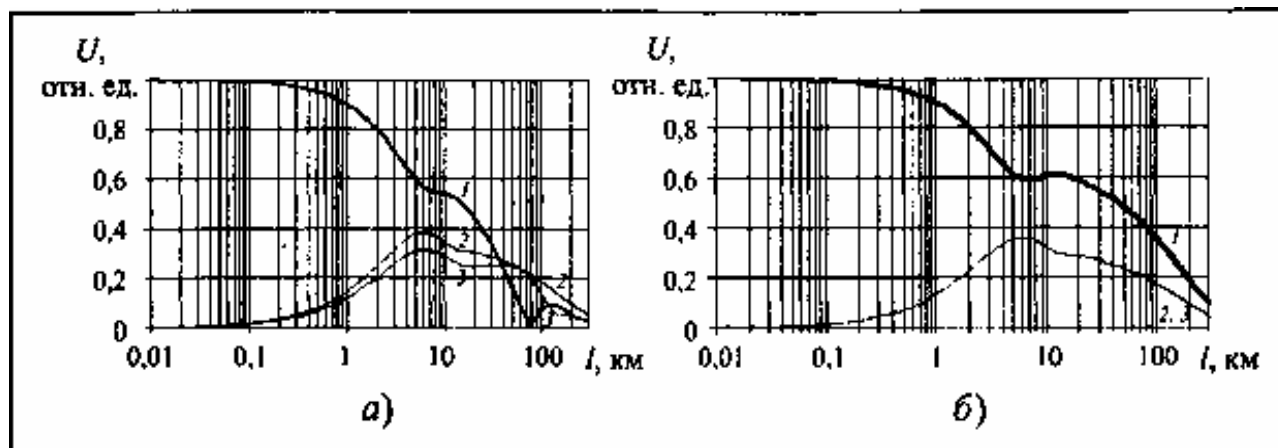


Рис. 2.2. Изменение модулей напряжения на фазах линии при передвижении точки измерения вдоль линии при присоединении источника:
 а — по схеме рис. 2.1, а; б — по схеме рис. 2.1, б

Такое многообразие зависимостей в значительной мере затрудняет анализ условий изменения напряжения на фазах по длине линии при разных частотах и схемах присоединения к фазам ВЛ. Этот анализ существенно облегчается при использовании модального метода с введением понятия мод или модальных составляющих.

Теоретические исследования, подтвержденные экспериментально полученными данными, показывают, что для линии с любым расположением проводов существует несколько способов возбуждения системы напряжений и токов в проводах линии, при которых отношения между напряжениями и токами проводов не изменяется по длине линии. Каждая такая система напряжений и/или токов, распространяющаяся вдоль линии без искажения своей формы, называется модой (mode в переводе с английского означает "вид волны, колебания"). Число таких способов возбуждения (мод) всегда равно числу проводов линии. При этом в одной из мод, называемой *земляной* или *нулевой*, токи во всех проводах имеют одинаковое направление и "обратный" ток протекает по земле. Все остальные моды называются *междуфазными*, так как для них прямой и обратный токи протекают по фазам ЛЭП.

Условия распространения системы напряжений и токов каждой из мод описывается следующими параметрами:

системой волновых сопротивлений, связывающих модальное напряжение U_M и ток I_M каждого из проводов линии в любой точке x (число волновых сопротивлений равно числу фаз):

$$Z_{в.м} = \frac{U_M(x)}{I_M(x)} = \text{const}; \quad (2.1)$$

коэффициентом затухания α , дБ/км, и коэффициентом фазы φ , рад/км, с помощью которых можно описать, как изменяется модуль и на какой угол поворачивается вектор напряжения (тока) каждого из проводов линии при продвижении вдоль линии на расстояние 1 км.

С помощью коэффициента затухания α и коэффициента фазы φ можно легко рассчитать напряжение $U_M(x)$ каждого из проводов в произвольной точке линии, находящейся на расстоянии x от ее начала, по известному напряжению $U_M(0)$ соответствующего провода в начале линии. При этом модуль вектора напряжения $U_M(x)$ уменьшается в $e^{-0,115\alpha x}$ раз по сравнению с модулем напряжения $U_M(0)$, а сам вектор поворачивается на угол (βl) , рад:

$$\begin{aligned}
 U_M(x) &= U_M(0)e^{-0,115\alpha x}e^{-j\beta x} = \\
 &= U_M(0)e^{-0,115\alpha x}[\cos(\beta x) + j\sin(\beta x)].
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

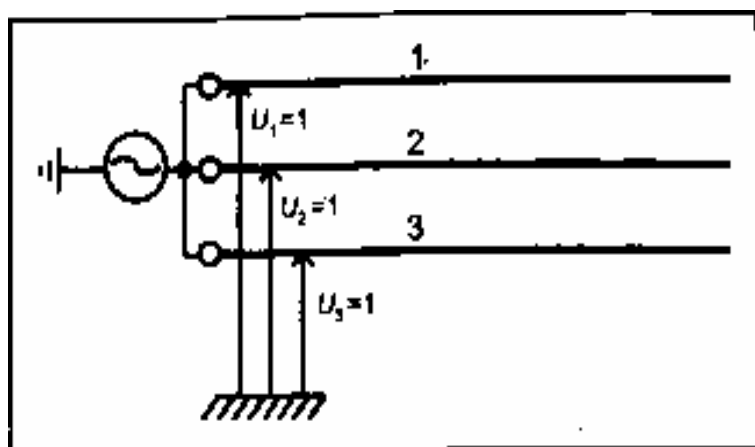


Рис. 2.3. Возбуждение в линии нулевой моды

Коэффициент фазы φ для частоты f , кГц, связан со скоростью распространения электромагнитных волн данной моды вдоль линии v , тыс. км/с. Эта связь, рад/км, выражается как

$$\beta = \frac{2\pi f}{v}.
 \tag{2.3}$$

Такая же формула, при условии замены напряжения U на ток I , отражает изменение тока вдоль линии.

Принято следующее обозначение мод. Как уже было отмечено, одна из них называется *земляной или нулевой*. Коэффициенты затухания и фазы этой моды наибольшие, так как весь обратный ток в этой моде протекает в земле с очень большим удельным сопротивлением (на много порядков больше, чем удельное сопротивление проводов линии). Междофазным модам присваиваются номера от первого до $(n - 1)$, где n — число проводов, по степени возрастания влияния земли на коэффициенты затухания и фазы.

Рассмотрим какие системы напряжений и токов проводов характеризуют моды в линии с горизонтальным расположением проводов.

Нулевая мода образуется, когда передатчик включен, как это показано на рис. 2.3, так, что на все три фазы в начале линии подается одинаковое напряжение (примем его равным некоторой единице)¹.

¹ Более точный анализ показывает, что напряжение нулевой моды на средней фазе несколько больше, а ток несколько меньше, чем на крайних фазах.

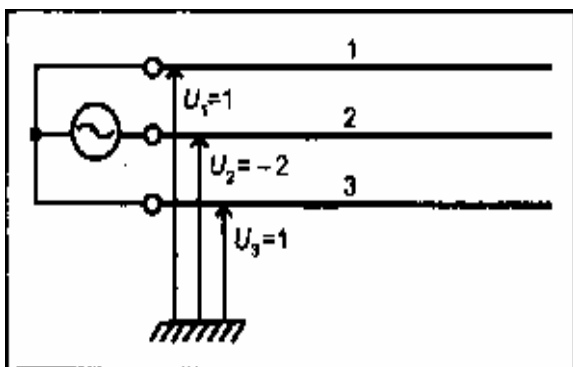


Рис. 2.4. Возбуждение в линии первой междуфазной моды

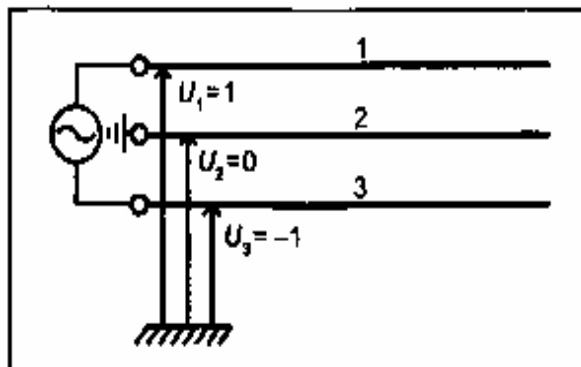


Рис. 2.5. Возбуждение в линии второй междуфазной моды

Волновое сопротивление примерно одинаково для всех проводов, хотя, строго говоря, волновое сопротивление среднего провода несколько больше, чем для крайних проводов.

Значения параметров α , ν и Z_B нулевой моды для рассматриваемой линии 220 кВ при частоте 300 кГц приведены в табл. 2.1.

Первая междуфазная мода (фаза средняя — две фазы крайние) образуется, когда передатчик включен, как это показано на рис. 2.4, так, что на обе крайние фазы в начале линии подается одинаковое напряжение (ток), которое примем равным некоторой единице, а на среднюю фазу подается двойное напряжение (ток), повернутое по фазе на 180° .*

Волновое сопротивление примерно одинаково для всех проводов, хотя, строго говоря, волновое сопротивление среднего провода несколько больше, чем для крайних проводов.

* Более точный анализ показывает, что для первой моды модуль напряжения на средней фазе несколько больше, чем двойное значение модуля напряжения на крайних фазах.

Таблица 2.1. Значения параметров α , ν и Z_B для разных мод

Название моды	Параметры				
	α , дБ/км	ν , км/с	Z_B , Ом, для проводов:		
			1	2	3
Нулевая (все фазы — земля)	2,407	282 179	590	634	590
Первая междуфазная (средняя фаза — две крайние фазы)	0,055	299627	340	365	340
Вторая междуфазная (фаза — крайние фазы)	0,187	297 734	403	-	403

Значения α , ν и Z_B первой моды при частоте 300 кГц приведены в табл. 2.1.

Вторая междуфазная мода (фаза — фаза крайние) образуется, когда передатчик включен, как это показано на рис. 2.5. В силу симметрии расположения проводов относительно плоскости, проходящей через средний провод, напряжение и ток на среднем проводе по всей длине линии будут равны нулю.

Для каждого из крайних проводов линии волновое сопротивление одинаково (для среднего провода, на котором во второй моде нет ни напряжения, ни тока, волновое сопротивление отсутствует). Значения α , ν и Z_B второй моды при частоте 300 кГц приведены в табл. 2.1.

Теперь с помощью введенных понятий мод распространения напряжения и тока вдоль линии можно легко понять и предсказать, как будут изменяться напряжения (токи) каждой из фаз линии при произвольных схемах подключения источника сигнала к этой линии. Для этого используем метод наложения (суперпозиции), при котором для определения напряжений (токов) фаз в любой произвольной точке x : линии производят следующие действия:

систему напряжений (токов) всех проводов в начале линии разлагают на модальные составляющие таким образом, чтобы для каждого из проводов сумма напряжений (токов) всех мод была бы равна реальному напряжению (току) рассматриваемого провода;

рассматривают распространение каждой из модальных составляющих вдоль линии до произвольной точки x , используя определения напряжения каждой из фаз для каждой из модальных составляющих в этой точке простую зависимость (2.2);

полученные для точки x напряжения модальных составляющих на каждом из проводов геометрически складывают и получают напряжения проводов в рассматриваемой точке.

Использование модальных составляющих при рассмотрении условий распространения сигналов. Рассмотрим использование описанного метода на примере линии, изображенной на рис. 2.1 (т.е. при наиболее простом случае, когда нерабочие фазы линии заземлены). В этом случае напряжения на нерабочих фазах в начале линии равны нулю и разложение напряжений на проводах в начале линии на напряжения модальных составляющих производят как это показано в табл. 2.2.

Проведем анализ приведенных выше зависимостей напряжений на рабочей и нерабочей фазах при присоединении по схемам крайняя фаза — земля и средняя фаза — земля, приняв напряжение генератора, приложенное к рабочей фазе, равным единице ($U_r=1$).

а) Схема присоединения крайняя фаза — земля при заземленных нерабочих фазах (рис. 2.1, а).

Согласно данным табл. 2.2 в начале линии (обозначение 0) имеются напряжения во всех трех модах:

для первой (рабочей) фазы: напряжение первой моды $U_{1M1}(0) = 0,169$, напряжение второй моды $U_{1M2}(0) = 0,5$ и напряжение нулевой моды $U_{1M0}(0) = 0,331$; (их геометрическая сумма равна единице, т.е. реальному напряжению генератора);

для второй (нерабочей) фазы: напряжение первой моды $U_{2M1}(0) = -0,345$ и напряжение нулевой моды $U_{2M0}(0) = 0,345$, напряжение второй моды отсутствует (их геометрическая сумма равна нулю, т.е. реальному напряжению второй фазы относительно земли);

для третьей (нерабочей) фазы: напряжение первой моды $U_{1M1}(0) = 0,169$, напряжение второй моды $U_{1M2}(0) = -0,5$ и напряжение нулевой моды $U_{1M0}(0) = 0,331$ (их геометрическая сумма равна нулю, т.е. реальному напряжению третьей фазы относительно земли).

Таблица 2.2. Напряжения модальных составляющих в начале линии с горизонтальным расположением проводов

Присоединение	Формулы для определения модальных напряжений на		
	левой крайней фазе 1	средней фазе 2	правой крайней фазе 3
Фаза 1 - земля	$U_{1M1} = 0,169U_{\Gamma};$ $U_{1M2} = 0,5U_{\Gamma};$ $U_{1M0} = 0,331U_{\Gamma};$	$U_{2M1} = - 0,345U_{\Gamma};$ $U_{2M2} = 0;$ $U_{2M0} = 0,345U_{\Gamma}$	$U_{3M1} = 0,169U_{\Gamma};$ $U_{3M2} = - 0,5U_{\Gamma};$ $U_{3M0} = 0,331U_{\Gamma};$
Фаза 2 - земля	$U_{1M1} = - 0,325U_{\Gamma};$ $U_{1M2} = 0;$ $U_{1M0} = 0,325U_{\Gamma};$	$U_{2M1} = 0,663U_{\Gamma};$ $U_{2M2} = 0;$ $U_{2M0} = 0,337U_{\Gamma}$	$U_{3M1} = - 0,325U_{\Gamma};$ $U_{3M2} = 0;$ $U_{3M0} = 0,325U_{\Gamma};$
Фаза / — фаза 2	$U_{1M1} = 0,494U_{\Gamma};$ $U_{1M2} = 0,5U_{\Gamma};$ $U_{1M0} = 0,006U_{\Gamma};$	$U_{2M1} = - 1,006U_{\Gamma};$ $U_{2M2} = 0;$ $U_{2M0} = 0,006U_{\Gamma}$	$U_{3M1} = 0,494U_{\Gamma};$ $U_{3M2} = - 0,5U_{\Gamma};$ $U_{3M0} = 0,006U_{\Gamma}$
Фаза / — фаза 3	$U_{1M1} = 0;$ $U_{1M2} = U_{\Gamma};$ $U_{1M0} = 0;$	$U_{2M1} = 0;$ $U_{2M2} = 0;$ $U_{2M0} = 0;$	$U_{3M1} = 0;$ $U_{3M2} = - U_{\Gamma};$ $U_{3M0} = 0;$

В точке линии, находящейся на расстоянии x от ее начала:

модуль напряжения каждой из мод на каждом из проводов будет меньше, чем в начале линии в $(e^{-0,115ax})$ раз (в соответствии с выражением (2.2), в котором для каждой моды коэффициент затухания a относится к рассматриваемой моде);

эти напряжения будут повернуты по фазе на угол Vx (в соответствии со своей скоростью распространения v рассматриваемой моды).

Реальное напряжение на каждой из фаз равно геометрической сумме напряжений модальных составляющих для соответствующей фазы в точке x

$$\begin{aligned}
 U_1(x) &= U_{1M1}(x) + U_{1M2}(x) + U_{1M0}(x); \\
 U_2(x) &= U_{2M1}(x) + U_{2M0}(x); \\
 U_3(x) &= U_{3M1}(x) + U_{3M2}(x) + U_{3M0}(x).
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

Так как и коэффициент затухания и скорость распространения у разных мод различны, модули напряжений этих мод при переходе от начала линии к точке x будут уменьшаться в разное число раз, а векторы этих напряжений будут поворачиваться на разные углы. В результате, по мере удаления от начала линии модуль напряжения на рабочей фазе будет уменьшаться, а на нерабочих фазах линии станет отличным от нуля. При этом, степень уменьшения напряжения на рабочей фазе и степень увеличения напряжения на нерабочих фазах определяется как амплитудными, так и фазовыми соотношениями между напряжениями разных мод.

В табл. 2.3 приведены результаты расчета по (2.2) и (2.4) для разных расстояний x . При расчетах были использованы значения коэффициентов затухания и скоростей распространения различных мод, приведенные в табл. 2.1.

Из данных табл. 2.3 видно, что напряжение всех трех мод оказывает заметное влияние на напряжения фаз только при расстоянии от начала линии, не превышающем 10 км. При расстоянии от начала линии 10 км и более, напряжение нулевой составляющей становится намного меньше напряжений обеих междуфазных мод и можно считать, что напряжение на фазах обуславливается только геометрической суммой напряжений междуфазных мод.

Таблица 2.3. Напряжения на фазах линии в разных ее точках при присоединении по схеме крайняя фаза — земля.

Расстояние, x, км	Фаза	Напряжение модальной составляющей			Модуль напряжения фазы
		1	2	0	
0,1	1	0,137+j0,099	0,402+j0,295	0,252+j0,199	0,988
	2	-0,279 -j202	-	0,262+j0,207	0,018
	3	0,137+j0,099	-0,402-j0,295	0,252+j0,199	0,013
10	1	0,158 -j0,012	0,338-j0,185	-0,014-j0,015	0,527
	2	-0,322 -j0,0245	-	-0,0145-j0,0156	0,339
	3	0,158-j0,012	-0,338 + j0, 185	-0,014-j0,015	0,25
78	1	0,085 -j0,059	-0,077+j0,052	$< 10^{-10}$	0,01
	2	-0,173 +j0,120	-	$< 10^{-10}$	0,211
	3	0,085 -j0,059	0,077-j0,052	$< 10^{-10}$	0,196
110	1	0,055-j0,064	0,024 + j0,04	$< 10^{-10}$	0,083
	2	-0,112 +j70,131	-	$< 10^{-10}$	0,172
	3	0,055 -j0,064	-0,024-j0,04	$< 10^{-10}$	0,109

При расстоянии от начала ВЛ, превышающем 10 км, напряжения на крайних фазах в значительной степени определяется фазовым углом между напряжениями первой и второй мод, который увеличивается с увеличением расстояния. На расстоянии 78 км от начала линии фазовый угол между напряжениями первой и второй мод (равный разности между фазовыми углами векторов напряжений этих междуфазных мод) оказывается примерно равным 180° . При этом напряжение на рабочей фазе оказывается равным арифметической разности близких по модулю напряжений междуфазных мод и становится очень малым;

напряжение на средней нерабочей фазе получается намного больше напряжения на рабочей фазе, так как определяется только напряжением мало затухающей первой моды (напряжение второй моды на средней фазе отсутствует);

напряжение на второй крайней нерабочей фазе также намного больше напряжения на рабочей фазе, так как определяется арифметической суммой (а не разностью, как для первой фазы) близких по модулю напряжений междуфазных мод.

При дальнейшем увеличении расстояния от начала ВЛ за 80 км напряжение на рабочей фазе начинает возрастать за счет того, что фазовый угол между напряжениями междуфазных мод оказывается больше 180° и геометрическая сумма этих напряжений становится больше их арифметической разности.

б) Схема присоединения средняя фаза - земля при заземленных нерабочих фазах (рис. 2.1, б).

В начале линии согласно данным табл. 2.2 имеются напряжения только в двух модах нулевой и первой междуфазной (во второй междуфазной моде при такой схеме включения напряжение не возбуждается):

для первой (нерабочей) фазы: напряжение первой моды $U_{1M1}(0) = -0,325$, напряжение нулевой моды $U_{1M0}(0) = 0,325$; (их геометрическая сумма равна нулю, то есть реальному напряжению первой фазы относительно земли);

для второй (рабочей) фазы: напряжение первой моды $U_{2M1}(0) = 0,663$ и напряжение нулевой моды $U_{2M0}(0) = 0,337$; (геометрическая сумма равна единице, то есть реальному напряжению генератора);

для третьей (нерабочей) фазы напряжения мод такие же, что и для первой фазы.

Так же, как и в случае присоединения по схеме крайняя фаза — земля при удалении точки измерения от начала ВЛ примерно на 10 км нулевая мода практически затухает и остается только первая междуфазная мода. При этом напряжение на нерабочих крайних фазах становятся равными примерно половине напряжения на рабочей фазе и при большем

удалении от начала линии это соотношение остается постоянным, а сами напряжения уменьшаются достаточно медленно в соответствии с коэффициентом затухания первой моды.

Проведенный анализ хорошо и наглядно объясняет ход кривых, приведенных на рис. 2.2, *a* и *б*.

Весь вышеизложенный анализ производился при изменении местоположения точки измерений вдоль длины полубесконечной линии для неизменной частоты сигнала, подаваемого в линию. Аналогичные по характеру результаты получаются при рассмотрении частотной зависимости напряжения сигнала в конце полностью согласованной линии фиксированной длины. На рис. 2.6 приведена частотная зависимость затухания линии длиной 80 км для разных схем присоединения к ней при примерном согласовании нагрузки на ее конце с волновыми сопротивлениями линии.

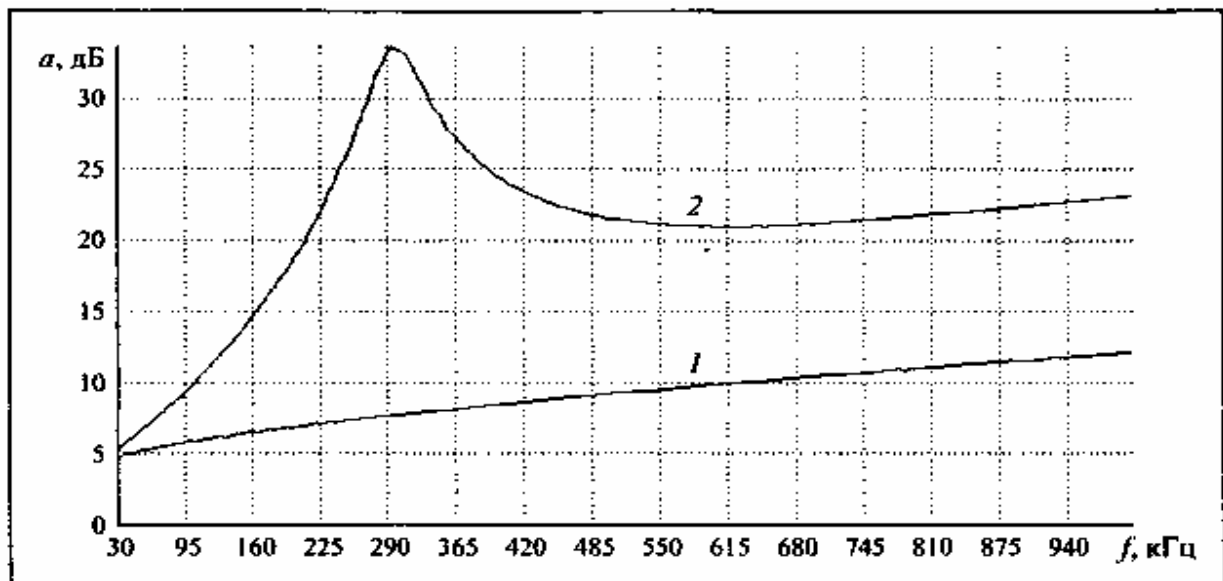


Рис. 2.6. Частотная зависимость затухания линии 220 кВ длиной 80 км при схеме присоединения средняя фаза — земля (1) и крайняя фаза — земля (2)

Из сопоставления приведенных выше результатов расчетов и анализа этих результатов, сделанных для нетранспонированной линии, можно сделать несколько важных выводов:

на линиях с реальными длинами 10 км и более можно считать, что часть напряжения передатчика, попавшая в нулевую моду, полностью затухает на этой длине и напряжение на фазах линии вдали от ее начала определяется только напряжениями междуфазных мод;

однотипные по виду схемы присоединения к ВЛ (например, фаза — земля) имеют существенно разные зависимости напряжения на рабочем проводе от расстояния от начала ВЛ;

наилучшими схемами присоединения к линии являются схемы присоединения, при которых в линии возбуждается только одна междуфазная мода. Такие схемы присоединения называются одномодовыми — по числу междуфазных мод, существующих в линии приданной схеме присоединения. В рассматриваемом случае это схемы средняя фаза - земля (из междуфазных мод в линии существует только первая мода) и фаза - фаза крайние (в линии существует только вторая мода). Зависимость напряжения на рабочей (рабочих) фазе от расстояния от начала линии в этих случаях монотонная без провалов. К этим же схемам можно отнести так называемые квазиодномодовые схемы, при которых возбуждаемое в начале линии напряжение первой моды (с минимальным затуханием и фазовым сдвигом), по крайней мере, не меньше

напряжения второй междуфазной моды (с большим затуханием и фазовым сдвигом). Напряжения на нерабочих фазах при однофазных и квазиоднофазных схемах присоединения всегда меньше, чем напряжение на рабочей фазе. Для рассматриваемой линии такой схемой присоединения является средняя фаза — крайняя фаза);

схемы присоединения, при которых в начале линии возбуждаются напряжения двух междуфазных мод с разными затуханиями и скоростями распространения, при условии, что напряжение моды с большим затуханием и фазовым сдвигом больше напряжения моды с минимальным затуханием и фазовым сдвигом называются многофазными. Зависимость напряжения на рабочей фазе от расстояния от начала линии в этих случаях немонотонная с наличием провалов напряжения или, что то же самое, всплесков или полюсов затухания. Напряжения на нерабочих фазах могут быть значительно больше напряжения на рабочей фазе. Для рассматриваемой линии это схема присоединения крайняя фаза — земля;

при такой длине линий (или при такой частоте), при которых разность между фазовыми углами векторов междуфазных мод достаточно мала, отличие в характере изменения напряжения на рабочей и нерабочих фазах для однофазных и многофазных однотипных схем присоединения невелико. При этом выбор любой фазы в качестве рабочей мало влияет на напряжение на этой фазе и напряжение на рабочей фазе всегда больше напряжения нерабочих фаз;

при длине линии (или при такой частоте), при которых разность между фазовыми углами векторов междуфазных мод достаточно велика, необходимо учитывать различие между параметрами однофазных и многофазных схем присоединения и производить выбор схемы присоединения с учетом этих различий. При этом может оказаться, что на некотором расстоянии от начала линии максимальный сигнал получается не на той фазе, к которой присоединен передатчик в начале линии, а на другой фазе.

Влияние гололедно-изморозиевых отложений на проводах линии на условия передачи сигнала. Появление на проводах ВЛ гололедно-изморозиевых отложений (ГИО) вызывает существенное увеличение коэффициентов затухания модальных составляющих и уменьшение скоростей распространения. Это объясняется, главным образом, потерями

Таблица 2.4. Влияние ГИО на модальные параметры

Напряжение ВЛ, кВ	Параметры и номера мод		Значения параметров α и v для разных мод при разных частотах, кГц			
			50	100	300	1000
220	а, дБ/км	1	0,022/0,09	0,031/0,286	0,057/0,87	0,116/1,23
		2	0,034/0,102	0,066/0,288	0,19/0,9	0,545/1,51
		0	0,66/0,69	1,04/1,28	2,43/3	5,3/6,13
	V, тыс. км/с	1	299,17/274,19	299,38/275,62	299,6/280,16	299,76/282,46
		2	296,58/274,82	297,02/276,35	297,75/280,76	298,5/283,38
		0	265,2/252,52	271,94/259,79	282,24/271,02	289,52/279,22
500	а, дБ/км	1	0,011/0,039	0,02/0,286	0,053/0,366	0,158/0,542
		2	0,061/0,087	0,133/0,219	0,4/0,68	1,06/1,45
		0	0,722/0,76	1,23/1,31	2,62/2,87	5,5/5,86
	V, тыс км/с	1	299,0/288,53	299,12/289,17	299,32/291,11	299,5/292,22
		2	293,15/284,3	294,11/285,7	295,81/288,83	297,37/291,19
		0	264,1/258,41	272,02/266,45	282,24/277,41	289,52/285,32

Примечание. В числителе приведены значения параметров без ГИО, в знаменателе - с ГИО.

электромагнитной энергии в слое гололеда или изморози.

Потери, вносимые гололедом, одинаковы для каждой из модальных составляющих.

Поэтому влияние гололеда приводит к уравниванию потерь в разных модальных составляющих, т.е. к уменьшению различия между коэффициентами затухания α и скоростями распространения v различных мод. При этом максимальное изменение затухания и скорости распространения получается у первой моды и минимальное изменение — у нулевой моды.

При прочих равных условиях изменение в значении коэффициентов затухания α и скоростей распространения v зависит от толщины ГИО, диаметра провода линии и от того расщеплена или нет фаза линии. Это изменение тем больше, чем больше толщина ГИО, чем меньше диаметр провода линии и максимально для линии без расщепления фаз. Для линий с расщепленными фазами влияние ГИО существенно меньше, чем для линий без расщепления фазы.

Для иллюстрации сказанного в табл. 2.4 приведены значения модальных параметров ВЛ 220 кВ с нерасщепленной фазой и ВЛ 500 кВ с фазой, расщепленной на три составляющих, определенные без гололеда и с гололедом при толщине стенки 2 см.

2.2. ВЛИЯНИЕ ТРАНСПОЗИЦИИ ФАЗ ЛИНИИ НА УСЛОВИЯ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛА

Транспозиция фаз — это такой вид нарушения однородности линии, который, практически не приводя к появлению отраженных волн, вызывает появление на участке линии после транспозиции напряжений и токов во всех трех модах, даже в том случае, когда на участке линии до транспозиции имеется напряжение и ток только в одной моде. Рассмотрим это на примере линии с горизонтальным расположением фаз.

Примем, как это показано на рис. 2.7, *а*, что к месту транспозиции фаз подходит падающая волна только одной (первой) моды. Для первой моды, как это следует из предыдущего материала, напряжения в условных единицах на крайних фазах равны - 1, а на средней фазе +2,04*. Напряжения фаз непосредственно до и сразу после транспозиции должны быть одинаковыми. В силу этого, после транспозиции система напряжений на фазах не будет соответствовать ни одной из мод и может быть разложена на модальные составляющие, как это показано на рис. 2.7, *а*.

То же самое можно сказать для случаев, когда на участке линии до транспозиции существует только вторая мода (рис. 2.7, *б*) и только нулевая мода (на рисунке этот случай не отображен, так как в месте транспозиции напряжение этой моды, как правило, отсутствует). Как видно из рис. 2.7, транспозиция фаз приводит к появлению на участке линии после транспозиции напряжений и токов во всех трех модах, даже в том случае, когда на участке линии до транспозиции напряжение и ток существует только в одной моде.

* Принимаем при этом, что отраженные от места транспозиции волны настолько малы, что ими можно пренебречь и считать, что волна проходит через место транспозиции фаз без искажения.

Рассмотрим теперь, как транспозиция повлияет на условия распространения сигнала по линии, на которой дважды (на расстоянии 100 и 200 км от ее начала) осуществлено транспонирование фаз.

Рассмотрим наиболее простой случай, когда рабочая фаза в начале линии — средняя и когда обе нерабочие (крайние) фазы линии заземлены. При этом, на участке линии до первой транспозиции, изменение напряжения фаз при увеличении расстояния точки измерения от начала линии будет происходить достаточно монотонно (также, как и в рассматриваемом ранее случае нетранспонированной линии при схеме присоединения средняя фаза — земля — см. рис. 2.1, *б* и 2.2, *б*). В точке, удаленной от начала линии на расстояние 100 км и расположенной непосредственно перед транспозицией, будет только падающая волна первой моды. В начале второго участка линии после первой транспозиции согласно рис. 2.7,

я появятся напряжения в первой и второй модах (напряжением в нулевой моде можно пренебречь). Поэтому на этом участке линии характер изменения напряжения фаз при увеличении расстояния точки измерения от точки транспозиции будет совершенно другой, чем на первом участке. Он будет примерно такой же, как для двухмодовой схемы присоединения к нетранспонированной линии (см. рис. 2.1, а и 2.2, а). В начале третьего участка линии (после второй транспозиции) напряжения в первой и второй модах появятся как от первой (рис. 2.7, а), так и от второй (рис. 2.7, б) мод, подошедших слева по второму участку линии к месту второй транспозиции. Поэтому характер изменения напряжений фаз по третьему участку по мере удаления от места второй транспозиции будет отличаться от характера изменения, как на первом, так и на втором участках. При этом, как на втором, так и на третьем участках возможны достаточно резкие изменения напряжения фаз относительно земли и соотношения между этими напряжениями, характерные для многомодовых схем присоединения.

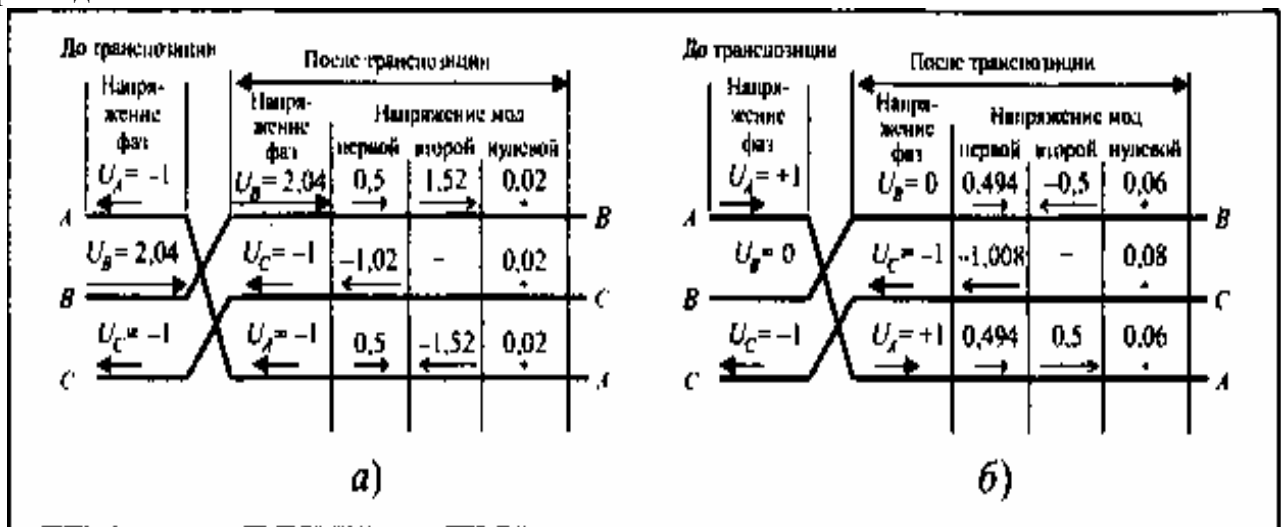


Рис. 2.7. Влияние транспозиции на условия распространения ВЧ сигнала:

а — к месту транспозиции подходит волна только первой моды; б — к месту транспозиции подходит волна только второй моды

2.3. ВЛИЯНИЕ ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН НА ЗАТУХАНИЕ ВЧ ТРАКТА

До сих пор мы рассматривали условия распространения сигнала без учета отраженных волн (по полубесконечной или согласованной линии).

Реальные линии имеют конечную длину и не имеют полного согласования по концам. Поэтому напряжение сигнала в любой точке линии и, в том числе, по ее концам определяется не только падающими, как это рассматривалось в § 2.1 и 2.2, но и отраженными от концов линии волнами. Отраженные волны возникают из падающих в местах нарушения однородности линии (в данном случае на концах линии). Напряжение отраженной волны в месте отражения связано с напряжением падающей волны коэффициентом отражения:

$$U_{отр} = k_{отр} U_{пад} \quad (2.5)$$

Коэффициент отражения показывает насколько нагрузка всех фаз на конце линии отличается от волновых сопротивлений линии. В случае полного согласования нагрузки и волнового сопротивления линии коэффициент отражения равен нулю и отраженная волна не

возникает. Во всех остальных случаях в конце линии возникает отраженная волна. Если к концу линии подходит падающая волна только одной моды, то отраженные волны возникают в общем случае во всех модах, что всегда надо учитывать при анализе условий передачи сигнала по линии.

Отраженная от конца линии волна любой моды распространяется в сторону начала линии и, дойдя до начала линии, складывается с напряжением падающей волны этой же моды. В начале линии угол φ между векторами напряжений падающей и пришедшей к началу отраженной от конца линии волны определяется двойным пробегом волны по длине линии. Для линии длиной l , км, угол φ , рад, вычисляется по формуле, которая с учетом (2.3) записывается в виде:

$$\varphi = 2\beta l = 2 \frac{2\pi f}{v} l. \quad (2.6)$$

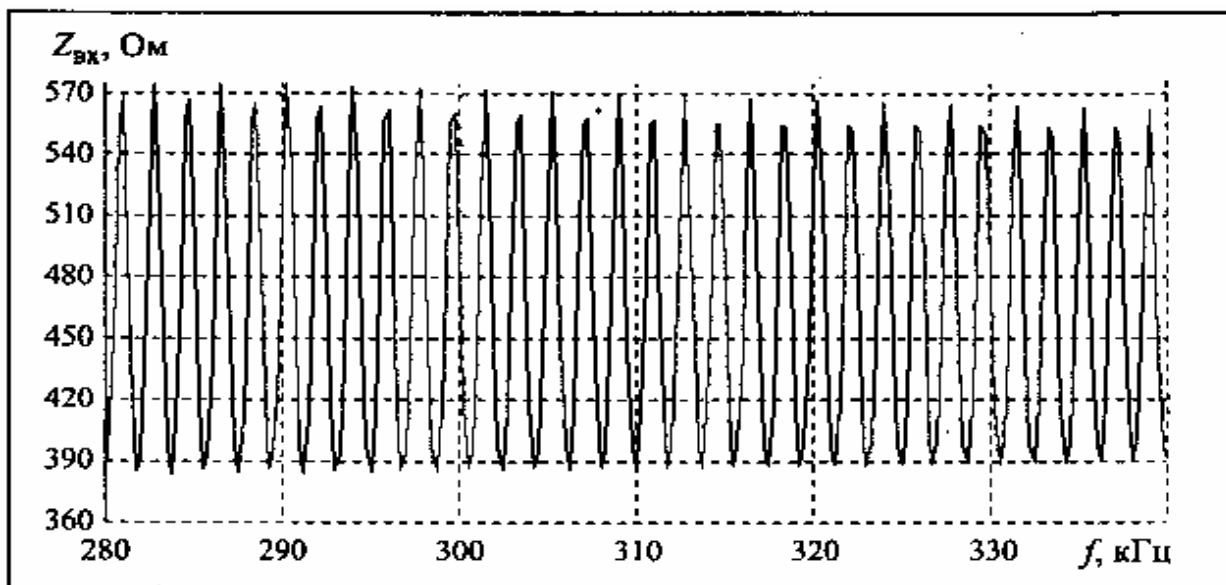


Рис. 2.8. Частотная зависимость входного сопротивления линейного тракта при отсутствии согласования на приемном конце линии

Полные напряжения на фазах являются геометрической суммой падающих и отраженных волн, которые на разных частотах в соответствии с выражением (2.6) находятся в разных фазовых соотношениях. В связи с этим полные напряжения на фазах в начале линии периодически изменяются от арифметической суммы напряжения падающих и отраженных волн (угол φ_1 , определенный по (2.6), кратен четному числу π) до арифметической разности между ними (угол φ_2 кратен нечетному числу π). Это обуславливает периодическое изменение входного сопротивления каждой из фаз линии от максимума до минимума. Интервал между частотами, кГц, соответствующими максимальным и минимальным значениям входного сопротивления $\Delta f_{max-min}$ определяется из выражения:

$$\Delta f_{max-min} = \frac{v}{4l}, \quad (2.7)$$

которое можно получить из очевидного соотношения:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = 2 \frac{2\pi}{\nu} k(f_2 - f_1) = \pi.$$

Влияние отраженных волн на входное сопротивление линейного ВЧ тракта хорошо видно из рис. 2.8, на котором приведена зависимость входного сопротивления линейного тракта от частоты при присоединении по одномодовой схеме средняя фаза - земля к нетранспонированной линии 220 кВ с горизонтальным расположением фаз. Длина линии принята равной 80 км.

Как видно из рисунка, интервал частот, в котором происходит изменение входного сопротивления от максимального до минимального значения, соответствует интервалу, определенному по (2.7). При длине линии l , равной 80 км, если принять скорость ν первой моды, равной 300 тыс. км/с, он примерно равен 0,94 кГц.

Размах изменения входного сопротивления линейного тракта в полосе частот, определяемой по (2.7),

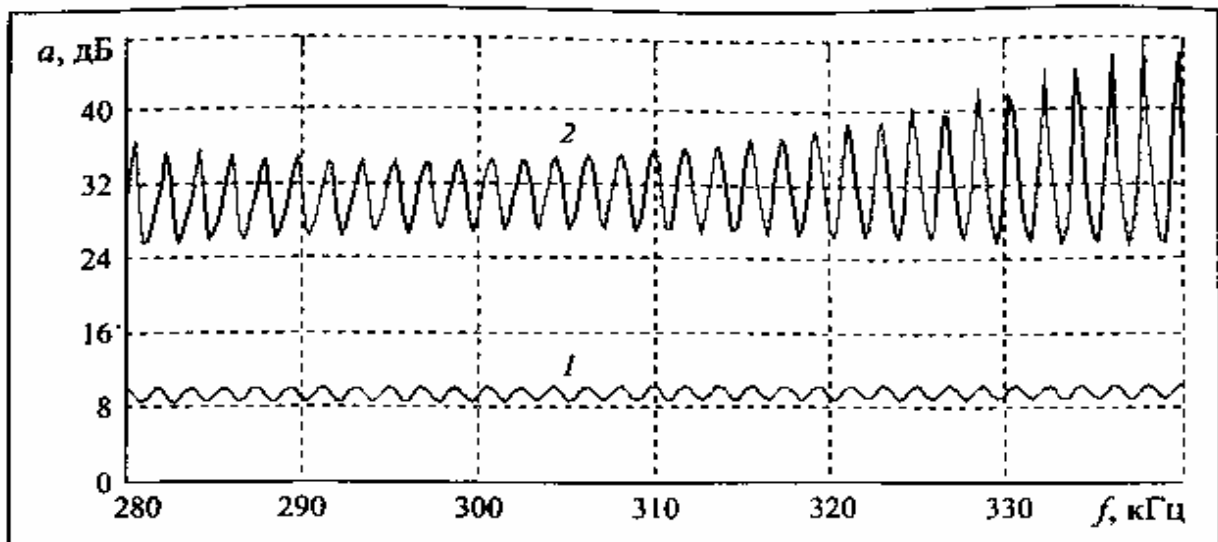


Рис. 2.9. Частотная зависимость затухания линейного тракта при отсутствии согласования на приемном конце линии для присоединения по схеме:

1 — средняя фаза - земля; 2 — крайняя фаза - земля

будет тем меньше, чем меньше коэффициент отражения от приемного конца линии (т.е., чем меньше напряжение отраженной волны в месте отражения) и чем больше затухание междуфазной моды на длине линии (т.е., чем больше ослабляется дошедшая до начала линии волна, отраженная от ее конца).

Зависимость входного сопротивления от частоты для многомодовых схем присоединения имеет тот же характер, что и для одномодовых схем присоединения, лишь незначительно отличаясь от нее в некоторых деталях.

Дошедшая до начала линии отраженная от ее конца волна, при отсутствии согласования в начале линии вновь отразится и, распространяясь вдоль линии, достигнет ее конца. Это приводит к тому, что также как и для начала линии, полные напряжения на фазах в конце линии периодически изменяются от максимального до минимального значения, обуславливая периодическое изменение напряжения на нагрузке конца линии и, соответственно затухания сигнала, передаваемого по тракту. Интервал между частотами, которые соответствуют смежным максимумам и минимумам затухания, также как и для

входного сопротивления, определяется по (2.7).

Влияние отраженных волн на затухание линейных трактов показано на рис. 2.9 на примере уже рассматриваемой линии 220 кВ. На этом рисунке приведены частотные зависимости затухания линейного тракта при одномодовой (кривая 1 для схемы средняя фаза — земля) и многомодовой (кривая 2 для схемы крайняя фаза - земля) схемам присоединения. Условия, при которых производился расчет зависимостей рис. 2.9, одинаковы для обеих схем присоединения — рабочая фаза нагружена на сопротивление 450 Ом, а нерабочие фазы изолированы (для согласованной линии зависимость затухания от частоты приведены на рис. 2.6).

Из этого рисунка хорошо видна разница в характере приведенных зависимостей для разных схем присоединения. Для одномодовой схемы присоединения с использованием для организации тракта одноименных фаз с обеих концов линии размах изменения затухания линейного тракта в полосе частот, определяемой по (2.7), небольшой (примерно 1,5 дБ) и уменьшается с ростом частоты из-за увеличения затухания в тракте отражения. Для многомодовой схемы присоединения размах изменения затухания может достигать до 25 дБ и более (в полосе частот около 950 Гц!), причем с ростом частоты этот размах может как уменьшаться, так и увеличиваться.

2.4. ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА СХЕМ ПРИСОЕДИНЕНИЯ К ВЛ

При выборе схем присоединения к линии предпочтение должно быть отдано оптимальным схемам присоединения. Оптимальными схемами присоединения мы будем называть такие схемы присоединения, при которых затухание ВЧ тракта и нестабильность затухания, вызванная различными причинами, оказываются минимально возможными. Нестабильность затухания может вызываться:

изменением коммутационного состояния линии, при котором изменяется нагрузка фаз на ее концах и, соответственно, условия распределения напряжения сигнала между модами и коэффициент отражения волн от конца линии;

изменением температуры воздуха, которое приводит к изменению стрелы провеса фаз и тросов, т.е. расчетной высоты их подвеса. При этом изменяются потери, вносимые землей в тракт распространения мод, и, соответственно, затухание и скорость распространения мод;

гололедно-изморозиевыми образованиями на фазах и тросах линии, которые значительно увеличивают потери, вносимые в тракт распространения мод.

Принципы выбора схем присоединения к линии формулируются, основываясь на результатах приведенного выше анализа условий распространения сигнала по линиям при помощи модальной теории с учетом конструктивных особенностей линий. С этой точки зрения линии можно разделить на три большие группы: *нетранспонированные симметричные*, *нетранспонированные несимметричные* и *транспонированные*. Рассмотрим эти группы отдельно.

Нетранспонированные симметричные линии. К этой группе относятся нетранспонированные линии, для которых параметры трактов с допустимой погрешностью можно рассчитать, используя теорию симметричных линий.

Симметричными называют такие линии, у которых:

расстояния между всеми проводниками одинаковы;

расстояния между каждым из проводников и землей одинаковы.

У таких линий (которые с некоторыми допущениями реально осуществимы только для кабельных линий) междуфазные моды имеют одинаковые коэффициенты затухания и скорости распространения, и все однотипные схемы присоединения (например, фаза - земля) по своим параметрам не отличаются одна от другой.

Критерием того, можно ли считать параметры линии, используя теорию симметричных линий, или их надо считать с учетом реальной несимметрии, является допустимая погрешность расчета затухания ВЧ тракта. Принято, что допустимая погрешность расчета

затухания, сделанного с использованием теории симметричных линий без учета многократно отраженных волн, не должна превышать ± 2 дБ. При соблюдении этого условия расчет дополнительного затухания, обусловленного наличием в линии многократно отраженных волн, также производится с малой погрешностью. Анализ серии расчетов, проведенных для разных линий, показывает, что указанная погрешность расчета не превышает, если разность между фазовыми углами векторов междуфазных мод на приемном конце линии оказывается не больше, чем 60° .

Разность между фазовыми углами векторов междуфазных мод 1 и 2 для линии длиной l может быть определена как:

$$\Delta\beta l = \beta_2 l - \beta_1 l = \frac{v_1 - v_2}{v_1 v_2} f l, \quad (2.8)$$

где индекс 1 *относят* к моде 1, а индекс 2 — к моде 2.

Как видно из (2.8), при известных и не изменяющихся с изменением частоты значениях скоростей распространения междуфазных мод разность между фазовыми углами векторов междуфазных мод может быть выражена как функция произведения $f l$, где f — максимальная частота, передаваемая по данному ВЧ тракту, а l — длина линии.

Анализ показывает, что к нетранспонированным симметричным линиям (или, для краткости, к симметричным линиям), можно отнести все линии напряжением 35 кВ и те линии напряжением 110 — 220 кВ, для которых произведение максимальной частоты, передаваемой по ВЧ тракту, на длину линии не превышает заданное значение, которое приведено в табл. 2.5. Следует при этом помнить, что одна и та же линия в зависимости от частоты сигнала может рассматриваться как симметричная или как несимметричная.

Для рассматриваемой выше линии 220 кВ при максимально передаваемой по тракту частоте сигнала 300 кГц предельная длина линии, при которой она может считаться симметричной, равна 24 км ($7000/300 = 24$), что хорошо подтверждается результатами расчетов, приведенными на рис. 2.2.

Таблица 2.5. Значения $f_{max} l$, при которых линию можно считать симметричной

Расположение фаз на опоре	Номинальное напряжение линии, кВ	Произведение $f_{max} l$, кГц • км
Горизонтальное	110 220	8000 7000
Треугольное	ПО 220	15000 10000
Двухцепное вертикальное	ПО 220	40000 9000

Для симметричных линий выбор рабочих фаз для организации ВЧ тракта произволен, т.е. любая схема присоединения является оптимальной. Рабочие фазы с обоих концов линии при этом должны выбираться одноименными.

Нестабильность параметров ВЧ тракта по симметричным линиям при изменении коммутационного состояния линии для любой однотипной схемы присоединения примерно одинакова. Однако, для схем присоединения фаза - фаза эта нестабильность меньше, чем для схем присоединения фаза — земля. Нестабильность параметров ВЧ тракта при изменении температуры воздуха одинакова для всех схем присоединения. Гололедно-изморозиевые отложения на проводах линии приводят к примерно одинаковому увеличению затухания для любых схем присоединения.

Нетранспонированные несимметричные линии. Все нетранспонированные линии 110

— 220 кВ, которые не могут быть отнесены к симметричным, и все линии 330 кВ и выше должны рассматриваться как несимметричные. Параметры этих линий нельзя рассчитывать, используя теорию симметричных линий.

Для несимметричных линий оптимальными для организации ВЧ тракта являются однофазные и квазиоднофазные схемы присоединения. В табл. 2.6 для линий с различными типами расположения фаз на опоре даны рекомендации по выбору фаз, обеспечивающему получение оптимальных схем присоединения. Кроме схем присоединения, перечисленных в табл. 2.6, оптимальной схемой является внутрифазная схема с присоединением к изолированным проводам расщепленных фаз.

Другие схемы присоединения, в том числе и те, которые называют перекрестными (когда на разных концах линии используются разноименные фазы) являются неоптимальными и возможность их использования должна специально обосновываться и проверяться

Таблица 2.6. Выбор фаз для получения оптимальных схем присоединения к нетранспонированной линии

Расположение фаз на опоре	Номера фаз для присоединения вида	
	фаза - земля	фаза — фаза
Горизонтальное	2	1-2, 2-3, 1-3
Треугольное	2	1-2
Двухцепное вертикальное	1,2,4,5	1-2, 1-4, 4-5

Примечание. Нумерация фаз линии соответствует приведенной на рис. 2.1

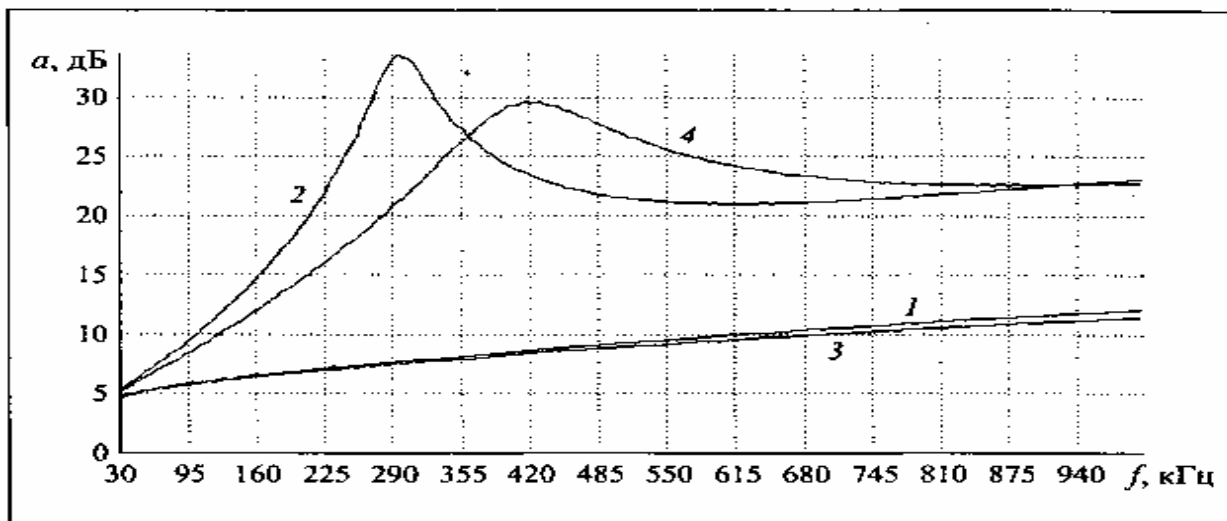


Рис. 2.10. Частотные зависимости затухания для согласованной по концам линии 220 кВ с горизонтальным расположением проводов при разных стрелах провеса и схемах присоединения:

1,3— средняя фаза — земля; 2,4— крайняя фаза — земля. Кривые 1 и 2 — для температуры окружающего воздуха + 35 °С; кривые 3 и 4 — для + 15 °С

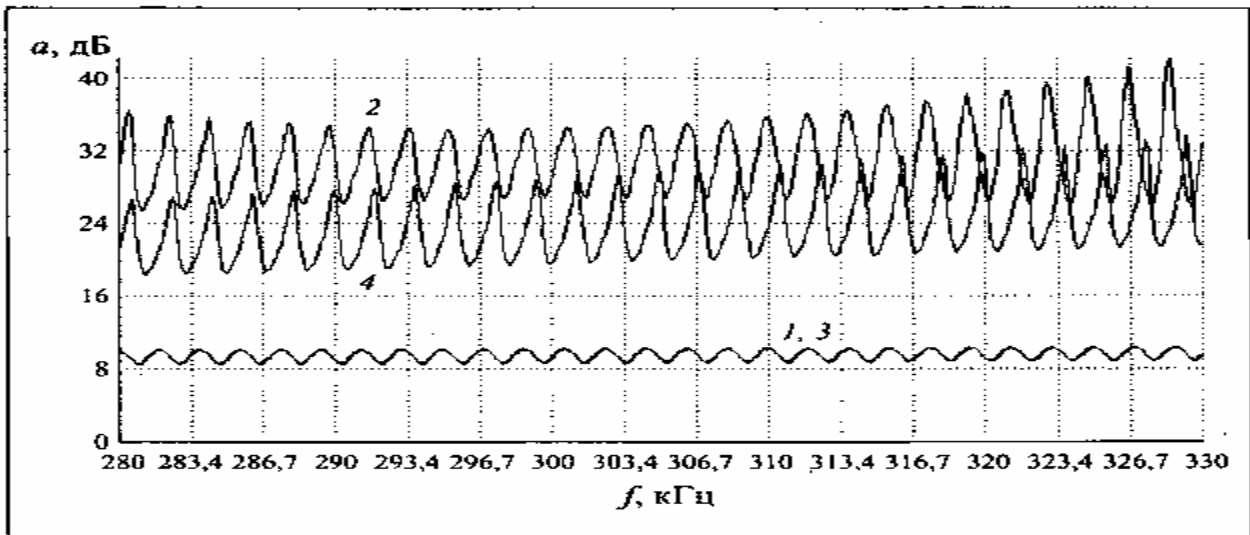


Рис. 2.11. Частотные зависимости затухания для несогласованной по концам линии 220 кВ с горизонтальным расположением проводов при разных стрелах провеса и схемах присоединения:

1, 3 — средняя фаза — земля; 2, 4 — крайняя фаза — земля. Кривые 1 и 2 — для температуры окружающего воздуха + 35 °С; кривые 3 и 4 — для + 15 °С

Нестабильность параметров ВЧ тракта по нетранспонированным несимметричным линиям при оптимальных схемах присоединения примерно такая же, как и для тракта по симметричным линиям.

При присоединении к ВЛ по неоптимальным схемам нестабильность параметров тракта может быть очень велика. Так, например, только изменение температуры окружающего воздуха на 20 °С может привести к значительному изменению затухания и частотной зависимости этого затухания.

Это хорошо видно из рис. 2.10 и 2.11, на которых приведены частотные зависимости затухания для оптимальной (средняя фаза — земля) и неоптимальной (крайняя фаза — земля) схем присоединения к линии 220 кВ при разных температурах воздуха. При этом кривые на рис. 2.10 получены при примерно согласованном режиме нагрузки по концам линии (когда каждая из фаз нагружена относительно земли на сопротивление 450 Ом), а кривые на рис. 2.11 — когда нагрузка рабочей фазы равна 450 Ом, а нерабочие фазы изолированы. Длина линии принята равной 80 км.

Разный (для разных схем присоединения) характер изменения затухания линии при изменении температуры воздуха объясняется следующим образом. При оптимальной схеме присоединения изменение затухания обусловлено только достаточно малым изменением затухания первой моды (за счет потерь, вносимых землей). При неоптимальной схеме присоединения изменение затухания линии обусловлено, в основном, не изменением затухания междуфазных мод, а изменением разности скоростей распространения первой и второй модальных составляющих. Небольшое изменение скоростей приводит к существенному изменению фазовых соотношений между напряжениями первой и второй модальных составляющих на приемном конце линии и, следовательно, к существенному изменению результирующего напряжения приема рабочей фазы.

Если по каким-либо причинам для организации ВЧ тракта по нетранспонированной несимметричной линии невозможно выбрать оптимальную схему присоединения, допускается выбор неоптимальной многомодовой схемы. Однако, в этих случаях существуют некоторые ограничения по использованию многомодовых схем. Как правило, в качестве критерия, определяющего эти ограничения, используют произведение $f_{\max}l$. Эти ограничения вызваны необходимостью обеспечения стабильности параметров ВЧ трактов

при изменении коммутационного состояния линии и температуры воздуха.

Таблица 2.7. Значения $f_{max}l$, при которых когда можно использовать неоптимальные схемы присоединения к нетранспонированным ВЛ

Расположение фаз на опоре	Номинальное напряжение линии, кВ	Произведение $f_{max}l$, кГц • км
Горизонтальное	110	12000
	220	10000
	330	6000
	500	4500
	750	4500
Треугольное	ПО	60000
	220	15000
	330	10000
Двухцепное вертикальное	110	16000
	220	10000
	330	8000

Анализ серии расчетов, проведенных для разных линий, показывает, что стабильность параметров ВЧ тракта при неоптимальных схемах присоединения с использованием одноименных фаз на обоих концах линии остается в допустимых пределах, если разность между фазовыми углами векторов междуфазных мод на приемном конце линии, определяемая по (2.8), оказывается не больше, чем 90° .

Значение произведения $f_{max}l$, с помощью которого можно сделать оценку ограничения по использованию ВЧ трактов с неоптимальными схемами присоединения к одноименным фазам с учетом стабильности параметров таких схем, приведены в табл. 2.7.

Отдельно следует сказать о возможности использования перекрестных схем присоединения типа фаза - земля к нетранспонированной линии. При их использовании частоты передаваемых сигналов должны ограничиваться не только сверху, как это делается для других неоптимальных схем присоединения, но и снизу. Ограничение снизу необходимо для уменьшения влияния на параметры

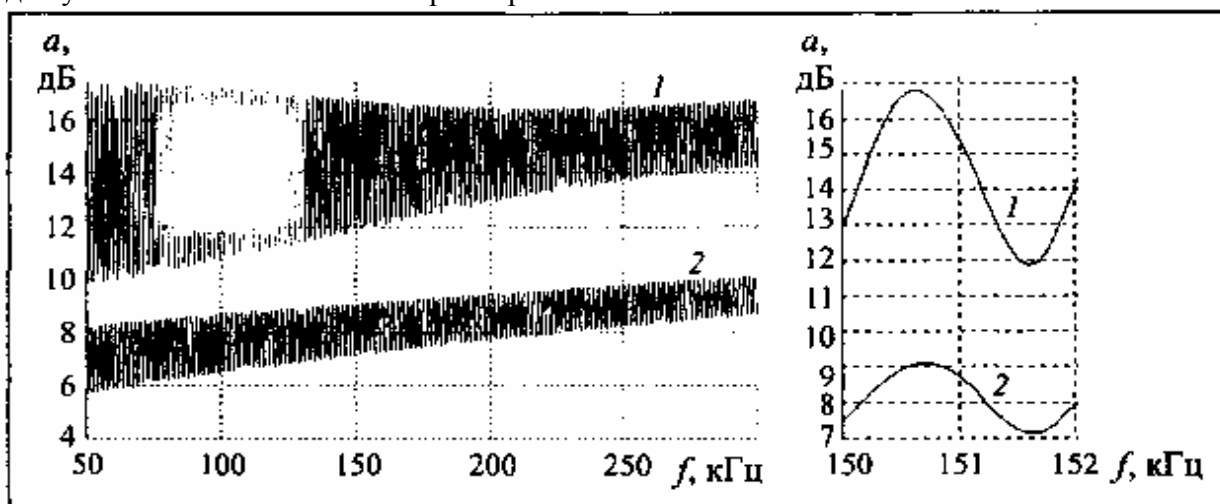


Рис. 2.12. Частотные зависимости затухания ВЧ тракта по ВЛ 220 кВ:

a — общий вид зависимости в широкой полосе частот; *б* — детали зависимости в узкой полосе частот; 1 — перекрестная схема присоединения средняя фаза — земля с одного конца и крайняя фаза — земля с другого конца линии; 2 — схема присоединения средняя фаза — земля с обоих концов линии

ВЧ тракта многократно отраженных волн и обеспечения стабильности параметров ВЧ тракта при изменении коммутационного состояния линии.

Покажем необходимость такого ограничения на примере линии с горизонтальным расположением проводов при использовании присоединения крайняя фаза - земля с одного конца линии и средняя фаза - земля с другого ее конца. Такая схема иногда необоснованно причисляется к оптимальным, так как формально эта схема может быть отнесена к однофазным. На рис. 2.12 приведена частотная зависимость затухания ВЧ тракта по ВЛ 220 кВ с перекрестной схемой присоединения средняя фаза - земля с одного конца и крайняя фаза - земля с другого конца линии. Для сравнения на этом же рисунке приведена частотная зависимость затухания тракта с присоединением с обоих концов линии по схеме средняя фаза - земля (оптимальная схема). Зависимости получены для случая, когда нагрузка рабочей фазы равна 450 Ом, а нерабочие фазы изолированы. Длина линии принята равной 80 км.

Из рисунка видно, что неравномерность затухания тракта при перекрестном присоединении к линии в области низких частот оказывается недопустимо большой и уменьшается до приемлемых пределов только на сравнительно высоких частотах.

Транспонированные линии. Как уже отмечалось, транспозиция фаз производится на линиях, длина которых превышает 100 км. Такую длину, как правило, имеют только линии 330 кВ и выше.

Параметры ВЧ трактов по таким линиям всегда определяют с учетом несимметрии этих линий.

У линий со стандартной схемой транспозиции, показанной на рис. 1.4, в принципе, нет однофазных или квазиоднофазных схем присоединения, они все многофазные. Это вытекает из приведенного в § 2.2 рассмотрения влияния транспозиции на условия распространения сигнала. Тем не менее, все схемы присоединения к транспонированной линии можно разбить на две группы. В первой группе явления, связанные с многофазностью распространения сигнала, проявляются на относительно высоких частотах или не проявляются вовсе, а во второй группе эти явления проявляются достаточно отчетливо и на более низких частотах.

Иллюстрация принципа, положенного в основу разбиения схем присоединения на две группы иллюстрируется результатами расчета затухания ВЧ тракта при разных схемах подключения к линии 330 кВ, приведенными на рис. 2.13. Схема линии соответствует рис. 1.4 при длине шага транспозиции, равном 50 км (общая длина линии 150 км).

Оптимальными (в оговоренном выше смысле) схемами для транспонированной линии принято называть схемы, относящиеся к первой группе.

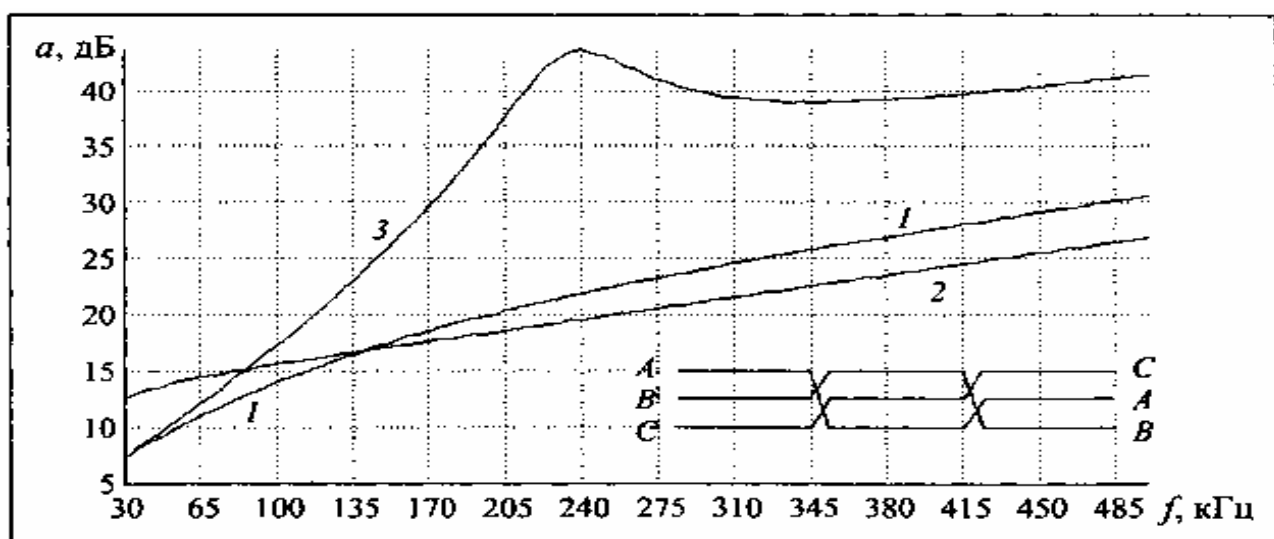


Рис. 2.13. Частотные зависимости затухания линейного ВЧ тракта по транспо-

нированной ВЛ 330 кВ с горизонтальным расположением фаз:

/ — фаза *A* - земля или фаза *B* - земля; 2 — фаза *B* — земля/фаза *A* - земля; 3 — фаза *C* - земля

Для линии с горизонтальным расположением проводов и транспозицией фаз, показанной на рис. 1.4, оптимальными являются следующие схемы присоединения (с учетом обозначения фаз рис. 1.4):

фаза *A* — земля на обоих концах ЛЭП;

фаза *B* — земля на обоих концах ЛЭП;

фаза *B* — земля на левом конце линии/фаза *A* — земля на правом конце линии (т.е. с обоих концов линии присоединение осуществляется по схеме средняя фаза - земля);

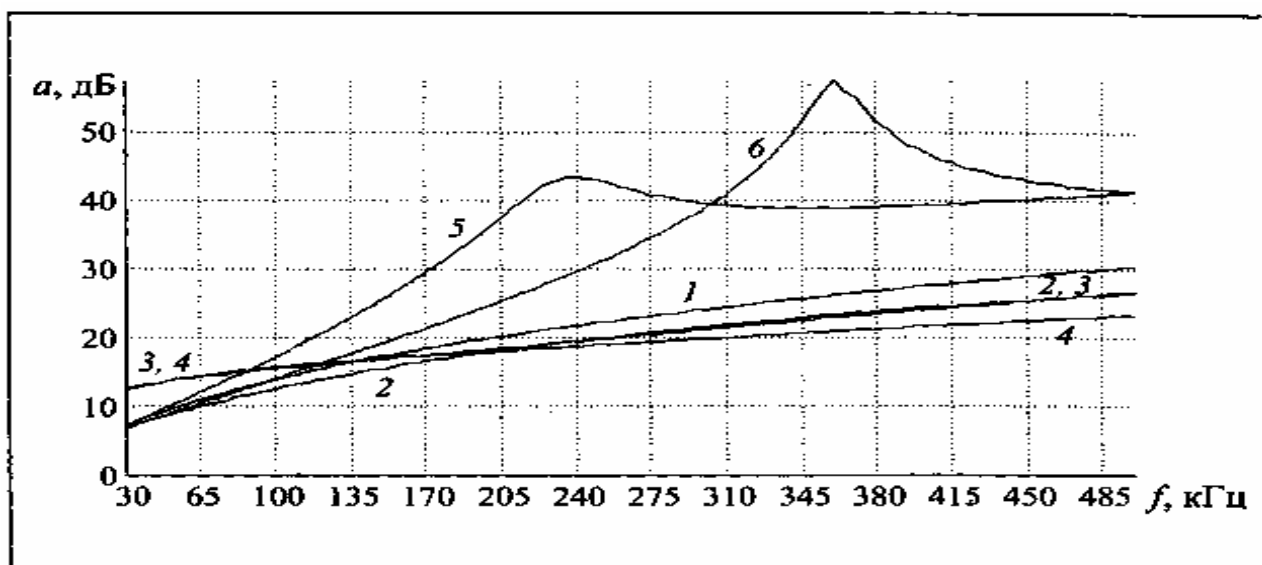
фаза *A* — фаза *B* на обоих концах ЛЭП.

Остальные схемы присоединения (например, фаза *C* — земля или фаза *A* - фаза *C* и фаза *B* - фаза *C*) относятся к неоптимальным схемам.

При рассмотрении возможности организации ВЧ канала по транспонированной линии всегда необходимо помнить об отличии оптимальных схем присоединения к транспонированным линиям от оптимальных схем присоединения к нетранспонированным линиям. Для оптимальной схемы присоединения к нетранспонированной линии *ни при каких обстоятельствах* не могут возникать явления, связанные с увеличением затухания тракта из-за неблагоприятных фазовых соотношений между напряжениями междуфазных мод на приемном конце линии. Поэтому для этих схем нет ограничений по их использованию. Для оптимальных схем присоединения к транспонированной линии такие ограничения существуют, потому что при определенных обстоятельствах (большое удельное сопротивление земли в районе прохождения линии, высокие рабочие частоты канала, большое номинальное напряжение линии, при котором используют расщепленные фазы, и расстояния между фазами велики) указанные явления все же могут возникать.

Если по тем или иным причинам окажется необходимым использовать неоптимальные схемы присоединения, то возможность такого использования должна каждый раз специально обосновываться, особенно при достаточно высоких частотах, близких к частоте "полюса затухания".

Как правило, стабильность параметров трактов с оптимальными схемами присоединения к транспонированным линиям существенно больше, чем трактов с неоптимальными схемами присоединения. Это хорошо видно из рис. 2.14, на котором показано как изменяется



/we. 2.14. Частотные зависимости затухания линейного ВЧ тракта по ВЛ 330 кВ с горизонтальным расположением фаз при разных стрелах провеса проводов:

1 и 2 — фаза *A*- земля или фаза *B*- земля; 3 и 4 — фаза *B*-земля/фаза *A* - земля; 5 и 6 — фаза *C* - земля; кривые 1, 3 и 5 — при температуре воздуха + 35 °С; кривые 2, 4 и 6 — при + 15 °С

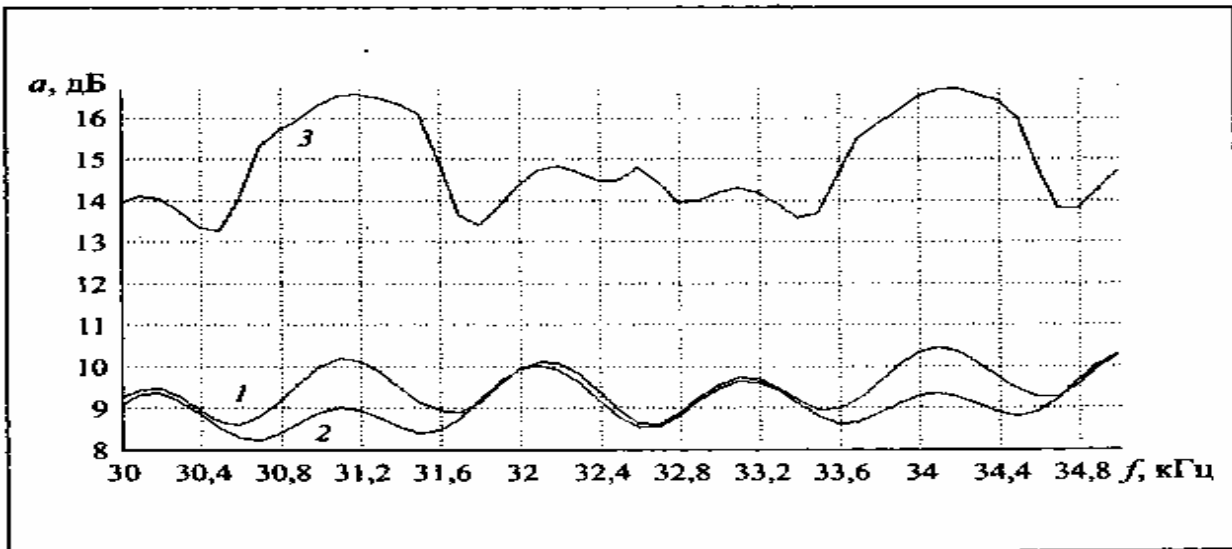


Рис. 2.15. Зависимости затухания в узкой полосе частот для линейного ВЧ тракта по ВЛ 330 кВ с горизонтальным расположением фаз:

1 — фаза *A* - земля или фаза *B* - земля; 2 — фаза *C* — земля; 3 — фаза *B* - земля/фаза *A* — земля

затухание тракта при изменении температуры воздуха на 20 °С, приводящей к изменению стрелы провеса фаз.

Транспонированные линии имеют достаточно большую длину, и поэтому влияние многократно отраженных волн на затухание тракта проявляется в весьма малой степени для любых (оптимальных и неоптимальных) схем присоединения. При этом неравномерность затухания, обусловленная многократно отраженными волнами, оказывается достаточно малой, даже на низких частотах. Правда, это не всегда справедливо для схемы с присоединением на разных концах линии к средней фазе, при которой неравномерность затухания может оказаться повышенной. Это хорошо видно из рассмотрения кривых на рис. 2.15.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

Влияние на параметры ВЧ тракта ответвлений от ВЛ, ВЧ обходов промежуточных подстанций и кабельных вставок

3.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В гл. 2 рассмотрены особенности распространения сигналов по ВЧ тракту, в схему которого входит только многопроводная ЛЭП, и приведены рекомендации по выбору оптимальных схем присоединения к линии. В то же время ВЧ тракт может быть организован по ЛЭП с ответвлениями к промежуточным подстанциям или кабельными вставками в ВЛ электропередачи. Кроме того, часто ВЧ тракт образуют по двум и более ЛЭП с организацией ВЧ обходов промежуточных подстанций. И ответвления, и кабельные вставки, и ВЧ обходы нарушают однородность ЛЭП, входящих в схему тракта, и значительно влияют на условия распространения сигналов по ВЧ тракту.

Рассмотрим влияние указанных типов нарушения однородности линии на параметры ВЧ тракта. Все рассмотрение будем делать, считая, что линии, входящие в тракт, нетранспонированные и присоединение к ним осуществляется по оптимальным схемам.

Такое допущение практически не ограничивает использование полученных данных, так как все указанные виды нарушения однородности ЛЭП, как правило, встречаются на линиях 35 — 110 кВ, для которых все схемы присоединения можно считать оптимальными.

3.2. ВЛИЯНИЕ ОТВЕТВЛЕНИЯ ОТ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Степень влияния ответвления на параметры ВЧ тракта несколько различается в зависимости от того, организован или нет канал ВЧ связи к ПС на конце ответвления. Рассмотрим эти два случая отдельно.

Ответвление не используется для организации связи. Рассмотрим влияние на примере линии ПС А — ПС В с ответвлением к ПС С (рис. 3.1, а). При рассмотрении условий передачи сигнала между концами линии от пункта А до пункта В ответвление к ПС С может быть представлено в виде шунта, сопротивление которого равно входному сопротивлению ответвления. Таким образом, схему рис. 3.1, а можно представить в виде однолинейной эквивалентной схемы, изображенной на рис. 3.1, б.

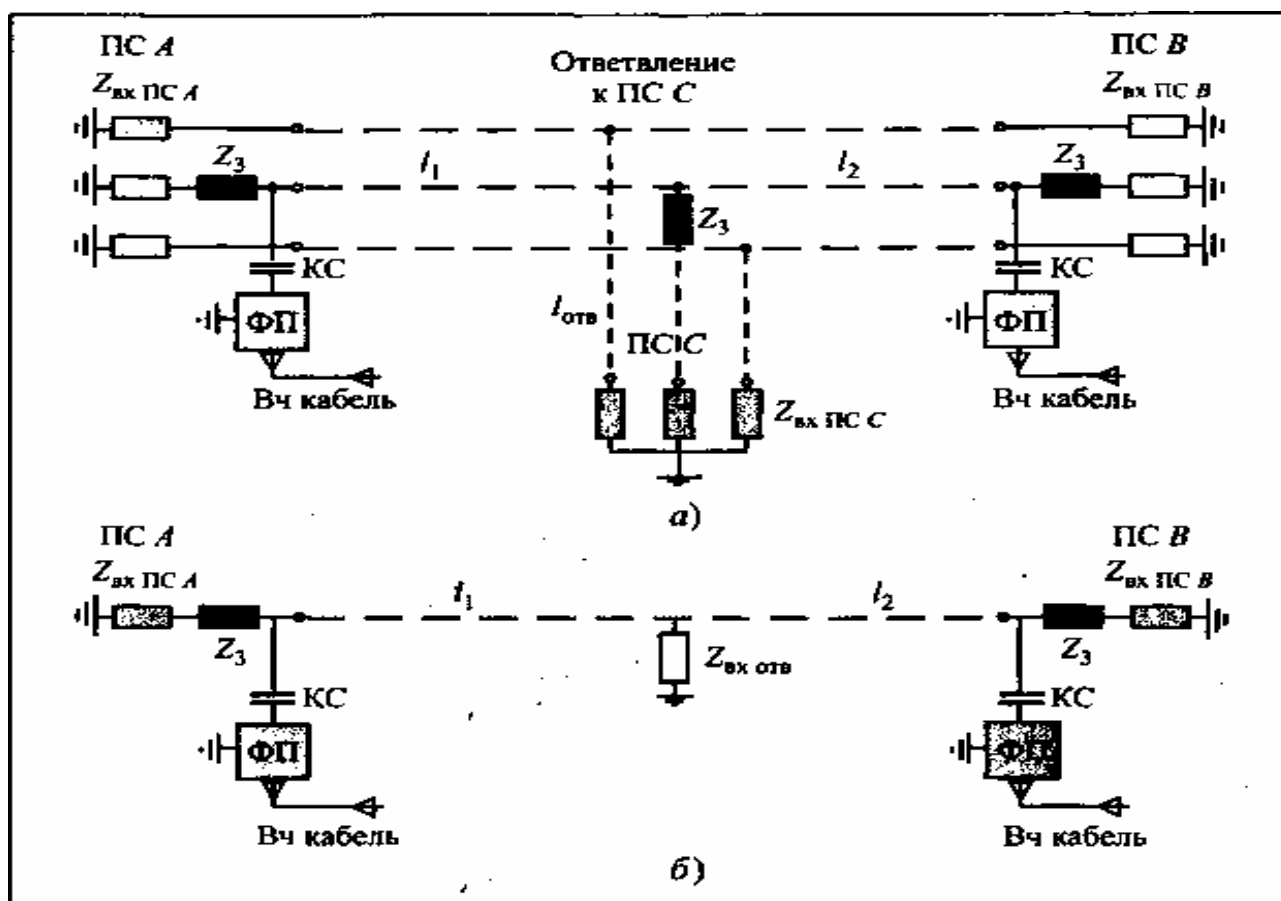


Рис. 3.1. Схема тракта с ответвлением:
а — трехлинейная; б — однолинейная эквивалентная

Входное сопротивление ответвления, представляющего собой короткую линию с длиной $l_{отв}$, зависит от режима нагрузки конца ответвления и соотношения длины ответвления и частоты рассматриваемого сигнала. В процессе эксплуатации нагрузка конца ответвления может изменяться от полной изоляции фаз линии в конце ответвления, когда линия отключена от ПС С (режим холостого хода — ХХ) до замыкания фаз на землю, когда линия отключена от ПС С и заземлена (режим КЗ). В случае, когда линия в конце ответвления подключена к ПС С, конец ответвления нагружен на входное сопротивление ПС. Для

небольших ПС, которые, как правило, включаются на конце ответвления, входное сопротивление имеет чисто емкостной характер и эти ПС обычно представляют эквивалентной емкостью.

Во всех указанных режимах нагрузки конца ответвления модуль коэффициента отражения падающих волн от конца ответвления равен единице. В этом случае (при отсутствии заградителя в начале ответвления) входное сопротивление ответвления в месте его подключения к основной линии будет с изменением частоты сигнала периодически изменяться от минимального значения, которое намного меньше волнового сопротивления линии, до максимального, которое намного больше этого сопротивления.

Так, например, если пренебречь затуханием волн на длине ответвления и принять, что все провода ответвления изолированы на его конце, то на частотах, четверть длины волны которых укладывается на длине ответвления нечетное число раз, входное сопротивление ответвления будет равно нулю. На частотах, четверть длины волны которых укладывается на длине ответвления четное число раз, входное сопротивление ответвления будет равно бесконечности. При КЗ всех проводов на конце ответвления, наоборот — на частотах, четверть длины волны которых укладывается на длине ответвления нечетное число раз, входное сопротивление ответвления будет равно бесконечности, а на частотах, четверть длины волны которых укладывается на длине ответвления четное число раз, входное сопротивление ответвления будет равно нулю.

При нагрузке конца ответвления на емкость, эквивалентирующую входное сопротивление ПС С, частоты, соответствующие минимальному и максимальному значению входного сопротивления, будут занимать промежуточное положение между указанными выше частотами.

Соответственно, затухание, вносимое в ВЧ тракт ответвлением, будет изменяться при изменении частоты от достаточно большого значения до достаточно малого. Изменение это будет происходить в интервале частот Δf , определяемом из выражения (2.7), которое, если принять скорость распространения междупазной волны v равной скорости света (300 тыс. км/с), может быть записано как:

$$\Delta f_{\max - \min} \approx \frac{300}{4l_{\text{отв}}} = \frac{75}{l_{\text{отв}}}, \quad (3.1)$$

где Δf_{\max} выражается в килогерцах, а $l_{\text{отв}}$ — в километрах.

На рис. 3.2 приведена частотная зависимость затухания "сквозного" ВЧ тракта между ПС А и В при разных режимах нагрузки на конце ответвления. Эти зависимости определялись для схемы присоединения фаза-земля к линии 110 кВ, представленной на рис. 3.1, со следующими данными: $l_1 = 12$ км, $l_2 = 15$ км, $l_{\text{омв}} = 7,5$ км, эквивалентная емкость ПС С равна 5000 пФ. При этом принято, что линия на ПС А и ПС В полностью согласована (этим исключается влияние волн, отраженных от концов линии, на частотную зависимость затухания ВЧ тракта). Для сопоставления на этом же рисунке приведены частотные зависимости затухания линии без ответвления. Приведенные зависимости иллюстрируют сказанное выше о характере частотной зависимости затухания ВЧ тракта с ответвлением.

Как видно из рис. 3.2, затухание, вносимое ответвлением в сквозной ВЧ тракт, на некоторых частотах очень велико (в данном случае доходит до 20 дБ) и в большой степени зависит от коммутационного состояния конца ответвления.

Для уменьшения шунтирующего действия ответвления и увеличения стабильности затухания, вносимого ответвлением в "сквозной" ВЧ тракт при переключениях на линии, ответвление "обрабатывают". Это значит, что вблизи места подключения ответвления к основной линии, в линию ответвления включают ВЧ заградители, настроенные на полосу

частот, которая передается по сквозному ВЧ тракту. При этом минимальное значение входного сопротивления ответвления

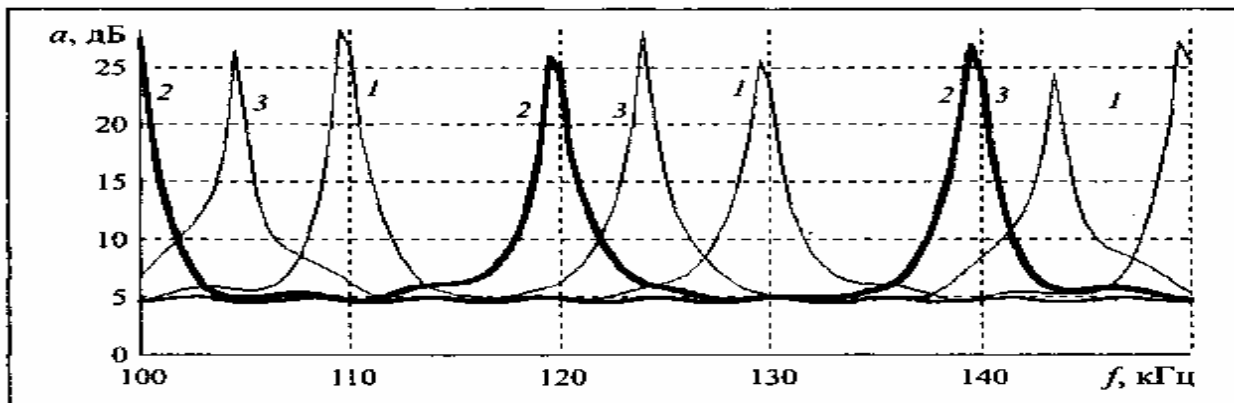


Рис. 3.2. Частотные зависимости затухания тракта с ответвлением при разных режимах нагрузки конца ответвления:

1 — XX конца ответвления; 2 — КЗ конца ответвления; 3 — конец ответвления нагружен на емкость 5 нФ; 4 — затухание линии без ответвления

для обработанных фаз становится примерно равным сопротивлению заградителя и шунтирующее действие ответвления на сквозной ВЧ тракт резко уменьшается. Степень уменьшения шунтирующего действия зависит от числа обработанных фаз. Как правило, заградители включают только в рабочую фазу (при схеме фаза - фаза — в обе рабочие фазы).

На рис. 3.3 приведена частотная зависимость затухания ВЧ тракта с ответвлением, у которого рабочая фаза обработана ВЧ заградителем с активным сопротивлением, равным 650 Ом. Эта зависимость построена только для случая XX на конце ответвления. Для сравнения на этом же рисунке приведена частотная зависимость затухания при отсутствии ВЧ заградителя. Из этого рисунка хорошо видно, что наличие ВЧ заградителя снижает максимальное затухание, вносимое в сквозной ВЧ тракт ответвлением, примерно с 20 до 4 дБ.

Частотные зависимости затухания, представленные на рис. 3.2 и 3.3, получены для случая, когда на концах линии (ПС *A* и *B*) включена согласованная нагрузка, что исключает влияние на параметры тракта многократно отраженных волн и не дает возможности оценить влияние на стабильность затухания тракта изменения коммутационного состояния ВЛ на ПС *A* и *B*.

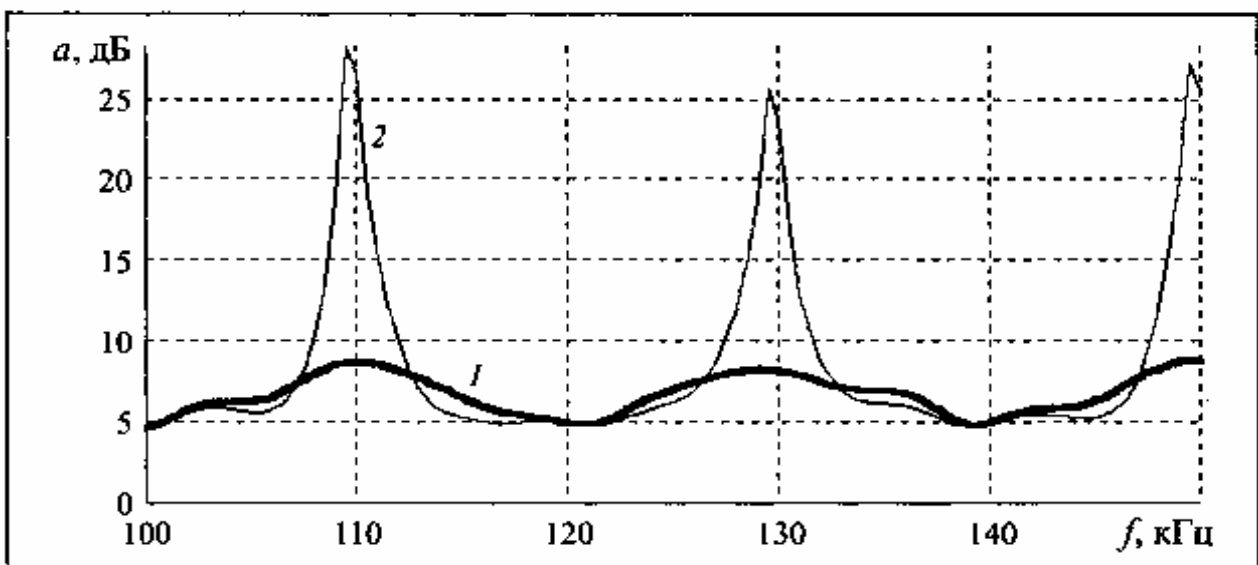


Рис. 3.3. Частотные зависимости затухания тракта с ответвлением при режиме XX на конце ответвления:

/ — в рабочую фазу линии ответвления включен ВЧ заградитель с активным сопротивлением 650 Ом; 2 — ответвление не "обработано"; схема фаза — земля

В реальных условиях для схемы присоединения фаза — земля, модуль коэффициента отражения междуфазной волны от конца линии может достигать 0,4 — 0,6, обуславливая появление в тракте многократно отраженных волн, которые влияют на частотную зависимость параметров ВЧ тракта. Кроме того, изменение сопротивления нагрузки нерабочих фаз ВЛ на ПС *A* и *B* влияет на соотношение энергии междуфазных и нулевой модальных составляющих в линии.

На рис. 3.4 представлены частотные зависимости затухания тракта по линии с обработанным ответвлением для двух крайних коммутационных состояний линии — линия отключена (кривая 1) и линия отключена и заземлена на всех трех ПС (кривая 2). Схема присоединения — фаза - земля.

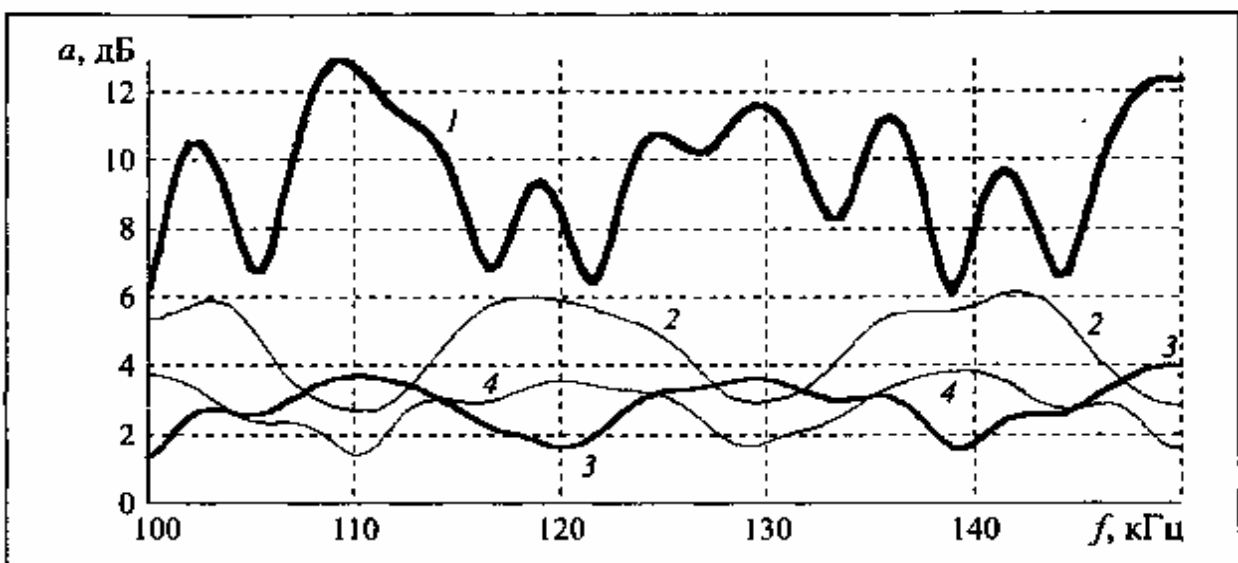


Рис. 3.4. Частотные зависимости затухания тракта с ответвлением, обработанным заградителями для схем присоединения:

1 и 2 — фаза - земля; 3 и 4 — фаза - фаза; 1 и 3 — линия отключена и не заземлена (режим XX); 2 и 4 — линия отключена и заземлена (режим КЗ) на всех трех ПС линии

На рисунке видно волнообразное изменение затухания, обусловленное как периодическим изменением затухания, вносимого ответвлением ($\Delta f_{max - min} \approx 10$ кГц), так и многократными отражениями волн между местом включения ответвления и концами линии ($\Delta f_{max - min} \approx 3 \div 4$ кГц).

Следует сказать, что при схеме присоединения фаза - фаза неравномерность частотной зависимости затухания, вносимого ответвлением в сквозной ВЧ тракт, и нестабильность этого затухания при изменении коммутационного состояния ВЛ существенно меньше, чем для схемы фаза — земля, что хорошо видно из рис. 3.4, где приведены соответствующие зависимости (кривые 3 и 4).

Ответвление используется для организации связи. В случае, когда организуется трехконцевой канал связи между ПС *A*, *B* и *C*, в месте подключения ответвления

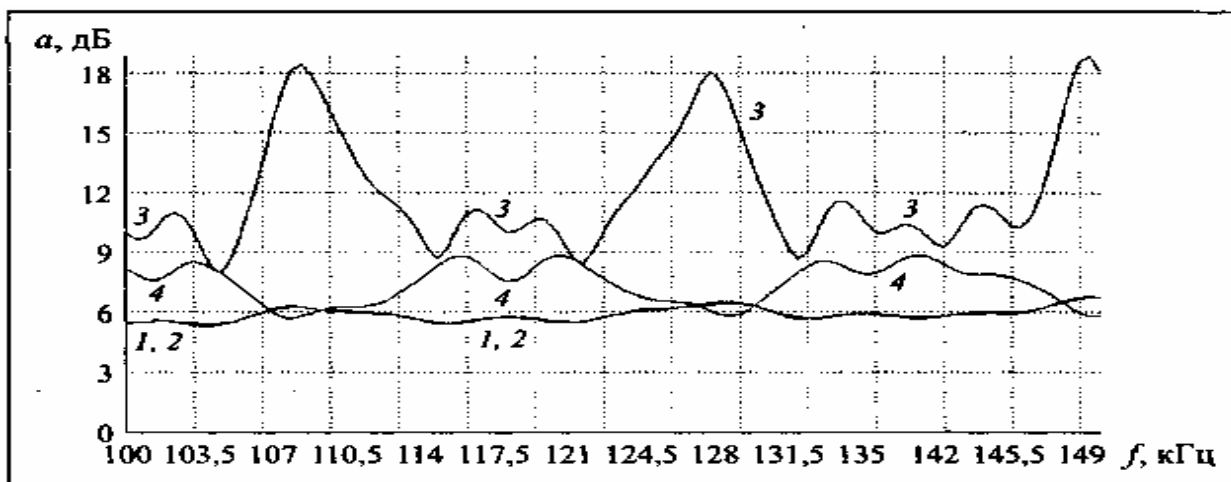


Рис. 3.5. Частотные зависимости затухания тракта с обработанным на конце ответвлением для схем присоединения:

1,2— фаза — фаза; 3,4— фаза — земля; 1, 3— XX нерабочих фаз; 2,4— КЗ нерабочих фаз

к основной линии ВЧ заградитель не включают. Вместо этого на конце ответвления к рабочей фазе линии подключается фильтр присоединения с конденсатором связи и в эту фазу включается ВЧ заградитель, отделяющий входное сопротивление ПС C от места включения фильтра присоединения. При этом коэффициент отражения от конца ответвления становится меньше 1 и максимальное затухание, вносимое ответвлением в сквозной тракт уменьшается, а минимальное — возрастает по сравнению с тем случаем, когда ответвление не обрабатывается.

Если нагрузка на конце ответвления выбрана так, что она полностью согласуется с волновым сопротивлением линии (для этого при схеме присоединения фаза — земля необходимо обработать заградителями и фильтрами присоединения все три фазы на конце ответвления), то ответвление будет вносить в сквозной тракт затухание 3,5 дБ, которое не зависит от частоты. Реально при схеме присоединения фаза — земля модуль коэффициента отражения междофазной волны от конца ответвления может достигать 0,4 — 0,6. При этом затухание, вносимое ответвлением в сквозной тракт, будет существенно зависеть от частоты и от коммутационного состояния линии.

При схеме присоединения фаза — фаза можно получить достаточно хорошее согласование на конце ответвления и затухание, вносимое в сквозной тракт ответвлением, практически не будет зависеть от частоты и от коммутационного состояния линии.

Для примера на рис. 3.5 представлены частотные зависимости затухания сквозного тракта для схем присоединения фаза - земля и фаза - фаза. Зависимости приведены для случаев, когда к рабочей фазе (рабочим фазам) на конце ответвления подключено сопротивление 450 Ом (эквивалент фильтра присоединения), а нерабочая (нерабочие) фаза изолирована или заземлена.

3.3. ВЛИЯНИЕ ВЧ ОБХОДОВ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Как уже говорилось, часто для организации канала связи ВЧ тракт образуют по двум и более линиям электропередачи. При этом на промежуточных подстанциях организуют ВЧ обходы этих подстанций для обеспечения работы канала в любых коммутационных состояниях линий, входящих в ВЧ тракт.

Рассмотрим влияние ВЧ обхода на затухание ВЧ тракта на примере схемы, представленной на рис. 3.6.

Особенности влияния ВЧ обхода на затухание сквозного ВЧ тракта проявляются в том случае, когда передача сигнала между участками линий, входящими в схему тракта до и после обхода, осуществляется не только через саму схему обхода, состоящую из цепочно соединенных ФП и ВЧ кабеля, подключенных к рабочим фазам линий, но и по другим "паразитным" путям. Одним из "паразитных" путей является путь по нерабочим фазам линий, образующих тракт, соединяющимся через сборные шины подстанции. Вторым путем является участок параллельного сближения линий, образующих

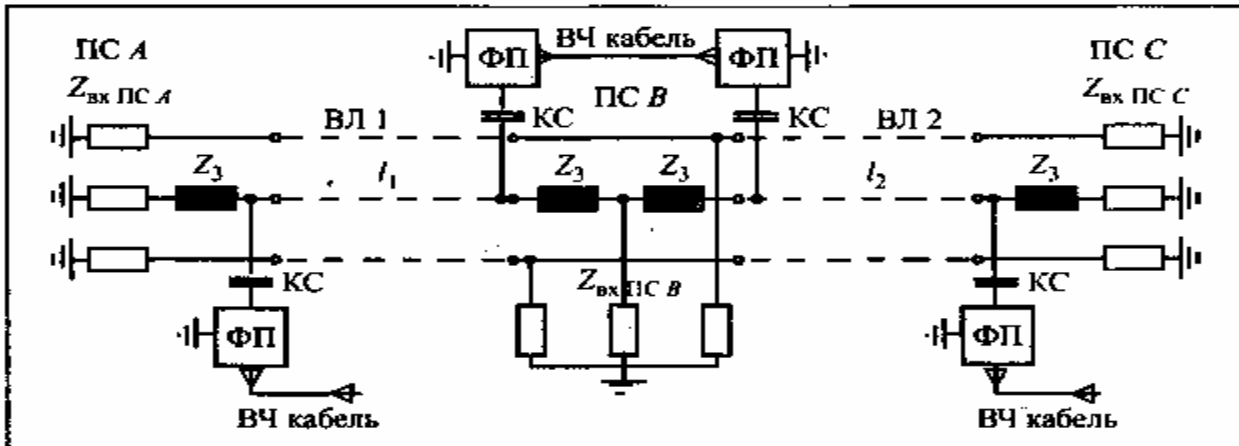


Рис. 3.6. Схема ВЧ тракта с обходом промежуточной ПС

ВЧ тракт на подходе к подстанции с обходом, если параллельное сближение существует.

Первый путь отсутствует в тех случаях, когда входное сопротивление ПС, на которой организован обход, близко к нулю (крупная ПС с большим числом отходящих линий). При этом напряжения на нерабочих фазах пренебрежимо мало и передача сигнала от участка тракта до обхода к участку тракта после обхода осуществляется только через саму схему обхода, состоящую из цепочно соединенных ФП и ВЧ кабеля, подключенных к рабочим фазам линий до и после обхода. В этом случае сквозной ВЧ тракт как бы состоит из двух трактов и его затухание оказывается примерно равным сумме затуханий составных частей сквозного ВЧ тракта (до и после обхода). Это хорошо видно из рис. 3.7, на котором приведены зависимости затухания тракта со схемой, показанной на рис. 3.6 при следующих

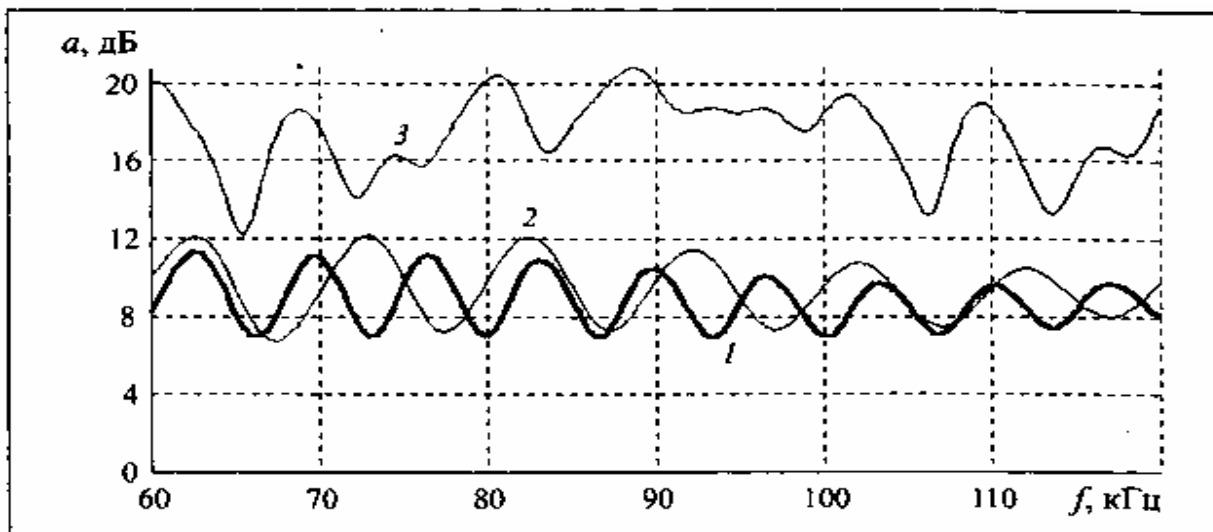


Рис. 3.7. Частотная зависимость затухания ВЧ тракта с обходом промежуточной ПС:

/ — для сквозного тракта; 2 и 3 — для участков тракта до и после обхода

исходных данных: $l_1 = 22$ км, $l_2 = 15$ км, фильтр присоединения типа ФП 2200/(60-120). То же самое будет и в случае, когда обход осуществляется между линией одного напряжения и линией другого напряжения (т.е. когда между этими линиями нет гальванической связи по сборным шинам ПС). Рассмотрим теперь случай, когда ВЧ тракт организуется по схеме фаза - земля и когда входное сопротивление подстанции обхода достаточно велико (небольшая ПС, к которой подходят только две рассматриваемые линии). В этом случае при включении передатчика на конце тракта (например на ПС А) напряжения на нерабочих фазах линии до обхода оказываются достаточно большими (примерно половина напряжения на рабочей фазе — см. §2.1). При этом передача сигнала от участка тракта до обхода к участку тракта после обхода осуществляется не только по цепочечно включенным ФП и ВЧ кабелю, подключенным к рабочей фазе, но и по нерабочим фазам через сборные шины ПС. За счет этого в начале второго участка ВЛ появятся напряжения не только на рабочей, но и на нерабочих фазах. Амплитудные и, главное, фазовые соотношения между напряжениями рабочей и нерабочих фаз на входе ВЛ второго участка будут изменяться с изменением частоты сигнала. Напряжение сигнала, подаваемое на рабочую фазу второго участка линии, сдвигается по фазе относительно напряжения рабочей фазы конца первого участка линии, а фазовый угол сигнала на нерабочих проводах практически не меняется. При этом на одних частотах углы между напряжением на рабочей и напряжениями на нерабочих фазах в начале второго участка линии будут примерно совпадать, а на других частотах отличаться на 130° . Это обуславливается тем, что фазовые характеристики фильтров присоединения в пределах рабочей полосы частот поворачивают фазу сигнала рабочего провода от -180° до $+180^\circ$.

На тех частотах, для которых углы между напряжениями сигнала на рабочем и нерабочих проводах примерно совпадают, в частотной зависимости затухания тракта образуется область повышенного затухания. В этом случае значительная часть сигнала в начале второго участка ВЛ попадает в нулевую модальную составляющую и затухание ВЧ тракта оказывается большим (много большим суммы затуханий участков тракта до и после обхода).

На тех частотах, для которых углы между напряжениями сигнала на рабочем и нерабочих проводах близки к 180° в частотной зависимости затухания тракта образуется область пониженного затухания. В этом случае в начале второго участка ВЛ возбуждается практически только междуфазная модальная составляющая и затухание ВЧ тракта оказывается относительно малым (меньше суммы затуханий участков тракта до и после обхода).

Известен метод, с помощью которого на частотах повышенного затухания можно уменьшить затухание тракта с обходом. Для этого изменяют полярность вторичной обмотки трансформатора одного из ФП, изменяя фазу напряжения и тока рабочего провода на 180° *

* Изменение полярности обмотки ФП можно только для фильтров с трансформаторной схемой.

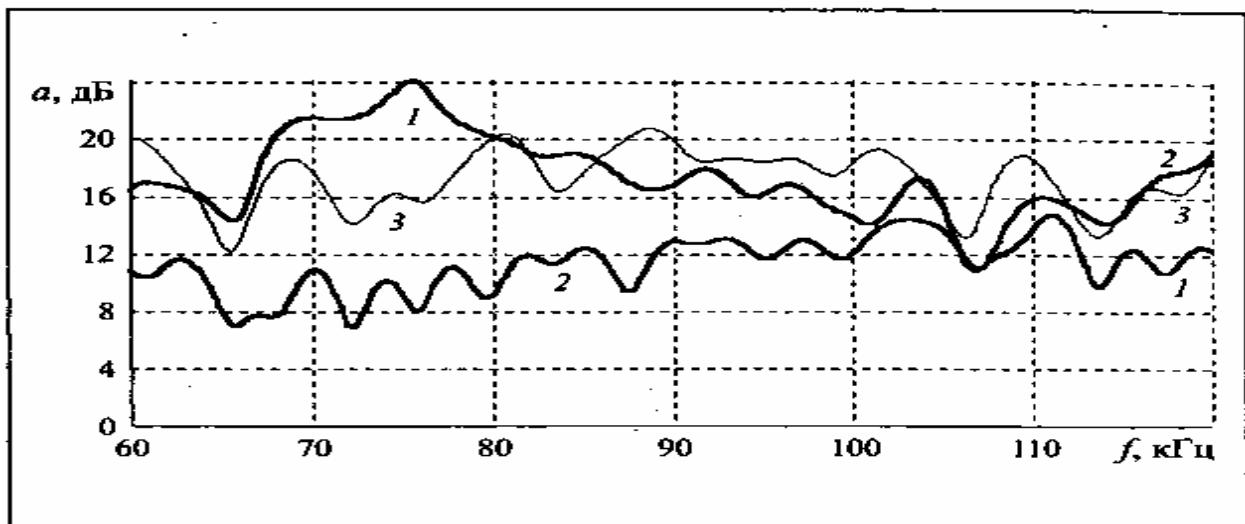


Рис. 3.8. Частотная зависимость затухания ВЧ тракта с обходом промежуточной ПС:
 1 и 2 — для ПС с эквивалентной емкостью 5000 пФ (соответственно без изменения полярности обмотки ФП и с изменением полярности на 180°); 3 — при нулевом входном сопротивлении ПС

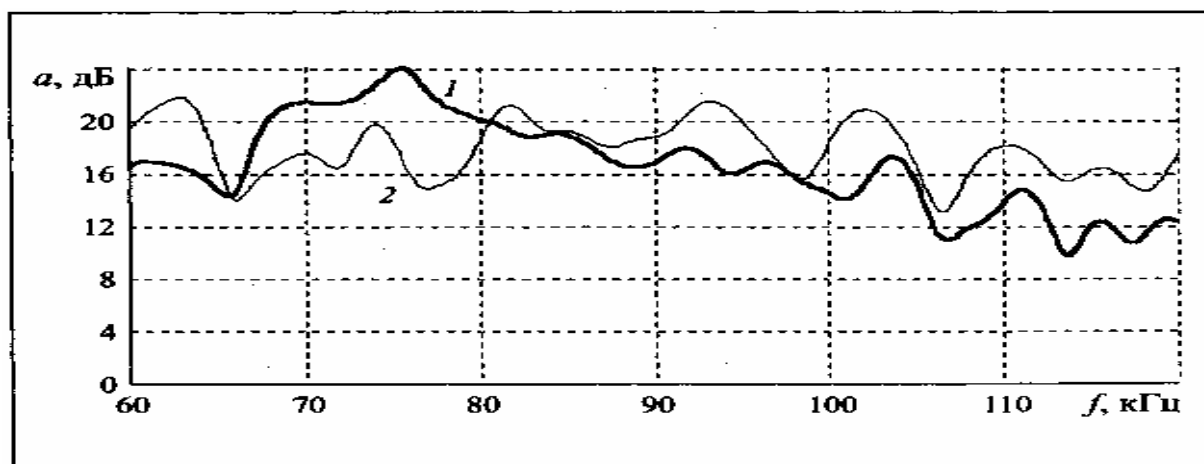


Рис. 3.9. Частотная зависимость затухания ВЧ тракта с обходом промежуточной ПС с эквивалентной емкостью 5000 пФ:

1 — одна из ВЛ, составляющих ВЧ тракт отключена; 2 — обе линии включены (без изменения полярности обмотки ФП)

В этом случае область повышенного затухания оказывается на месте области пониженного затухания и наоборот.

Ширина полосы частот областей повышенного и пониженного затухания и их месторасположение зависят от схемы ФП и длины ВЧ кабеля в схеме обхода. Отличие (как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения) затухания тракта от суммы затухания участков тракта зависит от входного сопротивления ПС и затухания собственно схемы обхода (в которую входят ФП, ВЧ кабель, разделительные фильтры и аппаратура, параллельно подключенная к схеме обхода).

Сказанное иллюстрируется рис. 3.8. На этом рисунке приведены частотные зависимости затухания тракта с обходом со схемой рис. 3.6 для случая, когда емкость промежуточной ПС равна 5000 пФ (среднее значение эквивалентной емкости небольшой ПС). Кривая 1 соответствует случаю неизменной полярности обмотки ФП, кривая 2 — случаю, когда полярность обмотки одного из ФП изменена на 180°. Для сравнения приведена частотная зависимость затухания, которая соответствует входному сопротивлению ПС, близкому к нулю (кривая 3).

Следует отметить, что затухание ВЧ тракта как в области повышенного, так и в области пониженного затухания нестабильно при коммутационных переключениях ВЛ, входящих в схему тракта. Так, отключение одной из линий разрывает путь через сборные шины ПС и затухание в частотной области повышенного затухания резко уменьшается, а в области пониженного затухания — повышается, что иллюстрируется на рис. 3.9.

Все эти явления практически отсутствуют при схеме присоединения фаза — фаза, так как при этой схеме напряжение на нерабочей фазе линий близко к нулю.

Наличие на подходе к ПС обхода параллельного сближения линий, образующих ВЧ тракт с обходом, оказывает влияние на затухание ВЧ тракта только в области повышенного затухания или в том случае, когда схема обхода, состоящая из цепочно соединенных ФП, ВЧ кабеля и, возможно, параллельно включенной аппаратуры уплотнения, имеет большое затухание.

3.4. ВЛИЯНИЕ КАБЕЛЬНОЙ ВСТАВКИ В ВОЗДУШНУЮ ЛИНИЮ

В последнее время при заходе ВЛ высокого напряжения в пределы города применяют кабельные вставки. Кабельная вставка может быть необходима и

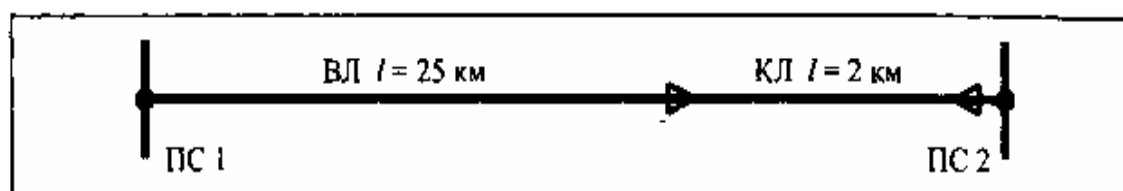


Рис. 3.10. Схема смешанной линии 110 кВ

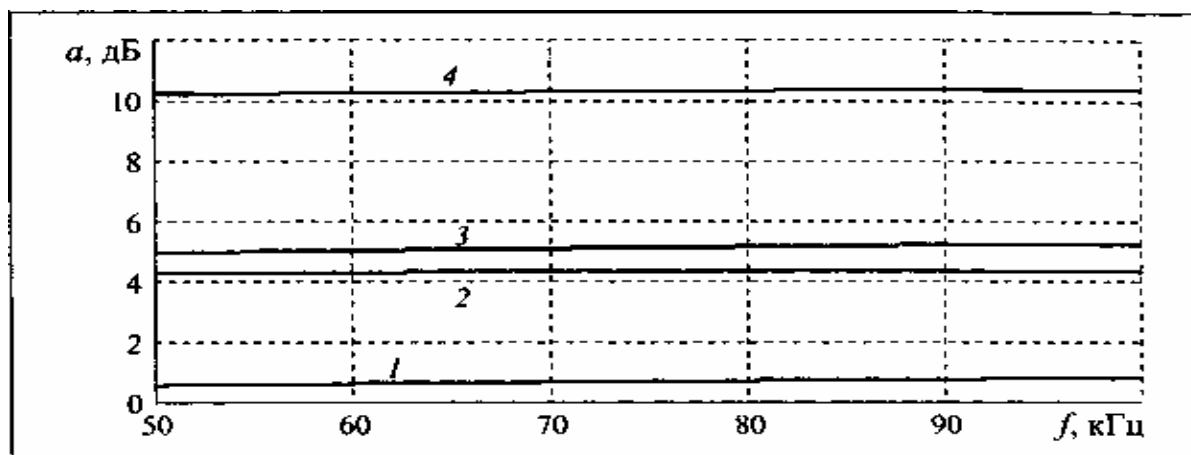


Рис. 3.11. Частотные зависимости затухания ВЧ тракта по смешанной ЛЭП (кривая 4) и по участкам, составляющим эту смешанную ЛЭП: КЛ (кривая 1) и ВЛ (кривая 2); кривая 3 — сумма затухания ВЛ и КЛ; во всех случаях ЛЭП по концам согласована

при пересечении линией территории железнодорожного узла, аэродрома и других объектов, где строительство ВЛ недопустимо.

Влияние кабельной вставки на параметры тракта по смешанной воздушно-кабельной линии обуславливается тем, что волновые сопротивления ВЛ отличаются от волновых сопротивлений кабельной линии (КЛ) более, чем на порядок. Так, волновое сопротивление ВЛ для междофазных волн равно примерно 400 Ом, а КЛ — примерно 30 Ом. Поэтому в месте соединения ВЛ и КЛ возникают потери, обусловленные отражением волн от этого места, и в тракт вносится дополнительное затухание равное примерно 5 — 7 дБ. Кроме того, при отсутствии согласования по концам ВЛ и КЛ, в тракте возникают многократно

отраженные от мест нарушения однородности волны. Эти волны обуславливают появление периодического изменения затухания между максимальными и минимальными значениями. Рассмотрим ВЧ тракт, организованный по смешанной воздушно-кабельной линии 110 кВ, схема которой приведена на рис. 3.10.

На рис. 3.11 представлены частотные зависимости затухания тракта по смешанной ЛЭП при присоединении фаза - земля (кривая 4) для случая полностью согласованных по концам тракта ВЛ и КЛ. Кроме того, на рисунке приведены по отдельности затухание ВЧ тракта при присоединении фаза - земля отдельно по КЛ (кривая 1), по ВЛ (кривая 2) и их сумма (кривая 3). Разность между кривыми 4 и 3 примерно равно дополнительному затуханию, обусловленному потерями на отражение от места соединения ВЛ и КЛ.

В случае, представленном на рис. 3.11, по концам тракта линии согласованы, что исключает влияние многократно отраженных волн на затухание. При отсутствии согласования отраженные от места соединения ВЛ и КЛ волны многократно отражаются между местом этого соединения и концами линии и обуславливают периодическое изменение затухания тракта между максимальным и минимальным значениями. При этом изменение условий согласования по концам ЛЭП при коммутациях высоковольтных аппаратов приводит к нестабильности во времени параметров ВЧ тракта.

На рис. 3.12 представлены частотные зависимости затухания тракта по той же смешанной ЛЭП. Эти зависимости приведены для схем присоединения фаза - земля и фаза - фаза и для двух коммутационных состояний ЛЭП — когда она отключена (нерабочие фазы изолированы) и когда она отключена и заземлена (не-

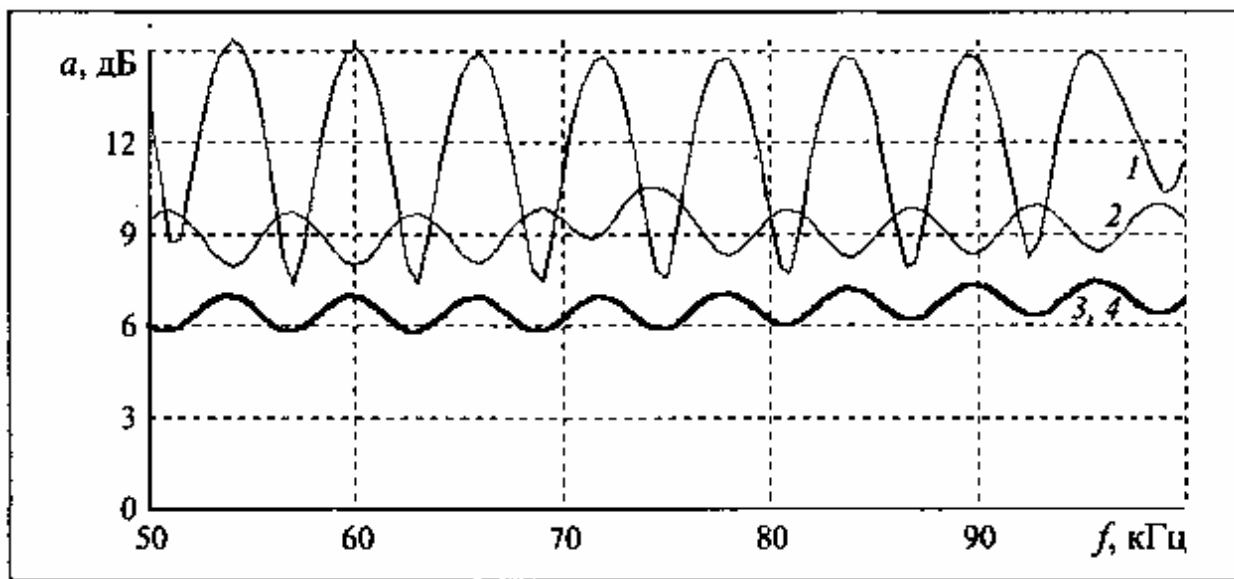


Рис. 3.12. Частотные зависимости затухания ВЧ тракта по смешанной ЛЭП при схеме присоединения фаза — земля (1 и 2) и фаза - фаза (3 и 4); 1 и 3 — нерабочие фазы по концам ЛЭП изолированы; 2 и 4 — нерабочие фазы по концам ЛЭП заземлены

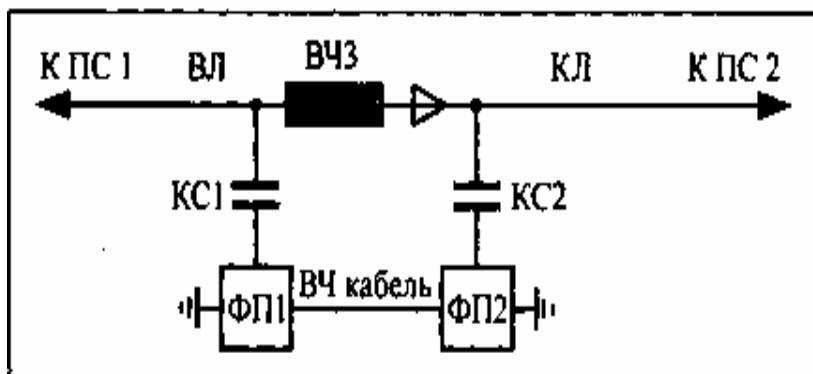


Рис. 3.13. Схема ВЧ обхода места стыка ВЛ и КЛ

рабочие фазы заземлены). В обоих случаях рабочая (рабочие в случае схемы фаза - фаза) фаза нагружена на характеристическое сопротивление.

Как видно из рис. 3.12, нестабильность затухания частотной зависимости затухания и неравномерность этой зависимости для ВЧ тракта с кабельной вставкой (также как и ВЧ тракта с ответвлением) при схеме присоединения фаза — фаза существенно меньше, чем при схеме фаза — земля.

Уменьшить влияние неоднородности в месте стыка ВЛ и КЛ можно, сделав ВЧ обход этого места, как это показано на рис. 3.13.

В схеме обхода ФП с конденсатором связи, присоединяемый к кабельной линии, должен иметь расчетное характеристическое сопротивление со стороны линии, близкое к волновому сопротивлению КЛ.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

Электрические помехи, действующие в ВЧ тракте

4.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Как уже отмечалось выше, отличие ВЧ трактов по ВЛ от трактов по обычным проводным линиям связи заключается в том, что сама ВЛ является источником электрических помех. Эти помехи появляются из-за наличия на проводах ВЛ высокого напряжения промышленной частоты, и воздействуют на приемники каналов связи наряду с обычными видами помех (от грозовых разрядов, радиостанций и других каналов передачи информации).

Мы рассмотрим только те помехи, которые обусловлены самой ЛЭП. Эти помехи можно разделить на помехи, генерируемые ЛЭП при нормальном режиме, и дополнительные виды помех, возникающие при коммутационных операциях выключателями и разъединителями и аварийных ситуациях.

При нормальном режиме помехи с относительно высоким уровнем вызываются коронированием проводов и частичными электрическими разрядами в изоляции линии. При авариях и коммутационных операциях появляются кратковременные помехи, обусловленные горением электрической дуги, возникающей в месте КЗ или между ножами разъединителей и контактами выключателей при включении или отключении этих аппаратов.

Кроме того, помехи с высоким уровнем могут возникать при пробое искровых промежутков, защищающих изоляцию стального грозозащитного троса. Эти помехи возникают в случаях, когда по тем или иным причинам нарушается заземление троса и на нем через емкостные связи с фазами наводится высокое напряжение относительно земли. Эти помехи можно отнести к дополнительному виду, хотя они могут существовать неопределенно долго (до тех пор, пока заземление троса не будет восстановлено).

Помехи при нормальном режиме ЛЭП должны учитываться для определения работоспособности каналов ВЧ связи, по которым передается речь, данные, телемеханическая информация, сигналы релейной защиты и противоаварийной автоматики.

Дополнительные виды помех, ввиду кратковременности их действия, необходимо учитывать только при определении работоспособности ВЧ каналов релейной защиты и противоаварийной автоматики, по которым передается информация, необходимая для ликвидации аварийной ситуации в энергосистеме. Эти помехи необходимо также учитывать и для цифровых каналов ВЧ связи, так как эти помехи могут приводить к сравнительно длительным перерывам связи из-за нарушения синхронизации между передатчиком и приемником.

Помехи от пробоя искровых промежутков, защищающих изоляцию стальных грозозащитных тросов, могут длиться достаточно долго и нарушать работу ВЧ каналов по ЛЭП. Обеспечить работу ВЧ каналов (как аналоговых, так и цифровых) в период существования этого вида помех практически невозможно и поэтому обеспечить нормальную работу ВЧ каналов можно только ликвидацией источника помех.

Рассмотрим отдельно особенности каждого из видов помех.

4.2. ПОМЕХИ ПРИ НОРМАЛЬНОМ РЕЖИМЕ ЛИНИИ

На линиях 110 кВ и выше основным источником помех при нормальном режиме линии является корона на фазах линии. Короной называется явление, выражающееся в появлении электрических разрядов в воздухе в некотором объеме вблизи поверхности фазных проводов. Эти разряды возникают вследствие большой напряженности электрического поля у поверхности проводов. Они возникают на всей длине линии и вызывают:

ВЧ помехи (воспринимаемые приемником аппаратуры уплотнения, включенной по концам ВЧ тракта);

радиопомехи (воспринимаемые радиоприемниками вблизи ВЛ);

акустические помехи (характерный шум, слышимый под линией);

потери мощности промышленной частоты.

Высокочастотные помехи от короны (также, как и радиопомехи) обусловлены практически только разрядами так называемой "положительной" короны, которая возникает в моменты времени, когда напряжение на данной фазе ВЛ проходит вблизи положительного максимума. При этом ВЧ помехи от коронирования каждой из фаз ВЛ существуют только в течение примерно 6 — 7 мс вблизи моментов времени, когда напряжение на данной фазе ВЛ проходит вблизи положительного максимума и периодически повторяются каждые 20 мс (длительность периода промышленной частоты 50 Гц). Так как коронируют все три фазы линии, то в течение одного периода промышленной частоты на выходе ВЧ тракта со схемой присоединения фаза — земля или фаза — фаза возникает, в общем случае, три всплеска напряжения помех. Исключение составляют всего два случая. Первый случай — ВЧ тракт со схемой присоединения фаза - фаза крайние к нетранспонированной линии с горизонтальным расположением фаз. На выходе этого ВЧ тракта за время 20 мс имеется всего два всплеска напряжения помех (помехи от коронирования средней фазы в этом тракте практически отсутствуют). Вторым случаем — ВЧ тракт с внутрифазным присоединением к изолированным проводам расщепленной фазы, на выходе которого за время 20 мс имеется всего один всплеск напряжения помех (помехи от коронирования двух нерабочих фаз в этом тракте практически отсутствуют).

Таким образом, напряжение помех от короны оказывается как бы модулированным напряжением промышленной частоты. В сравнительно узкой полосе частот, скажем 20 кГц, в каждый из моментов времени помехи от короны являются помехами флуктуационного типа с периодически изменяющимся среднеквадратичным значением (период составляет 20 мс).

На рис. 4.1 приведены осциллограммы помех при различных схемах присоединения к ВЛ.

Максимальные значения среднеквадратичного напряжения в каждом из всплесков помех, обусловленных коронированием каждой из фаз, могут значительно отличаться один от другого. Соотношение между максимальными среднеквадратичными напряжениями помех в каждом из всплесков зависит от схемы присоединения к линии, от того транспонирована линия или нет, от погодных условий. Даже для одной и той же транспонированной линии с заданной схемой присоединения это соотношение зависит от частоты, на которой определяются помехи.

Хотя среднеквадратичное напряжение помех от короны имеет ярко выраженную зависимость от времени, для оценки влияния этих помех на достоверность приема сигналов используют среднее

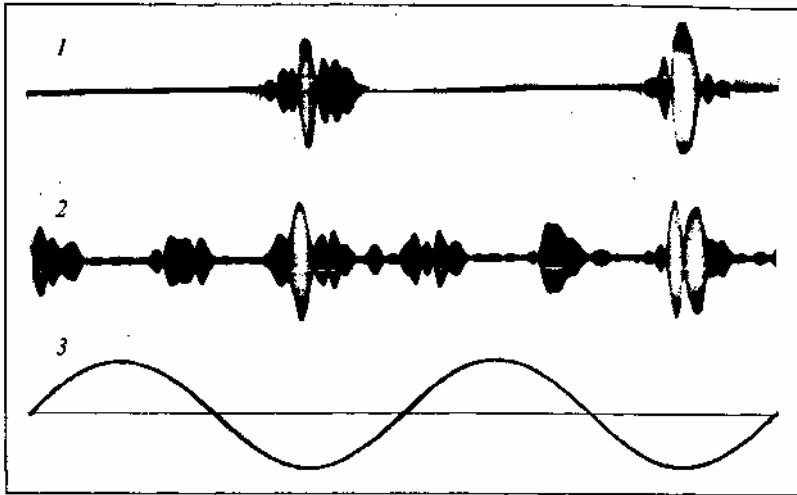


Рис. 4.1. Осциллограммы помех от короны в ВЧ трактах с разными схемами подключения к ВЛ:

1 — в внутрифазном тракте; 2 — в тракте фаза — земля

среднеквадратичное значение уровня помех $p_{\text{пом}}$, определенное (измеренное) за некоторый отрезок времени, который должен быть существенно больше, чем 20 мс. Когда говорят об уровне помех от короны, имеют в виду именно уровень, соответствующий среднему среднеквадратичному значению $p_{\text{пом}}$. Этот уровень зависит от того, в какой полосе частот определяются помехи. Если известен (по результатам измерений или расчетов) уровень помех, определенный в полосе частот Δf_1 , то пересчет этого уровня в другую полосу частот Δf_2 производится по формуле

$$P_{\text{пом}\Delta f_2} = P_{\text{пом}\Delta f_1} + 10 \lg \left(\frac{\Delta f_2}{\Delta f_1} \right). \quad (4.1)$$

Для линии данного класса напряжения уровень помех зависит от условий возникновения источников короны, их интенсивности, а также условий распространения токов источников короны от каждого из мест их возникновения до конца линии. Все эти условия определяются конструкцией линии — ее длиной, схемой транспозиции фаз, если линия транспонирована, диаметром провода фазы, а для расщепленной фазы степенью ее расщепления; условий суммирования токов всех источников короны на конце линии, т.е. от схемы присоединения к линии.

Уровень помех от короны имеет довольно сильно выраженную зависимость от частоты. Эта зависимость в основном обуславливается частотной зависимостью модальных коэффициентов затухания линии и наличием или отсутствием транспозиции фаз ВЛ. Очевидно, что мощность помех, определенная на одном из концов линии, равна сумме мощностей, приходящих от каждого из источников помех, расположенных на фазах линии на всей ее длине. При этом доля в общей мощности помех, обусловленная каждым из источников, на приеме уменьшается в соответствии с затуханием между местом расположения данного источника помех и концом линии, где определяются помехи. Чем выше частота, на которой определяются помехи, тем с меньшего участка линии "собирается" основная мощность помехи и, соответственно, меньше суммарный уровень помех.

На рис. 4.2 приведены для примера частотные зависимости уровня помех от короны для разных схем присоединения к нетранспонированной линии 220 кВ.

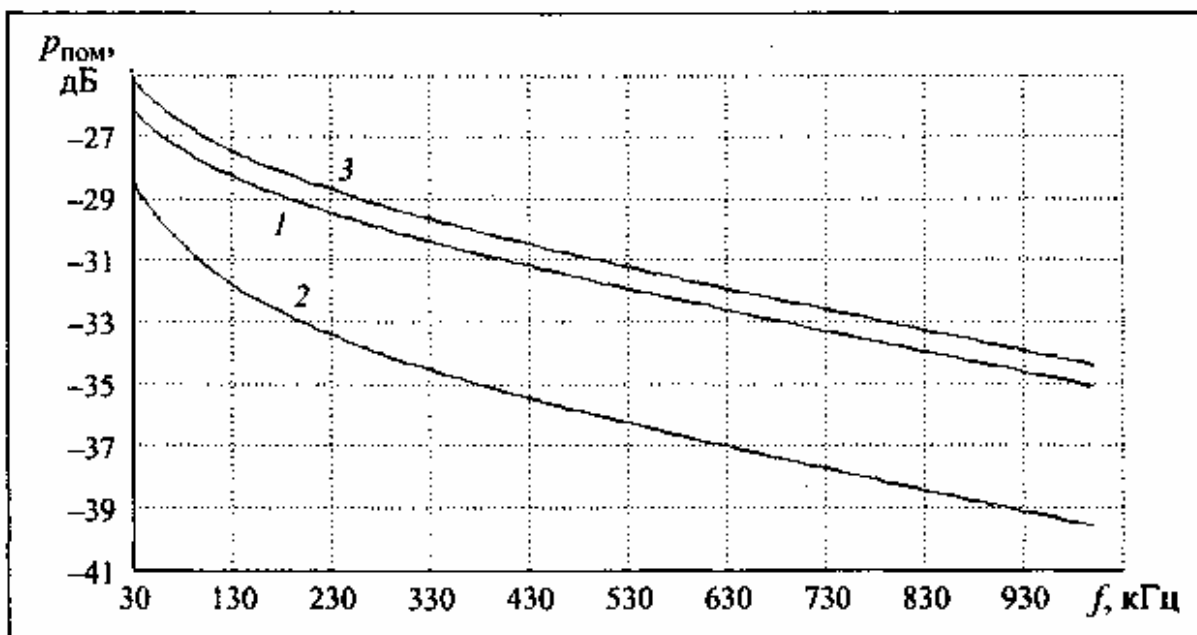


Рис. 4.2. Частотные зависимости расчетных уровней помех для ВЛ 220 кВ с горизонтальным расположением проводов:

1 — средняя фаза - земля; 2 — крайняя фаза - земля; 3 — средняя фаза - крайняя фаза

Таблица 4.1. Усредненные значения расчетного уровня помех от короны

Номинальное	ПО	220	330	500	750
Усредненный расчетный	-38	-28	-26	-20	-19

Уровень помех от короны для одной и той же линии является случайной величиной, зависящий при прочих равных условиях от многих внешних факторов и, в особенности, от условий погоды. Загрязнение поверхности провода, туман и осадки в виде дождя и снега значительно увеличивают уровень помех от короны. Разница между уровнями помех, измеренными для чистых проводов в хорошую погоду и при сильном дожде, может достигать до 20 — 30 дБ. Наибольшее увеличение уровня помех возникает при интенсивном дожде на участке линии, прилегающем к подстанции, где эти помехи определяются.

Расчетный уровень помех от короны обычно определяется как уровень помех для полосы частот 1 кГц с вероятностью того, что он не будет превышен, равной 50 %.

Представление об усредненных значениях расчетного уровня помех (для приемника с полосой частот 1 кГц и средней частоте настройки 100 кГц) при 50 % вероятности появления для линий разного класса по напряжению можно получить из табл. 4.1.

4.3. ПОМЕХИ ОТ ПРОБОЯ ИСКРОВЫХ ПРОМЕЖУТКОВ, ЗАЩИЩАЮЩИХ ИЗОЛЯЦИЮ ГРОЗОЗАЩИТНЫХ ТРОСОВ

Грозозащитные тросы, как правило, подвешиваются на опорах ЛЭП на одном изоляторе, который защищается искровым промежутком. При этом тросы разрезаются на каждой анкерной опоре и заземляются с одного из концов анкерного пролета, оставаясь изолированным на другом его конце. Этим достигается исключение потерь мощности промышленной частоты в тросах при нормальном режиме ВЛ. В этих условиях напряжение на тросе относительно земли близко к нулю. Заземление троса может по тем или иным причинам нарушаться и тогда он на всей длине анкерного пролета оказывается изолированным. При этом на тросе через емкостные связи с фазами наводится высокое напряжение, которое может вызвать перемежающийся пробой одного или нескольких

искровых промежутков. Эти пробои являются источником помех с широким

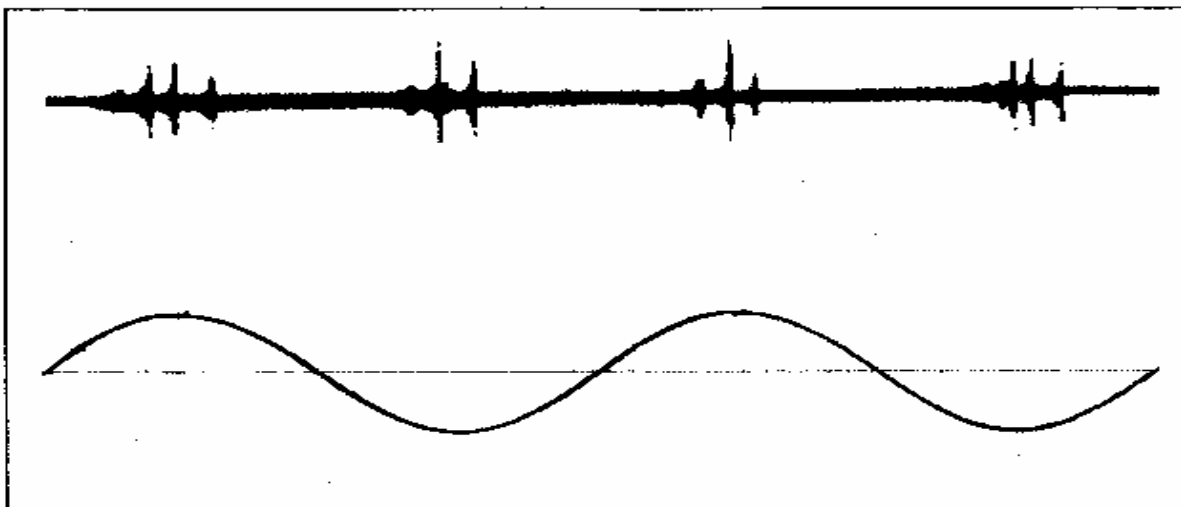


Рис. 4.3. Осциллограммы помех от пробоя изоляции

частотным спектром и высоким уровнем, которые будут существовать, пока не будет устранен их источник. Эти помехи имеют характерную зависимость от времени, в течение периода промышленной частоты имеется два всплеска помех, сдвинутых на 10 мс. Всплески напряжения помех располагаются вблизи моментов времени, когда напряжение на тресе проходит около положительного и отрицательного максимумов. (Напомним, что помехи от короны имеют за период промышленной частоты три всплеска, сдвинутых примерно на 6 — 7 мс). Примерный вид осциллограммы помех от пробоя искровых промежутков дан на рис. 4.3.

Уровень помехи зависит от многих факторов и может достигать до +20 дБм в полосе частот 4 кГц.

4.4. ПОМЕХИ ОТ КОММУТАЦИОННЫХ ОПЕРАЦИЙ И КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Помехи от коммутационных операций возникают при включении или отключении выключателей или разъединителей. Эти помехи имеют значительный уровень и обуславливаются переходными процессами, возникающими при пробое промежутка между контактами выключателя или разъединителя и при восстановлении изоляционных свойств этого промежутка. Помехи попадают на вход ВЧ аппаратуры уплотнения как с линии через КС и ФП, так и за счет электромагнитной связи между сборными шинами ПС и ВЧ кабелем.

Наибольшие напряжения помех и длительность их существования обуславливается операциями включения или отключения отрезков сборных шин и высоковольтного оборудования разъединителями. Пиковое напряжение помех, измеренное на ВЧ кабеле в полосе частот пропускания ФП, может достигать до единиц киловольт, а длительность существования помех достигать до нескольких секунд (длительность операции разъединителем). Эти помехи не только мешают правильному приему передаваемой информации, но и могут оказывать опасное влияние, повреждая блоки оборудования, подключенные к ВЧ кабелю.

Характер и величина помех при работе разъединителей разные в разных временных интервалах коммутационного процесса. В начале операции включения или в конце операции отключения расстояние между ножами разъединителя велико и пробой воздушного промежутка между этими ножами редки (1-2 раза за полупериод 50 Гц). Амплитуды импульсов помех при этом тоже велики. В конце операции включения или начале операции отключения расстояние

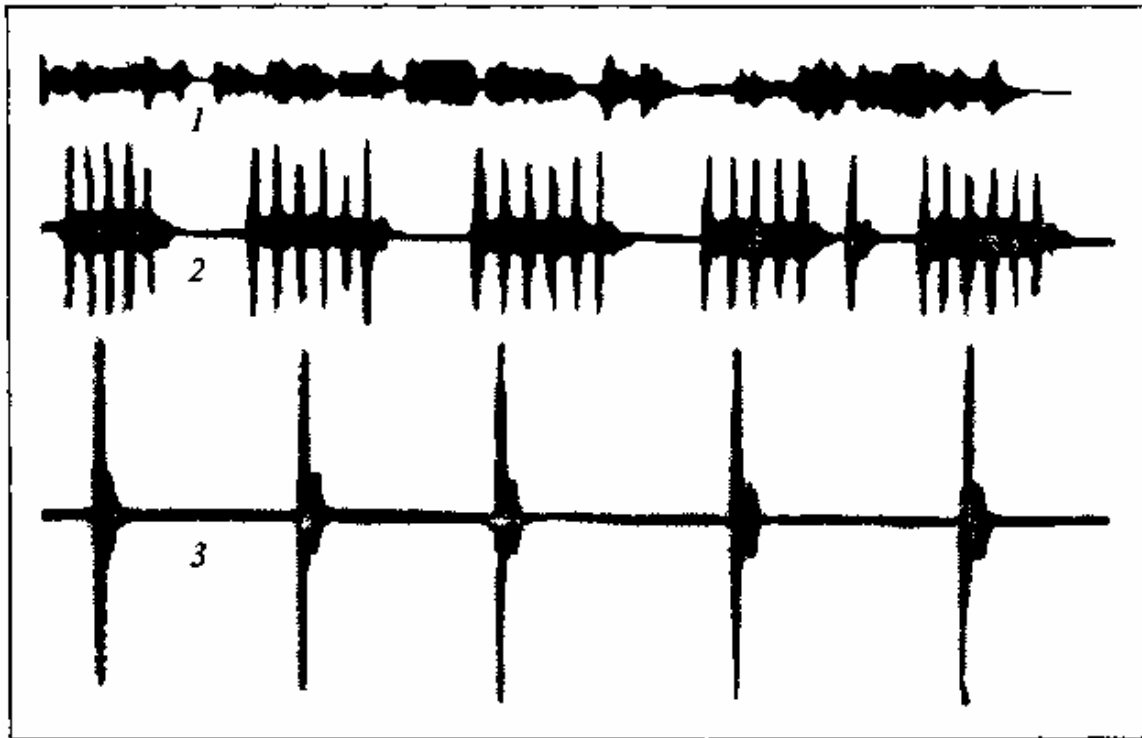


Рис. 4.4. Осциллограмма напряжения помех при отключении разъединителя 500 кВ: 1 — в начале операции отключения; 2 — в середине этой операции; 3 — в ее конце

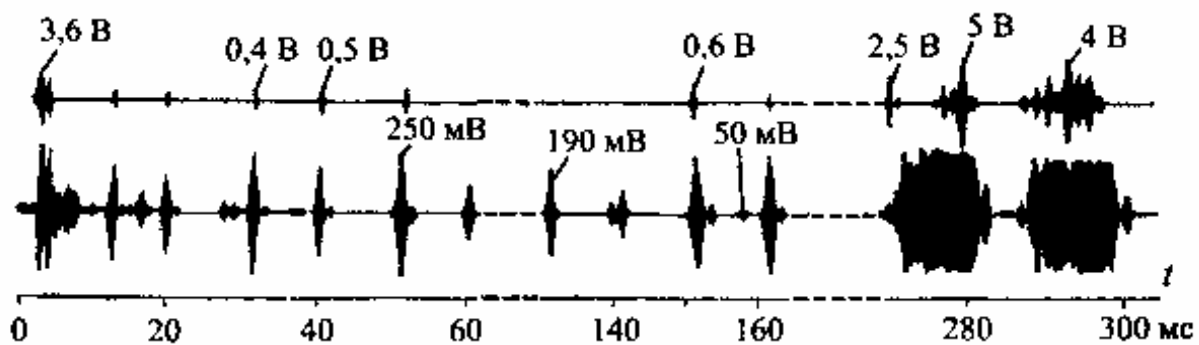


Рис. 4.5. Осциллограмма напряжения помех при КЗ на линии 500 кВ

между ножами разъединителя невелико и в течение полупериода частоты 50 Гц происходит много пробоев с малыми амплитудами импульсов помех.

На рис. 4.4 приведена осциллограмма напряжения помех при отключении разъединителя 500 кВ.

Помехи от коммутации выключателями имеют примерно такой же характер, что и помехи от коммутации разъединителями, но время их действия ограничивается 15 — 20 мс.

Помехи, вызываемые короткими замыканиями, обусловлены горением дуги в месте КЗ. Как правило, КЗ на ВЛ отключается устройствами релейной защиты за время 100 - 150 мс. За это время помехи от КЗ проходят три фазы, хорошо различаемые на рис. 4.5, на котором приведена осциллограмма напряжения помех при КЗ на линии 500 кВ.

Первая фаза, длящаяся 2 — 4 мс, характеризуется пробоем изоляционного промежутка и установлением КЗ. В этот период пиковое значение напряжения помех на выходе ВЧ кабеля может достигать 100 В и более, а на выходе полосового фильтра с полосой пропускания около 4 кГц — доходить до +15 -н +30 дБм.

Вторая фаза, которая существует в течение времени горения установившейся дуги КЗ,

характеризуется резким уменьшением уровня помех относительно первой фазы. Помехи носят характер редких всплесков (один — два всплеска за период 50 Гц) с пиковым уровнем в полосе 4 кГц, не превышающем - 0,5 дБм.

Третья фаза существования помех обусловлена отключением тока КЗ выключателем и гашением дуги в месте КЗ. Длительность этой фазы может (с учетом разновременности действия выключателей на разных фазах) достигать до 20 — 30 мс. Интенсивность помех в этой фазе их существования примерно такая же, как и в первой фазе.

ГЛАВА ПЯТАЯ

Упрощенные методы расчета параметров ВЧ трактов и уровней помех от короны

5.1. УПРОЩЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ВЧ ТРАКТА

Упрощенные методы расчета параметров ВЧ трактов касаются расчета только затухания и характеристического (номинального) сопротивления тракта. Они разработаны для простейших типовых схем организации трактов. Значения модальных параметров, используемых при этих расчетах, определяются для линий, построенных на типовых опорах и использующих типовые марки проводов. Эти параметры определяются при максимально возможной стреле провеса проводов; изменение параметров при уменьшении стрелы провеса не учитывается.

Расчетные выражения для определения затухания и характеристического (номинального) сопротивления тракта получены из точных выражений путем введения большого числа допущений, которые заключаются в следующем:

пренебрегается влиянием многократно отраженных волн на затухание и входное сопротивление ВЧ тракта. Приближенный учет влияния этих волн на параметры тракта при необходимости производится отдельно;

считается, что волна напряжения и тока "нулевой" моды, возникающая на одном из концов линии, полностью затухает на длине этой линии и не доходит до противоположного ее конца. Энергия, попавшая в эту моду, учитывается как дополнительное затухание, называемое "концевым" затуханием;

считается, что входное сопротивление ПС по концам линии равно нулю. Это значит, что при расчетах "нерабочие" провода линии на ее концах считаются заземленными, а "рабочий" провод ("рабочие" провода для схемы провод — провод) линии заземлен через ВЧ заградитель;

транспонированная линия, если она входит в ВЧ тракт, имеет стандартную схему транспозиции, показанную на рис. 1.4, причем длины шагов транспозиции одинаковы и равны $1/3$ длины линии, и на всей длине линия подвешена на опорах одного типа¹;

затухание, вносимое ответвлением от ВЛ, которое зависит от частоты, периодически изменяясь от максимального значения до минимального, в расчете принимается равным максимально возможному значению;

затухание ВЧ тракта с обходом равно сумме затуханий участков тракта до и после обхода. При этом не учитывается тот факт, что реальное затухание тракта с обходом может быть как больше, так и меньше этой суммы (см. § 3.3).

В силу сказанного упрощенные методы расчета дают достаточно достоверные результаты только для ВЧ тракта с оптимальными схемами присоединения, когда в схему тракта входит только одна нетранспонированная линия. Менее достоверные результаты получаются для случая, когда в схему тракта входит транспонированная линия со стандартным циклом транспозиции, линия с одним ответвлением или две линии с ВЧ обходом промежуточной подстанции. Чем больше схема тракта отличается от стандартной, чем больше число ответвлений и/или обходов имеется в ВЧ тракте, тем больше возможная погрешность расчета затухания тракта относительно его действительного значения.

Характеристическое и номинальное сопротивление ВЧ тракта. Под характеристическим сопротивлением линейного ВЧ тракта $Z_{лт}$ понимается входное сопротивление линейного ВЧ тракта (т.е. ВЧ тракта, заключенного между точками подключения ФП к линии), определенное

без учета отраженных волн. Значение этого сопротивления обычно используется при расчете необходимых параметров ФП и ВЧ заградителей и при измерениях этих параметров.

¹ В некоторых случаях на одном из концов линии со стандартным циклом транспозиции делается третья, так называемая "фазировочная", транспозиция для упорядочивания последовательности фаз ВЛ на подходе к ПС. Наличие этой транспозиции при расчетах может не учитываться при условии, что расстояние между местом ее установки и ближайшей ПС не превышает 2 - 3 км.

Характеристическое сопротивление линейного ВЧ тракта зависит от выбора схемы присоединения к ВЛ. Кроме того, оно зависит от конструкции линии, т.е. от расстояния между проводами и от проводов до земли, оттого, расщеплена ли фаза линии и, если расщеплена, то на сколько составляющих, и, наконец, от радиуса каждого из проводов, составляющих расщепленную фазу. В упрощенных методах расчета значения характеристических сопротивлений линейного ВЧ тракта определяются для стандартных наиболее распространенных типов опор и конструкций проводов. Значения характеристических сопротивлений линейного ВЧ тракта с типовыми схемами присоединения к линии приведены в табл. 5.1.

Под номинальным сопротивлением ВЧ тракта понимается то сопротивление, на которое рассчитываются параметры ВЧ входа/выхода аппаратуры уплотнения и которое используется как сопротивление нагрузки ВЧ тракта при измерении его рабочего затухания. Для схемы присоединения провод — земля номинальное сопротивление принимается равным волновому сопротивлению ВЧ кабеля, соединяющего аппаратуру уплотнения и фильтр присоединения. Как правило, это коаксиальный кабель типа РК с волновым сопротивлением 75 Ом, номинальное сопротивление ВЧ тракта также принимается равным 75 Ом. Схема присоединения провод — провод обычно осуществляется с помощью двух однофазных ФП (см. рис. 1.7). В этом случае номинальное сопротивление ВЧ тракта принимается равным 150 Ом.

Рабочее затухание ВЧ тракта a_T при упрощенных методах расчета определяется как сумма затуханий, обусловленных каждым из элементов, составляющих ВЧ тракт

Таблица 5.1. Типовые значения характеристических сопротивлений линейных ВЧ трактов

Напряже- ние ВЛ кВ	Характеристическое сопротивление $Z_{ЛТ}$, Ом, для схемы присоединения					
	фаза— земля	фаза— фаза	трос— земля	трос- трос	два троса - земля	внутри- фазная
35-220	450	800				
330*	330	600				400*****
500**	310	550	550	960	275	
750***	280	500	550	960	275	-

*Фаза расщеплена на две составляющие. ** Фаза расщеплена на три составляющие.

*** Фаза расщеплена на пять составляющих.

**** Внутрифазный тракт организуется только по изолированным проводам расщепленной фазы ВЛ 330 кВ.

. Оно определяется для хороших погодных условий. Учет влияния неблагоприятных погодных условий (учет гололедно-изморозиевых отложений на проводах ВЛ) производится отдельно расчетом дополнительного затухания $\Delta a_{\text{гол}}$.

Учитываемые в расчетах элементы, составляющие ВЧ тракт, следующие:

линии электропередачи (если рассматриваемые линии имеют ответвления, то эти ответвления учитываются отдельно);

ответвления от линии электропередачи;

ВЧ заградители по концам участков линии. Число таких заградителей всегда два на один участок линии (если рассматриваемый заградитель включен в ответвление, то этот заградитель учитывается при определении затухания ответвления);

фильтры присоединения по концам участков линии. Число таких фильтров всегда два на один участок линии;

ВЧ кабели по концам участков линии. Число таких ВЧ кабелей всегда два на один участок линии;

разделительные фильтры, включаемые последовательно в ВЧ тракт для разделения двух ВЧ трактов по частоте;

аппаратура других каналов, подключаемая к общему ВЧ тракту по его концам или на ВЧ обходах, которая оказывает шунтирующее действие на рассматриваемый тракт.

Рабочее затухание рассчитывается при отсутствии гололеда на проводах линий. Увеличение затухания ВЧ тракта под воздействием ГИО на проводах линии $D_{\text{гол}}$ в упрощенных методах расчета определяется отдельно.

С учетом сказанного, расчетное затухание ВЧ тракта определяется по формуле:

$$a_{\tau} = \sum_{k=1}^{n_{\text{ВЛ}}} a_{\text{ВЛ}} + \sum_{k=1}^{2n_{\text{ВЛ}}} (a_{\text{з}} + a_{\text{ФП}} + a_{\text{каб}}) + \sum_{k=1}^{n_{\text{отв}}} a_{\text{отв}} + \sum_{k=1}^{n_{\text{р.ф}}} a_{\text{р.ф}} + \sum_{k=1}^{n_{\text{ш}}} a_{\text{ш}}, \quad (5.1)$$

где $a_{\text{ВЛ}}$ — затухание, обусловленное линией электропередачи; $n_{\text{ВЛ}}$ — число участков линии в составе ВЧ тракта; $a_{\text{з}}$ — затухание, обусловленное заградителем; $a_{\text{ФП}}$ — затухание, обусловленное фильтром присоединения; $a_{\text{каб}}$ — затухание, обусловленное ВЧ кабелем; $a_{\text{отв}}$ — затухание, обусловленное ответвлением от линии электропередачи; $n_{\text{отв}}$ — число ответвлений от линии в составе ВЧ тракта; $f_{\text{рф}}$ — затухание, обусловленное разделительным фильтром; $a_{\text{рф}}$ — число разделительных фильтров в составе ВЧ тракта; $a_{\text{ш}}$ — затухание, обусловленное шунтирующим действием аппаратуры другого канала, работающего по общему с рассматриваемым каналом ВЧ тракту; $n_{\text{ш}}$ — число шунтирующих элементов в составе ВЧ тракта.

Если затухание ВЧ тракта рассчитывается для того, чтобы определить соотношение сигнала и помехи на приемном конце линии, то в формуле (5.1) затухание ВЧ заградителя, фильтра присоединения, ВЧ кабеля и шунтирующего элемента (если он есть) на приемном конце тракта учитываться не должно. Дело в том, что расчетный уровень помех от короны определяется на выходе линейного тракта, нагруженного на характеристическое сопротивление. Поэтому ВЧ заградитель, фильтр присоединения, ВЧ кабель и шунтирующий элемент на приемном конце тракта вносят одинаковое затухание, как для сигнала, так и для помехи. С учетом этого при расчете соотношения сигнала и помехи на приемном конце линии следует использовать модифицированную формулу:

$$a_{\tau} = \sum_{k=1}^{n_{\text{ВЛ}}} a_{\text{ВЛ}} + \sum_{k=1}^{2n_{\text{ВЛ}}-1} (a_{\text{з}} + a_{\text{ФП}} + a_{\text{каб}}) + \sum_{k=1}^{n_{\text{отв}}} a_{\text{отв}} + \sum_{k=1}^{n_{\text{р.ф}}} a_{\text{р.ф}} + \sum_{k=1}^{n_{\text{ш}}-1} a_{\text{ш}}. \quad (5.2)$$

Рассмотрим упрощенные методы расчета затухания для каждой из составляющих формул (5.1) и (5.2), а также методы расчета прироста затухания, обусловленного ГИО и неравномерности затухания тракта.

Линия электропередачи. Вычисление составной части затухания ВЧ тракта, обусловленной линией электропередачи, несколько различается для случая нетранспонированных ВЛ (или тех линий, которые можно считать "симметричными") и для случая транспонированной несимметричной линии.

Затухание для "симметричной" и нетранспонированной линии электропередачи (при использовании оптимальных схем присоединения и внутрифазного тракта) рассчитывается по формуле, которая получена с учетом "одномодового" характера передачи сигнала по линии, дБ

$$a_{ВЛ} = a_{мф}l + a_k, \quad (5.3)$$

где $a_{мф}$ — коэффициент затухания основной междуфазной модальной составляющей, возбуждаемой в тракте при рассматриваемой схеме присоединения, дБ/км; l — длина линии, км; a_k — концевое затухание, учитывающее потери той части энергии передатчика, которая попадает в "земляную" модальную составляющую и, не доходя до приемника, полностью затухает в линии, дБ.

Концевое затухание принимается равным:

для схемы фаза - земля — при одноцепной линии 2,5 дБ и при двухцепной линии 1 дБ;

для схемы фаза - фаза и внутрифазного тракта 0 дБ.

Коэффициент затухания $a_{мф}$ для схем присоединения фаза - земля и фаза - фаза определяется по формуле, дБ

$$\alpha_{мф} = (k_1 k_3 \sqrt{f} + k_2 k_4 f) 10^{-3}. \quad (5.4a)$$

Для внутрифазного присоединения к изолированным проводам расщепленной фазы ВЛ 330 кВ $a_{мф}$ определяется по формуле, дБ

$$\alpha_{мф} = k_1 \sqrt{f} 10^{-3}. \quad (5.4b)$$

В этих формулах слагаемое, пропорциональное корню квадратному из частоты, определяет часть затухания, обусловленную потерями в проводах линии; слагаемое, пропорциональное первой степени частоты, определяет часть затухания, обусловленную потерями в земле.

Значения коэффициентов k_1 для сталеалюминиевых проводов зависят от диаметра провода линии и, в случае, когда линия не может быть отнесена к "симметричной", от выбранной схемы присоединения (т.е. оттого, какая мода является основной в выбранной оптимальной схеме присоединения). Эти значения для основных марок проводов приведены в табл. 5.2.

Значения коэффициентов k_2 зависят от расстояний между фазами и от фаз до земли (т.е. от номинального напряжения линии) и типа расположения фаз. В случае, когда линия не может быть отнесена к "симметричной", значения коэффициентов k_2 зависят и от выбранной схемы присоединения¹. Значения коэффициентов k_2 приведены в табл. 5.3.

¹ В принципе значение коэффициента k_2 зависит от отношения частоты к удельному сопротивлению земли, однако это обстоятельство учитывается только для ВЛ 500 кВ.

Таблица 5.2. Значения коэффициентов k_L ,

Тип линии и вид присоединения	Значения коэффициента k_l для проводов						
	АС95	АС 120	АС 185	АС240	АС300	АС330	АС400
Симметричная и несимметричная для схемы присоединения фаза /-фаза3 к трехпроводной ВЛ с горизонтальным расположением фаз*	5,3	4,7	3,8	3,3	3,0	2,9	2,6
Несимметричная:							
все схемы, кроме внутрифазных	6,0	5,2	4,2	3,6	3,3	3,2	2,9
внутрифазное присоединение**	-	—	—	6,6	5,9	5,8	—

*Нумерация фаз дана на рис. 1.1.

**Данные приведены только для проводов, используемых на ВЛ 330 кВ.

Значения коэффициентов k_3 и k_4 зависят от степени расщепления фазного провода линии и не зависят оттого, относится ли рассматриваемая линия к группе "симметричных" или нет¹. Эти значения приведены в табл. 5.4.

Затухание для транспонированной линии электропередачи (при использовании оптимальных схем присоединения) рассчитывается по достаточно громоздким формулам или по кривым, полученным на основании расчетов на ЭВМ. Более практичным является использование обобщенных кривых, которые, если ввести ограничения по значению произведения $f_{max} l$ (f_{max} — максимальная частота, при которой может производиться расчет для линии общей длиной l), дают приемлемую точность расчетов в большом диапазоне изменения удельного сопротивления земли.

На рис. 5.1 и 5.2 приведены частотные зависимости затухания ВЧ трактов по линиям 330 и 500 кВ с горизонтальным расположением проводов, которые можно использовать в упрощенных методах расчета.

Произведения $f_{max} l$ для линий разных классов напряжения, при которых рис. 5.1 и 5.2 рекомендуется использовать для расчетов затухания, приведены ниже:

U , кВ	220	330	500
$f_{max} l$ кГц • км	70000	45000	25000

¹ Эти коэффициенты используются только для линий 330 кВ и выше, которые должны рассматриваться как "несимметричные".

Т а б л и ц а 5.3. Значения коэффициентов K_2

Типы пинии и подвески проводов линии	Значения коэффициента k_2 для номинального напряжения линии				
	35**	110	220	330***	500****
Симметричная:					
олнопепная	0,12	0,23	0,37	-	-
двуххцепная	0,12	0,16	0,25	-	-
Несимметричная:					
горизонтальная, кроме фазы /- фазы 3*	-	0,012	0,024	0,036	$0,74\sqrt{l}10^{-2}$
горизонтальная, фаза / — фаза 3*	—	0,32	0,5	0,63	1,0
треугольная	-	0,036	0,036	0,036	-
двуххцепная	-	0,15	0,15	0,15	-

*Нумерация фаз согласно рис. 1.1.

** Считается, что все линии 35 кВ можно отнести к группе "симметричных".

*** Считается, что все линии 330 кВ и выше относятся к группе "несимметричных".

****Считается, что опоры линии 500 кВ имеют только горизонтальную подвеску фаз.

Таблица 5.4. Значения коэффициентов k_3 и k_4

Число проводов в расщепленной фазе	1	2	3	5
Напряжение ВЛ, кВ	35 - 220	330	500	750
k_3	1	0,68	0,48	0,32
k_4	1	1,35	1,45	1,5

Элементы обработки и присоединения. Затухание, обусловленное ВЧ заградителем, определяется для случая, когда линия за заградителем (со стороны ПС) заземлена. В этом случае затухание, вносимое в линейный тракт заградителем, зависит от соотношения сопротивления заградителя Z_3 (в расчетах оно принимается чисто активным), характеристического сопротивления линейного тракта $Z_{л.т}$ и характеристического сопротивления фильтра присоединения со стороны линии $Z_{ф.л}$. Это затухание определяется по формуле, дБ

$$a_3 = 20 \lg \left(1 + \frac{Z_{ф.л} Z_{л.т}}{R_3 (Z_{ф.л} + Z_{л.т})} \right). \quad (5.5)$$

Часто вместо расчета по (5.5) принимают нормированные значения затухания, вносимого заградителем. При этом согласно рекомендациям

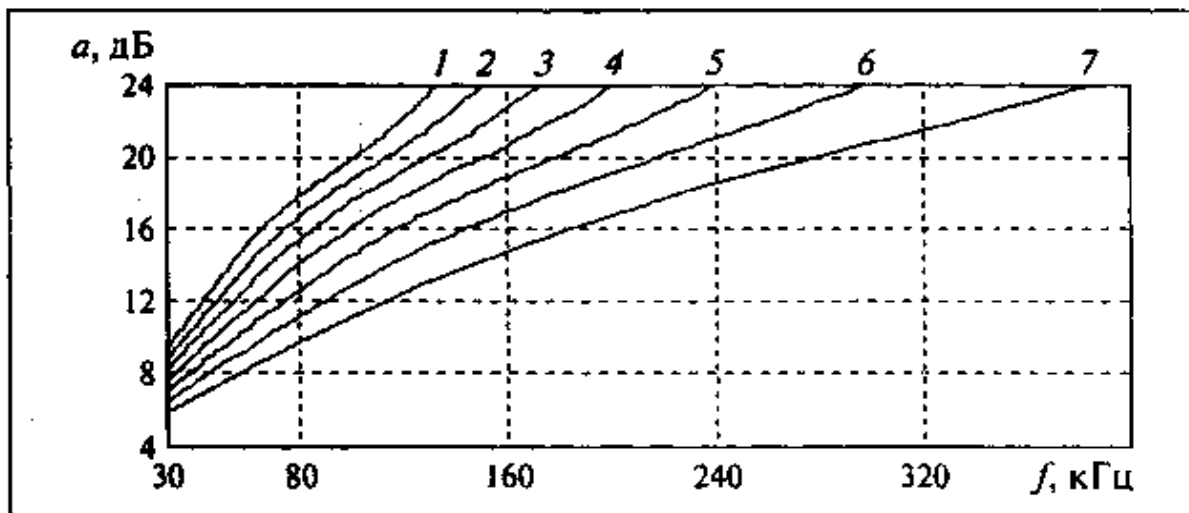


Рис. 5.1. Частотные зависимости затухания ВЧ тракта с присоединением фаза А - земля или фаза В - земля к транспонированным ВЛ 330 кВ разной длины: 1 - $l = 120$ км; 2 - $l = 150$ км; 3 - $l = 180$ км; 4 - $l = 210$ км; 5 - $l = 240$ км; 6 - $l = 270$ км; 7 - $l = 300$ км

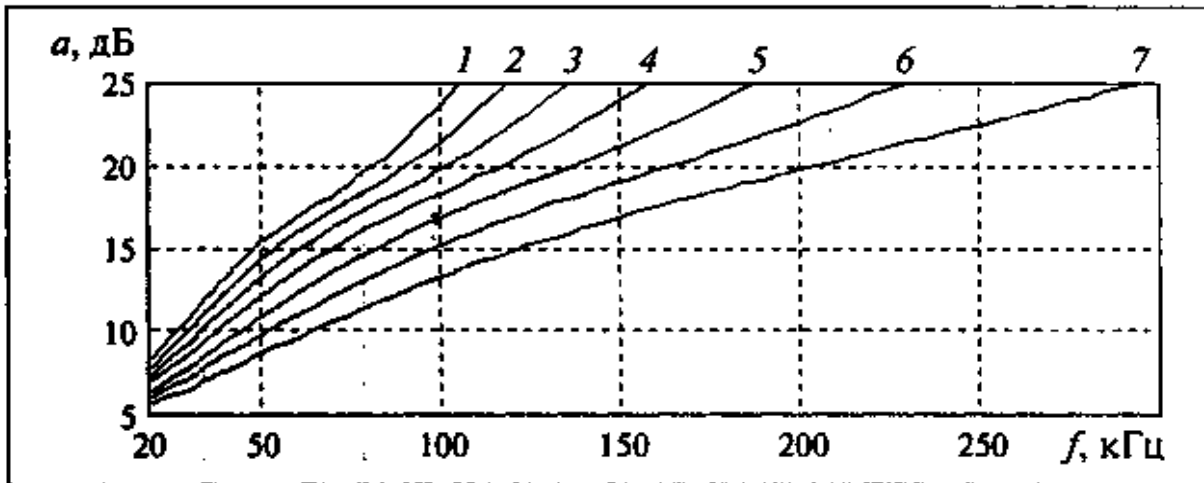


Рис. 5.2. Частотные зависимости затухания ВЧ тракта с присоединением фаза *A* — земля или фаза *B* — земля к транспонированным ВЛ 500 кВ разной длины:
 1 - $l = 120$ км; 2 — $l = 150$ км; 3 — $l = 180$ км; 4 — $l = 210$ км; 5 - $l = 240$ км; 6 - $l = 270$ км;
 7 - $l = 300$ км

Международной Электротехнической Комиссии (МЭК) считается, что сопротивление заградителя R_3 в полосе записания не меньше, чем $1,41 Z_{ЛТ}$, а характеристическое сопротивление фильтра присоединения со стороны линии $Z_{Ф.П.}$ равно характеристическому сопротивлению линейного тракта $Z_{ЛТ}$. При этих условиях значение затухания, вносимого заградителем, принимается равным $a_3 = 2,6$ дБ (округленное значение 3 дБ).

При этом, конечно, предполагается, что ВЧ заградитель настроен таким образом, что рассматриваемые при расчете частоты находятся в пределах его полосы записания.

Затухание, обусловленное фильтром присоединения, определяется для случая, когда фильтр нагружен на характеристическое сопротивление линейного тракта. В этом случае оно определяется потерями из-за рассогласования между характеристическими сопротивлениями фильтра присоединения со стороны линии $Z_{Ф.П.}$ и линейного тракта $Z_{ЛТ}$, и потерями в активных сопротивлениях элементов фильтра. Затухание, определяемое потерями в активных сопротивлениях элементов фильтра, принимается равным 1 дБ и общее затухание ФП рассчитывается по формуле, дБ:

$$a_{ФП} = 1 + 20 \lg \left(\frac{Z_{Ф.П.} + Z_{ЛТ}}{2 \sqrt{Z_{Ф.П.} Z_{ЛТ}}} \right). \quad (5.6)$$

Часто вместо расчета по (5.6) принимают нормированные значения затухания, вносимого фильтром присоединения. При этом согласно рекомендациям МЭК принимается, что затухание несогласованности ФП в полосе пропускания не меньше 12 дБ (т.е. значения $Z_{Ф.П.}$ и $Z_{ЛТ}$ различаются не более, чем в 1,67 раза). При этих условиях значение затухания, вносимого фильтром присоединения, принимается равным $a_{Ф.П.} = 1,3$ дБ (округленное значение 1,5 дБ).

Затухание, обусловленное ВЧ кабелем на частоте f , кГц, может быть рассчитано по формуле, дБ

$$a_{каб} = 0,13 \sqrt{f l_{каб}}. \quad (5.7)$$

Если длина ВЧ кабеля не превышает 0,1 км, то вносимое им затухание принимается равным $a_{каб} = 0,5$ дБ.

Ответвления. Если ответвление не используется для организации связи, то оно обязательно

должно обрабатываться ВЧ заградителями, включаемыми в его начале, по крайней мере, в рабочую (для схемы фаза - фаза — рабочие) фазу линии ответвления. При этом максимальное затухание, вносимое ответвлением, получается на частотах, для которых входное сопротивление ответвления минимально (см. § 4.1). В расчетах минимальное входное сопротивление необработанного ответвления принимается равным нулю,

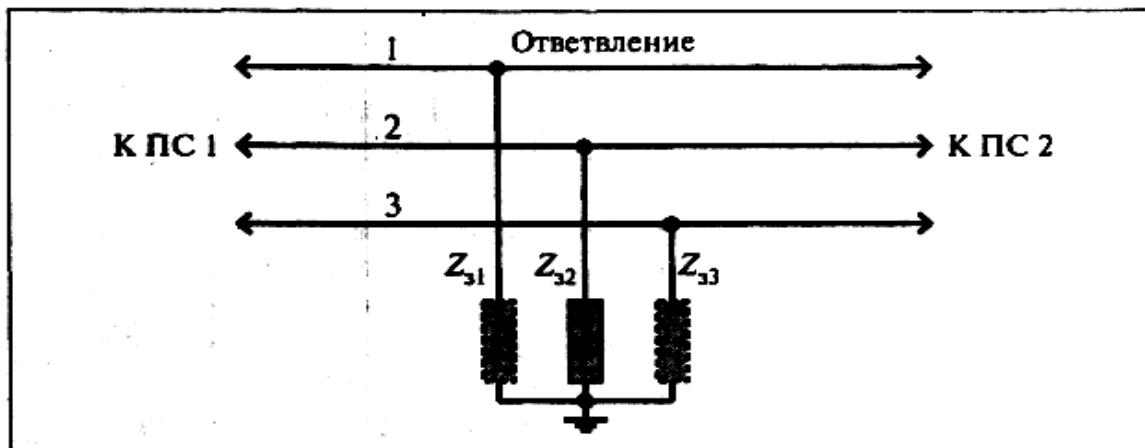


Рис. 5.3. Расчетная схема для определения затухания, вносимого обработанным ответвлением

что практически всегда соответствует действительности, так как длины ответвлений, как правило, очень малы. Расчетная схема для определения значения затухания, вносимого ответвлением в "сквозной" тракт, приведена на рис. 5.3.

Формулы для определения максимального затухания, вносимого ответвлением, обработанным заградителем с запирающим сопротивлением Z_3 для расчетной схемы рис. 5.3 следующие: для схемы присоединения фаза — земля, дБ: обработана только рабочая фаза

$$a_{\text{отв}} = 20 \lg \left| 1,3 + \frac{285}{k_4 Z_3} \right|, \quad (5.8a)$$

обработана рабочая и одна из нерабочих фаз:

$$a_{\text{отв}} = 20 \lg \left| 1,16 + \frac{230}{k_4 Z_3} \right|, \quad (5.8б)$$

обработаны все три фазы:

$$a_{\text{отв}} = 20 \lg \left| 1 + \frac{190}{k_4 Z_3} \right|; \quad (5.8в)$$

для схемы фаза — фаза при обработке двух рабочих фаз справедлива формула (5.8в). Значения коэффициента k_4 который используется при расчетах ответвлений на линиях 330 кВ

и выше, приведены в табл. 5.4.

Часто вместо расчета по (5.8) используют значение затухания, вычисленное при нормированных значениях сопротивления заградителя (согласно рекомендациям МЭК сопротивление заградителя Z_3 в полосе записания не меньше, чем $650/K_4$). При этих условиях значение затухания, вносимого ответвлением, получается равным:

$a_{отв} \approx 5,0$ дБ для схемы фаза — земля при обработке одной рабочей фазы;

$a_{отв} \approx 3,6$ дБ для схемы фаза - земля при обработке одной рабочей и одной из нерабочих фаз;

$a_{отв} \approx 2,5$ дБ для схемы фаза - земля при обработке всех трех фаз и для схемы фаза — фаза при обработке рабочих фаз.

Приведенные значения затухания, вносимого ответвлением, справедливы при условии, что заградители включены в фазы линии ответвления в самом ее начале. Чем дальше от места разветвления включены заградители, тем больше затухание, вносимое ответвлением, будет отличаться от расчетного значения (в сторону увеличения). Поэтому не рекомендуется включать заградители на расстоянии от места разветвления, превышающим допустимое значение, км:

$$l_{доп} \leq \frac{15}{f_B}, \quad (5.9)$$

где f_B — наивысшая частота, передаваемая по ВЧ тракту, кГц.

Если ответвление используется для организации связи (трехконцевой канал связи), то в конце линии ответвления осуществлена полная обработка рабочей фазы (рабочих фаз для схемы фаза - фаза). Это значит, что на конце ответвления:

рабочая фаза отделена от ПС заградителем;

к рабочей фазе линии ответвления подключен фильтр присоединения с ВЧ кабелем;

ВЧ кабель нагружен на входное сопротивление аппаратуры, имеющей в рассматриваемой полосе частот номинальное входное сопротивление, равное 75 Ом.

При этом максимальное затухание, вносимое ответвлением, определяется модулем коэффициента отражения междуфазной волны от конца ответвления $k_{отр}$, определяемого так же, как и для конца линии по формулам (5.12) и (5.14) (см. ниже), и затуханием этой волны на длине ответвления $a_{мф.отв}$ и определяется по формуле, дБ:

$$a_{отв max} = 20 \lg \left| \frac{3 - k_{отр} 10^{-0,1 a_{мф.отв}}}{2(1 - k_{отр} 10^{-0,1 a_{мф.отв}})} \right|. \quad (5.10)$$

Обычно при расчетах принимают наиболее вероятные значения модуля коэффициента отражения от конца ответвления и считают, что длина ответвления невелика и затуханием междуфазной волны на длине ответвления $a_{мф.отв}$ можно пренебречь. Наиболее вероятное значение модуля коэффициента отражения: для схемы присоединения фаза — земля $k_{отр} = 0,5$ и для схемы присоединения фаза — фаза $k_{отр} = 0,2$. При этом максимальное значение затухания, вносимого ответвлением, используемым для организации связи $a_{отв max}$, получается равным 8 дБ для схемы фаза - земля и 5 дБ для схемы фаза — фаза.

Иногда при ответвлении, не используемом для организации связи, когда невозможно подвесить заградители в начале ответвления, производят полную обработку на конце ответвления и тем самым ограничивают расчетное затухание, вносимое в сквозной тракт до 8 или 5 дБ в зависимости от схемы организации тракта (фаза — земля или фаза — фаза). При

использовании этого приема следует помнить, что ФП, включенные на конце ответвления, должны быть нагружены со стороны кабельного входа на резистор сопротивлением 75 Ом. При этом резистор должен быть рассчитан так, чтобы он выдерживал возможные перенапряжения, возникающие на выходе ФП при КЗ и коммутационных перенапряжениях. **Разделительные фильтры** включаются в ВЧ тракт для разделения двух ВЧ трактов в некотором диапазоне частот. Затухание, обусловленное разделительными фильтрами, принимается не зависящим от частоты и равным 1 дБ.

Шунтирующими элементами в составе ВЧ тракта являются:

аппаратура других каналов, подключаемая непосредственно или через разделительные фильтры к общему ВЧ тракту по его концам или на ВЧ обходах, входное сопротивление которой оказывает шунтирующее действие на рассматриваемый тракт; входное сопротивление ВЧ тракта другого канала, подключаемого на подстанции обхода непосредственно или через разделительный фильтр к тракту рассматриваемого канала.

Затухание, обусловленное шунтирующими элементами, принимается не зависящим от частоты и равным 1 дБ.

Пример 5.1. Рассчитать затухание ВЧ тракта по ВЛ 220 кВ с горизонтальным расположением проводов для оптимальной схемы присоединения средняя фаза - земля. Затухание рассчитать на частотах 100, 150 и 200 кГц.

Исходные данные для расчета:

ВЛ 220 кВ, не транспонированная, длиной 80 км. Фазный провод типа АС 330/43. Заградители типа ВЗ 630-0,5/100-200; $Z_{3min} = 650$ Ом; фильтры присоединения типа ФПМ 3200/76-1000; $Z_{ф.л} = 480$ Ом; ВЧ кабели типа РК-75, длиной по 100 м с каждого конца линии.

Решение. Сначала определяем частотно зависимую составляющую формулы (5.1). Расчет сделаем для частоты 100 кГц.

Коэффициент затухания $a_{мф}$ определяем по (5.4а) с учетом значения коэффициентов $k_1 = 3,2$ (табл. 5.2, провод АС 330), $k_2 = 0,024$ (табл. 5.3, горизонтальное расположение проводов ВЛ) и $k_3 = k_4 = 1$ (табл. 5.4, фаза без расщепления):

$a_{мф} = (3,2\sqrt{100 + 0,024 \cdot 100})10^{-3} = 0,0344$ дБ/км. Затухание линии определяется по формуле (5.3):

$a_{вл} = 0,0344 \cdot 80 + 2,5 = 5,25$ дБ/км.

Затухание ВЧ кабелей, входящих в схему тракта по концам, определяется по (5.7)

$$\sum a_{каб} = a_{каб1} + a_{каб2} = 0,13\sqrt{100}(0,1 + 0,1) = 0,26 \text{ дБ.}$$

Для других частот расчет делается аналогично. Результаты расчета приведены в табл. 5.5.

Определяем составляющие формулы (5.1), которые не зависят от частоты.

Затухание ВЧ заградителей, входящих в схему тракта по концам и в месте ВЧ обхода,

определяется по (5.5) при исходных данных $Z_{л.т} = 450$ Ом (табл. 5.1); $Z_{фп} = 480$ Ом и $Z_3 = 650$ Ом (заданы):

$$\sum a_3 = 2a_3 = 2 \cdot 20 \lg \left[1 + \frac{480 \cdot 450}{650(480 + 450)} \right] = 5,31 \text{ дБ.}$$

Затухание фильтров присоединения, входящих в схему тракта по концам и в месте ВЧ обхода, определяется по (5.6) при исходных данных $Z_{л.т} = 450$ Ом (табл. 5.1); $Z_{фп} = 480$ Ом (задано):

$$\sum a_{фп} = 2a_{фп} = 2 \left[1 + 20 \lg \left(\frac{480 + 450}{2\sqrt{480 \cdot 450}} \right) \right] = 2 \text{ дБ.}$$

Затухание заградителей, фильтров присоединения и ответвления можно было бы не определять по соответствующим формулам, как это было сделано выше, а принимать рекомендованные численные значения. В этом случае значение затухания тракта будет

несколько отличаться от полученного. Это значение также приведено в сводной таблице с обозначением a'_m .

Пример 5.2. Рассчитать затухание ВЧ тракта с обходом и ответвлением со схемой, представленной на рис. 5.4. Затухание рассчитать на частотах 100, 125, 150, 175 и 200 кГц. *Исходные данные для расчета:*

ВЛ 110 кВ с треугольным расположением проводов. Фазный провод типа АС-185/43. Длины ВЛ приведены на рисунке;

заградители типа ВЗ 630-0,5/100-200; $Z_{3 \min} = 650 \text{ Ом}$;

фильтры присоединения типа ФПУ 6400/65-800; $Z_{\text{ф.л}} = 450 \text{ Ом}$;

ВЧ кабели типа РК-75. Длины 100,40 и 200 м соответственно на ЛС А, В и С, присоединение по схеме верхняя фаза - земля (см. рис. 1.1).

Решение. Сначала определяем частотно зависимые составляющие формулы (5.1):

Коэффициент затухания $a_{\text{мф}}$ для линий, входящих в схему тракта, определяем по (5.4а) с учетом значения коэффициентов $k_1 = 4,2$ (табл. 5.2, провод АС185), $k_2 = 0,036$ (табл. 5.3, треугольное расположение проводов ВЛ) и $k_3 = k_4 = 1$ (табл. 5.4, фаза без расщепления). Для частоты 100 кГц:

$$a_{\text{мф}} = (4,2 \cdot 1 \cdot \sqrt{100} + 0,036 \cdot 1 \cdot 100) \cdot 10^{-3} \sim 0,046 \text{ дБ/км.}$$

Затухание каждой из ВЛ, входящей в ВЧ тракт, определяется по (5.3). Для частоты 100 кГц затухание линий, входящих в тракт:

$$\sum a_{\text{ВЛ}} = a_{\text{ВЛ1}} + a_{\text{ВЛ2}} = 0,046(15 + 12 + 18) + 2 \cdot 2,5 = 7,07 \text{ дБ.}$$

Затухание ВЧ кабелей, входящих в схему тракта по концам и в месте ВЧ обхода, определяется по (5.7). Для частоты 100 кГц это затухание равно:

$$\begin{aligned} \sum a_{\text{каб}} &= a_{\text{каб1}} + a_{\text{каб2}} + a_{\text{каб3}} = 0,13\sqrt{100}(0,1 + 0,04 + 0,2) = \\ &= 0,42 \text{ дБ.} \end{aligned}$$

Для других частот расчет делается аналогично. Результаты расчета приведены в табл. 5.6.

Определяем составляющие формулы (5.1), которые не зависят от частоты.

Затухание ВЧ заградителей, входящих в схему тракта по концам и в месте ВЧ обхода, определяется по (5.5) при исходных данных $Z_{\text{ЛГ}} = 450 \text{ Ом}$ (табл. 5.1); $Z_{\text{ФП}} = 450 \text{ Ом}$ и $Z_3 = 650 \text{ Ом}$ (заданы):

$$\sum a_3 = 4a_3 = 4 \cdot 20 \lg \left(1 + \frac{450 \cdot 450}{650(450 + 450)} \right) = 10,4 \text{ дБ.}$$

Затухание фильтров присоединения, входящих в схему тракта по концам и в месте ВЧ обхода, определяется по (5.6) при исходных данных $Z_{\text{ЛГ}} = 450 \text{ Ом}$ (табл. 5.1); $Z_{\text{ФП}} = 450 \text{ Ом}$ (задано):

$$\sum a_{\text{ФП}} = 4a_{\text{ФП}} = 4 \cdot \left[1 + 20 \lg \left(\frac{450 + 450}{2\sqrt{450 \cdot 450}} \right) \right] = 4 \text{ дБ.}$$

Таблица 5.5. Сводная таблица с результатами расчетов примера 5.1

Параметр	Значение рассчитываемого параметра для частот, кГц		
	100	150	200
$a_{\text{мф}}$, дБ/км	0,0344	0,0428	0,05
$a_{\text{ВЛ}}$, дБ	5,25	5,92	6,5

$\sum a_k, \text{дБ}$	0,26	0,32	0,37
$\sum (a_3 + a_{\text{ФП}}), \text{дБ}$	7,31	7,31	7,31
$a_T, \text{дБ}$	12,82	13,55	14,18
$a_T^1, \text{дБ}$	14,05	14,72	15,30

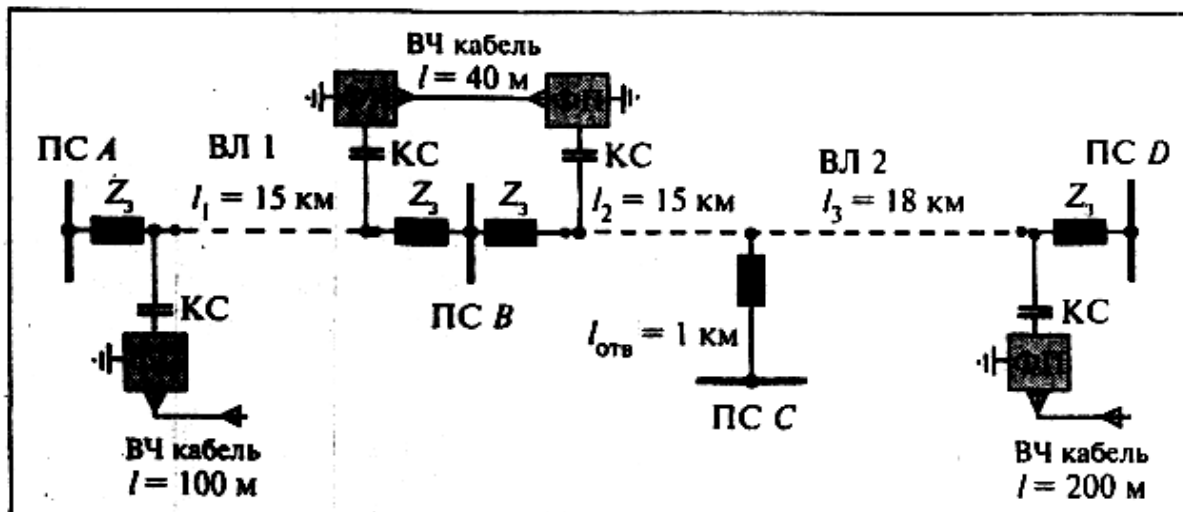


Рис. 5.4. Схема ВЧ тракта для примера 5.2

Затухание отвлечения определяется по (5.8а) при исходных данных $\gamma_4 = 1$ (табл. 5.4, фаза без расщепления); $Z_3 = 650 \text{ Ом}$ (задано):

$$a_{\text{отв}} = 20 \lg \left(1,3 + \frac{285}{1 \cdot 650} \right) = 4,8 \text{ дБ.}$$

Затухание загрядителей, фильтров присоединения и отвлечения можно было бы не определять по соответствующим формулам, как это было сделано выше, а принимать рекомендованные численные значения. В этом случае значение затухания тракта будет несколько отличаться от полученного. Это значение также приведено в сводной таблице с обозначением a_T^1 .

Пример 5.3. Что изменится в результатах расчета примера 5.2, если вместо фильтра присоединения типа ФПУ 6400/65-800 с $Z_{\text{ФП}} = 450 \text{ Ом}$ использовать ФП типа ФПУ 2200/100-800 с $Z_{\text{ФП}} = 730 \text{ Ом}$?

Решение. Определяем только те составляющие формулы (5.1), которые изменятся при замене ФП с одного типа на другой.

Затухание ВЧ загрядителей, входящих в схему тракта по концам и в месте ВЧ обхода, определяется по (5.5) при исходных данных $Z_{\text{ЛТ}} = 450 \text{ Ом}$ (табл. 5.1); $Z_{\text{ФП}} = 730 \text{ Ом}$ и $Z_3 = 650 \text{ Ом}$ (заданы):

$$\sum a_3 = 4a_3 = 4 \cdot 20 \lg \left(1 + \frac{730 \cdot 450}{650(730 + 450)} \right) = 12,4 \text{ дБ.}$$

Затухание фильтров присоединения, входящих в схему тракта по концам и в месте ВЧ обхода, определяется по (5.6) при исходных данных $Z_{\text{ЛТ}} = 450 \text{ Ом}$ (табл. 5.1); $Z_{\text{ФП}} = 730 \text{ Ом}$ (задано):

$$\sum a_{\text{ФП}} = 4a_{\text{ФП}} = 4 \left(1 + 20 \lg \left(\frac{730 + 450}{2\sqrt{730 \cdot 450}} \right) \right) = 5 \text{ дБ};$$

$$\sum (a_3 + a_{\text{ФП}}) = 17,4 \text{ дБ.}$$

Таким образом, расчетное затухание тракта при смене ФП с одного типа на другой увеличится на 3 дБ [$\sum (a_3 + a_{\text{ФП}})$ получается равной 17,4 дБ вместо 14,4 дБ при прочих равных условиях]. На рис. 5.5 и 5.6 приведены для сопоставления результаты расчетов для примеров 5.1 — 5.3 по упрощенной и точной (по программе "Тракт") методикам.

Из рассмотрения этих рисунков видно, что погрешность расчета по упрощенной методике значительно увеличивается с усложнением схемы рассчитываемого тракта, причем эта погрешность практически не контролируема.

Приrost затухания линии при образовании гололедно-изморозиевых отложений на ее проводах рассчитывается по формуле:

$$\Delta a_{\text{ГОЛ}} = \frac{k_3 k_{\text{СХ}} m_{\text{ГОЛ}}}{1 - 0,38 k_{\text{СХ}} \lg \left(1 + \frac{2d_{\text{ГОЛ}}}{d_{\text{ПР}}} \right)} \lg \left(1 + \frac{2d_{\text{ГОЛ}}}{d_{\text{ПР}}} \right) l_{\text{ГОЛ}}, \quad (5.11)$$

где k_3 — коэффициент, учитывающий расщепление фазы ВЛ, значения которого приведены в табл. 5.4; $k_{\text{СХ}}$ — коэффициент, принимающий значение 1

Т а б л и ц а 5.6. Сводная таблица с результатами расчетов примера 5.2

Параметр	Значение параметра для частоты, кГц				
	100	125	150	175	200
$a_{\text{МФ}}$, дБ/км	0,046	0,052	0,057	0,062	0,067
$\sum a_{\text{ВЛ}}$, дБ	7,07	7,34	7,56	7,79	8,00
$\sum a_{\text{К}}$, дБ	0,44	0,49	0,54	0,58	0,63
$\sum (a_3 + a_{\text{ФП}})$, дБ	14,4	14,4	14,4	14,4	14,4
$a_{\text{ОТВ}}$, дБ	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
a_{T} , дБ	26,71	27,03	27,3	27,57	27,93
a_{T}^1 , дБ	30,51	30,83	31,1	31,37	31,63

для схем присоединения фаза — земля и фаза — фаза и значение 1,8 для внутрифазного тракта; $d_{\text{ГОЛ}}$ — толщина гололедно-изморозиевых отложений на проводах ВЛ, см; $d_{\text{ПР}}$ — диаметр фазного провода ВЛ, см; $m_{\text{ГОЛ}}$ — коэффициент, характеризующий частотную зависимость параметров ГИО; $l_{\text{ГОЛ}}$ — длина участка ВЛ с гололедно-изморозиевыми отложениями на проводах ВЛ.

Частотная зависимость коэффициента $m_{\text{ГИО}}$ для чистого гололеда, образующегося при температуре —2 °С, приведена на рис. 5.7.

Толщина ГИО (стенки гололеда) принимается в расчетах в соответствии с районом по гололеду, в котором проходит трасса линии. Согласно ПУЭ вся территория России делится на пять районов по возможному значению стенки гололеда на линиях (табл. 5.7).

Обычно стенку гололеда при расчете увеличения затухания ВЧ тракта от гололеда принимают для повторяемости 1 раз в 5 лет.

Длина участка линии, одновременно охваченная гололедом, определяется на основании статистической обработки данных метеостанций, расположенных вдоль трассы линии. При отсутствии таких данных эта длина принимается равной 30 км, так как одновременное появление гололеда на большей длине ВЛ маловероятно. Если длина линии меньше 30 км, то считают, что выпадение ГИО возможно на всей длине ВЛ.

Пример 5.4. Определить прирост затухания от чистого гололеда для линии 220 кВ длиной 80 км с фазным проводом АС 330/43 (диаметр 2,52 см). Прирост затухания определить для схемы присоединения фаза - земля для частот 50, 100 и 300 кГц; район по гололеду IV (толщина стенки гололеда 1,5 см).

Произвести те же расчеты для ВЛ 330 кВ с конструкцией фазы 2хАС 330/43.

Решение.

ВЛ 220 кВ. Подставляем в (5.11) значения $k_3 = k_{cx} = 1$; $d_{\text{ГИО}} = 1,5$ см, $d_{\text{ПР}} = 2,52$ см. Значение m определяется по рис. 5.5 для частот 50 ($m = 0,125$), 100 ($m = 0,432$) и 300 кГц ($m = 1,598$).

Длину $l_{\text{гол}}$ принимаем равной 30 км. Для частоты 50 кГц:

$$\Delta a_{\text{гол}} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 0,125}{1 - 0,38 \cdot 1 \cdot \lg\left(1 + \frac{2 \cdot 1,5}{2,52}\right)} \lg\left(1 + \frac{2 \cdot 1,5}{2,52}\right) \cdot 30 = 1,47 \text{ дБ.}$$

Анал

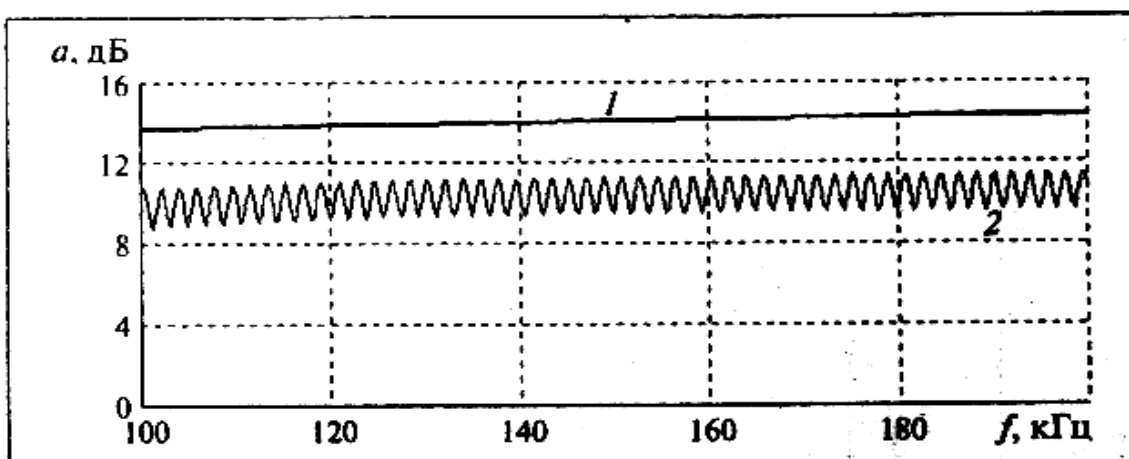


Рис. 5.5. Сопоставление результатов расчета по упрощенной (кривая 1) и точной (кривая 2) методикам для примера 5.1

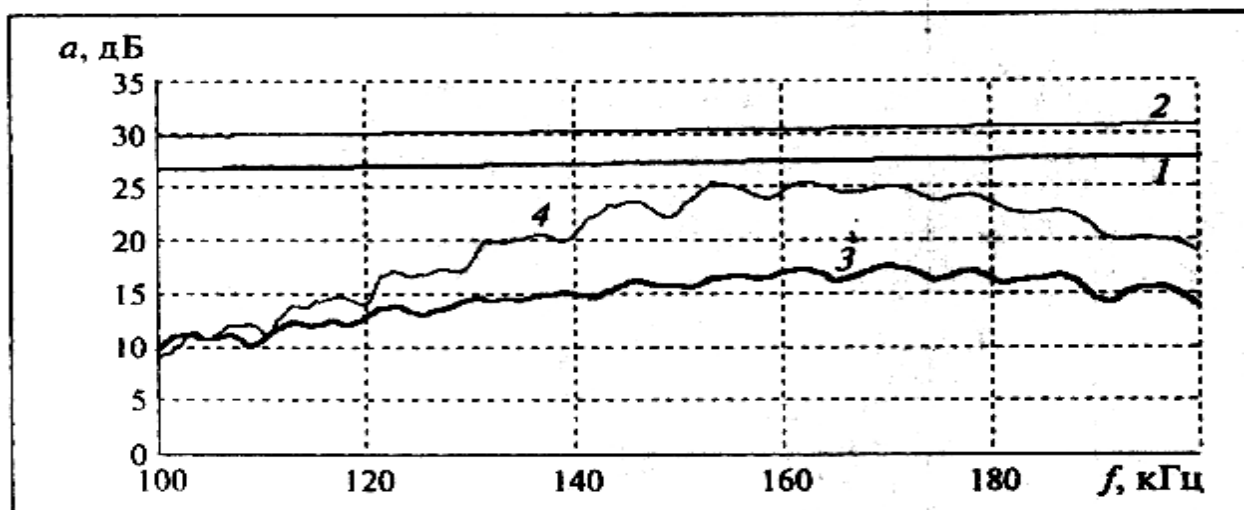


Рис. 5.6. Сопоставление результатов расчета по упрощенной (кривые 1 и 2) и точной (кривые 3 и 4) методикам соответственно для примеров 5.2 и 5.3

ВЛ 330 кВ. Подставляем в (5.11) значения $k_3 = 0,68$, $k_{сх}=1$; $d_{гол} = 1,5$ см, $d_{пр} = 2,52$ см.

Значения t те же, что для ВЛ 220 кВ. Длину $l_{гол}$ принимаем равной 30 км. Для частоты 50 кГц:

$$\Delta a_{гол} = \frac{1 \cdot 0,68 \cdot 0,125}{1 - 0,38 \cdot 0,68 \cdot \lg\left(1 + \frac{2 \cdot 1,5}{2,52}\right)} \lg\left(1 + \frac{2 \cdot 1,5}{2,52}\right) \cdot 30 = 0,95 \text{ дБ.}$$

Аналогично производим расчет для частот 100 и 200 кГц и результаты сводим в табл. 5.8.

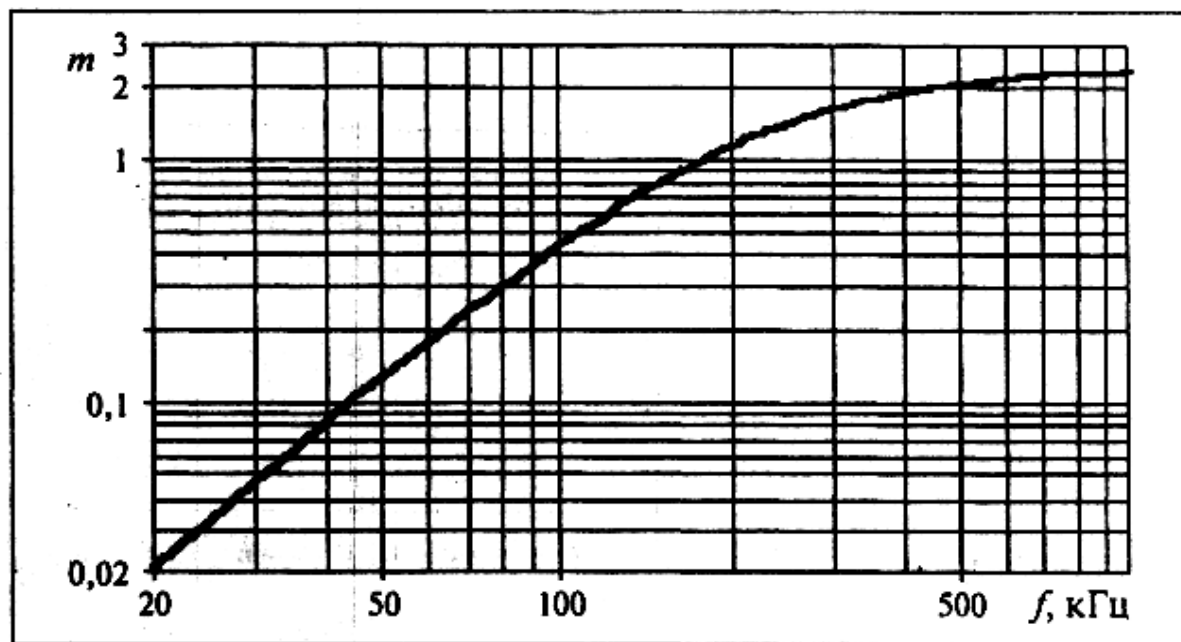


Рис. 5.7. Частотная зависимость коэффициента m

Из таблицы видно, что для линии с расщепленными фазами влияние гололеда на затухание тракта существенно меньше, чем для линии без расщепления фаз.

Неравномерность затухания тракта, обусловленная многократно отраженными волнами. Как было сказано выше, затухание линии определяется по формуле (5.3) без учета влияния многократно отраженных от концов линии волн. Многократно отраженные от концов линии волны для одних частот увеличивают и для других частот уменьшают затухание линии относительно расчетного по (5.3), делая частотную зависимость затухания неравномерной. Изменение затухания от максимального значения до минимального происходит периодически в интервале частот $\Delta f_{\max-\min}$, определяемом выражением (2.7).

Таблица 5.7. Районирование трасс ВЛ по гололеду

Район по гололеду	Толщина стенки гололеда, см, при повторяемости	
	1 раз в 5 лет	1 раз в 10 лет
I	0,5	0,5
II	0,5	1,0
III	1,0	1,5

IV	1,5	2,0
Особый	2,0 и более	Более 2,2

Приближенный учет влияния многократно отраженных волн на затухание тракта сводится к определению неравномерности затухания в интервале частот $\Delta f_{\max-\min}$ вызванной этими отражениями $\Delta a_{\text{отр}}$

Рассмотрим методику расчета неравномерности затухания для тракта, в схему которого входит только одна ВЛ. Для приближенного расчета значения $\Delta a_{\text{отр}}$ необходимо уметь определять коэффициент отражения междуфазной волны $k_{\text{отр.мф}}$ от конца линии.

Для схемы присоединения фаза — земля коэффициент отражения междуфазной волны зависит от нагрузки как рабочей, так и нерабочих фаз.

Сопротивление нагрузки нерабочих фаз в процессе эксплуатации может изменяться от бесконечности (линия отключена и не заземлена) до нуля (линия отключена и заземлена). Для этих крайних значений сопротивлений нагрузки нерабочих фаз выражение для определения коэффициента отражения напряжения междуфазной волны определяется по формулам:

$$k_{\text{отр.мф.к}} = \frac{-2,1 + q_{\text{н}}}{2,1 + 1,73q_{\text{н}}}, \quad (5.12a)$$

$$k_{\text{отр.мф.х}} = \frac{-0,04 + q_{\text{н}}}{1,34 + q_{\text{н}}}, \quad (5.126)$$

где $q_{\text{н}}$ — относительное сопротивление нагрузки рабочей фазы, которое определяется как:

$$q_{\text{н}} = \frac{Z_{\text{н}} k_4}{380}. \quad (5.13)$$

Для двух указанных крайних случаев режима работы линии $Z_{\text{н}}$ принимается равным: при отключенной и незаземленной линии характеристическому сопротивлению используемого фильтра присоединения;

Таблица 5.8. Сводная таблица с результатами расчетов примера 5.4

ВЛ	$\Delta a_{\text{гол}}$, дБ, для частот, кГц		
	50	100	300
220	1,47	5,06	18,8
330	0,95	3,3	12,2

при отключенной и заземленной линии эквивалентному сопротивлению, вычисленному для схемы с параллельным включением фильтра присоединения с его характеристическим сопротивлением и заградителя с его заграждающим сопротивлением.

На рис. 5.8 приведены кривые зависимости коэффициента отражения от конца линии, рассчитанные по (5.12). Все расчетные зависимости для сопротивлений нагрузки нерабочих фаз, отличающихся от нуля и бесконечности, лежат между приведенными кривыми. Из рассмотрения кривых, приведенных на рис. 5.8, видно, что при схеме присоединения фаза — земля принципиально невозможно согласовать линию при всех возможных режимах линии

электропередачи и коэффициент отражения от конца линии может при коммутационных переключениях линии изменяться в широких пределах. Все это приводит, как мы уже говорили ранее, к нестабильности характеристик ВЧ тракта при коммутационных переключениях линии.

Для схемы присоединения фаза — фаза коэффициент отражения практически зависит только от того, на какие сопротивления нагружены рабочие провода. Поэтому при коммутационных переключениях линии

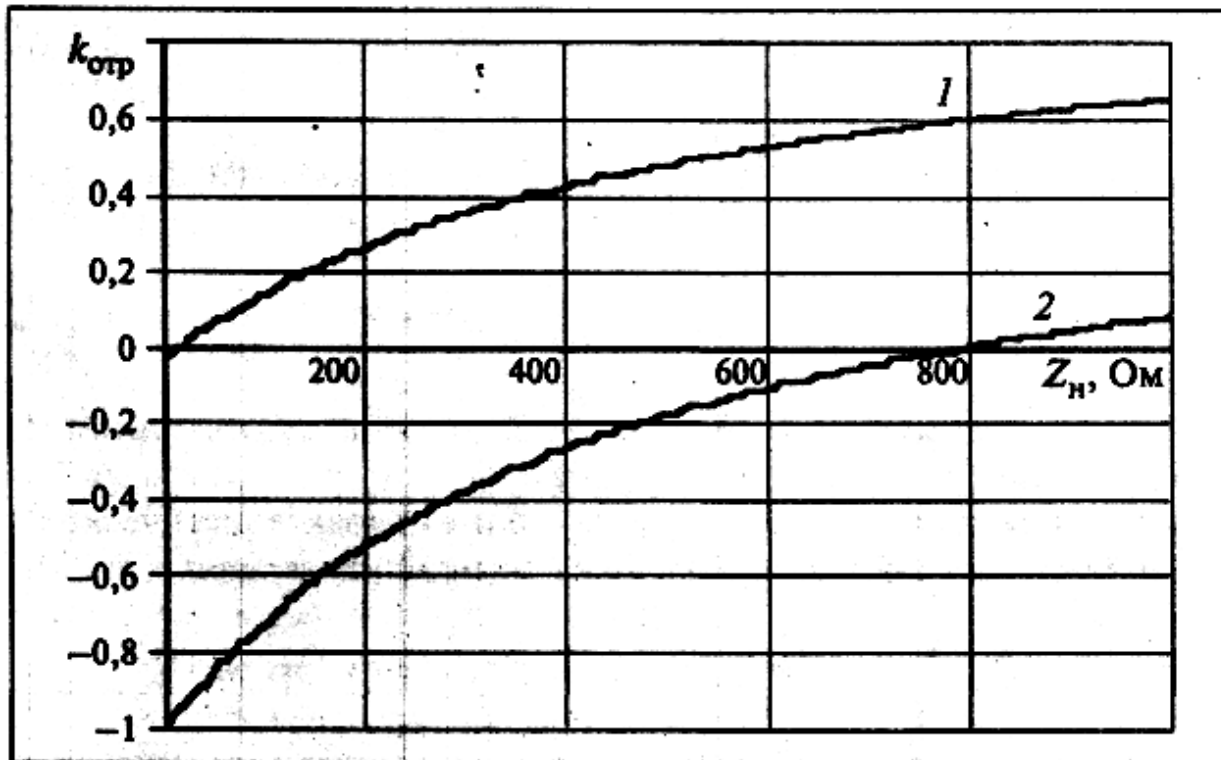


Рис. 5.8. Зависимость коэффициента отражения междуфазной волны от сопротивления нагрузки рабочей фазы для схемы присоединения фаза — земля к линии без расщепления фаз:

1 — нерабочие фазы изолированы; 2 — нерабочие фазы заземлены

коэффициент отражения изменяется значительно меньше, чем для схемы фаза — земля (только за счет изменения сопротивления нагрузки рабочих фаз). В этом случае он вычисляется по формуле:

$$k_{\text{отр.мф}} = \frac{q_n - 1}{q_n + 1}, \quad (5.14)$$

где q_n определяется по (5.13) для сопротивления нагрузки одной из фаз,

Для внутрифазного присоединения коэффициент отражения вычисляется по формуле (5.14), но значение q_n определяется по входному сопротивлению устройства присоединения на один провод расщепленной фазы Z_n , которое не зависит от коммутационного состояния линии:

$$q_n = \frac{Z_n}{200}. \quad (5.15)$$

Пример 5.5. Определить пределы изменения коэффициента отражения от конца линии при изменении коммутационного состояния ВЛ от "линия отключена" до "линия отключена и

заземлена". Характеристическое сопротивление ФП со стороны линии принять равным 480 Ом; загоражающее сопротивление заградителя — 6500м.

Решение. Расчет производим по формулам (5.12) и (5.14) с учетом (5.13). Результаты расчета приведены в табл. 5.9. Из этой таблицы наглядно видны преимущества схемы присоединения фаза - фаза перед схемой фаза — земля в части стабильности значений коэффициентов отражения от концов ВЛ (а значит и параметров тракта) при изменении коммутационного состояния линии.

Таблица 5.9. Сводная таблица с результатами расчетов примера 5.5

Состояние линии электропередачи и сопротивление нагрузки рабочей фазы	Коэффициент отражения для схем присоединения	
	фаза — земля	фаза — фаза
Линия отключена $Z_H = 480$ Ом; $q_H = 480/380 = 1,26$	$K_{OTR.MФ.X} = 0.47$	$K_{OTR.MФ.X} = 0.12$
Линия отключена и заземлена $Z_H = 480 \cdot 650 / (480 + 650) = 276$ Ом $q_H = 276/380 = 0,73$	$K_{OTR.MФ.K} = - 0,47$	$K_{OTR.MФ.K} = - 0,16$

Неравномерность затухания ВЧ тракта, обусловленная наличием в линии многократно отраженных от концов этой линии волн, определяется по формуле:

$$\Delta a_{отр} = 20 \lg \left(\frac{1 + |k_{мф1} k_{мф2}| 10^{-0,1 \alpha_{мф} l}}{1 - |k_{мф1} k_{мф2}| 10^{-0,1 \alpha_{мф} l}} \right). \quad (5.16)$$

В формуле (5.16) $k_{мф1}$ и $k_{мф2}$ — коэффициенты отражения от левого и правого концов линии; $\alpha_{мф}$ — затухание основной междуфазной модальной составляющей на длине линии.

В том случае, когда в схему тракта входит линия с ответвлением, когда в схеме тракта есть ВЧ обходы промежуточных подстанций или кабельная вставка в воздушную линию, оценка неравномерности затухания такого тракта получается намного сложнее, чем для уже рассмотренного случая. Для трактов со сложными схемами, когда в тракте имеется больше, чем две точки нарушения однородности линии, влияние многократно отраженных волн на затухание тракта должно определяться расчетом по точным методикам на ЭВМ. Отметим только, что в случае наличия в ВЧ тракте нескольких мест нарушения однородности линии, неравномерность затухания такого тракта может оказаться весьма большой.

Пример 5.6. Для ВЧ тракта по ВЛ 220 кВ, данные которого приведены в примере 5.1, рассчитать неравномерность затухания, вызванную многократно отраженными от концов линии волнами и полосу частот, для которой определяется эта неравномерность.

Расчет произвести для частот 100 и 200 кГц для случая, когда нерабочие фазы заземлены (линия отключена и заземлена).

Решение. Расчет неравномерности затухания производим по формуле (5.16), в которую подставляем уже рассчитанные ранее коэффициенты затухания междуфазной волны (пример 5.1) и коэффициент отражения междуфазной волны (пример 5.4 для случая КЗ нерабочих фаз). Для частоты 100 кГц:

$$\Delta a_{отр} = 20 \lg \left[\frac{1 + (-0,41) \cdot (-0,41) \cdot 10^{-0,1 \cdot 0,0344 \cdot 80}}{1 - (-0,41) \cdot (-0,41) \cdot 10^{-0,1 \cdot 0,0344 \cdot 80}} \right] = 1,55 \text{ дБ.}$$

Аналогично производится расчет для частоты 200 кГц. Результаты приведены ниже:

$$\Delta f_{max - min} = \frac{300}{4 \cdot 80} \approx 0,94 \text{ кГц.}$$

f кГц	100	200
$\Delta a_{отр}$, дБ	1,55	1,16

Полоса частот, для которой определяется неравномерность затухания, рассчитывается по (2.7) для скорости v , равной скорости света 300 тыс. км/с:

Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с данными рис. 5.5, который сделан на основании результатов расчета на ЭВМ по точной методике.

5.2. УПРОЩЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА УРОВНЯ ПОМЕХ ОТ КОРОНЫ

Упрощенные методы расчета уровня помех от короны дают возможность определить средний среднеквадратичный уровень помех от короны в заданной полосе частот. Так же, как и упрощенные методы расчета параметров ВЧ тракта, они получены из точных выражений путем введения ряда допущений. Основное допущение заключается в том, что упрощенные методы расчета уровня помех от короны получены для присоединения по схеме средняя фаза — земля к нетранспонированным ВЛ, осуществленных на типовых опорах с горизонтальным расположением проводов, и для внутрифазного тракта. Тем не менее, упрощенные методы дают достаточную точность и для других схем присоединения, и для ВЛ с другими опорами. До того, как перейти к расчету уровней помех, рассмотрим вычисление максимальной напряженности электрического поля на поверхности проводов средней фазы ВЛ с горизонтальным расположением проводов, определяющей интенсивность коронирования. Максимальная напряженность электрического поля (амплитудное значение) E на поверхности проводов средней фазы ВЛ с горизонтальным расположением проводов определяется по следующей упрощенной формуле, кВ/см

$$E \approx 0,0147 \frac{\left[1 + \frac{(p-1)2 \sin(\pi/n)r}{d} \right] C_2 U_n}{nr}, \quad (5.17)$$

где n — число проводов, составляющих расщепленную фазу; r — радиус проводов, составляющих расщепленную фазу, см; d — шаг расщепления (расстояние между смежными проводами, составляющими расщепленную фазу), см; U_n — линейное напряжение ВЛ, кВ; C_2 — рабочая емкость средней фазы, рассчитываемая по приведенной ниже формуле, пФ/м

$$C_2 \approx \frac{66,2}{\ln(1,26S / \sqrt[n]{rd^{n-1}})} - 1,2, \quad (5.18)$$

в которой S — расстояние между средней и крайней фазами ВЛ, см.

Кроме напряженности электрического поля для расчета помех необходимо знать значение генерации помех (обозначается символом Γ), характеризующее линейную плотность мощности источников помех на фазах линии, которые считаются равномерно распределенными по длине линии.

Расчет генерации помех для данной линии производится по эмпирической формуле, которая позволяет определить генерацию для этой линии по ее значению, полученному на основании долговременных измерений на опытной линии. Генерация существенно зависит от степени загрязнения поверхности проводов ВЛ и погодных условий и является случайной величиной, распределенной по закону, близкому к нормальному. Параметры распределения генерации определяются на основании статистической обработки результатов, полученных при долговременных (минимум в течение года) измерениях помех на реальных линиях или на опытных пролетах специально сооружаемых для исследования эффектов короны. Формула для расчета значения генерации, которое не будет превышено в 50 % случаев (Γ_{50}), полученная с учетом обобщения результатов измерений на нескольких линиях, записывается следующим образом, дБм:

$$\Gamma_{50} = -67,1 + 2,3E + 40 \lg r, \quad (5.19)$$

где E — максимальная напряженность электрического поля на поверхности проводов рассматриваемой ВЛ, кВ/см; r — радиус провода, составляющего фазу, см.

Упрощенное выражение для определения уровня помех с 50 %-ной вероятностью их появления и в полосе частот, для которой определяются помехи, равной 1 кГц, записывается в следующем виде, дБм:

$$P_{\text{НОМ}} 50 \% = A + \Gamma_{50} + 10 \lg (1/k_4 a_{\text{МФ}}), \quad (5.20)$$

где A — величина, зависящая от выбранной схемы присоединения к линии. Она принимает значения: -36 дБм для оптимальных схем присоединения фаза — земля и фаза — фаза, —26 дБм для внутрифазного присоединения; k_4 — коэффициент, учитывающий степень расщепления фазного провода ВЛ (см. табл. 5.4); $a_{\text{МФ}}$ — коэффициент затухания междуфазной волны, расчет которого производится по (5.4) с учетом выбранной схемы присоединения к линии, дБ/км.

Определенный таким образом расчетный уровень помех относится к концу ВЛ при условии нагрузки фаз ВЛ на согласованные сопротивления (без учета затухания, вносимого ФП и ВЧЗ). Поэтому при расчетах соотношения сигнала и помехи в каналах связи уровень приемного сигнала должен определяться тоже без учета затухания ФП и ВЧЗ, включенных на приемном конце линии.

Расчет уровня помех по (5.20) дает значение этого уровня для линий, трасса которых проходит на высоте не выше 300 м над уровнем моря и для полосы частот $\Delta f = 1$ кГц.

Если трасса линии проходит на отметках выше 300 м, то значение уровня помех увеличивается на $\Delta p_{\text{н.у.м}}$, равное, дБм:

$$\Delta p_{\text{н.у.м}} = H_{\text{ср}}/300, \quad (5.21)$$

где $H_{\text{ср}}$ — средняя арифметическая высота трассы ВЛ над уровнем моря, м.

Уровень помех $p_{\Delta f}$ в любой полосе частот Δf определяется в соответствии с выражением (4.1) по известному уровню p_1 в полосе частот 1 кГц, дБм:

$$P_{\text{ПОМ}} \Delta f = P_{\text{НОМ}} 1 + 10 \lg \Delta f \quad (5.22)$$

Часто вместо расчетов по (5.20) в расчетах используют табличные (усредненные) значения уровней помех для линий разных классов напряжения. Эти расчетные уровни приведены в табл. 4.1.

Уровень помех так же, как и генерация помех, является случайной величиной, распределенной по закону, близкому к нормальному. При этом уровень помех, определенный по формуле (5.20), соответствует уровню, который не будет превышен в 50 % случаев. Для вероятностей P , отличных от 50 %, уровень помех $P_{ном 50\%}$ определенный по (5.20), увеличивается на значение Δp , которое приведено ниже:

$P [p_{ном} \leq (p_{ном 50\%} + \Delta p)], 50\%$	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	99
$\Delta p, \text{ дБ}$	-7,8	-6,0	-4,2	-2,4	-1,4	0	1,3	3,0	4,8	7,0	8,5	11,2

Эти данные получены на основании результатов долговременных измерений на линиях 500 кВ, расположенных в европейской части России. Примером использования этих данных является, например, выбор минимально необходимого запаса по затуханию при проектировании ВЧ каналов телефонной связи. Принято, что в канале связи минимально допустимое соотношение сигнала и помехи (26 дБ) должно выполняться в течение 97 % времени. Вероятность 3 % соответствует появлению уровня, превышающего расчетный $p_{ном 50\%}$ на 9 дБ. Поэтому, минимально необходимый запас по затуханию при проектировании ВЧ каналов телефонной связи, принят равным 9 дБ.

Следует отметить, что уровни с вероятностью появления 1 % и менее обычно появляются при сильном дожде вблизи той ПС, на которой эти уровни определяются.

В принципе формула (5.20), по которой определяются уровни помех от короны, получена для бесконечно длинной линии. На линии конечной длины /уровни помех от короны на проводах этой линии оказываются меньше на значение Δp_l , которое рассчитывается следующим образом, дБ:

$$\Delta p_l = -10 \lg(1 - 10^{-0,1 \alpha_{\text{мф}}}). \quad (5.23)$$

Тем не менее эта поправка обычно не принимается во внимание по двум причинам. Во-первых, фазы реальных линий соединяются со сборными шинами подстанций, а через них с фазами других линий. При этом уровень помех на рассматриваемой линии определяется не только короной на этой линии, но частично и короной на сборных шинах ПС и фазах других линий. Во-вторых, при дожде вблизи ПС уровень помех обуславливается, в основном, только тем участком линии, над которым идет дождь, и мало зависит от общей длины линии.

Пример 5.7. Определить уровень помех от короны для частоты 100 кГц в полосе частот телефонного канала ($\Delta f = 3,1$ кГц) для ВЛ 220 кВ с горизонтальным расположением. Провод АС 330/43 (радиус провода 1,25 см). Расстояние между фазами 5,78 м.

Решение. По (5.18) определяем рабочую емкость средней фазы ($n = 1$)

$$C_2 \approx \frac{66,2}{\ln(1,26 \cdot 578 / 1,25)} - 1,2 = 9,2 \text{ пФ/м.}$$

По (5.17) определяем напряженность электрического поля на средней фазе линии

$$E \approx 0,0147 \frac{9,2 \cdot 220}{1,25} = 23,79 \text{ кВ/см.}$$

По (5.19) определяем генерацию помех

$$G_{50} = -67,1 + 2,3 \cdot 23,79 + 40 \lg 1,25 = -8,5 \text{ дБм.}$$

По (5.20) определяем уровень помех в полосе 1 кГц для частоты 100 кГц. Необходимое

значение коэффициента затухания междуфазной моды берем из примера 5.1 ($a_{\text{мф}} = 0,0344$ дБ/км)

$$P_{\text{пом1 50\%}} = -36 - 8,5 + 10 \lg(1/0,0344) = -29,9 \text{ дБм.}$$

По (5.22) определяем уровень помех в полосе 3,1 кГц

$$P_{\text{пом 3,1}} = -29,9 + 10 \lg 3,1 = -24,95 \text{ дБм.}$$

Вместо проведенных выше расчетов значение уровня помех можно было бы взять в табл. 4.1. Согласно этой таблице $P_{\text{пом1 50\%}} = -28$ дБм. Различие в цифрах обуславливается тем, что рассматриваемая в примере 5.6 линия несколько отличается по конструкции от той, для которой определялись помехи, приведенные в табл. 4.1.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

Методы измерения параметров ВЧ трактов

6.1. ЛОГАРИФМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ

В технике связи при измерениях напряжения и мощности сигнала (помех) и степени ослабления сигнала при прохождении им каких-либо элементов электрической цепи используют понятия абсолютного уровня сигнала по мощности и по напряжению.

Абсолютный уровень по мощности, дБм — это логарифмическая мера отличия кажущейся мощности S_x сигнала (помехи) от мощности $P_0 = 1$ мВт, принятой за базисную. Он определяется следующим образом, дБм:

$$p = 10 \lg \left(\frac{S_x}{P_0} \right) = 10 \lg S_x = 10 \lg \left(\frac{U_x^2}{Z_x} 10^3 \right), \quad (6.1)$$

где S_x — кажущаяся мощность измеряемого сигнала, мВт; U_x — напряжение измеряемого сигнала, В; Z_x — сопротивление, на котором измеряется сигнал, Ом.

Абсолютный уровень по напряжению, дБн — это логарифмическая мера отличия напряжения U_x сигнала (помехи) от напряжения $U_0 = 0,775$ В, принятого за базисное (базисное напряжение $U_0 = 0,775$ В соответствует мощности 1 мВт на сопротивлении 600 Ом).

$$p = 20 \lg \left(\frac{U_x}{U_0} \right) = 20 \lg \left(\frac{U_x}{0,775} \right). \quad (6.2)$$

Он определяется следующим образом, дБн:

Соотношение между абсолютными уровнями по мощности и по напряжению выражается как:

$$p \text{ (дБм)} = p \text{ (дБн)} + 10 \lg \frac{600}{Z_x}, \quad (6.3)$$

где Z_x — сопротивление, на котором измеряется мощность S_x при определении уровня по мощности по (6.1).

При условии, что $Z_x = 600$ Ом, значения абсолютного уровня по напряжению и по мощности совпадают.

6.2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ

ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ И ДВУХПОЛЮСНИКОВ

Перед тем, как рассматривать методы измерения параметров ВЧ трактов и составляющих его элементов, рассмотрим общие методы измерения основных параметров, которыми характеризуются четырехполюсники и двухполюсники.

Так, для четырехполюсников, какими являются ВЧ тракт, фильтры присоединения и разделительные фильтры, такими параметрами являются рабочее затухание и входное сопротивление. В ряде случаев в дополнение к измерению входного сопротивления или вместо него измеряют затухание несогласованности четырехполюсника, которое характеризует отклонение входного сопротивления от его номинального значения.

Для двухполюсников, какими являются ВЧ заградители, и в некоторых случаях разделительные фильтры, такими параметрами являются полное сопротивление и активная и реактивная составляющие полного сопротивления двухполюсника.

Измерение рабочего затухания. Рабочее затухание — это одна из мер, позволяющая определить изменение уровня сигнала при прохождении им каких-либо элементов электрической цепи. Рабочее затухание четырехполюсника, включенного между источником сигнала (генератором) с внутренним сопротивлением Z_1 и приемником с сопротивлением Z_2 , определяется по формуле, дБ:

$$a_p = 10 \lg \left(\frac{S_1}{S_2} \right) \quad (6.4)$$

где S_1 — кажущаяся мощность, которую генератор отдает на согласованную с ним нагрузку Z_1 , мВт; S_2 — кажущаяся мощность, воспринимаемая приемником,

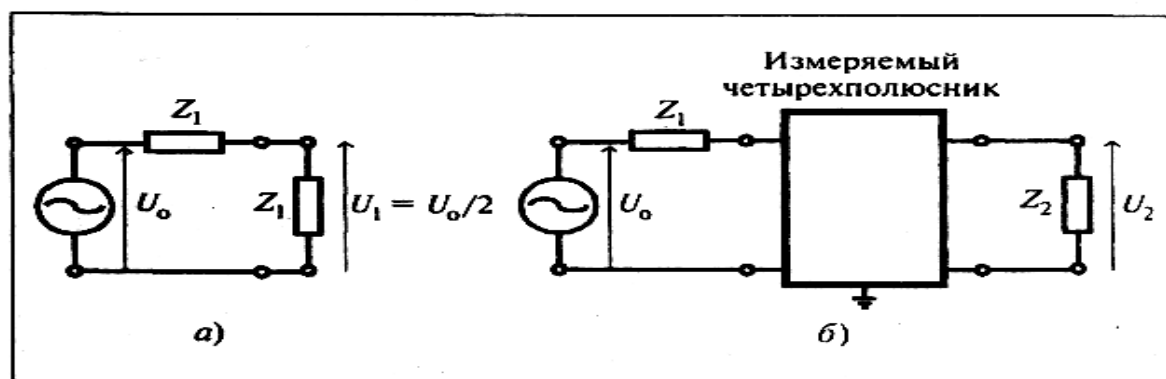


Рис. 6. J. К определению рабочего затухания четырехполюсника:

a — измерение напряжения сигнала генератора на согласованную нагрузку; *б* — измерение напряжения сигнала генератора на выходе измеряемого четырехполюсника, нагруженного на входное сопротивление приемника

имеющим сопротивление Z_2 и подключенным к генератору через четырехполюсник, мВт. Значение рабочего затухания не зависит от направления передачи сигнала, т.е. при передаче сигнала слева направо (когда сопротивление генератора равно Z_1 и сопротивление приемника Z_2) и при передаче справа налево (когда сопротивление генератора равно Z_2 и сопротивление приемника Z_1) рабочее затухание остается одинаковым.

Мощности S_1 и S_2 определяются по измеренным напряжениям U_1 и U_2 (рис. 6.1):

$$S_1 = \frac{U_1^2}{Z_1}; \quad S_2 = \frac{U_2^2}{Z_2}.$$

Из рассмотрения рис. 6.1 видно, что производить специальное измерение напряжения сигнала генератора на согласованную нагрузку U_1 согласно рис. 6.1, а не обязательно.

Имея в виду очевидное соотношение

$$S_1 = \frac{U_1^2}{Z_1} = \left(\frac{U_0}{2}\right)^2 \frac{1}{Z} = \frac{U_0^2}{4Z_1},$$

рабочее затухание можно определить по результатам измерения напряжений U_0 и U_2 , произведя измерение только по схеме рис. 6.1, б. В практике измерения производят именно таким образом.

Если мощности S_1 и S_2 выразить в абсолютных уровнях по мощности, дБм, то рабочее затухание a_p определится как разность этих уровней, дБ: (6.56)

$$a_p = p_1(\text{дБм}) - p_2(\text{дБм}). \quad (6.5a)$$

Измерение рабочего затухания производят с использованием измерительного генератора и измерителя уровня по схеме рис. 6.2.

Как видно из рисунка для определения рабочего затухания измеряют уровень p_0 , соответствующий ЭДС эквивалентного генератора с внутренним сопротивлением Z_1 , и уровень p_2 на сопротивлении нагрузки Z_2 , включенном на выходе четырехполюсника. При этом, если уровни p_0 и p_2 измеряются как абсолютные уровни по мощности, то рабочее затухание определяется по результатам измерений по формуле, дБ:

$$a_p = p_0(\text{дБм}) - 6 - p_2(\text{дБм}). \quad (6.5б)$$

Легко увидеть, что в этой формуле слагаемое $p_0 - 6$ равно уровню, выдаваемому генератором на согласованную нагрузку [уровень p_1] в формуле (6.5а)].

В современных измерительных генераторах сопротивление Z_1 встроено в схему генератора, а индикатор выходного уровня измеряет ЭДС генератора, но отградуирован так, что показывает уровень ЭДС за вычетом 6 дБ, т.е. уровень $p_1 = p_0 - 6$.

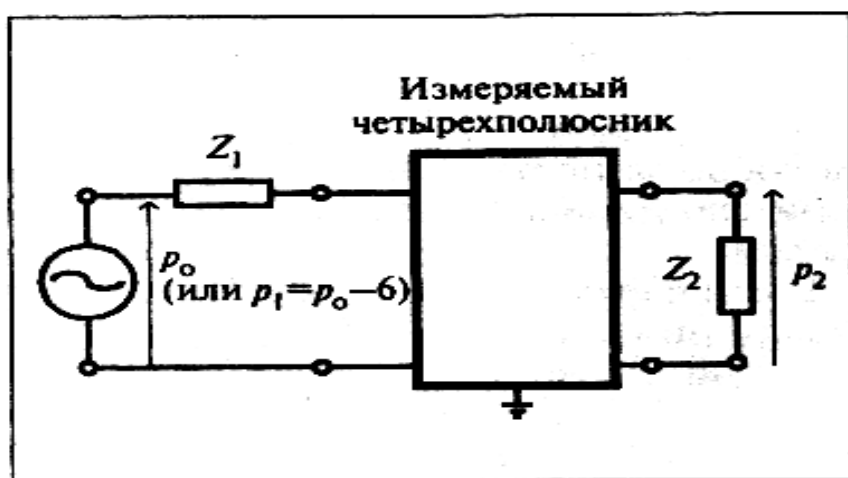


Рис. 6.2. Схема измерения рабочего затухания четырехполюсника

Именно это обстоятельство имеется в виду, когда на рис. 6.2 рядом с показаниями прибора записано p_0 (или $p_1 = p_0 - 6$). При использовании для измерения рабочего затухания таких генераторов затухание определяется по разности показаний выходного прибора генератора и

измерителя уровня, включенного параллельно нагрузке, по формуле (6.5а).
 В том случае, когда уровни p_0 и p_2 измеряются как абсолютные уровни по напряжению, формулы (6.5а и б) записываются (соответственно) в виде, дБ:

$$a_p = p_1(\text{дБн}) - p_2(\text{дБн}) - 10 \lg \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right) \quad (6.6a)$$

$$a_p = p_0(\text{дБн}) - 6 - p_2(\text{дБн}) - 10 \lg \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right) \quad (6.66)$$

В частном, но довольно распространенном случае, когда внутреннее сопротивление

$$a_p = p_1 - p_2 \quad (6.7a)$$

генератора Z_1 , и сопротивление нагрузки Z_2 одинаковы ($Z_1 = Z_2$), формулы (6.5) и (6.6) записываются так, дБ.

$$a_p = p_0 - 6 - p_2 \quad (6.76)$$

При этом уровни p_0 , p_1 , p_2 могут быть измерены в виде как абсолютных уровней по мощности, так и абсолютных уровней по напряжению.

Измерение неизвестного сопротивления производится при определении входного сопротивления четырехполюсника (например, ВЧ тракта) и при определении сопротивления двухполюсника (например, заградителя). В ряде случаев оказывается достаточным определить только модуль полного сопротивления, в некоторых случаях, кроме модуля, необходимо дополнительно определить активную и реактивную составляющие полного сопротивления.

Модуль полного сопротивления. Определение модуля полного сопротивления Z_x с помощью ВЧ миллиамперметра и вольтметра (измерителя уровня) прямым измерением тока, протекающего по сопротивлению, и напряжения на нем, практически нереализуемо. Дело в том, что по измеряемому сопротивлению протекает.

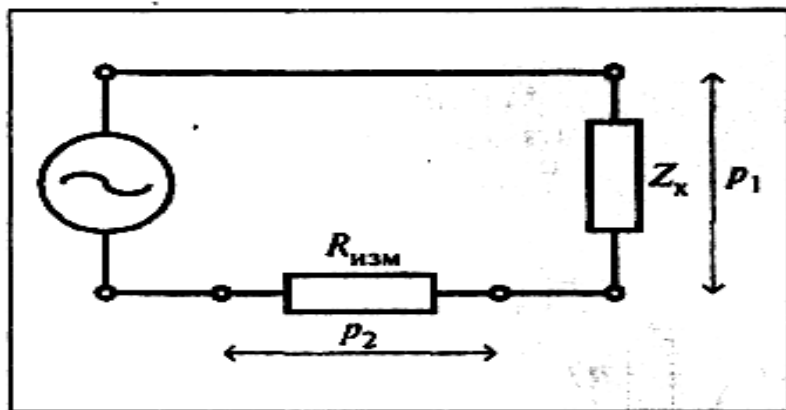


Рис. 6.3. Схема измерения модуля полного сопротивления

как правило, не только ток сигнала, подаваемого от измерительного генератора, но и значительный ток помех от посторонних источников.

Поэтому модуль полного сопротивления Z_x определяется, как правило, по схеме рис. 6.3, в которой последовательно с измеряемым сопротивлением Z_x включают измерительный

резистор с известным сопротивлением $R_{ИЗМ}$. При этом, по измеряемому и измерительному сопротивлениям протекает один и тот же ток, что позволяет легко определить измеряемое сопротивление.

Модуль измеряемого сопротивления определяют по результатам измерения напряжений U_1 и U_2 или абсолютных уровней по напряжению p_1 и p_2 , Ом:

$$Z_x = R_{ИЗМ} \frac{U_1}{U_2} = R_{ИЗМ} 10^{0,05(p_1 - p_2)}. \quad (6.8)$$

Следует учесть, что один из концов измеряемого сопротивления, как правило, или соединен с "землей" и не может быть от нее отделен (в случае измерения входного сопротивления ВЧ тракта), или рекомендуется заземлять (в случае измерения ВЧ заградителя). Поэтому в этой схеме следует использовать измерительный генератор с симметричным выходом без соединения с "землей" (корпусом). Применение генератора с коаксиальным выходом допустимо только в случаях, когда сопротивление $R_{ИЗМ}$ выбрано небольшим (единицы ом). Однако при этом необходимо корпус генератора тем или иным способом изолировать от "земли". Измерение напряжений U_1 и U_2 или абсолютных уровней по напряжению p_1 и p_2 рекомендуется производить селективным измерителем уровня с достаточно узкой полосой избирательности, чтобы максимально отстроиться при измерениях от внешних помех и от гармонических составляющих, которые могут присутствовать в сигнале измерительного генератора.

Активная и реактивная части полного сопротивления. В ряде случаев (например, при измерении ВЧ заградителей) необходимо определить активную и реактивную составляющие полного сопротивления. Измерение составляющих полного сопротивления можно произвести с помощью специальных измерительных приборов — моста полных проводимостей или моста полных сопротивлений. Однако эти приборы практически не встречаются в энергосистемах и вместо них рекомендуется использовать упрощенную схему моста переменного тока, рекомендованную МЭК, которая приведена на рис. 6.4.

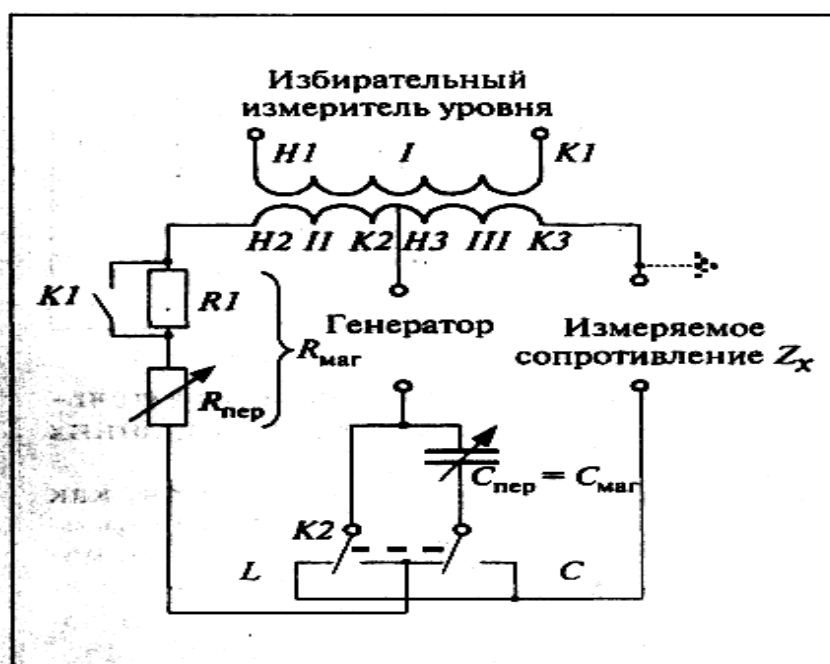


Рис. 6.4. Принципиальная схема упрощенного моста полных сопротивлений

В состав моста входят:

дифференциальный трансформатор, обмотки которого делаются с одинаковым числом витков, а

их намотка выполняется так, чтобы коэффициенты трансформации между обмотками / и // и / и /// отличались бы один от другого не более, чем на 1 %;

магазин емкостей $C_{\text{маг}} = C_{\text{пер}}$, который должен обеспечивать установку в плече моста конденсатора с переменной емкостью, изменяющейся в пределах от 0 до 1 мкФ;

магазин сопротивлений $R_{\text{МАГ}}$, в состав которого входит переменное сопротивление $R_{\text{пер}}$, которое должно обеспечивать установку в плече моста сопротивления, изменяющегося в пределах от 0 до 1200 Ом, и резистор $R1$ с сопротивлением 1200 Ом, который должен обеспечивать расширение пределов измерения моста до 2400 Ом;

переключатель $K1$, обеспечивающий включение/отключение резистора $R1$.

переключатель $K2$, обеспечивающий переключение магазина емкостей $C_{\text{маг}}$ из плеча магазина сопротивлений $R_{\text{МАГ}}$ [при емкостном характере мнимой (реактивной) составляющей Z_x] в плечо измеряемого сопротивления Z_x (при индуктивном характере реактивной составляющей).

В качестве источника сигнала используют генератор с симметричным выходом и "нулевым" внутренним сопротивлением; в качестве индикатора настройки моста используют избирательный измеритель уровня с высокоомным входом и минимально возможной полосой избирательности.

Измерения производятся в следующей последовательности.

Магазин сопротивлений устанавливают в положение, соответствующее минимальному значению сопротивления, а магазин емкостей — в положение, соответствующее максимальному значению емкости.

Поочередным изменением $R_{\text{пер}}$ и $C_{\text{пер}}$ добиваются балансировки моста, которая соответствует минимальному показанию индикатора. Балансировка считается выполненной, если уровень, измеряемый индикатором, не меньше, чем на 35 дБ ниже уровня выхода генератора. Если балансировка не получается, следует изменить положение переключателя $K2$, переведя магазин емкостей из одного плеча моста в другое.

Измеряемые значения составляющих R_x и X_x и модуль полного сопротивления Z_x определяются как:

$$R_x = R_{\text{маг}}; \quad X_x = \frac{1}{\omega C_{\text{маг}}}; \quad Z_x = \sqrt{R_x^2 + X_x^2}. \quad (6.9)$$

Знак реактивной составляющей определяется по тому, в каком плече моста оказывается включенным магазин емкостей при достижении баланса моста. Если магазин емкостей $C_{\text{маг}}$ находится в плече магазина сопротивлений $R_{\text{маг}}$, то реактивная составляющая X_x имеет емкостной характер. В обратном случае реактивная составляющая X_x имеет индуктивный характер.

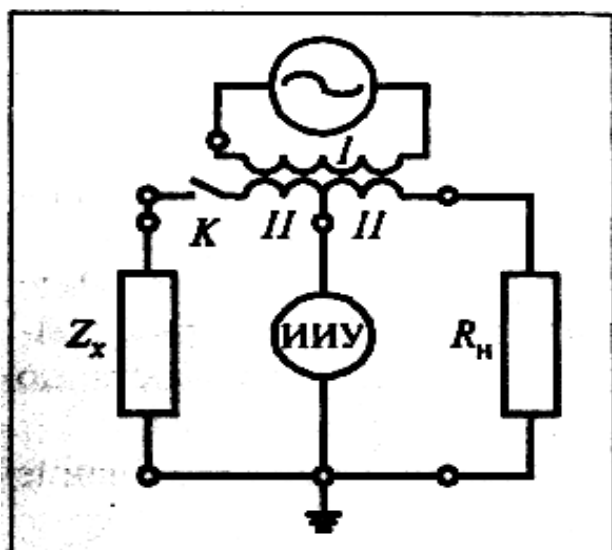


Рис. 6.5. Принципиальная схема измерения затухания несогласованности сопротивления Z_x и сопротивления $R_{\text{ном}}$

Измерение затухания несогласованности. В ряде случаев требуется определить затухание несогласованности между входным сопротивлением четырехполюсника и сопротивлением, равным

номинальному (нормируемому) значению входного сопротивления четырехполюсника. Этот параметр является мерой отличия входного сопротивления четырехполюсника от его номинального (нормируемого) значения.

Затухание несогласованности $a_{нс}$ комплексного входного сопротивления Z_x с номинальным значением этого сопротивления $R_{ном}$ определяется как

$$a_{нс} = 20 \lg \left| \frac{Z_x + R_{ном}}{Z_x - R_{ном}} \right|. \quad (6.10)$$

Чем меньше входное сопротивление отличается от его номинального значения, тем больше затухание несогласованности. Следует помнить, что, как следует из (6.10), затухание несогласованности определяется отличием между Z_x и $R_{ном}$ не только по модулю, но и по фазовым углам этих сопротивлений. Так, если сопротивление Z_x будет равным по модулю сопротивлению $R_{ном}$, но чисто реактивным, то затухание несогласованности будет равно нулю, так как модули числителя и знаменателя выражения, стоящего под знаком логарифма в (6.10), будут равны один другому.

Измерение затухания несогласованности производят по схеме рис. 6.5.

Входящий в состав моста дифференциальный трансформатор должен отвечать тем же требованиям, что и трансформатор, входящий в схему моста переменного тока.

В качестве источника сигнала используют генератор с симметричным выходом и "нулевым" внутренним сопротивлением; в качестве индикатора настройки моста используют избирательный измеритель уровня *ИИУ* с высокоомным входом и минимально возможной полосой избирательности.

Измерения производят, контролируя уровень на выходе генератора p_0 , который должен оставаться неизменным, в следующей последовательности:

ключ K отключен. Измеряют уровень p_1 в диагонали моста в этом режиме (уровень p_1 равен уровню сигнала генератора на вторичной полуобмотке // дифференциального трансформатора);

ключ K включен. Измеряют уровень p_2 в диагонали моста в этом режиме.

Затухание несогласованности определяют по результатам измерений как разность уровней, измеренных при выключенном и включенном ключе K :

$$a_{нс} = p_1 - p_2 \quad (6.11a)$$

Методика производства измерения может быть упрощена. Если для дифференциального трансформатора известен коэффициент трансформации между первичной и вторичной обмотками, и, если он неизменен в рассматриваемом диапазоне частот, то уровень p_1 может быть определен не измерением, а расчетом как:

(6.11б)

$$p_1 = p_0 - 20 \lg \left(\frac{w_I}{w_{II}} \right) = p_0 - \Delta p_{тр},$$

где p_0 — уровень на выходе генератора; w_I/w_{II} — коэффициент трансформации дифференциального трансформатора между обмотками I и II .

При этом, устанавливая на выходе генератора уровень p_0 , равный значению $\Delta p_{тр}$, получают,

что затухание несогласованности равно измеренному уровню p_2 , взятому с обратным знаком. При измерениях этим методом в схеме измерений ключ K не требуется (он всегда замкнут).

6.3. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЧ ТРАКТОВ

Измерения параметров ВЧ трактов и составляющих его элементов производят при: наладочных работах во время первоначального ввода канала в эксплуатацию; профилактических работах, проводимых в процессе эксплуатации; определении причин несоответствия параметров тракта нормам.

Целью измерений является оценка качества ВЧ тракта и составляющих его элементов на основании анализа полученных при измерениях значений параметров тракта и его элементов. При этом измеренные значения параметров, характеризующих ВЧ тракт и составляющие его элементы в рабочем диапазоне частот, сопоставляют с их расчетными значениями и/или нормами, и/или паспортными данными.

Иногда достаточно точный расчет параметров ВЧ тракта затруднен в силу отсутствия достоверных исходных данных или по другим причинам. В этих случаях только результаты измерений позволяют определить параметры ВЧ тракта и оценить возможность организации по этому тракту канала связи.

Как правило, измерение параметров ВЧ трактов и составляющих его элементов производят не на одной частоте (например, средней частоте рабочей полосы частот канала), а в некотором диапазоне частот. При этом выбор полосы частот, в которой необходимо провести измерения, и выбор интервала между смежными частотами измерений (шага по частоте) производится с учетом особенностей измеряемого элемента. В большинстве случаев только наличие частотных зависимостей измеряемых параметров позволяет сделать вывод о качестве тракта. Обработку результатов измерений и сравнение экспериментально полученных и паспортных или расчетных данных выборочно производят уже по ходу измерений. При значительном расхождении сравниваемых величин следует провести дополнительные уточняющие измерения.

Если для измеряемого элемента тракта или всего тракта в целом отсутствуют паспортные или расчетные данные, измерениям параметров должен предшествовать их расчет.

Результаты измерений должны оформляться протоколом, в котором указывается дата измерений, типы и номера измерительных приборов, схема измерений и другие данные, необходимые для анализа результатов измерений. Так, например, при измерении затухания ВЧ тракта необходимо указывать температуру воздуха, наличие снегопада и гололедо-изморозиевых отложений, если они были во время измерений, при измерении уровня помех от короны — наличие или отсутствие осадков во время измерений и напряжение ВЛ.

При проведении измерений принимают все возможные меры для сведения к минимуму погрешностей измерения, вызванных погрешностями приборов, плохим заземлением, длинными измерительными шнурами и т.д.

Примерный перечень измерительных приборов, необходимых для проведения измерений параметров ВЧ трактов, приведен в приложении 1. Для каждого из приборов дана краткая примерная спецификация требуемых параметров.

Измерение параметров элементов ВЧ тракта. Рассмотрим измерение параметров таких составных элементов ВЧ тракта, как ВЧ заградителей, фильтров присоединения с ВЧ кабелями и разделительных фильтров. При этом будем рассматривать только те методы измерений, которые касаются экспериментального определения высокочастотных параметров указанных элементов. Методы измерений прочности изоляции, сопротивления изоляции и параметров защитных устройств выходят за рамки данной книги.

Измерения фильтров присоединения и ВЧ кабеля. Устройство, именуемое фильтром присоединения, является фильтром только при его совместной работе с конденсатором связи. Поэтому все ВЧ параметры, которыми характеризуется фильтр присоединения, относятся к четырехполюснику, в состав которого входят и сам ФП (как отдельное устройство), и конденсатор связи. В дальнейшем, под термином фильтр присоединения будем подразумевать схему, состоящую из самого фильтра и конденсатора связи (или его эквивалента),

подключенного к линейному выходу ФП.

Фильтр присоединения с входящим в его схему конденсатором связи является несимметричным четырехполюсником с разными характеристическими сопротивлениями со стороны входа, к которому подключается ВЧ кабель (кабельный вход), и со стороны выхода, к которому подключается фаза линии высокого напряжения (линейный вход). Фильтр присоединения характеризуется полосой пропускания, в пределах которой два его параметра — рабочее затухание и затухание несогласованности — отвечают нормам. Согласно существующим нормам рабочее затухание ФП не должно превосходить 1,3 дБ,

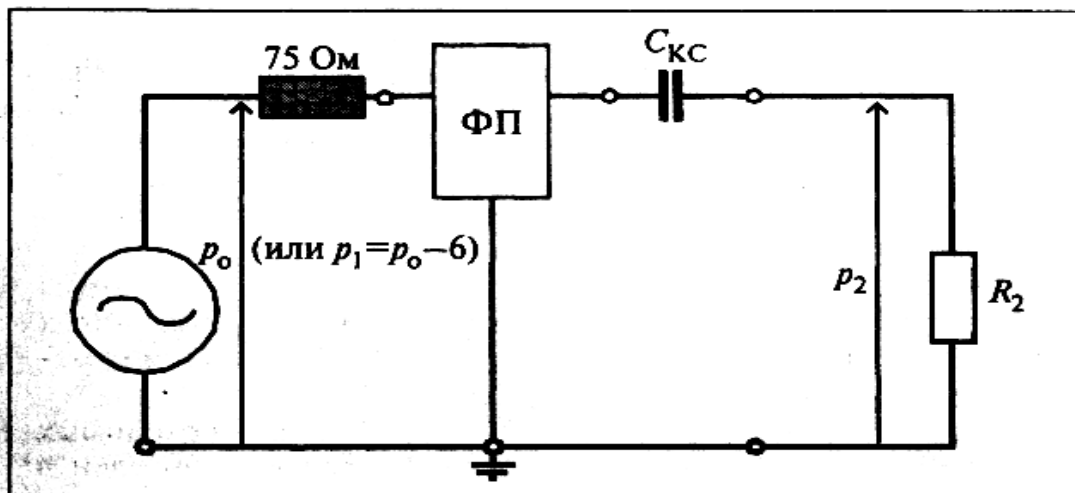


Рис. 6.6. Принципиальная схема измерения рабочего затухания фильтра присоединения

а затухание несогласованности не должно быть меньше 12 дБ. Следует подчеркнуть, что в пределах полосы пропускания ФП должны удовлетворять нормам оба указанных параметра. Кроме того, фильтр дополнительно характеризуется затуханием нелинейности, однако, этот параметр в условиях эксплуатации не измеряют, и методика его измерения здесь рассматриваться не будет.

Рабочее затухание фильтра присоединения измеряется по схеме рис. 6.2, которая применительно к измерению фильтра присоединения приведена на рис. 6.6. Измерения рекомендуется производить в абсолютных уровнях по напряжению.

При этом сопротивление резистора R_1 в схеме рис. 6.2 принимают равным номинальному входному сопротивлению ВЧ тракта, т.е. 75 Ом^1 , а сопротивление R_2 принимают равными характеристическому сопротивлению линейного ВЧ тракта в соответствии с данными табл. 6.1. Оговоримся, что присоединение по схеме фаза — фаза производится с помощью двух фильтров присоединения, каждый из которых включается между соответствующей фазой и землей, и сопротивление R_2 дано для измерения каждого из ФП.

¹ При использовании симметричного ВЧ кабеля сопротивление R_1 принимается равным 150 Ом .

Т а б л и ц а 6.1. Значения сопротивления R_2 в схеме измерения параметров фильтров присоединения

Напряжение ВЛ, кВ	R_2 , Ом, для схемы присоединения		
	фаза - земля	фаза - фаза	внутрифазная
35-220	450	400	
330*	330	300	200****
500**	310	280	
750***	280	250	

- Фаза расщеплена на две составляющих.

- ** Фаза расщеплена на три составляющих.
- ***Фаза расщеплена на пять составляющих.
- ****Внутрифазный тракт организуется только по изолированным проводам расщепленной фазы ВЛ 330 кВ.
-

Таблица 6.2. Значения поправки Δa в формуле (6.12)

Напряжение ВЛ, кВ	Поправка Δa , дБ, для схемы присоединения		
	фаза — земля	фаза — фаза	внутрифазная
35-220	7,8	7,3	
330	6,4	6,0	4,3
500	6,2	5,7	
750	5,7	5,2	

Рабочее затухание определяется по показаниям приборов по формуле (6.6), которую можно записать в виде, дБ:

(6.12a)

$$a_p = p_1(\text{дБн}) - p_2(\text{дБн}) - \Delta a,$$

(6.126)

$$a_p = p_0(\text{дБн}) - 6 - p_2(\text{дБн}) - \Delta a,$$

где

$$\Delta a = 10 \lg \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right) = 10 \lg \left(\frac{R_2}{75} \right)$$

— поправка, которая зависит от характеристического сопротивления линейного тракта, для которого предназначен рассматриваемый ФП. Ее значения приведены в табл. 6.2.

Затухание несогласованности фильтра присоединения измеряется по схеме рис. 6.5, которая применительно к измерению фильтра присоединения приведена на рис. 6.7. При этом измерения рекомендуется

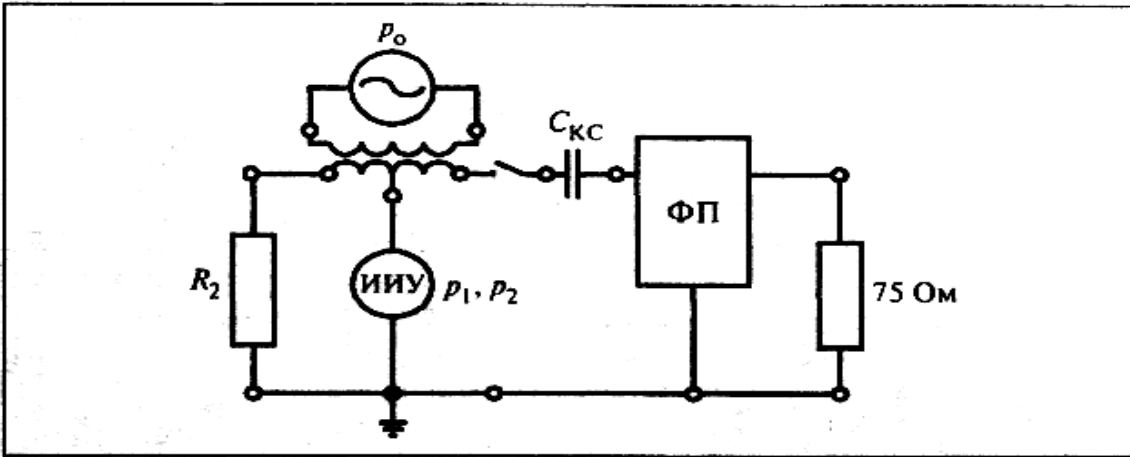


Рис. 6.7. Принципиальная схема измерения затухания несогласованности фильтра присоединения

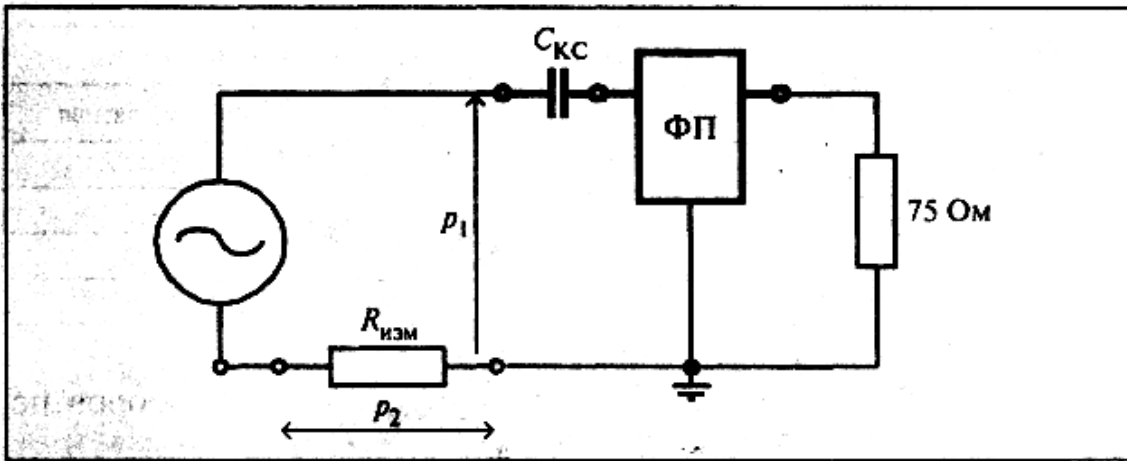


Рис. 6.8. Принципиальная схема измерения модуля входного сопротивления фильтра присоединения

производить в абсолютных уровнях по напряжению, а сопротивления резисторов R_1 и R_2 принимают равными тем же значениям, что и при измерении рабочего затухания фильтра. Затухание несогласованности определяется по показаниям p_1 и p_2 избирательного измерителя уровня ИИУ по формуле (6.11а) или с учетом соотношения (6.11б) прямо по показаниям p_2 . Часто возникает необходимость измерения модуля входного сопротивления фильтра присоединения со стороны линейного входа $Z_{фл}$. Это измерение производится по схеме рис. 6.3, которая применительно к измерению фильтра присоединения приведена на рис. 6.8.

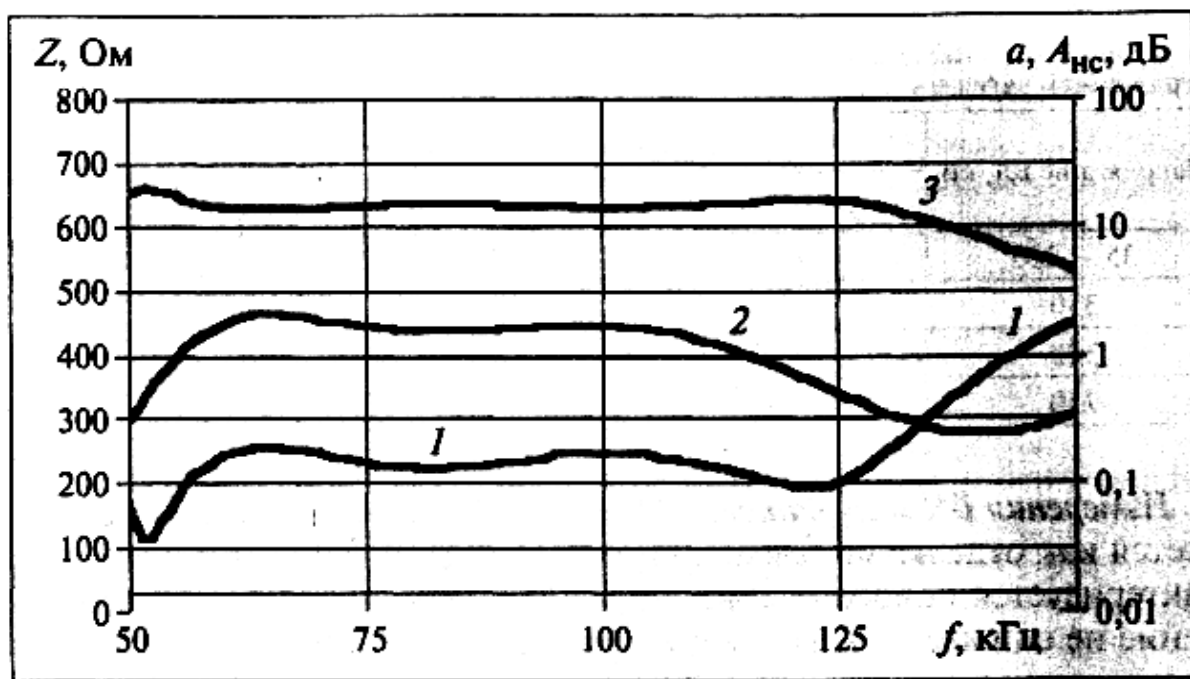


Рис. 6.9. Частотные зависимости параметров фильтра присоединения типа ФПМ 4650/(50-127):

1 — затухание ФП; 2 — входное сопротивление со стороны линии; 3 — затухание несогласованности для $R_2 = 310 \Omega$

Сопротивление резистора $R_{ИЗМ}$ в этой схеме рекомендуется принимать равным 1 Ом.

Погрешность сопротивления резистора желательно выбирать не более 1 %. Модуль входного сопротивления определяется по показаниям приборов по формуле (6.8), которая при $R_{ИЗМ} = 1 \Omega$ записывается в следующем виде, Ом:

$$Z_{ф.л} = 10^{0,05(a_1 - a_2)}. \quad (6.13)$$

Измерения параметров ФП производят в полосе несколько более широкой, чем полоса пропускания фильтра, указанная в его паспорте. Шаг по частоте выбирается так, чтобы достаточно хорошо обрисовать частотную зависимость параметров. При измерениях обязательно фиксируются граничные частоты, при которых и рабочее затухание, и затухание несогласованности еще соответствуют нормам (не более 1,3 дБ и не менее 12 дБ соответственно). Обычно достаточно, чтобы шаг по частоте был 10 кГц, а вблизи граничных частот полосы пропускания — 2 кГц.

Примерный вид частотных зависимостей рабочего затухания, затухания несогласованности и модуля входного сопротивления ФП со стороны линии показан на рис. 6.9.

Таблица 6.3. Значения сопротивления R_{3MIN} , по которым определяется полоса заграждения заградителя

Напряжение ВЛ, кВ	R_{3MIN} Ом, для схемы присоединения		
	фаза — земля	фаза - фаза	внутрифазная
35-220	650	570	
330	480	430	290
500	440	400	
750	400	400	

Измерения ВЧ заградителей. Обычно ВЧ заградитель рассматривается как отдельный элемент тракта в виде двухполюсника и характеризуется полосой запирания, в которой активное сопротивление не снижается ниже нормируемого значения. В ряде случаев (при внутрифазном присоединении к изолированным проводам расщепленных фаз, при использовании присоединения к грозозащитным тросам) заградитель может входить составным элементом в схему фильтра присоединения и как отдельный элемент не рассматривается.

В том случае, когда ВЧ заградитель рассматривается как отдельный элемент, граничные частоты полосы заграждения определяются как частоты, для которых активное сопротивление оказывается не меньше значения, полученного из выражения:

(6.14)

$$R_{зmin} = 1,41 Z_{л.т}.$$

где $Z_{л.т}$ — характеристическое сопротивление линейного тракта. расчетные значения которого приведены в табл. 5.1.

В табл. 6.3 приведены нормированные значения активной составляющей полного сопротивления заградителя, по которой должна определяться полоса заграждения заградителя. Таким образом, для определения полосы запирания оградителя необходимо измерять частотную зависимость активного сопротивления заградителя.

Измерение сопротивления производится в соответствии с рекомендациями § 6.2 или с помощью моста полных сопротивлений, или с помощью упрощенного моста полных сопротивлений, принципиальная схема которого изображена на рис. 6.4. Балансировка измерительного моста при измерениях заградителей облегчается тем, что при правильной настройке заградителя знак мнимой части полного сопротивления заранее известен. На частотах, расположенных ниже среднегеометрической частоты полосы заграждения, мнимая часть полного сопротивления заградителя имеет индуктивный характер, а на частотах выше ее — емкостной характер.

При проведении измерений для уменьшения их погрешности необходимо располагать заградитель так, чтобы он был удален от пола и окружающих плоскостей (особенно металлических) на расстояние не меньшее, чем диаметр заградителя. Кроме того, рекомендуется заземлять нижний вывод заградителя и использовать измерительные приборы с симметричными входами.

Измерения сопротивления заградителя производят в полосе несколько более широкой, чем полоса заграждения. Как уже было сказано, полоса заграждения — это та полоса частот, в которой действительная часть полного сопротивления заградителя оказывается не менее значения, приведенного в табл. 6.3. Шаг по частоте выбирается так, чтобы достаточно хорошо обрисовать частотную зависимость сопротивления заградителя с фиксацией экстремальных точек частотной зависимости начала и конца полосы заграждения. Обычно достаточно, чтобы шаг по частоте лежал в пределах 1 - 10 кГц.

Примерный вид частотных зависимостей полного сопротивления заградителя и его действительной и мнимой составляющих показан на рис. 6.10.

Измерение составляющих полного сопротивления заградителя производят после наладочных работ по настройке заградителя.

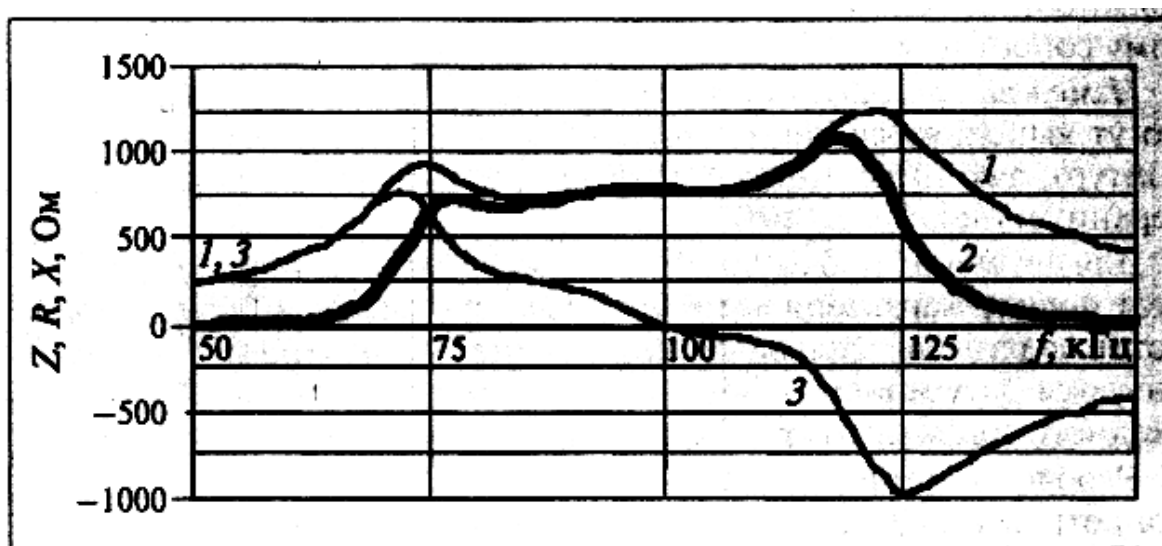


Рис. 6.10. Примерный вид частотной зависимости сопротивления заградителя типа ВЗ 630/0,5-(74 - 118) кГц:

1 — полное сопротивление Z ; 2 — активное сопротивление R ; 3 — реактивное сопротивление X

При проведении профилактических измерений, когда уже имеется паспорт заградителя с результатами более ранних измерений модуля полного сопротивления, активной и реактивной частей полного сопротивления, достаточно измерить только частотную зависимость модуля полного сопротивления и сопоставить полученные результаты с уже имеющимися.

Совпадение вновь полученных и старых результатов говорит об исправности заградителя. Измерение модуля полного сопротивления заградителя производят по схеме рис. 6.3 при сопротивлении резистора $R_{\text{изм}}$, равном 1 Ом. Модуль полного сопротивления заградителя определяют по показаниям приборов по формуле (6.13).

Измерения ВЧ кабеля. Рабочее затухание ВЧ кабеля измеряют по схеме рис. 6.2, в которой сопротивления Z_1 и Z_2 принимаются одинаковыми и равными номинальному сопротивлению ВЧ тракта (обычно $Z_1 = Z_2 = 75$ Ом). Затухание определяют по результатам измерения уровней p_0 (или p_1) и p_2 по формуле (6.7а и б) в зависимости от того, учитывается или нет поправка 6 дБ при отображении выходного уровня в генераторе.

Модуль входного сопротивления ВЧ кабеля измеряют по схеме рис. 6.3. Измерительное сопротивление $R_{\text{изм}}$ в этой схеме рекомендуется выбирать в пределах от 1 до 10 Ом. Частотная зависимость затухания исправного ВЧ кабеля должна быть плавной с увеличением затухания пропорционально корню квадратному из частоты. Входное сопротивление практически не должно изменяться с изменением частоты и быть близким волновому сопротивлению кабеля 75 Ом.

Измерения разделительных фильтров. Разделительные фильтры могут выполняться как в виде двухполюсников (разделительный контур), так и четырехполюсников (полосовой фильтр, фильтр верхних и нижних частот).

Для сигналов, проходящих через разделительный фильтр (РФ), этот фильтр характеризуется рабочим затуханием. Для сигналов, которые разделительный фильтр блокирует, этот фильтр характеризуется затуханием, обусловленным шунтирующим действием входного сопротивления РФ.

Рабочее затухание РФ измеряется по схеме рис. 6.2, в которой сопротивления Z_1 и Z_2 принимаются одинаковыми и равными номинальному сопротивлению ВЧ тракта (обычно $Z_1 = Z_2 = 75$ Ом). Рабочее затухание определяется по результатам измерения уровней P_0 (или p_1) и P_2 по формуле (6.7а или б) в зависимости от того, учитывается или нет поправка 6 дБ при отображении выходного уровня в генераторе.

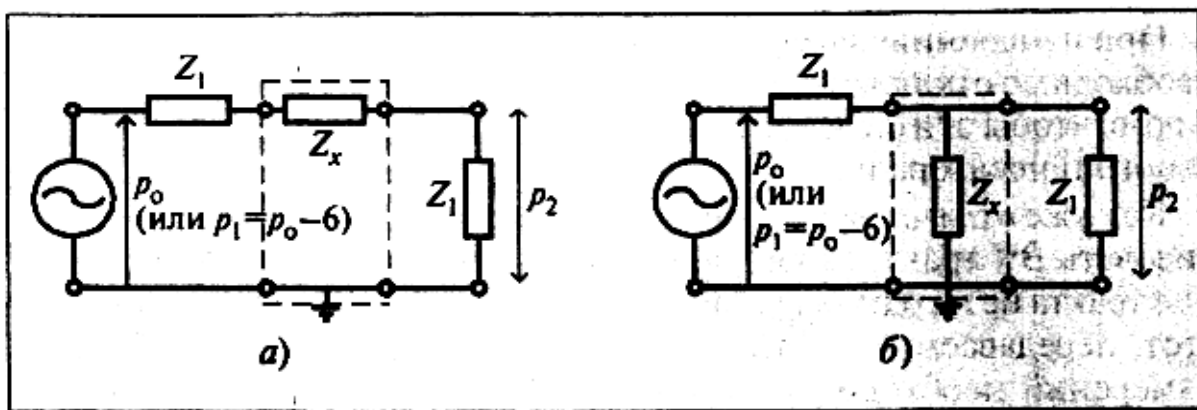


Рис. 6.11. Измерение рабочего затухания при представлении двухполюсника в виде четырехполюсника:

а — последовательно включенный двухполюсник; б — параллельно включенный двухполюсник

В том случае, когда разделительный фильтр является двухполюсником, при измерении рабочего затухания он представляется как неполный четырехполюсник (рис. 6.11, а). Затухание, обусловленное шунтирующим действием входного сопротивления РФ (равно, как и любого сопротивления, включенного параллельно рассматриваемому тракту), измеряется по схеме, показанной на рис. 6.2 с учетом представления входного сопротивления РФ в виде неполного четырехполюсника, как это показано на рис. 6.11, б.

Измерение рабочего затухания и входного сопротивления ВЧ тракта. Рабочее затухание ВЧ тракта измеряют по схеме рис. 6.2, в которой сопротивления Z_1 и Z_2 принимают одинаковыми и равными номинальному сопротивлению ВЧ тракта (обычно $Z_1 = Z_2 = 75$ Ом). Измерение производят для одного направления передачи сигнала, так как рабочее затухание одинаково для обоих направлений. Рабочее затухание определяют по результатам измерения уровней P_0 (или P_1) и P_2 по формуле (6.7а или б) в зависимости от того, учитывается или нет поправка 6 дБ при отображении выходного уровня в генераторе.

Входное сопротивление ВЧ тракта не одинаково для разных концов ВЧ тракта и поэтому должно измеряться с обоих концов тракта. Обычно измеряют модуль входного сопротивления с использованием схемы рис. 6.3. Измерительное сопротивление $R_{изм}$ в этой схеме рекомендуется выбирать в пределах от 1 до 10 Ом. В ряде случаев представляет интерес определение затухания несогласованности, измеряемое по схеме рис. 6.5.

При измерениях затухания и входного сопротивления ВЧ тракта необходимо отключать сигналы параллельно работающим передатчиков, чтобы эти сигналы не перегружали входные цепи измерительного генератора и измерителя уровня.

Как уже отмечалось ранее, для того, чтобы полностью охарактеризовать ВЧ тракт, важно знать затухание и входное сопротивление тракта не на одной какой-либо одной частоте, а в диапазоне частот, передаваемых по этому тракту. Таким образом, в результате измерений необходимо получить частотные зависимости затухания и входного сопротивления тракта. Так как на частотные зависимости затухания и входного сопротивления тракта оказывают влияние изменения режима линии (линия включена в работу, линия отключена и не заземлена и линия отключена и заземлена заземляющими ножами линейных разъединителей), в ряде случаев необходимо производить измерения параметров тракта при разных коммутационных состояниях ВЛ.

Выбор условий проведения измерений зависит от того, с какой целью эти измерения производятся.

Измерения, производимые при первоначальном вводе канала в эксплуатацию, должны выполняться в максимально возможном объеме. При определении этого объема необходимо учитывать особенности частотных характеристик ВЧ тракта с той или иной схемой организации тракта и их зависимость от коммутационного состояния линий, входящих в схему тракта, которые отмечались в гл. 2 и 3. Только такие измерения дают достаточный

материал для оценки качества ВЧ тракта и для последующего анализа, проводимого по результатам профилактических измерений и при определении причин изменения параметров ВЧ трактов в тех случаях, когда эти изменения возникают.

Выбор частот, на которых следует производить измерения. Измерения желательно производить в широком диапазоне частот, соответствующем рабочим полосам частот фильтров присоединения и ВЧ заградителей.

Одной из важных характеристик ВЧ тракта является неравномерность затухания в узкой полосе частот. Изменения затухания и входного сопротивления тракта при относительно небольшом изменении частоты могут вызываться разными причинами. Основной является наличие отраженных от мест нарушения однородности линий волн, приводящее к периодическому изменению затухания и входного сопротивления тракта между максимальным и минимальным значениями. Это изменение происходит в полосе частот $\Delta f_{MAX-MIN}$ определяемой из выражения (2.7).

Кроме того, изменения затухания и входного сопротивления ВЧ тракта в узкой полосе частот могут быть следствием резонансных явлений между реактивными составляющими сопротивлений двух последовательно включенных заградителей или заградителя и подстанции, или заградителя и ответвления, обработанного заградителем. Однако эти изменения обычно имеют разовый характер вблизи какой-либо "резонансной" частоты и при дальнейшем изменении частоты не повторяются.

Выбор частот, для которых необходимо производить измерения внутри выбранного диапазона, должен производиться таким образом, чтобы достаточно хорошо обрисовать частотные зависимости затухания и входного сопротивления тракта с учетом схемы тракта и выбранной схемы присоединения.

Обычно измерения производят между нижней и верхней границами выбранного диапазона с постоянным шагом по частоте. Выбор шага по частоте делается таким, чтобы обрисовать периодически повторяющуюся неравномерность частотной зависимости затухания. Если предварительный анализ показывает, что влияние отраженных волн может привести к значительной (более 2 — 3 дБ) неравномерности в полосе частот канала тональной частоты (ТЧ) (обычно 4 кГц), измерение необходимо производить с шагом по частоте по крайней мере в 3 раза меньшим, чем интервал частот $\Delta f_{MAX-MIN}$ который определяется из выражения (2.7). В том случае, когда предварительный анализ показывает, что влияние отраженных волн достаточно мало (например, тракт по длинной транспонированной ВЛ, схема присоединения фаза — фаза), измерение можно производить с большим шагом по частоте, однако не рекомендуется этот шаг выбирать меньше, чем 1 кГц. В полосе рабочих частот каналов, работающих по рассматриваемому тракту, измерения рекомендуется производить с шагом не больше, чем 0,5 кГц.

Определение необходимых переключений на линии. Обычно измерения производят при рабочем (включенном) состоянии линий, входящих в схему тракта. Необходимость в проведении измерений при отключенной (заземленной или незаземленной заземляющими ножами линейных разъединителей) линии может возникнуть при измерениях параметров тракта с обработанным заградителем ответвлением, не используемым для организации связи. Так, если в диапазоне частот, в котором производятся измерения, ответвление вносит минимальное затухание, а смежный максимум вносимого ответвлением затухания лежит вне пределов измеряемого диапазона, то по результатам измерений нельзя судить о правильности настройки включенного в ответвление заградителя. Для получения данных о правильности настройки заградителя необходимо изменить коммутационный режим конца ответвления таким образом, чтобы максимум вносимого затухания попал в измеряемый диапазон частот. В практике легче всего получить режим холостого хода, когда линия на конце ответвления просто отключена от подстанции ответвления. Однако для низких частот, когда входное сопротивление подстанции достаточно велико, этот режим близок к рабочему и такое измерение не дает требуемых результатов. В этих случаях дополнительное измерение необходимо производить при заземленной на конце ответвления линии.

Кроме того, необходимость в проведении измерений при различных коммутационных состояниях линии может возникнуть, если выявляется большое несоответствие измеренных

параметров расчетным значениям. Однако этот вид измерений относится к поиску причин несоответствия измеренных и расчетных параметров и будет рассмотрен ниже.

Некоторые особенности методик измерения ВЧ трактов с обходом. При измерениях тракта с ВЧ обходом промежуточной подстанции желательно убедиться в том, что затухание тракта не будет сильно меняться при переключениях на линиях, входящих в схему тракта. Такое изменение может возникнуть за счет связи между линиями, входящими в тракт через сборные шины подстанции обхода (см. §3.2). Принципиальная возможность такого изменения может быть определена измерением "сквозного" тракта при нормальном состоянии тракта и при разорванной схеме ВЧ обхода (отключение ВЧ кабеля, соединяющего ФП на ПС обхода и нагрузка обоих фильтров на сопротивление 75 Ом). Если различия между затуханием сквозного тракта, измеренным при нормально соединенной и при разорванной схеме обхода, не превышают 10 — 15 дБ, в частотной зависимости тракта имеются области повышенного и пониженного затухания и затухание тракта может значительно изменяться при переключениях на линиях, входящих в схему тракта.

Измерения, производимые в процессе эксплуатации при профилактических работах, имеют целью удостовериться в неизменности частотных зависимостей затухания и входного сопротивления и сделать вывод об исправности (или неисправности) оборудования, входящего в схему ВЧ тракта. Эти измерения допускается выполнять только в пределах рабочих частот рассматриваемого канала связи и в рабочем состоянии линии. Частоты, на которых следует производить измерения, должны для сопоставимости совпадать с частотами, на которых производились измерения при пуске канала в эксплуатацию. Если результаты измерений затухания не отличаются от тех, которые были получены ранее, более, чем на 1 дБ, можно считать, что оборудование, входящее в схему ВЧ тракта, исправно. Если отличия превышают 3 — 4 дБ, следует производить измерения для определения причин изменения параметров ВЧ тракта.

Также, как и при первоначальном вводе канала в эксплуатацию, при профилактических измерениях может возникнуть необходимость в проведении измерений при отключенной (заземленной или незаземленной заземляющими ножами линейных разъединителей) линии. Это относится к измерениям параметров тракта с обработанным заградителем ответвлением, не используемым для организации связи, если необходимо проверить параметры заградителя, включенного в ответвление.

Измерения для определения причин несоответствия параметров тракта нормам.

Несоответствие параметров тракта нормам может быть выявлено как при проведении работ по первоначальному вводу канала, так и при проведении периодических измерений уже работающего канала. Причинами этого несоответствия могут быть неисправности в оборудовании, входящем в схему тракта или ухудшение параметров этого оборудования. Если же несоответствие выявлено при первоначальном вводе канала, то дополнительными причинами могут быть ошибки, допущенные на этапе проектирования при выборе схемы ВЧ тракта или неправильно выполненный монтаж оборудования (например, подключение к разным фазам по концам линии¹ или обработка ответвления, сделанная на нерабочей фазе вместо рабочей).

Причины, вызывающие ненормально большие затухание ВЧ тракта или неравномерность частотной зависимости затухания, определяют на основании тщательного анализа частотных зависимостей затухания и входного сопротивления тракта, полученных при измерениях и проведении при необходимости дополнительных измерений по специально разработанной программе.

¹ Отметим, что не всегда подключение к разным фазам по концам линии приводит к ухудшению параметров тракта — см. гл. 2.

Выбор диапазона частот, в котором должны проводиться измерения, и определение необходимых переключений линии определяется индивидуально в каждом конкретном случае.

При анализе частотных зависимостей затухания и входного сопротивления тракта учитывают,

что разные элементы, входящие в ВЧ тракт (фильтры присоединения с конденсаторами связи, ВЧ кабели, разделительные фильтры и заградители), при их неисправности и неправильном выборе их параметров влияют на частотные зависимости параметров тракта по-разному. Приведем несколько примеров.

Если на одном из концов ВЧ тракта, организованного по схеме фаза - земля, неисправен ВЧ кабель (оборван или закорочен) или фильтр присоединения, то затухание ВЧ тракта оказывается очень большим во всем частотном диапазоне. При этом входное сопротивление ВЧ тракта, измеренное со стороны неисправного кабеля, будет плавно изменяться от очень больших (единицы килоом) до очень малых (единицы ом) значений. Интервал частот между смежными максимумом и минимумом будет в этом случае соответствовать значению, определяемому выражением (2.7), в котором l — это длина ВЧ кабеля от его начала до места повреждения и v — это скорость распространения в кабеле (принимается равной примерно 200 тыс. км/с).

При схеме присоединения фаза — фаза повреждение одного ВЧ кабеля или фильтра приводит к относительно небольшому увеличению затухания, однако, частотная зависимость входного сопротивления, измеренная для поврежденного ВЧ кабеля, будет иметь уже описанный выше характер.

Неисправный заградитель на одном из концов тракта может вносить в тракт повышенное затухание (хотя это и не обязательно) во всей полосе частот заграждения или в ее части. В то же время наличие неисправного заградителя приводит к существенному изменению частотной зависимости входного сопротивления тракта с обоих его концов. В частотной зависимости входного сопротивления появляется значительная неравномерность. Интервал частот между максимумами и минимумами соответствует значению, определяемому по выражению (2.7), в котором $v = 300$ тыс. км/с, a — длина линии.

Неправильно обработанное или обработанное заградителем с неудовлетворительными параметрами ответвление вносит в ВЧ тракт затухание с характерным чередованием максимумов и минимумов при изменении частоты. Иногда ответвление может появляться при осуществлении временного захода рассматриваемой линии на другое ОРУ, что часто бывает при временной работе линии на напряжении ниже номинального. Механизм появления такого ответвления хорошо виден из рассмотрения рис. 6.12. Такое необработанное ответвление будет вносить в ВЧ тракт затухание с характерным чередованием максимумов и минимумов при изменении частоты на интервал, определяемый по (3.1).

Если аппаратура обработки и присоединения по концам линии ошибочно подключена к разным фазам, то при малой длине линии и/или сравнительно невысоких частотах это может стать причиной повышенного затухания и значительной периодически повторяющейся неравномерности затухания и входного сопротивления. Интервал между смежными максимумами и минимумами затухания и входного сопротивления при этом должен соответствовать значению, определяемому по (2.7). Отсутствие или повреждение разделительного фильтра, отделяющего один тракт от другого в схеме обхода (рис. 6.13, а), может привести к значительному увеличению неравномерности затухания и входного сопротивления тракта 7. Это увеличение неравномерности объясняется тем, что входное сопротивление участка тракта 2, начинающегося от точки А, будет существенно изменяться при изменении частоты на интервал, определяемый по (2.7), из-за полного отсутствия согласования тракта 2 на ПС 3 для частот, передаваемых по тракту 7.

Включение аппаратуры уплотнения на промежуточной подстанции по схеме, показанной на рис. 6.13, б, может стать причиной повышенного затухания "сквозного" тракта на некоторых частотах. Это оказывается следствием того, что в этой схеме отрезок ВЧ кабеля от точки А до аппаратуры уплотнения АУ является ответвлением, нагруженным на реактивное входное сопротивление этой аппаратуры.

Некоторое увеличение по тем или иным причинам затухания элементов, входящих в схему ВЧ обхода в случае, когда обход организован между линиями одного класса напряжения, может привести к существенному увеличению затухания тракта с обходом в некотором диапазоне частот. Так, увеличение затухания из-за ухудшения изоляции ВЧ кабеля, изменения параметров ФЯ, появления параллельно включенной на обходе аппаратуры уплотнения,

может привести к изменению соотношения между энергией сигнала, проходящей через схему обхода и по нерабочим фазам через сборные шины подстанции обхода (см. §3.3).

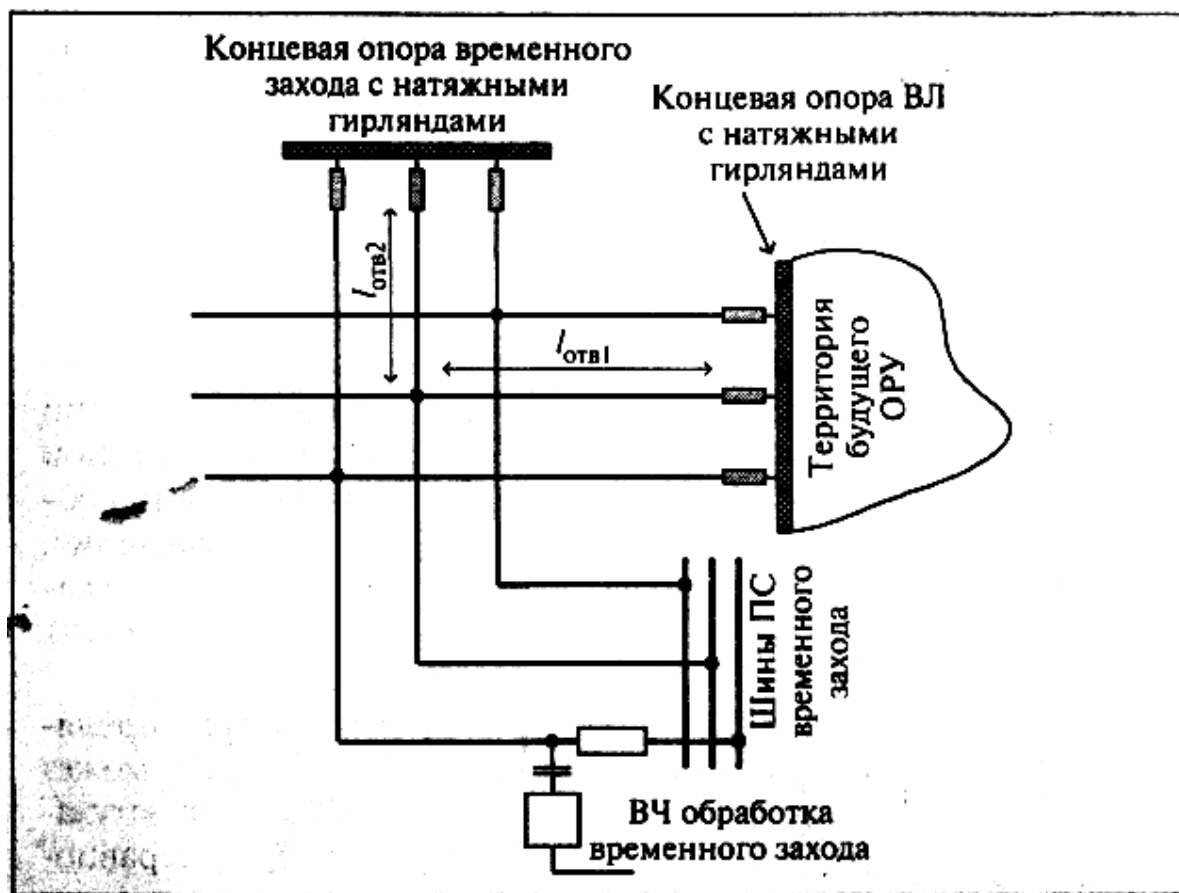


Рис. 6.72. К появлению ответвления в тракте по ВЛ с временным заходом на другое ОРУ

Подытоживая можно сказать, что повышенная периодически повторяющаяся неравномерность затухания и входного сопротивления тракта связана с причинами, увеличивающими коэффициент отражения междуфазных волн в том или ином месте тракта. Поэтому по интервалу частот между смежными максимумами и минимумами затухания и входного сопротивления тракта можно, используя формулу (2.7), определить расстояние между концом тракта и элементом, обуславливающим ухудшение параметров тракта. Дополнительные специальные измерения параметров тракта производят в том случае, когда частотные зависимости затухания и входного сопротивления не дают возможности определить причины ухудшения параметров тракта. Специальными эти измерения мы назвали не потому, что они производятся какими-то особыми методами, а потому, что объем этих измерений несколько шире тех, которые производятся при обычных измерениях. Определение объема дополнительных измерений производят в зависимости от предполагаемых причин ухудшения параметров тракта.

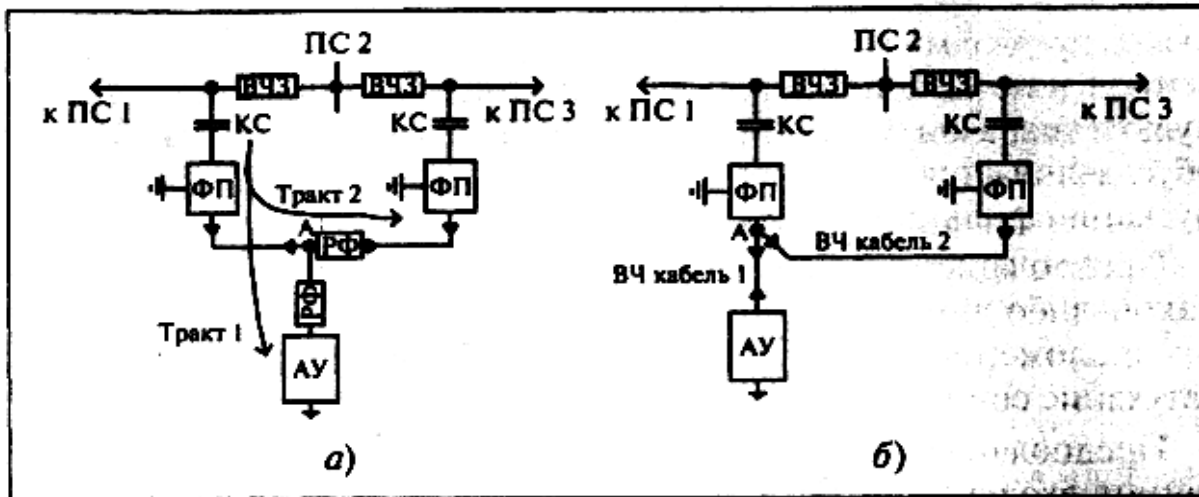


Рис. 6.13. К определению возможных причин ухудшения параметров ВЧ тракта

Рассмотрим некоторые наиболее часто встречающиеся дополнительные измерения. Предполагается повреждение заградителя на конце какой-либо линии, входящей в схему тракта. Для проверки этого предположения дополнительно измеряют затухание и входное сопротивление этого участка ЛЭП при отключенной и незаземленной линии при поочередном заземлении рабочей фазы за заградителем (переносным заземлением или заземляющим ножом линейного разъединителя, если имеется возможность пофазного управления разъединителем). При заземлении рабочей фазы за неисправным заградителем, как правило, увеличивается неравномерность затухания и входного сопротивления тракта, вызванная отражениями от концов линии.

Предполагается повреждение или неправильное включение заградителя на ответвлении. Для проверки этого предположения дополнительно измеряют затухание и входное сопротивление участка линии с ответвлением при отключенной и незаземленной по концам линии. При этом выбирают такой режим конца ответвления, при котором максимум затухания, вносимого ответвлением, был бы в пределах полосы пропускания фильтра присоединения. При неисправном или неправильно подвешенном в месте ответвления заградителе, ответвление будет вносить в ВЧ тракт затухание практически такое же, как если бы заградителя не было. Следует сказать, что измерение на отключенной и не заземленной линии применяется всегда, когда необходимо измерить параметры тракта в достаточно широком диапазоне частот. Дело в том, что ВЧ заградители не позволяют получать при измерениях достоверные данные за пределами полосы заграждения. При измерениях на отключенной и не заземленной линии затухание от заградителей равно нулю и диапазон частот, в котором можно производить измерения, обуславливается только существенно более широкой полосой пропускания фильтров присоединения.

Предполагается повреждение фильтра присоединения на конце какой-либо линии, входящей в схему тракта. Для проверки этого предположения отключают ФП от линии и измеряют его рабочее затухание совместно с эквивалентом конденсатора связи.

Предполагается повреждение ВЧ кабеля на конце какой-либо линии, входящей в схему тракта. Для проверки этого предположения измеряют сопротивление изоляции кабеля и целостность его жилы.

Предполагается, что повышенное затухание тракта вызвано шунтирующим действием входного сопротивления какого-либо элемента ВЧ тракта. Для проверки этого предположения дополнительно измеряют затухание тракта при отключенном шунтирующем сопротивлении.

Предполагается, что повышенное затухание тракта с обходом вызвано повреждением какого-либо элемента на одном из участков тракта. Для проверки этого предположения дополнительно измеряют затухание каждого из участков тракта и определяют участок, где находится поврежденный элемент.

Предполагается, что повышенное затухание тракта с обходом вызвано влиянием сигнала,

проходящего через сборные шины подстанции обхода по нерабочим фазам. Для проверки этого предположения дополнительно измеряют затухание тракта при "разорванной" схеме обхода и сравнивают этот результат с затуханием тракта при нормальной схеме соединения на ПС обхода.

Предполагается, что повышенное затухание тракта в некоторой узкой полосе частот вызвано взаимной компенсацией реактивных составляющих полных сопротивлений заградителя и входного сопротивления подстанции на каком-либо участке тракта. Для проверки этого предположения дополнительно измеряют затухание тракта при поочередном отключении выключателей по концам линии. Всплеск затухания должен исчезнуть при отключении линии на том конце, где происходит компенсация сопротивлений.

Измерение уровня помех. Как правило, в практике встречаются необходимость в измерении трех видов помех, существующих постоянно или кратковременно на выходе ВЧ тракта: сосредоточенные (узкополосные) помехи от соседних ВЧ каналов и радиостанций; помехи от короны на проводах высоковольтных линий электропередачи; помехи от перекрытия высоковольтной изоляции.

Сосредоточенные помехи измеряют обычно при определении уровней мешающих сигналов на узловых подстанциях, используя полученные результаты при назначении частот новых ВЧ каналов в данном регионе. Кроме того, эти измерения делают для определения источника мешающего сигнала, влияющего на работу какого-либо ВЧ канала.

Измерения производят на выходе ВЧ кабеля, нагруженного на номинальное сопротивление (75 Ом). Для исключения перегрузки входных цепей измерителя уровня при измерениях отключают передатчики аппаратуры, подключенные к измеряемому ВЧ кабелю. Измерения производят в интересующей оператора полосе частот (обычно в полосе частот аппаратуры обработки и присоединения) избирательным измерителем уровня с использованием полосы избирательности 1 - 3 кГц, а при необходимости, для уточнения значения мешающей частоты, в более узкой полосе. При измерениях определяют частоту мешающего сигнала, его уровень и, по возможности, источник сигнала. Источник сигнала определяют, или сопоставляя его частоту с частотами существующих каналов ВЧ связи, или прослушивая характер помехи с помощью наушников или динамика, включенных на выходе детектора измерителя уровня. Как правило, результаты измерения записываются в абсолютных уровнях по мощности, дБм. При этом, если измерения производятся в абсолютных уровнях по напряжению, дБн, то переход к абсолютному уровню по мощности осуществляется по формуле (6.3), которая при $Z_x = R_{ном} = 75 \text{ Ом}$ записывается как:

$$P \text{ (дБм)} = p \text{ (дБн)} + 9. \quad (6.15)$$

Помехи от короны измеряют обычно для определения минимально необходимого уровня приема сигналов данного канала. Измерения производят на выходе ВЧ кабеля, нагруженного на номинальное сопротивление (75 Ом). Для исключения перегрузки входных цепей измерителя уровня при измерениях отключаются передатчики аппаратуры, подключенной к измеряемому ВЧ кабелю.

Измерение уровня помех от короны должно производиться измерителем уровня, имеющим среднеквадратичный детектор. Следует помнить, что измерения прибором с другими типами детекторов могут привести к значительной погрешности измерения. Как правило, измерения производят с использованием полосы избирательности 1 - 3 кГц в нескольких точках (начало, середина и конец) диапазона частот, в котором требуется определить уровень помех (обычно в полосе частот аппаратуры обработки и присоединения). Точки измерений выбирают таким образом, чтобы на частотах измерения отсутствовали сосредоточенные помехи. Проверка того, что измеряемый уровень обусловлен помехами от короны, производится сравнением уровня помех, измеренного при разных полосах избирательности измерителя уровня. Измеренные при разных полосах избирательности уровни должны соотноситься в соответствии с формулой (4.1).

Кроме того, эта проверка может производиться по характеру шума, прослушиваемого через

наушники или динамик. При прослушивании помех от короны шум должен быть похож на шум идущего дождя.

Результаты измерения записываются в абсолютных уровнях по мощности, дБм. При этом, если измерения производятся в абсолютных уровнях по напряжению, дБн, то переход к абсолютному уровню по мощности осуществляется по формуле (6.15).

Как уже было сказано в §5.2, помехи от короны являются случайной величиной, распределенной по нормальному закону. Поэтому единичное измерение уровня помех трудно интерпретировать. Наиболее стабильные (повторяющиеся по результатам) измерения получаются при их произведении при интенсивном дожде или снеге, идущим вблизи подстанции, на которой производятся измерения. Поэтому измерения желательно производить именно в такую погоду и определять уровень помех, соответствующий 50 %-ной вероятности появления, как измеренный при этих условиях за вычетом 10 дБ.

Так как уровень помех зависит от ширины полосы избирательности измерителя уровня и от условий погоды, измеренное значение уровня обязательно должно сопровождаться указанием, в какой полосе частот и при какой погоде измерения производились. При записи рекомендуется использовать следующие градации погодных условий: хорошая погода летом, дождь, сильный дождь, хорошая погода зимой, снег, сильный снег.

Помехи от перекрытия высоковольтной изоляции обычно возникают при перекрытии искровых промежутков на подвесной изоляции грозозащитных тросов, а также при частичных пробоях основной изоляции высоковольтного оборудования. Целью измерений является точное установление того, что наблюдаемые помехи обусловлены перекрытием изоляции. Для этого необходимо просмотреть осциллограмму помех и сопоставить периодичность появления всплесков напряжения помех с периодом промышленной частоты 50 Гц. Как уже говорилось в §4.2, помехи от перекрытия высоковольтной изоляции имеют два всплеска, сдвинутые на 10 мс и располагающиеся вблизи моментов времени, когда напряжение на фазе с поврежденной изоляцией или на тросе проходит около положительного и отрицательного максимумов. Так как на выходе ВЧ кабеля могут существовать сигналы работающих ВЧ каналов по ЛЭП, которые будут маскировать помехи от пробоя изоляции, просмотр помех производят осциллографом, включенным на выходе полосового фильтра с шириной полосы пропускания 1,5 — 4 кГц. Средняя частота полосового фильтра должна выбираться такой, чтобы напряжение сосредоточенных помех на его выходе было бы намного меньше напряжения во всплесках помех. В качестве такого фильтра можно использовать фильтр приема аппаратуры уплотнения при условии выключения передатчика на противоположном конце канала. Пиковое значение напряжения помех определяют измерением с помощью осциллографа. Оценка напряжения помех в любой полосе Δf_2 по его значению, измеренному в полосе Δf_1 , может быть произведена, исходя из неравенства:

$$U_{\Delta f_1} \sqrt{\frac{\Delta f_2}{\Delta f_1}} \leq U_{\Delta f_2} \leq U_{\Delta f_1} \frac{\Delta f_2}{\Delta f_1}. \quad (6.16)$$

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Примерный перечень необходимых измерительных приборов

В этом приложении дан примерный перечень приборов, необходимых для производства измерений параметров ВЧ трактов, с указанием минимально требуемых значений основных характеристик этих приборов.

Назначение подбора	Основные характеристики	Минимально требуемые значения
Генератор синусоидальных сигналов	Диапазон частот, кГц	24 — 1 000
	Максимальный выходной уровень сигналов, дБм	20
	Погрешность установки уровня, дБ	Не более $\pm 0,2$
	Внутреннее сопротивление, Ом	75, 150, 600 и 0 (< 3)
	Выход	Симметричный и несимметричный
Измеритель	Диапазон частот, кГц	24-1000
	Возможности измерения	Широкополосное и избирательное
	Диапазон измеряемых уровней, дБм:	
	при широкополосном измерении	От — 60 до +40
	при избирательном измерении	От — 80 до +40
	Внутреннее сопротивление, Ом	75, 150, 600 и более 10000
	Вход	Симметричный и несимметричный
	Полоса избирательности при избирательном измерении, Гц	От 25 до 50 и от 1400 до 3100
	Тип детектора	Среднеквадратичных значений
Погрешность измерений, дБ	Не более $\pm 0,2$	
Затухание нелинейности, дБ	Не менее 70	

Продолжение приложения

Назначение прибора	Основные характеристики	Минимально требуемые значения
Упрощенный мост полных сопротивлений	Диапазон частот, кГц Диапазон измеряемых значений сопротивления, Ом: по модулю по активному сопротивлению по реактивному сопротивлению Погрешность измерений, %	24—1000 От 100 до 2000 100 до 2000 От 0 до 2000 Не более ± 5
Устройство для измерения затухания несогласованности	Диапазон частот, кГц Диапазон измеряемых значений затухания несогласованности дБ	24—1000 От 0 до 40
Осциллограф	Число входов Полоса частот, кГц Входное сопротивление Чувствительность Погрешность измерения напряжения, Наличие внешнего делителя Наличие ждущей развертки	2 10 Гц - 2000 1 МОм, 50 пФ От 5 мВ/дел до 50 В /дел Не более $\pm 5\%$ 1:10 Есть

Приложение 2. Программы для расчета параметров тракта

На использование при проектировании, наладке и эксплуатации ВЧ каналов по ЛЭП упрощенных методов расчета параметров, которые характеризуют тракт, накладывается ряд ограничений. Поэтому часто требуется произвести расчеты частотных зависимостей параметров, характеризующих тракт, используя не упрощенные, а точные методы расчетов. Такие расчеты можно производить, используя программы "Тракт" и "Noise". Результаты расчетов по программам прошли большую апробацию измерениями на реальных трактах и дают хорошее совпадение с результатами экспериментов.

Программа "Тракт" работает в среде Windows 95/98/NT. Она позволяет рассчитывать затухание (и/или переходное затухание между некоторыми заданными местами подключения влияющего передатчика и подверженного влиянию приемника), входные сопротивления тракта и искажение группового времени запаздывания. Расчет может производиться в диапазоне частот от 10 до 1000 кГц для произвольных схем присоединения к фазам и тросам ЛЭП. Максимальное число проводов (фаз и тросов) ЛЭП, для которых может производиться расчет равно 12.

Алгоритм, по которому построена программа, базируется на модальной теории распространения сигналов по неоднородным многопроводным линиям. Кроме расчетов параметров ВЧ тракта, программа дает возможность рассчитать модальные параметры любой из ЛЭП (как воздушной, так и кабельной), входящей в схему ВЧ тракта.

В схему ВЧ тракта в любой последовательности могут входить следующие элементы: воздушная линия электропередачи с произвольным расположением фаз и грозозащитных

тросов. Влияние земли на модальные параметры линии рассчитывается как по Карсону (для полубесконечной однородной модели земли), так и по более сложным зависимостям с учетом двухслойной структуры земли;

кабельная высоковольтная линия с произвольным расположением фаз;

транспозиция фаз и тросов ЛЭП;

ВЧ обходы на промежуточных ПС и в местах соединения воздушной и кабельной линий;

ВЧ заградители с произвольной схемой элемента настройки:

фильтры присоединения (с конденсатором связи и ВЧ кабелем) с произвольной схемой;

ответвления от ЛЭП (схема линии на ответвлении может, в свою очередь, включать все указанные выше элементы).

Программа позволяет учитывать при расчетах:

покрытие проводов гололедом или изморозью на заданной длине любой из ВЛ, входящей в тракт;

прохождение ВЛ, входящей в схему тракта, на какой-либо ее части параллельно (или на одних опорах) с другой ВЛ, формально не входящей или входящей в схему тракта;

периодические неоднородности, влияющие на условия распространения сигнала по ЛЭП, такие как влияние опор ВЛ, заземление грозозащитных тросов, провисание проводов в пролете.

Исходные данные для расчетов задаются по каждому из элементов, входящих в тракт, в режиме диалогов с контролем достоверности исходных данных. Имеется возможность редактирования (коррекции) исходных данных.

Большая часть исходных данных задается с использованием базы данных, которая заполняется по мере проведения расчетов.

Имеется два типа базы данных: основная — общая для всех расчетов и локальная — для данного расчета.

В основной базе хранятся данные по типам опор ВЛ, типам фазных проводов и грозозащитных тросов, типам высоковольтных кабелей, типам ВЧ заградителей и фильтров присоединения, типам ВЧ кабелей, которые были введены при проведенных ранее расчетах. В локальной базе хранятся данные, касающиеся только данного расчета.

Имеется возможность редактирования схемы ВЧ тракта и исходных данных по элементам, составляющим ВЧ тракт, что бывает необходимо при проведении серии расчетов для анализа влияния того или иного элемента тракта на частотные зависимости его параметров.

Результаты расчета представляются в виде таблиц и/или графиков, которые можно при необходимости распечатать или передать через буфер обмена Windows в какой-либо редактор.

Имеется возможность представления на одном рисунке результатов нескольких расчетов как по одному, так и по разным трактам.

Программа "Noise" работает в среде Windows 95/98/NT. Она позволяет рассчитывать параметры, характеризующие помехи от короны на проводах линий переменного и постоянного тока, а именно:

частотные зависимости уровней помех в трактах с заданными схемами подключения к фазам и тросам ВЛ 110 кВ и выше при разных влияющих на уровень помех условиях вдоль трассы линии (например, загрязненность воздуха, погодные условия, высота над уровнем моря); зависимости среднеквадратичного напряжения помех от фазы напряжения промышленной частоты для линий переменного тока. Такие расчеты являются важными в том случае, если по проектируемому или действующему ВЧ каналу, будет осуществляться передача цифровой информации.

Кроме расчетов параметров ВЧ помех от короны, программа дает возможность рассчитать модальные параметры любой из ЛЭП, входящей в схему рассматриваемого ВЧ тракта.

Программа "NOISE" позволяет рассчитывать указанные выше параметры в диапазоне частот от 10 до 1000 кГц для произвольных схем присоединения к фазам и тросам ЛЭП переменного и постоянного тока. Для ЛЭП переменного тока максимальное число цепей — три (т.е. общее число фаз — до девяти), число тросов — до двух на цепь (т.е. общее число тросов до шести). Для ЛЭП постоянного тока число полюсов — до двух и число тросов — до двух.

Алгоритм, по которому построена программа, базируется на модальной теории

распространения сигналов по неоднородным многопроводным ВЛ и использует для расчета понятие генерации (функции возбуждения) помех. Расчеты производятся с учетом всех падающих и отраженных от мест нарушения однородности ВЛ волн.

. В схему ВЧ тракта в любой последовательности могут входить следующие элементы: воздушная линия электропередачи ЛЭП с произвольным расположением фаз (полюсов) и грозозащитных тросов. Влияние земли на модальные параметры линии рассчитывается по Карсону (для полубесконечной однородной модели земли);

транспозиция фаз и тросов ЛЭП;

ВЧ обходы на промежуточных ПС;

ответвления от ЛЭП;

ВЧ заградители с произвольной схемой элемента настройки;

фильтры присоединения (с конденсатором связи и ВЧ кабелем) с произвольной схемой.

Программа позволяет учитывать при расчетах:

наличие внутрифазного тракта с особенностями расчета помех во внутрифазном тракте;

генерацию, определяемую по методике, принятой в РФ или по методике СИГРЭ с учетом особенностей расчета генерации по этим методикам;

обрывы проводов ЛЭП и короткие замыкания этих проводов на землю и между собой;

периодические неоднородности, влияющие на условия распространения сигнала по ЛЭП — емкости фаз и тросов на опоры ВЛ;

изменение генерации на проводах ВЛ, вызванное теми или иными причинами на разных участках трассы линии. С помощью задания разной генерации на разных участках линии можно, например, рассчитать помехи для линии, проходящей в горных условиях или по трассе с местным загрязнением атмосферы вблизи промышленного объекта. Кроме того, повышение генерации помех может быть обусловлено дождем над частью линии переменного тока (для ППТ дождь уменьшает генерацию, что тоже может быть учтено заданием изменения генерации).

Исходные данные для расчетов задаются в режиме диалога с контролем достоверности исходных данных. Имеется возможность редактирования (коррекции) исходных данных. Большая часть исходных данных задается с использованием базы данных, которая заполняется по мере проведения расчетов.

Имеется два типа базы данных: основная — для всех расчетов и локальная — для данного расчета.

В основной базе хранятся данные по типам опор ВЛ, фазных проводов и грозозащитных тросов и ВЧ заградителей. Такая база позволяет после первого ввода данных по этим элементам использовать их при решении последующих задач.

В локальной базе хранятся данные, касающиеся только данной расчета.

Имеется возможность редактирования схемы ВЧ тракта и исходных данных по элементам, составляющим ВЧ тракт, что бывает необходимо при проведении серии расчетов для анализа влияния того или иного элемента тракта на уровень и характер помех.

Результаты расчета представляются в виде таблиц и/или графиков, которые можно при необходимости распечатать или передать через буфер Обмена Windows в какой-либо редактор. Имеется возможность представления на одном рисунке результатов нескольких расчетов как по одному, так и по разным трактам.

Список литературы

1. **Костенко М. В., Перельман Л. С., Шкарин Ю. П.** Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высоко го напряжения. М.: Энергия. 1973.
2. **Микуцкий Г. В., Шкарин Ю. П.** Линейные тракты каналов ВЧ.связи по линиям электропередачи. М.: Энергоатомиздат. 1987.
3. **Микуцкий Г. В., Скитальцев В. С.** Высокочастотная связь по линиям электропередач. М.: Энергия, 1987.
4. **Методические указания** по расчету параметров и выбору схем высокочастотных трактов по линиям электропередачи 35 — 750 к В переменного тока. Составитель Ю. П. Шкарин. М.: СПО Союзтехэнерго, 1989.
5. **Ишкин В. Х., Книжник Р. Г., Шкарин Ю. П.** Справочник по расчету высокочастотных параметров ВЛ 330 - 1150 кВ. М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. **Малышев А. И., Шкарин Ю. П.** Специальные измерения высокочастотных каналов полициям электропередачи. М.: Энергоиздат, 1990.

Вниманию специалистов

В редакции журнала "Энергетик" можно **приобрести** следующие вышедшие в свет выпуски "**Библиотечки электротехника**":

Алексеев Б. А., Борозинец Б. В. Определение местных перегревов в турбогенераторах по продуктам пиролиза в охлаждающем газе.

Бажанов С. А. Инфракрасная диагностика электрооборудования распределительных устройств.

Удрис А. П. Панель релейной защиты типа ЭПЗ-1636 для ВЛ 110-220 кВ (часть 1 — устройство защиты, часть 2 — обслуживание защиты).

Яковлев Л. В. Вибрация на ВЛ и методы защиты проводов и гро-зозащитных тросов.

Торопцев Н. Д. Трехфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором.

Киреева Э. А. Рациональное использование электроэнергии в системах промышленного электроснабжения.

Антонов В. И., Лазарева Н. М., Пуляев В. И. Методы обработки цифровых сигналов электроэнергетических систем.

Конюхова Е. А. Режимы напряжений и компенсации реактивной мощности в цеховых электрических сетях.

Курбангалиев У. К Самозапуск двигателей собственных нужд электростанций.

Овчинников В. В Автоматическое повторное включение.

Кузнецов А. П., Лукоянов В. Ю. и др. Современные испытательные устройства для релейной защиты и автоматики.

Шабад М. А. Защита генераторов малой и средней мощности.

Иноземцев Е. К. Ремонт высоковольтных электродвигателей электростанций (часть 1, часть 2).

Адрес редакции и журнала "Энергетик":

109280, Москва, ул. Автозаводская, д. 14/23.

Телефон (095) 275-19-06

E-mail: pni@mail.magelan.ru

Об авторе

Юрий Павлович Шкарин —

известный специалист в области передачи информации по каналам ВЧ связи по ЛЭП, кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Ю. П. Шкарин — автор книг "Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях электропередачи" (1973), "Линейные тракты каналов ВЧ связи по линиям электропередачи" (1986), "Специальные измерения ВЧ каналов по линиям электропередачи" (1990), "Расчет параметров высокочастотных трактов по линиям электропередачи" (1999). Он составитель "Методических указаний по расчету параметров и выбору схем ВЧ трактов по

линиям электропередачи 35 - 750 кВ переменного тока" (1989) и автор большого числа статей в журналах "Электричество", "Электрические станции", "Известия АН СССР, сер. Энергетика и транспорт", "Энергетик и докладов на сессиях CIGRE и заседаниях ИК 35 и ИК 36 CIGRE, В настоящее время профессор Московского энергетического института Ю. П. Шкарин является ведущим научным сотрудником АО ВНИИЭ.

Каналы ВЧ связи по линиям электропередачи в ближайшие 10 лет останутся одним из основных видов каналов в ведомственных сетях связи

