

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 03.08.2023

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11e2bbf5e9745d14a4851fda56d089

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
О.Г. Локтионова
« 8 » 08 2023 г.



КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ ИЗМЕРЕНИЙ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ И ЭТАПЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Методические указания
по выполнению практической работы
для студентов, обучающихся по специальности
10.05.02 «Информационная безопасность
телекоммуникационных систем»
по дисциплине «Измерения в телекоммуникационных системах»

Курск 2023

УДК 621.39

Составители: В.Г. Довбня, Д.С. Коптев

Рецензент:

Доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой космического приборостроения и систем связи

В. Г. Андронов

Классификация видов измерений в телекоммуникационных системах, этапы проведения измерительного эксперимента: методические указания по выполнению практической работы / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.Г. Довбня, Д.С. Коптев. – Курск, 2023. – 15 с.

Методические указания по выполнению практической работы содержат все необходимые теоретические сведения для изучения классификации основных видов измерений в телекоммуникационных системах и ознакомления с технологией проведения измерительного эксперимента, а также список контрольных вопросов для самопроверки изучаемого материала.

Методические указания соответствуют учебному плану по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», а также рабочей программе дисциплины «Измерения в телекоммуникационных системах».

Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», очной формы обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 08.08.2023. Формат 60x841/16.

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 0,789. Тираж 100 экз. Заказ. 781. Бесплатно

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

1 Цель практического занятия

Изучение классификации основных видов измерений в телекоммуникационных системах. Ознакомление с технологией проведения измерительного эксперимента.

2 Необходимые теоретические сведения

Под *измерениями* понимают процесс получения информации об исследуемой величине, целью и завершающим этапом которого является установление численного отношения между измеряемой величиной и некоторым ее значением, принятым за единицу измерения.

Из теоретической метрологии известно, что измерение физической величины – совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины.

Необходимое высокое качество передачи информации обеспечивается соблюдением установленных норм на многочисленные электрические параметры и характеристики систем передачи с помощью тех или иных измерений. Таким образом, электрические измерения являются одним из важнейших компонентов технической эксплуатации многоканальных систем передачи, непосредственно обеспечивающим их нормальное функционирование. В свою очередь, эффективность электрических измерений достигается их рациональной организацией, правильно выбранными методиками и соответствующей измерительной аппаратурой

В связи с большим числом и разнообразием параметров и характеристик систем передачи, подлежащих настройке и контролю, их измерения следует классифицировать по тем или иным признакам. Наиболее широкое распространение получили способы классификации по измеряемым величинам и по применяемым методам; эти способы общеизвестны.

Измерения классифицируются по нескольким признакам, наиболее важные из которых представлены в виде схемы на рисунке 1.

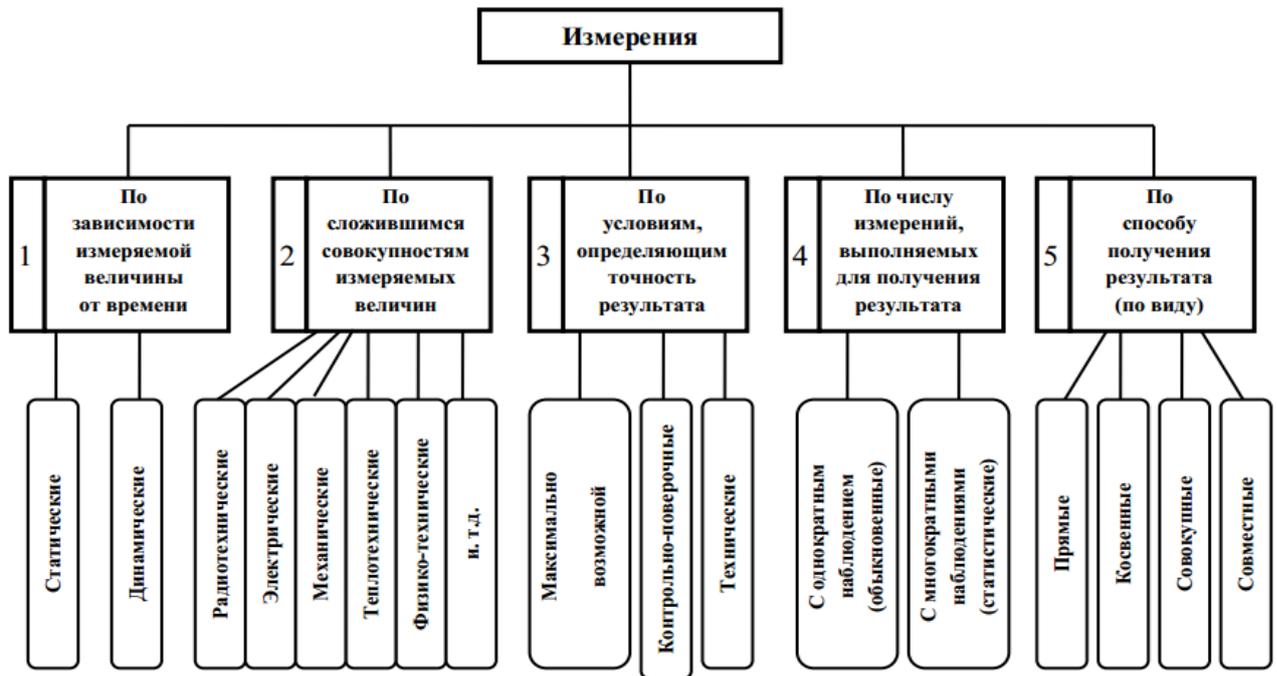


Рисунок 1– Классификация измерений

По четвертому признаку измерения классифицируются в зависимости от числа наблюдений многократные и однократные.

Под наблюдением понимают экспериментальную операцию, выполняемую в процессе измерения, в результате которой получают одно значение из серии значений величин, подлежащих совместной обработке для получения результата измерений.

Прямыми называют измерения, при которых искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных. При этом измеряемую величину сравнивают с мерой, измерительными приборами, градуированными в требуемых единицах.

При косвенных измерениях – искомое значение измеряемой величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям.

Совокупными называют производимые одновременно измерения нескольких одноимённых величин, при которых искомые значения величины находят решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин или ряда других величин, функционально связанных с измеряемыми.

Совместными называют проводимые одновременно измерения двух или нескольких разноимённых величин для нахождения зависимости между ними. Примером совместных измерений может служить измерение тепловой энергии по температуре, давлению и расходу теплоносителя,

определение удельного электрического сопротивления проводника по его сопротивлению, длине и площади поперечного сечения.

В качестве индикатора величины измеряемого напряжения могут быть использованы как стрелочные индикаторы (магнитно-электрические, электродинамические и т.д.), где величина напряжения определяется положением стрелки относительно шкалы, так и цифровые индикаторы, в которых величина напряжений индицируется в виде определённого числа. Применение цифровых индикаторов полностью устраняет субъективную ошибку, характерную для стрелочных индикаторов, облегчает считывание показаний.

Остановимся на специфической классификации измерений, в основу которой положено определение того или иного параметра системы передачи.

Параметры и характеристики системы передачи после монтажа стационарного оборудования определяются с целью настройки системы, выявления и замены неисправных блоков и выполнения установочных регулировок. Измерения на этом этапе называются *настроечными*. Очевидно, что отклонения измеряемых параметров и характеристик оборудования от номинальных значений в процессе настройки и регулировки минимальны и определяются в основном видами предусмотренных в аппаратуре регулировок. Допуски на указанные отклонения определяются *установочными нормами*, которые, как правило, регламентируются организацией, осуществляющей настройку, и указываются в технологических инструкциях по настройке данной системы передачи, составляемых этой организацией. Установленные при настройке значения электрических величин должны заноситься в технические паспорта, предназначенные для фиксации результатов измерений.

Электрические паспорта оборудования, составляемые по окончании настройки, служат основанием для приемки настроенной системы передачи в эксплуатацию. Процесс приемки заключается в проведении контрольных *приемосдаточных измерений*, осуществляемых обычно в полном объеме. За время между настроечными и приемосдаточными измерениями параметры и характеристики системы передачи несколько изменяются, главным образом вследствие изменения напряжений питания, а также природных факторов, например из-за изменения температуры кабеля. Помимо этого, измерения могут производиться разными приборами, тогда наблюдаемые отклонения параметров будут определяться и суммарной погрешностью этих приборов. Таким образом, при проведении

приемосдаточных измерений следует руководствоваться более широкими допусками на параметры и характеристики аппаратуры, определяемыми менее жесткими *настроечными нормами*. Эти нормы вносятся в специальные разделы электрических паспортов и позволяют делать заключение о возможности сдачи системы в эксплуатацию по результатам приемосдаточных измерений.

Изменения напряжений питания и природных факторов носят, как правило, циклический характер, поэтому в процессе эксплуатации параметры и характеристики систем передачи могут длительное время оставаться в пределах настроечных норм, что и обеспечивает необходимое высокое качество связи. Однако с течением времени за счет факторов воздействия, которые не носят циклического характера, например за счет старения, в отдельных элементах аппаратуры возникают нарушения, приводящие к ухудшению качества связи, которое в конечном итоге может стать недопустимо низким. Поэтому в процессе эксплуатации производятся *контрольные (профилактические)* измерения, результаты которых сопоставляются с еще менее жесткими, чем настроечные, *эксплуатационными нормами*. Эксплуатационные нормы соответствуют только удовлетворительному (допустимому) качеству связи. Выход параметров за пределы, установленные этими нормами, свидетельствует о необходимости проведения настройки, по окончании которой параметры вновь будут удовлетворять настроечным нормам.

Контрольные измерения проводятся по определенному плану и потому обычно называются плановыми или регламентными. Однако в процессе эксплуатации систем передачи возможны отказы оборудования, при которых необходимо проводить измерения с целью локализации места отказа и определения его характера. Эти измерения носят название *внеплановых* и являются составной частью ремонтно-восстановительных работ, в которые также (на заключительном этапе) могут входить как настроечные, так и приемосдаточные измерения.

При организации измерений важно учитывать и то, что параметры и характеристики систем передачи могут подразделяться на основные, дополнительные и факультативные. К *основным параметрам* относят те, выполнимость которых подтверждена опытом, а их достижение обеспечивает высокое качество передачи информации, предусмотренное при разработке данной системы и при проектировании конкретной магистрали. Как правило, нормы на эти параметры соответствуют рекомендациям Международного Союза Электросвязи или даже превосходят их.

К *дополнительным параметрам* относят такие, контроль которых необходим при передаче специфических видов информации. Как основные, так и дополнительные параметры могут считаться *факультативными*, т. е. такими, нормы на которые уточняются. Измерения факультативных параметров проводятся с целью анализа и накопления данных, в том числе для прогнозирования состояния системы.

При организации измерений на системах передачи безусловно надо стремиться к снижению трудозатрат при необходимой высокой точности измерений. Это достигается применением современной измерительной аппаратуры и автоматизацией процессов измерений. Большое значение имеют и правильно выбранные методики, что оказывается особенно важным при статистических и выборочных измерениях.

Проведение измерений на системах передачи, находящихся в эксплуатации, должно осуществляться по возможности *без закрытия связей*. Измерения, для проведения которых *закрытие связей* необходимо, должны осуществляться так, чтобы их продолжительность была бы минимальной, а время их проведения совпадало бы с временем наименьшей нагрузки на систему передачи. В некоторых случаях измерения с закрытием связей допускаются только при условии создания обходных путей на соответствующих участках сети.

Настроечные измерения.

Настроечные работы, и в том числе настроечные измерения, проводятся организациями, осуществляющими монтаж аппаратуры систем передачи как после строительства новой линии передачи, так и после модернизации или ремонтно-восстановительных работ на существующей линии. К работе по настройке линии передачи допускаются лица, изучившие состав, назначение и порядок функционирования аппаратуры, заводскую эксплуатационно-техническую документацию на все виды оборудования системы передачи, нормативную документацию по обслуживанию, настройке и ремонту, а также сдавшие экзамены по технике безопасности.

Все работы на необслуживаемых промежуточных станциях должны проводиться бригадой в составе не менее двух человек. В распоряжении бригады должна находиться специализированная машина, оборудованная электростанцией для освещения и питания паяльника, измерительные приборы с автономными источниками питания, инструмент, техническая документация, резервные блоки настраиваемого обо-

рудования. Если эта бригада проводит также ремонтно-восстановительные работы, желательно, чтобы машина была также оборудована устройствами, позволяющими осуществлять автономное питание оборудования необслуживаемой станции или даже нескольких станций, входящих в состав полусекции дистанционного питания. Наличие таких устройств позволяет обесточивать участки кабеля и производить ремонтно-восстановительные работы на кабеле без закрытия связей систем передачи, работающих по другим неповрежденным парам. В общем случае все работы на необслуживаемых станциях должны проводиться при выключенном дистанционном питании за исключением тех, которые можно производить подключаясь к специальным гнездам, установленным на наружной поверхности корпуса станции. Следует помнить об особой опасности попадания под напряжение дистанционного питания в условиях необслуживаемой станции, поэтому перед началом работ на ней необходимо получить подтверждение о снятии дистанционного питания от персонала обслуживаемой питающей станции по каналу служебной связи.

Характерной чертой настроечных измерений является их определенная последовательность, предусматривающая вначале настройку того оборудования, которое будет использовано на последующих этапах настроечных работ. Обычно вначале производится проверка и настройка оборудования оконечных и промежуточных обслуживаемых станций по основным параметрам на соответствие заводским паспортам. Одновременно (если это предусмотрено заводскими инструкциями) проверяется и настраивается оборудование необслуживаемых станций, которое после этого развозится по линии и монтируется.

Первоначально по линии развозят и монтируют оборудование служебной связи и телемеханики, поскольку каналы служебной связи и устройства телемеханики необходимы при настройке основного оборудования линейного тракта. Затем развозят и монтируют основное оборудование линии системы передачи.

Проверка и настройка оборудования начинается с проверки и настройки оборудования электропитания. Большинство измерений осуществляется при этом с помощью приборов, предусмотренных конструкцией аппаратуры и размещаемых на стойках. Однако в некоторых системах передачи проверка оборудования дистанционного питания осуществляется при подключении к нему измерительных приборов класса точности не ниже 0,2. При подключении внешних приборов к оборудованию ди-

станционного питания следует строго соблюдать правила техники безопасности, в частности, осуществлять разряд линии после снятия тока ДП.

После проверки оборудования служебной связи обслуживаемых станций на соответствие заводским паспортам производится настройка канала участковой служебной связи (УСС), не требующего настройки на необслуживаемых станциях, а затем канала постанционной служебной связи (ПСС). Настройка канала УСС сопровождается измерением его остаточного затухания на частоте 800 Гц, частотной характеристики неравномерности остаточного затухания, переходного затухания между развязанными выходами дифсистемы и психофотметрического напряжения помехи на выходе канала. Настройка каналов ПСС обычно осуществляется в два этапа, сначала на секциях между обслуживаемыми промежуточными станциями, затем между оконечными станциями с поочередным подсоединением секций друг к другу. При настройке каналов ПСС по сравнению с настройкой каналов УСС добавляются измерения диаграммы уровней по необслуживаемым станциям и переходного затухания между различными каналами. При настройке каналов ПСС надо учитывать, что нормы на их параметры должны выполняться при соединении всех n секций между обслуживаемыми станциями, т. е. при максимальной его протяженности для данной системы передачи. Если измерение параметров производится для меньшего числа соединенных секций, например, n' то нормы должны быть пересчитаны; допустимые отклонения частотной характеристики неравномерности остаточного затухания и психофотметрического напряжения помехи должны быть снижены в $\sqrt{n/n'}$ раз, а нормы на защищенность от переходных влияний между каналами ПСС, а также между различными направлениями передачи одного канала должны быть увеличены на $10 \lg(n/n')$ дБ.

При настройке систем телемеханики измерения электрических величин обычно не производят.

После настройки систем служебной связи и телемеханики приступают к настройке линейного тракта (ЛТ) системы передачи, которая начинается с подачи дистанционного питания и измерения значения его тока. В любых цифровых системах передачи, если ток ДП установлен равным номинальному, никаких настроечных операций проводить не требуется, а следует переходить к паспортизации параметров ЛТ. Для линейных трактов ЦСП обычно определяется: напряжение дистан-

ционного питания, помехозащищенность линейных регенераторов, коэффициент ошибок на приемных концах ЛТ и параметры каналов служебной связи.

Линейные тракты (ЛТ) МСП с ЧРК требуют проведения настроечных работ довольно большого объема, которые сопровождаются целым рядом измерений электрических величин. Прежде всего, настраивается диаграмма уровней ЛТ, для чего измеряются: сопротивления термодатчиков промежуточных усилителей, уровни КС на передающем конце тракта, а также на выходах оборудования обслуживаемых промежуточных станций и, наконец, на выходах необслуживаемых станций (уровень основного КQ). В процессе настройки диаграммы уровней производится оценка частотных характеристик неравномерности затухания его отдельных частей и их необходимая коррекция.

После установки диаграммы уровней и включения АРУ осуществляется точная коррекция амплитудно-частотной характеристики ЛТ. Процесс коррекции очень трудоемок и включает в себя многократные измерения амплитудно-частотных характеристик отдельных участков тракта и комбинаций участков, причем точность измерений должна быть высокой, а это не позволяет использовать высокопроизводительные панорамные измерители частотных характеристик. По окончании коррекции амплитудно-частотной характеристики переходят к паспортизации ЛТ путем измерений его амплитудно-частотной характеристики, уровней помех, нелинейных искажений и защищенности от линейных переходных влияний.

После настройки и паспортизации ЛТ переходят к коррекции амплитудно-частотных характеристик типовых групповых трактов и каналов ТЧ, организованных на основе данного ЛТ, а затем к их паспортизации. Работы эти проводятся вначале на трактах высшей ступени иерархии для данной системы передачи с последующим переходом к трактам менее высоких ступеней.

Контрольные измерения. Как уже отмечалось, контрольные измерения можно подразделить на плановые (регламентные) и внеплановые. Первые из них предназначены для определения и контроля параметров, которые подвержены изменениям во времени, с целью своевременной подстройки оборудования систем передачи. Удерживание параметров оборудования в пределах эксплуатационных норм, чему способствуют плановые измерения, обеспечивает удовлетворительное качество передачи информации. Плановые измерения проводятся с установленной пе-

риодичностью, причем период для тех или иных измерений устанавливается на основании наблюдений за скоростью изменения соответствующих параметров оборудования.

Внеплановые измерения проводятся с целью локализации мест возникновения отказов оборудования, а также при подстройке или ремонте оборудования для восстановления значений его параметров, вышедших за пределы эксплуатационных норм. Если к ремонту оборудования привлекаются сторонние организации (ремонт не выполняется силами эксплуатационной организации), то внеплановые измерения подразделяют на настроечные, проводимые посторонними организациями, и приемосдаточные, которые проводят эти организации совместно с эксплуатирующей.

При разработке систем передачи обычно стремятся к уменьшению объема контрольных измерений, увеличению длительности периодов между теми или иными плановыми измерениями. Это обеспечивается повышением таких параметров надежности оборудования, как среднее время наработки на отказ и коэффициент готовности, а также применением средств непрерывного автоматического контроля параметров оборудования. В конечном итоге необходимость в плановых измерениях вообще отпадает; в процессе эксплуатации осуществляются лишь внеплановые контрольные измерения по результатам сигнализации средств непрерывного автоматического контроля параметров оборудования. Такой уровень обслуживания достигнут в современных ЦСП с ИКМ, в которых плановые контрольные измерения оборудования ЛТ не предусматриваются.

В настоящее время на сетях связи широко внедряются ЦСП синхронной цифровой иерархии (СЦИ). Однако в эксплуатации находятся большое число линий связи уплотненных по системе плезиохронной цифровой иерархии (ПЦИ). Плезиохронные системы передачи, в первую очередь ИКМ-30, являются основой компонентных потоков при формировании групповых сигналов СЦИ. Замена металлических кабелей, на основе которых строятся линейные тракты ИКМ-30, ИКМ-120 и ИКМ-480, на волоконно-оптические, на базе которых строятся системы СЦИ, требует больших финансовых вложений и времени. Поэтому в настоящее время проектировщикам, строителям и операторам связи приходится организовывать работу гибридных сетей. Необходимым условием качественной работы таких сетей является наличие специальной кон-

трольно-измерительной аппаратуры, обеспечивающей контроль качества передачи и других эксплуатационных параметров на всех этапах работы системы передачи.

Таким образом, в изложенном материале представлена классификация основных измерений в МСП по настроечным и контрольным видам, а также раскрыты понятия установочных, контрольных и установочных норм на измеряемые параметры.

Этапы измерительного эксперимента

Успешное проведение любого из перечисленных измерений требует ясного представления об его этапах. Часто они кажутся само собою разумеющимися, однако, далеко не все учитываются, что приводит к существенным ошибкам и непроизводительным затратам времени. В общих чертах эти этапы следующие.

1. Первым этапом следует считать получение совершенно четкого *представления об измеряемой величине*. Нужно добиться четкого представления того, *что* измеряется. Например, если контролируется напряжение в каких-то точках цепи, то, кроме заданных точек, необходимо знать:

а) режим, в котором будет находиться цепь (каков источник напряжения, частота, сопротивление источника и нагрузки, а иногда и температура, влажность воздуха, режим соседних цепей и т. д.), т.е. влияющие факторы;

б) требуемое значение напряжения (среднеквадратическое, пиковое, средневыпрямленное);

в) ориентировочную величину измеряемого напряжения;

г) форму соответствующей ему кривой;

д) диапазон изменений измеряемой величины;

е) диапазон частот;

ж) допустимую погрешность измерений.

2. Вторым этапом следует считать *определение условий*, в которые поставлен экспериментатор, т. е. имеющиеся в распоряжении измеряющего время, кадры, материальная база (помещение, аппаратура, материалы, источники питания и т. д.).

3. Третий этап заключается в *выборе средств измерений* удовлетворяющих всем характеристикам измеряемой величины, представленным в п.1., таким, как диапазоны величин, частот и т.п. Кроме этого необходимо учесть величины активной и реактивной составляющих входного сопротивления средства измерений, которые при измерении будут оказывать

влияние на режим измеряемой цепи. Особое внимание следует уделить допустимой погрешности средства измерений, с учетом влияющих величин: температуры и влажности окружающей среды, возможных колебаний напряжения питания и т.п. Безусловным требованием к выбранным средствам измерений наличие поверочного клейма.

4. На основе данных п.п. 1 и 2 можно приступить к четвертому этапу – *выбору метода измерений* и затем к выбору или составлению принципиальной схемы измерений. Выбор метода измерений в значительной степени определяется техническими и метрологическими характеристиками имеющихся в наличии средств измерений. Очень часто требования к точности измерений в технике связи настолько высоки, что методом прямых измерений измерительную задачу решить не удастся. В этом случае прибегают к методам сравнения с мерой: нулевому, дифференциальному, замещения и др.

5. Выбрав схему и имея поверенную аппаратуру, можно приступить к *организации рабочего места* для проведения измерений. Необходимо обеспечить:

а) минимум паразитных связей между средствами измерений и соединительными цепями (в случае надобности разнести приборы на необходимое расстояние, экранировать провода);

б) удобство, быстроту и надежность коммутационных операций;

в) соблюдение требований техники безопасности.

6. Перед проведением в технике связи серий наблюдений желательно провести *пробный опыт*, проверить работоспособность схемы измерений хотя бы для одного частного случая. Такая проверка служит одновременно и проверкой монтажа.

7. При удовлетворительных (возможных) результатах пробного опыта можно приступить к серии наблюдений. Однако перед этим следует продумать *систему регистрации результатов* эксперимента. Она должна быть удобна как для измеряющего, так и для последующей математической обработки результатов наблюдений и обнаружения возможных ошибок как в результатах наблюдений, так и в расчетах.

В частности, при снятии разного рода характеристик полезно продумать и заранее подготовить таблицы для записи показаний различных приборов и величин с учетом вышесказанного, а также записывать номера и характеристики использованных приборов. В некоторых случаях следует рассмотреть вопрос о возможной автоматизации записи или о вводе ее в электронно-вычислительную машину.

8. Зафиксировав результаты серий наблюдений, желательно провести *проверочное измерение* для одного из уже записанных частных случаев. Это даст возможность судить об изменениях, которые могли произойти за время наблюдений в схеме или объекте измерений.

9. Если проверочное измерение дало благоприятный результат, то следует *обработать результаты серий наблюдений* и получить значения искомых величин – результаты эксперимента.

10. На основе этих результатов надо сделать выводы, *сформулировать заключение* о том, насколько выполнена поставленная задача. Если же что-то осталось невыполненным или оказалось сомнительным, то желательно указать причины этого и пути их преодоления.

В заключение необходимо отметить, что представленные этапы имеют условное деление, однако в целом отражают обобщенную методологию проведения экспериментальных измерений.

Следует иметь в виду, что этапы измерительного эксперимента обычно регламентируются соответствующими инструкциями. Однако не всегда удается следовать инструкции в виду отсутствия рекомендованных средств измерений.

3 Домашнее задание

Изучить основы теории, изложенные в настоящих методических указаниях и учебной литературе:

- Хромой Б. П. Метрология и измерения в телекоммуникационных системах (Том 2) – М.: ИРИАС, 2008. – 560 с.

По заданию преподавателя подготовить доклад на тему:

«Технологии организации и постановки измерительного эксперимента».

Быть готовым к ответам на контрольные вопросы по теме практического занятия.

4 Контрольные вопросы

1. Дайте определение измерения.
2. Дайте определение основных характеристик измерений.
3. Охарактеризуйте настроечные измерения параметров аппаратуры связи.

4. Дайте характеристику установочных норм параметров аппаратуры связи.
5. Охарактеризуйте процесс приемосдаточных измерений и настроечных норм на параметры аппаратуры связи.
6. Приведите последовательность проведения настроечных работ на аппаратуре связи.
7. Дайте определение линейного тракта системы передачи.
8. Дайте характеристику применения технологии цифровой синхронной иерархии в системе передачи.
9. Приведите классификацию контрольных измерений.
10. Охарактеризуйте эксплуатационные нормы параметров аппаратуры связи.
11. Приведите основные этапы организации измерительного эксперимента.

УДК 621.315.213.1

Составители: Д.С. Коптев, В.Г. Довбня

Рецензент:

Доктор технических наук, старший научный сотрудник,
заведующий кафедрой космического приборостроения и систем связи
В. Г. Андронов

Расчёт первичных и вторичных параметров симметричной кабельной цепи звёздной скрутки: методические указания по выполнению практической работы / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Д.С. Коптев, В.Г. Довбня. – Курск, 2023. – 20 с.

Методические указания по выполнению практической работы содержат все необходимые теоретические сведения для расчёта первичных и вторичных параметров металлических кабелей, варианты заданий, а также требования к оформлению отчёта по выполнению практической работы и список контрольных вопросов для самопроверки изучаемого материала.

Методические указания соответствуют учебному плану по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», а также рабочей программе дисциплины «Измерения в телекоммуникационных системах».

Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» очной формы обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 08.08.2023. Формат 60x841/16.
Усл. печ. л. 1,1625. Уч.-изд. л. 1,053. Тираж 100 экз. Заказ 762. Бесплатно
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

1 Цель работы

Провести расчёт первичных и вторичных параметров симметричной кабельной цепи звёздной скрутки, расположенной в первом повиве семи-четвёрочного кабеля со свинцовой оболочкой. По результатам вычислений построить графики частотной зависимости параметров и дать анализ этих зависимостей.

2 Основные теоретические сведения

2.1 Конструктивные размеры симметричного ЭКС

Способ организации связи по симметричному кабелю – двух кабельный, при котором цепи каждого направления передачи расположены в отдельном кабеле.

При существенном расхождении исходных данных симметричного ЭКС по заданию преподавателя и стандартных конструкций симметричных кабелей согласно [1, 2] необходимо уточнить конструктивные размеры симметричного ЭКС. Для этого по заданному значению диаметра токопроводящей жилы определяется диаметр изолированной жилы. В симметричных кабелях изоляция жил по конструкции может быть представлена двумя профилями, изображёнными на рисунке 1.

Диаметр изолированной жилы для кордельной изоляции (рисунок 1, а) определяется по формуле:

$$d_l = d_0 + 2d_k + 2t_l, \text{ мм}$$

где d_0 – диаметр токопроводящей жилы, мм;

d_k – диаметр корделя, мм;

t_l – общая толщина лент, наложенных поверх корделя, мм.

Диаметр изолированной жилы со сплошной или пористой изоляцией (рисунок 1, б) определяется по формуле:

$$d_l = d_0 + 2t_u, \text{ мм}$$

где t_u – радиальная толщина изоляционного слоя, мм.

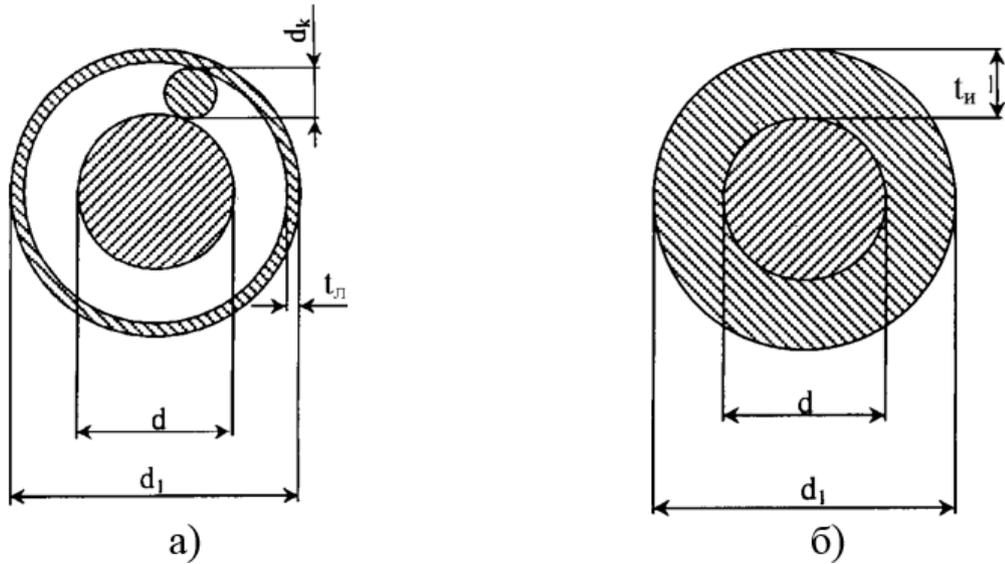


Рисунок 1 – Профили изоляции симметричных кабелей: а) кордельно-полиэтиленовая; б) сплошная или пористая полиэтиленовая

Изолированные жилы скручиваются в четвёрки с шагом 80-300 мм. Диаметр элементарной группы, скрученной в звёздную четвёрку (рисунок 2), определяется из выражения:

$$d_3 = d_l + a, \text{ мм}$$

где a – расстояние между центрами жил одной пары.

$$a = \sqrt{AC^2 + BC^2} = \sqrt{2}d_l, \text{ мм}$$

Отсюда $d_3 = 2,41 d_l$

Диаметр центрирующего корделя определится соотношением:

$$d_{цк} = a - d_l, \text{ мм}$$

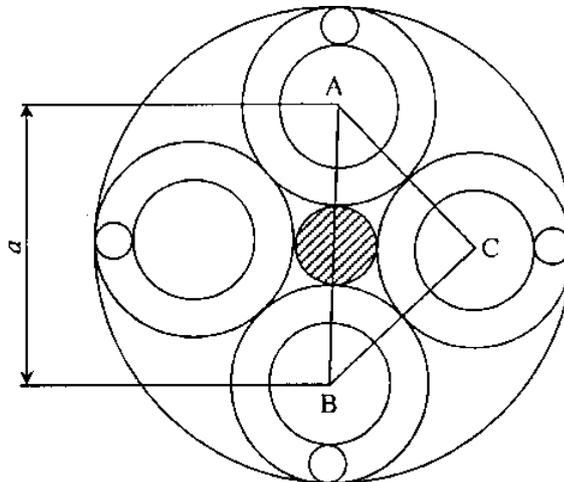


Рисунок 2 – Диаметр элементарной группы кабеля

Размеры кабельного сердечника зависят от числа четвёрок в кабеле. Диаметр кабельного сердечника с поясной изоляцией при наличии металлической оболочки будет соответствовать диаметру экрана:

$$d_э = D_{кc} + 2t_{ни} , \text{ мм}$$

где $t_{ни}$ – радиальная толщина поясной изоляции, мм.

Диаметр кабельного сердечника $D_{кc}$ определяется из выражений:

- для одно четверочного кабеля $D_{кc} = d_3$;
- для четырёх четверочного кабеля (рисунок 2.3) $D_{кc} = 2,41d_3$
- для семи четверочного кабеля при расположении в центре одной четвёрки и шести четвёрок в повиве $D_{кc} = 3d_3$.

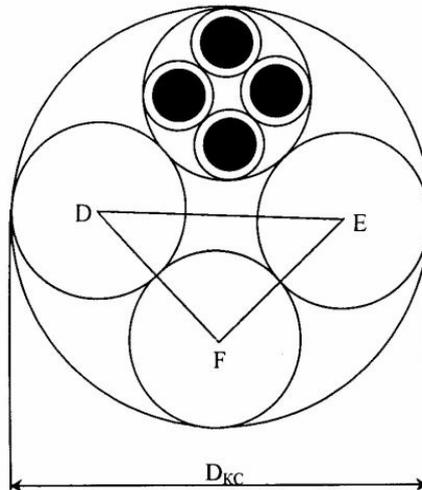


Рисунок 3 – Диаметр кабельного сердечника 4x4

Как правило, используются кабели небронированные – для прокладки в канализации, бронированные стальными лентами – для прокладки непосредственно в грунте и бронированные круглыми проволоками – для прокладки через судоходные и сплавные реки. Поэтому расчёт диаметров кабеля необходимо выполнить для всех трёх разновидностей конструкции, используя справочные данные.

2.2 Конструктивные размеры коаксиального ЭКС

Определение конструктивных размеров коаксиального кабеля во многом аналогичен расчёту симметричного кабеля. По заданному значению диаметра внутреннего проводника и изоляции коаксиальной пары

(КП) прежде всего, исходя из нормируемого значения волнового сопротивления $Z_в = 75$ Ом, определяют внутренний диаметр внешнего проводника:

$$Z_в = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_э}} \ln \frac{D}{d}$$

где $\epsilon_э$ – значение эквивалентной относительной диэлектрической проницаемости изоляции;

d – диаметр внутреннего проводника, мм;

D – внутренний диаметр внешнего проводника, мм.

При $z_в = 75$ Ом находим D :

$$D = de^{z_в \sqrt{\epsilon_э} / 60} = de^{1,25 \sqrt{\epsilon_э}}, \text{ мм}$$

Наружный диаметр КП определяется по формуле:

$$D_{кп} = D + 2t, \text{ мм}$$

где t – толщина внешнего проводника, определяется из справочника для ближайшего по конструкции коаксиального кабеля.

Диаметр сердечника кабеля, состоящего из четырёх КП одинакового размера, будет равен:

$$D_{кс} = 2,41 D_{кп}, \text{ мм}$$

В кабеле, содержащем четыре одинаковых КП, размещается пять симметричных групп. По результатам выполненного расчёта конструктивных параметров, приводится чертёж сечения кабеля, выполненный в масштабе с указанием всех элементов конструкции и полной марки кабеля.

3 Определение параметров передачи кабельных цепей

Параметры передачи кабельных цепей определяются с целью оценки электрических свойств кабеля и нахождения количества регенерационных пунктов и их размещения по трассе линии связи.

В результате расчёта должны быть построены графики частотной зависимости параметров, поэтому расчёт необходимо провести не менее,

чем на пяти фиксированных частотах рабочего диапазона, включая минимальную и максимальную.

Минимальную и максимальную частоту определяет преподаватель. При построении графиков следует иметь в виду, что наиболее резкому изменению подвержены параметры в области нижней части рабочего диапазона.

3.1 Первичные параметры передачи симметричного кабеля

3.1.1 Активное сопротивление цепи

Активное сопротивление цепи определяется по формуле:

$$R = R_0 \left[1 + F(kr_0) + \frac{\rho G(kr_0)(d_0/a)^2}{1 - H(kr_0)(d_0/a)^2} \right] + R_m, \text{ Ом/км}$$

где R_0 - сопротивление цепи на постоянном токе, рассчитываемое по формуле:

$$R_0 = \frac{8 \cdot 10^3 \chi \rho}{\pi d_0^2}, \quad \text{Ом/км;}$$

$\rho = \frac{1}{\sigma}$ - удельное сопротивление материала жил, Ом мм²/м, (таблица 1);

d_0 - диаметр жил, мм;

χ - коэффициент укрутки, учитывающий увеличение длины цепи за счёт скрутки, принимается равным 1,01.....1,07;

ρ - коэффициент, учитывающий потери на вихревые токи в жилах второй цепи элементарной группы, для звёздной скрутки $p=5$;

a - расстояние между центрами жил цепи, мм;

μ_a - абсолютная магнитная проницаемость;

μ - относительная магнитная проницаемость;

$$\mu_a = \mu_0 \mu, \text{ Гн/м;} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, \text{ Гн/м;}$$

$k = \sqrt{\omega \mu_a \sigma}$ - коэффициент вихревых токов, 1/м;

$P(kr_0)$, $G(kr_0)$, $H(kr_0)$ – Бесселевы функции, учитывающие потери на вихревые токи вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости, значения которых приведены в Приложении А.

Таблица 1 – Удельное сопротивление токопроводящих жил

Металл	Удельное сопротивление, Ом*мм ² /м	Удельная проводимость, См*м/мм ²	Относительная магнитная проницаемость	Коэффициент вихревых токов k, 1/мм
медь	0.01754	57	1	$0,0212\sqrt{f}$
алюминий	0.0295	34.4	1	$0,01635\sqrt{f}$
свинец	0.221	4.52	1	$0,00597\sqrt{f}$
сталь	0.139	7.23	100...200	$0,0756\sqrt{f}$

Составляющая активного сопротивления R_m , обусловленная потерями в окружающих металлических массах (соседних группах и металлической оболочке), на частоте 200 кГц определяется по таблице 2 как сумма потерь в смежных четвёрках и оболочке.

Таблица 2 – Определение составляющей активного сопротивления R_m

Число четвёрок	Дополнительное сопротивление R_{m200} за счёт потерь, Ом/км								
	в смежных четвёрках для повивов			свинцовой оболочке для повивов			алюминовой оболочке для повивов		
	1-го	2-го	3-го	1-го	2-го	3-го	1-го	2-го	3-го
в повиве	1-го	2-го	3-го	1-го	2-го	3-го	1-го	2-го	3-го
1	0	-	-	22	-	-	8,1	-	-
4	7,5	-	-	14	-	-	5,2	-	-
1+6	8,0	7,5	-	1,5	5,5	-	0,6	2,0	-
1+6+12	8,0	7,5	7,5	0	0	1,0	0	0	0,4

Определение потерь в металле для другой частоты производится по формуле:

$$R_m = R_{m200} \sqrt{f / 2 \cdot 10^5}, \quad \text{Ом/км}$$

где f - частота, Гц.

Расчёт потерь в стальной металлической оболочке можно производить аналогичным образом, так как при наличии алюминиевого экрана под стальной оболочкой потери определяются в основном внутренним слоем экрана.

3.1.2 Индуктивность, ёмкость и проводимость изоляции симметричной кабельной цепи

Индуктивность симметричной кабельной цепи определяется как сумма внешней межпроводниковой индуктивности ($L_{вн}$) и внутренней индуктивности самих проводников ($L_a + L_b$):

$$L = \kappa \left[4 \ln \frac{a - r_0}{r_0} + \mu Q(kr_0) \right] \cdot 10^{-4}, \text{ Гн/км}$$

где $Q(kr_0)$ – функция поверхностного эффекта, определяемая по таблице (Приложение А).

Ёмкость симметричной кабельной цепи определяется по формуле:

$$C = \kappa \varepsilon_3 \cdot 10^{-6} / 36 \ln \left(\frac{a}{r_0} \Psi \right), \text{ Ф/км}$$

где ε_3 – эквивалентное значение диэлектрической проницаемости, для различного конструктивного исполнения изоляции приведено в таблице 3;

Ψ – поправочный коэффициент.

Таблица 3 – Эквивалентные значения диэлектрической проницаемости, для различного конструктивного исполнения изоляции

Тип изоляции	ε_3	$tg \delta_3 \cdot 10^{-4}$ при частотах, кГц			
		10	100	250	550
Кордельно-бумажная	1.3	30	120	180	260
Кордельно-полистирольная	1.2-1.3	3	7	12	20
Полиэтиленовая	1.9-2.1	2	6	8	14

Пористо-полиэтиленовая	1.4-1.5	3	8	12	20
Баллонно-полиэтиленовая	1.2-1.3	2	6	8	12

Поправочный коэффициент Ψ , характеризующий близость проводов цепи к заземлённой оболочке и другим проводникам, при звёздной скрутке определяется по формуле:

$$\Psi = \frac{(d_3 + d_1 - d_0)^2 - a^2}{(d_3 + d_1 - d_0)^2 + a^2}$$

Проводимость изоляции кабельных цепей находится из выражения:

$$G = \omega C \operatorname{tg} \delta_3, \text{ См/км}$$

где $\operatorname{tg} \delta_3$ – тангенс угла диэлектрических потерь комбинированной изоляции (таблица 3).

Сведений о значениях $\operatorname{tg} \delta_3$ на более высоких частотах для симметричных кабелей в технической литературе не имеется, однако, учитывая, что чистые полиэтилен и полистирол имеют значение $\operatorname{tg} \delta_3$ постоянное в широком диапазоне частот и потери определяются лишь наличием в изоляции примесей и загрязнений неполярного диэлектрика полярными молекулами, то для более высоких частот значение $\operatorname{tg} \delta_3$ можно принимать равным его величине при $f=550$ кГц.

3.2 Вторичные параметры передачи симметричного кабеля

Коэффициент распространения цепи определяется по формуле:

$$\gamma = \alpha + i\beta = \sqrt{(R + i\omega L)(G + i\omega C)},$$

где α – коэффициент затухания, Нп/км;

β – коэффициент фазы, рад/км.

В области высоких частот ($\omega L/R > 3,5$) расчёт можно выполнять по упрощённым формулам:

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_d = \left(\frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right) 8,69 \text{ дБ/км}$$

$$\beta = \omega \sqrt{LC}, \text{ рад/км}$$

где α_m – составляющая затухания за счёт потерь в металле;
 α_d – составляющая затухания за счёт потерь в диэлектрике.

Волновое сопротивление цепи определяется по формуле:

$$Z_{\epsilon} = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + j\omega C)}}, \text{ Ом.}$$

При $\omega L/R > 3,5$ $Z_{\epsilon} = \sqrt{\frac{L}{C}}.$

Скорость распространения электромагнитной волны:

$$v = \omega/\beta, \text{ км/с.}$$

При выполнении условия:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \text{ км/с}$$

Результаты расчёта первичных и вторичных параметров должны быть сведены в таблицу и отражены на графиках частотной зависимости параметров, построенных в линейном масштабе частот. Необходимо объяснить поведение этих параметров в частотной области.

Полученные величины следует сравнить с параметрами близкого по конструкции типового кабеля и дать анализ причин отличия параметров рассчитанного кабеля от типового, выпускаемого кабельной промышленностью.

3.3 Параметры передачи коаксиальных кабелей

Активное сопротивление коаксиальной цепи определяется по формуле:

$$R = R_a + R_b = \frac{\sqrt{2}k}{2\pi\sigma} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) = \frac{A_1\sqrt{f}}{d} + \frac{A_2\sqrt{f}}{D}, \quad \text{Ом/км}$$

где R_a, R_b – активное сопротивление соответственно внутреннего и внешнего проводников, Ом/км;

d, D – диаметры, соответственно, внутреннего и внешней диаметр внешнего проводников;

A_1 и A_2 – постоянные коэффициенты соответственно для внутреннего и внешнего проводников, зависящие от материала проводников. Для меди – $A=0,0835$, для алюминия – $A=0,108$;

f – частота, Гц.

Индуктивность коаксиальной цепи состоит из суммы внешней индуктивности между проводами $L_{\text{вн}}$ и внутренней индуктивности проводников $L_a + L_b$:

$$L = L_a + L_b = \left[2 \ln \frac{D}{d} + \frac{\sqrt{2}\mu_a}{2\pi k} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) \right] 10^{-4} \quad \text{Гн/км}$$

Ёмкость коаксиальной цепи определяется как ёмкость цилиндрического конденсатора:

$$C = \varepsilon_9 10^{-6} / 18 \ln \frac{D}{d}, \quad \text{Ф/м}$$

где ε_9 - эквивалентное значение относительной диэлектрической проницаемости комбинированной изоляции (таблица 4).

Таблица 4 – Эквивалентное значение относительной диэлектрической проницаемости комбинированной изоляции

Тип изоляции	ϵ_3	$tg\delta_3 \cdot 10^{-4}$ при частотах, МГц			
		1	5	10	60
Кордельно-полистирольная	1,19	0,7	0,8	1,0	1,2
Полиэтиленовая шайбовая	1,13	0,5	0,5	0,7	0,8
Пористо-полиэтиленовая	1,5	2	3	3	-
Трубчато-полиэтиленовая	1,22	1,2	1,3	1,5	-
Полиэтиленовая спиральная	1,1	0,4	0,4	0,5	0,6

Проводимость изоляции коаксиальной кабеля находится, как и для симметричного кабеля!

Вторичные параметры передачи определяются по тем же формулам, что и для симметричного кабеля!

Для коаксиальных кабелей с медными внутренним и внешним проводниками коэффициент затухания можно определить через габаритные размеры и параметры изоляции:

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_d = \frac{2,6\sqrt{f\epsilon_3}}{\lg D/d} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) 10^{-3} + 9,08 f \sqrt{\epsilon_3} tg\delta_3 \cdot 10^{-5}, \quad \text{дБ/км}$$

Если в области высоких частот пренебречь внутренней индуктивностью проводников, то вторичные параметры можно рассчитать по упрощённым формулам:

$$\beta = \omega \sqrt{\epsilon_3} / C \quad , \quad \text{рад/км}$$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_3}} \cdot \ln \frac{D}{d} \quad , \quad \text{Ом}$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_3}} \quad , \quad \text{км/с}$$

где c – скорость света в вакууме.

Результаты расчёта первичных и вторичных параметров должны быть сведены в таблицу и отражены на графика частотной зависимости параметров, построены в линейном масштабе частот. Необходимо объяснить поведение этих параметров в частотной области.

Полученные величины параметров следует сравнить с параметрами близкого по конструкции типового кабеля и дать анализ причин отличия параметров рассчитанного кабеля от типового, выпускаемого кабельной промышленностью.

4 Задание на практическую работу

Провести расчёт первичных и вторичных параметров симметричной кабельной цепи звёздной скрутки, расположенной в первом повиве семичетвёрчного кабеля со свинцовой оболочкой.

Задания для каждого варианта определяются по таблице 5.

Таблица 5 – Варианты заданий для выполнения практической работы (последние две цифры зачётной книжки студента)

Изоляция		Предельная частота, кГц	Материал и диаметр жилы									
Материал	Диаметр корделя или слоя изоляции, мм		Медь					Алюминий				
		0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	
		Номера вариантов										
Кордельно – бумажная (толщина ленты 0,11 мм)	0,5	60	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
	0,6	108	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	0,7	252	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
	0,8	360	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Кордельно – полистирольная (толщина ленты 0,05 мм)	0,5	108	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
	0,6	252	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
	0,7	552	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
	0,8	792	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
Сплошная полиэтиленовая	1,1	108	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
	1,15	252	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99

Значение коэффициента скрутки k принять равным 1,02.

Значение ε и $\operatorname{tg} \delta$ приведены в таблице 6, для других частот ε и $\operatorname{tg} \delta$ следует определять методом интерполяции.

Таблица 6 – Значение ε и $\operatorname{tg} \delta$ для различных типов изоляции

Тип изоляции	ε	$\operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-4}$ при f кГц					
		12	60	108	252	552	800
Кордельно – бумажная	1,3	30	80	120	180	260	360
Кордельно – полистирольная	1,2	4,5	10	15	20	30	50
Сплошная полиэтиленовая	2,0	6	12	24	38	50	80

Расчёт выполнить в заданном диапазоне $f_n \dots f_v$ на частотах, указанных в таблице 7.

Таблица 7 – Распределение частот

Заданный диапазон $f_n \dots f_v$, кГц	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
12-60	12	20	28	35	50	60
12-108	12	30	45	70	90	108
12-252	12	40	60	100	160	252
12-360	12	60	120	180	240	360
12-552	12	100	200	300	420	552
12-792	12	120	180	280	400	792

По результатам вычислений построить графики частотной зависимости параметров и дать анализ этих зависимостей. Кривые должны быть плавными, если наблюдаются выбросы, то необходимо проверить расчёт данной точки. По результатам проделанных расчетов сделать вывод о том, к какому кабелю наиболее близки результаты расчётов. Кабель подобрать на основе исходных данных и анализа современного рынка телекоммуникационных составляющих передачи (кабелей).

5 Требования к оформлению отчёта по выполнению практической работы

Отчёт набирается компьютере в формате .doc или .rtf и печатается на одной стороне листа белой бумаги формата А4 (210×297).

Размеры полей:

- верхнее поле – 2 см;
- нижнее поле – 2 см;
- левое поле – 3 см;
- правое поле – 1,5 см;
- переплет – 0 см.

Выравнивание текста – по ширине. Шрифт – Times New Roman. Цвет шрифта – чёрный, размер шрифта – 14. Текст работы печатается с абзацного отступа 1,25 см. Междустрочный интервал – 1,5. Дополнительные отступы до и после абзацев не применяются.

Несложные формулы должны быть набраны с использованием команды «Вставка→Символ». Сложные формулы должны быть набраны в редакторе MathType 6.0 Equation.

Отчёт по выполнению практической работы должен содержать:

- название предмета, номер и название практической работы;
- фамилию и инициалы автора, номер группы;
- фамилию и инициалы преподавателя;
- цель работы;
- перечень используемого оборудования;
- последовательность действий при проведении исследований;
- вывод о проделанной работе;
- ответы на контрольные вопросы;
- дату выполнения и личную подпись.

Результаты различных измерений необходимо представить в виде нескольких самостоятельных таблиц и графиков. Каждая таблица и каждый график должны иметь свой заголовок и исходные данные эксперимента.

При выполнении численных расчетов надо записать формулу определяемой величины, сделать соответствующую численную подстановку и произвести вычисления.

6 Контрольные вопросы

1. Обзор и классификация видов измерений, применяемых в многоканальных системах передачи.
2. Виды измерений параметров металлических кабелей.
3. Первичные и вторичные параметры металлических кабелей.
4. Вторичные параметры передачи кабельной цепи и их зависимость от частоты.
5. Волновое сопротивление и коэффициент распространения, зависимость от частоты
6. Скорость распространения электромагнитной энергии по кабелям, зависимость от частоты.
7. Краткая характеристика измерений параметров симметричного и коаксиального кабелей, особенности измерений коаксиальных кабелей.

Библиографический список

1. Метрология и радиоизмерения: учебник / И. В. Лютиков, А. Н. Фомин, В. А. Леусенко и др.; под общ. ред. Д. С. Викторова; Сибирский федеральный университет. – Красноярск: Сибирский федеральный университет (СФУ), 2016. – 508 с.: ил., табл., схем. – Режим доступа: – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=497346>.
2. Голиков, А. М. Тестирование и диагностика в инфокоммуникационных системах и сетях: курс лекций, компьютерные лабораторные работы и практикум, задание на самостоятельную работу / А. М. Голиков. – Томск: ТУСУР, 2016. – 436 с.: ил., табл., схем. – (Учебная литература для вузов). – Режим доступа: – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=480803>
3. Бабёр, А. И. Электрические измерения: учебное пособие / А. И. Бабёр, Е. Т. Харевская. – Минск: РИПО, 2019. – 109 с.: ил., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=600608>

4. Основы метрологии, стандартизации и сертификации: контрольно-обучающие тесты: [16+] / Е. В. Усова, А. Ю. Краснова, О. Н. Моисеев и др.; под общ. ред. Е. В. Усовой. – Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2021. – 278 с.: ил., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=602453>.

5. Мандель, А. Е. Метрология в оптических телекоммуникационных системах: учебное пособие / А. Е. Мандель; Томский Государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), Кафедра сверхвысококачастотной и квантовой радиотехники. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2014. – 139 с.: схем., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=480513>.

6. Дворкович, В. П. Измерения в видеоинформационных системах: (теория и практика) / В. П. Дворкович, А. В. Дворкович. – Москва: Техносфера, 2015. – 783 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=467606>.

Приложение А

kr_0	$P(kr_0)$	$G(kr_0)$	$H(kr_0)$	$Q(kr_0)$
0.0	0	0	0.0417	1.0
0.5	0.0003	0.000975	0.0420	0.9998
0.6	0.001	0.00202	0.0440	0.9998
0.7	0.001	0.00373	0.0450	0.999
0.8	0.002	0.00632	0.0460	0.999
0.9	0.003	0.0101	0.0490	0.998
1.0	0.005	0.0152	0.0530	0.997
1.1	0.008	0.0220	0.0580	0.996
1.2	0.011	0.0306	0.0640	0.995
1.3	0.015	0.0413	0.0720	0.993
1.4	0.020	0.0541	0.080	0.990
1.5	0.026	0.0691	0.092	0.987
1.6	0.033	0.0863	0.106	0.983
1.7	0.042	0.105	0.122	0.979
1.8	0.052	0.126	0.137	0.974
1.9	0.064	0.149	0.154	0.968
2.0	0.078	0.172	0.169	0.961
2.1	0.094	0.197	0.187	0.953
2.2	0.111	0.221	0.205	0.945
2.3	0.131	0.246	0.224	0.935
2.4	0.152	0.271	0.242	0.925
2.5	0.175	0.295	0.263	0.913
2.6	0.201	0.318	0.280	0.901
2.7	0.228	0.341	0.298	0.888
2.8	0.256	0.363	0.316	0.874
2.9	0.286	0.384	0.333	0.860
3.0	0.318	0.405	0.348	0.845
3.1	0.351	0.425	0.362	0.830
3.2	0.385	0.444	0.376	0.814
3.3	0.420	0.463	0.388	0.798
3.4	0.456	0.481	0.400	0.782
3.5	0.492	0.499	0.416	0.766
3.6	0.529	0.516	0.420	0.749
3.7	0.566	0.533	0.430	0.733
3.8	0.603	0.550	0.440	0.717
3.9	0.640	0.567	0.450	0.720
4.0	0.678	0.584	0.460	0.688
4.1	0.715	0.601	0.466	0.671
4.2	0.752	0.618	0.474	0.657
4.3	0.789	0.635	0.484	0.643
4.4	0.826	0.652	0.490	0.629
4.5	0.863	0.669	0.509	0.616
4.6	0.899	0.686	0.505	0.603
4.8	0.971	0.720	0.516	0.579
5.0	1.043	0.755	0.530	0.556
5.2	1.114	0.790	0.540	0.535
5.4	1.184	0.825	0.550	0.516
5.6	1.254	0.861	0.558	0.498
5.8	1.324	0.896	0.566	0.481
6.0	1.394	0.932	0.575	0.461
6.2	1.463	0.967	0.582	0.445
6.4	1.533	1.003	0.590	0.436
6.8	1.673	1.073	0.602	0.412
7.0	1.743	1.109	0.608	0.400
7.4	1.884	1.180	0.620	0.379
7.8	2.024	1.251	0.630	0.360
8.0	2.094	1.287	0.634	0.351
9.0	2.446	1.464	0.655	0.313
10.0	2.799	1.641	0.670	0.282
$kr_0 > 10$	$\frac{\sqrt{2}kr_0 - 3}{4}$	$\frac{\sqrt{2}kr_0 - 1}{8}$	0.75	$\frac{2\sqrt{2}}{kr_0}$

УДК 621.39

Составители: В.Г. Довбня, Д.С. Коптев

Рецензент:

Доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий
кафедрой космического приборостроения и систем связи

В. Г. Андронов

Теоретические основы импульсного метода измерения металлических кабелей: методические указания по выполнению практической работы / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.Г. Довбня, Д.С. Коптев. – Курск, 2023. – 13 с.

Методические указания по выполнению практической работы содержат все необходимые теоретические сведения для изучения теоретических основ импульсного метода измерения металлических кабелей и список контрольных вопросов для самопроверки изучаемого материала.

Методические указания соответствуют учебному плану по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», а также рабочей программе дисциплины «Измерения в телекоммуникационных системах».

Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», очной формы обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 08.08.2023. Формат 60x841/16.
Усл. печ. л. 0,755. Уч.-изд. л. 0,684. Тираж 100 экз. Заказ. 802. Бесплатно
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

1 Цель практического занятия

Изучение теоретических основ импульсного метода измерения металлических кабелей.

2 Необходимые теоретические сведения

В основе импульсного метода измерений лежит определение интервала времени между моментом посылки в измеряемую линию зондирующего электрического импульса и моментом возвращения импульса от места повреждения к месту измерения. Зная скорость распространения электромагнитной энергии по линии v и время t , прошедшее с момента посылки в линию зондирующего импульса до возвращения импульса к месту измерений, можно определить расстояние до места повреждения

$$l = \frac{vt}{2} \quad (1)$$

Для того, чтобы обнаружить возвратившийся импульс и, следовательно, иметь возможность подсчитать время между посылкой и возвращением импульса, после посылки импульса следует некоторая пауза, в течение которой электромагнитная волна распространяется до места повреждения и возвращается обратно к началу линии. Этот процесс многократно повторяется.

Для уяснения принципа импульсного метода измерений рассмотрим сначала распространение одиночного импульса по линии, не имеющей потерь. Посланный в некоторый момент времени импульс распространяется по линии со скоростью v и через промежуток времени $t = l/v$ достигает конца линии, который нагружен сопротивлением Z_H . При равенстве сопротивления нагрузки Z_H волновому сопротивлению линии Z_c энергия импульса целиком поглощается сопротивлением нагрузки (рис. 1а). Если же $Z_H \neq Z_c$, то распространяющийся импульс частично отразится от нагрузки. Величина и фаза отражённого импульса зависят от величины отклонения Z_H от Z_c и определяется уравнением:

$$U_O = U_{II} (Z_H - Z_c) / (Z_H + Z_c) \quad (2)$$

где U_O — напряжение отражённого импульса, U_{II} — напряжение посланного импульса.

Если $Z_H > Z_c$, то отражённый импульс имеет тот же знак, что и зондирующий (рис. 1б), и обратный знак, если $Z_H < Z_c$ (рис. 1в). В предельных

случаях при размыкании цепи $Z_H = \infty$ и $U_O = U_{II}$, а при коротком замыкании цепи $Z_H = 0$ и $U_O = -U_{II}$.

У начала линии отражённый импульс частично поглощается сопротивлением генератора Z_G , частично отражается. Величина и фаза импульса, отражённого от начала линии, определяются уравнением

$$U_{ГО} = U_0(Z_G - Z_C) / (Z_G + Z_C) \quad (3)$$

где $U_{ГО}$ – напряжение импульса, отражённого от передатчика, Z_G – сопротивление передатчика. Если оценивают лишь пиковые значения отраженных импульсов, в формулы (2) и (3) подставляют значения модулей сопротивлений.

Очевидно, что если Z_H и Z_G не равны Z_C , то на линии имеют место многократные отражения до тех пор, пока вся энергия импульса не рассеется в конечных сопротивлениях. Поэтому входное сопротивление импульсного прибора должно быть согласовано с волновым сопротивлением измеряемой линии.

Подобным образом происходят отражения энергии, распространяющейся вдоль линии, во всех тех местах, в которых местное волновое сопротивление отличается от номинальной величины. Причинами отклонения местного значения волнового сопротивления от номинальной величины могут быть изменение размеров



Рисунок 1 – Возможные положения зондирующего и отраженного импульсов

цепей, вызванные деформацией или разбросом полуфабрикатов, плохие соединения в местах сочленения строительных длин, повреждения изоляции и как крайние случаи, обрывы или касания проводников. Если в однородной линии имеется участок длиной s с отличным от остальной линии волновым сопротивлением $Z' = Z + \Delta Z$, то результирующий коэффициент отражения

$$r = \frac{i \left(\frac{Z'}{Z} - \frac{Z}{Z'} \right) \operatorname{tg} \frac{\omega s}{v}}{2 + i \left(\frac{Z'}{Z} + \frac{Z}{Z'} \right) \operatorname{tg} \frac{\omega s}{v}}, \quad (4)$$

где v — скорость распространения электромагнитной энергии вдоль линии.

В случае коротких неоднородностей малой величины $\frac{\omega s}{v} \ll 1$ и $\frac{\Delta Z}{Z} \ll 1$ выражение (4) упрощается

$$r = i \frac{\omega s}{v} \frac{\Delta Z}{Z}. \quad (5)$$

Так, например, неоднородность коаксиальной пары, вызываемая смятием внешнего проводника или сращиванием двух кусков кабеля приводит к сосредоточенному увеличению погонной емкости $C_1 = \Delta C s$ и вызывает появление коэффициента отражения, величина которого определяется выражением (6):

$$r_c = -i \omega \frac{C_1 Z}{2}. \quad (6)$$

При измерениях реальных линий нельзя не учитывать искажений импульсов, происходящих вследствие потерь энергии в цепях, и фазовых искажений.

Схема, поясняющая принцип действия рефлектометра представлена на рисунке 2. В настоящее время на рынке контрольно-измерительного оборудования имеется большой выбор рефлектометров, однако, несмотря на разнообразие конструктивных решений и характеристик этих приборов, обобщенная схема на дает достаточно полное представление об их структуре и подключении к измеряемым цепям.

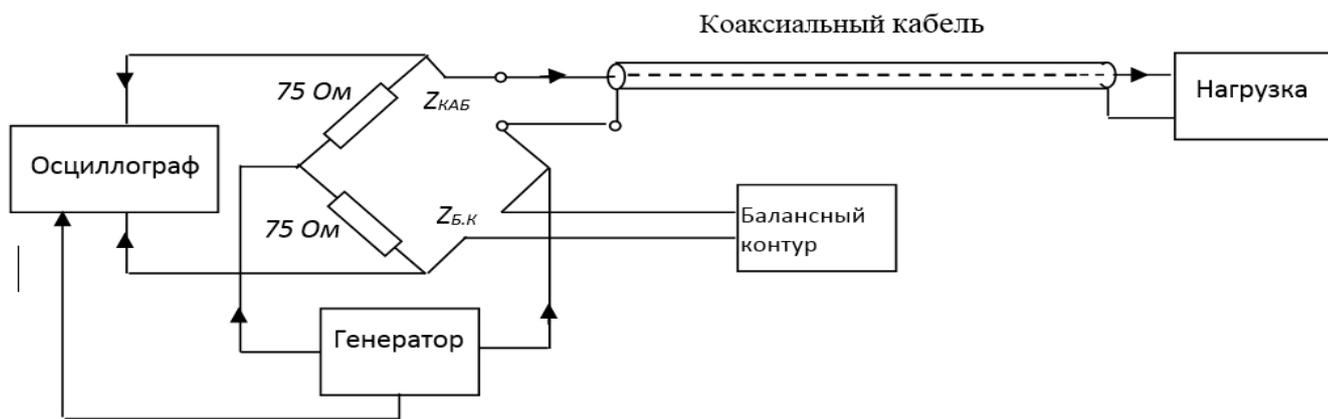


Рисунок 2 – Структурная схема, поясняющая принцип действия рефлектометра

Сущность импульсного метода измерений состоит в следующем. Импульсы напряжения малой длительности и определенной периодичности подаются от генератора импульсов через мостовую схему на вход коаксиальной пары и распространяются по ней. Если бы коаксиальная пара была однородной и нагруженной на свое волновое сопротивление, то каждый импульс на конце коаксиальной пары поглощался бы приемником (сопротивлением нагрузки), не отражаясь при распространении по коаксиальной паре, как это показано на рисунке 1а. При наличии несогласованной нагрузки на конце линии произойдет отражение энергии и в обратном направлении (к началу линии) будет распространяться отраженный импульс. В зависимости от характера несогласованности $Z_H > Z_C$ или $Z_H < Z_C$ отраженный импульс будет иметь полярность, показанную на рисунке 1, б и в. Осциллограммы, представленные на рисунке 1 отображаются на экране осциллографа, входящего в состав рефлектометра. Он подключен к диагонали моста. Поскольку осциллограф и генератор зондирующих импульсов подключены к разным диагоналям, сигнал от генератора (при наличии баланса) не будет проходить на выход осциллографа. Для того, что бы отобразить зондирующий импульс, сигнал подается на вход осциллографа по отдельной линии, как показано на рисунке 2. Таким образом, осциллограф имеет два входа: один для приема сигнала от генератора зондирующих импульсов, другой для приема отраженного сигнала. Хотя осциллограф подключен к диагонали, отраженный сигнал поступает на его вход, поскольку коаксиальная линия подключена к отдельному плечу мостовой схемы.

Теперь поясним назначение мостовой схемы. Зондирующий импульс, посылаемый в линию, имеет достаточно большое пиковое напряжение (порядка нескольких десятков вольт). Вообще чем больше его

энергия, тем эффективнее работает прибор, поскольку от этого зависит и дальность его действия, и способность обнаруживать малые неравномерности. Дальность действия определяется затуханием, вносимым кабелем. Зондирующий импульс, в отличие от полезного сигнала, проходит по длине линии дважды в прямом и обратном направлениях, соответственно и ослабляется в два раза сильнее. К этому добавим, что коэффициент отражения от конца линии не всегда равен единице, а зависит от величины сопротивления нагрузки. Приходящий обратный сигнал, может быть обработан, если выдержанно определенное отношение сигнал/шум. При измерениях линий имеющих большую длину этот показатель имеет определяющее значение.

Что касается малых неоднородностей, то отраженный сигнал, особенно если неоднородность расположена на большом расстоянии от начала, по определению должен быть малым. Поэтому вход осциллографа, на который подается отраженный сигнал, должен быть снабжен высокочувствительным усилителем. Но при этом возникает сложность обеспечения его правильной работы при подаче в линию зондирующих импульсов. Принцип измерения построен так, что для получения результата необходимо и генератор и высокочувствительный приемный усилитель подключить к входу линии. В этом случае мощный импульс с генератора (несколько десятков вольт) поступит не только в линию, но на вход усилителя, рассчитанного на прием сигналов слабых сигналов (единиц микровольт). В результате произойдет недопустимая перегрузка усилителя. Возможны разные пути решения этой задачи. Одним из них является применение сбалансированного моста. Генератор импульсов и вход осциллографа подключены к разным диагоналям моста и, следовательно, сигнал с генератора не поступает на вход осциллографа, а свободно поступает в линию, которая подключена к отдельному плечу моста. Отраженный сигнал поступает на то же плечо моста и беспрепятственно доходит до входа осциллографа.

Для обеспечения баланса моста в два плеча включены резисторы величиной 75 Ом, что соответствует волновому сопротивлению исследуемого кабеля. Что касается плеча, образуемого входным сопротивлением кабеля $Z_{КАБ}$, то оно в принципе может быть не чисто активным и для достижения баланса к нижнему плечу подсоединяется балансный контур с входным сопротивлением $Z_{Б.К}$. Балансный контур имеет в своем составе регулируемое активное сопротивление, а так же L и C, подстройкой которых добиваются полного баланса моста.

Следует отметить, что мостовая схема должна не только обеспечивать режим баланса, но и согласование с входным сопротивлением линии. Дело в том, что отраженный сигнал, дойдя до входа линии, при отсутствии согласования отразится от его начала и снова вернется в линию. Такие многократные отражения исказят осциллограмму на экране ЭЛТ.

Внешний вид осциллограмм, представленный на рис. 4.4., характерен для идеализированной линии, когда неоднородности параметров вдоль линии отсутствуют, а сигнал отражается от несогласованного выхода. При наличии же неоднородностей, повреждений или при несогласованной нагрузке, возникают отраженные импульсы, которые возвращаются к началу измеряемой коаксиальной пары через мостовую схему, следуя друг за другом и создавая в начале коаксиальной пары напряжение, непрерывно изменяющееся во времени. Это напряжение отображается на экране ЭЛТ в виде кривой, подобной показанной на рисунке 3 и называемой импульсной характеристикой измеряемой коаксиальной пары.

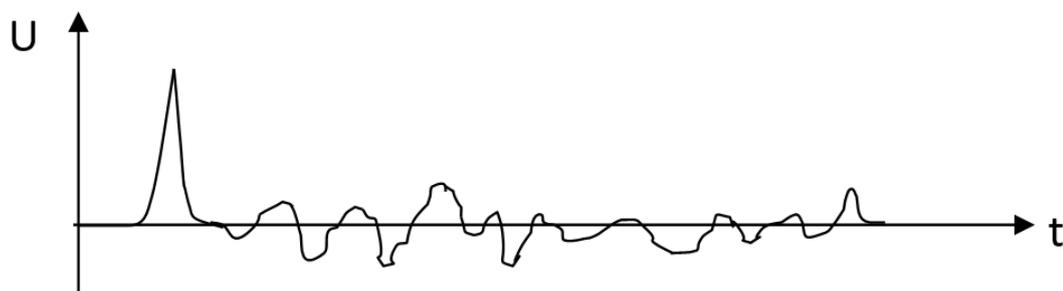


Рисунок 3 – Импульсная характеристика коаксиальной пары

Причиной возникновения неоднородностей могут быть механические повреждения кабелей, проникновение влаги и т.п. Другой причиной неоднородностей могут быть технологические дефекты производства и монтажа кабелей и муфт, вставки отрезков кабеля других типов, сделанные при спешном ремонте и т.п., вплоть до катушек Пупина, которые не были сняты при переводе существующей кабельной линии с аналоговой на цифровую систему передачи. Перечисленные факторы зачастую не влияют на качество передачи аналоговых сигналов, но могут резко ухудшить качество передачи цифровых сигналов.

Структурная схема рефлектометра

Приборы, выпускаемые для импульсных измерений имеют достаточно сложное устройство, отличаются разнообразием схемных решений. Однако в обобщенном виде могут быть вполне рассмотрены на основе структурной схемы, представленной на рисунке 4.

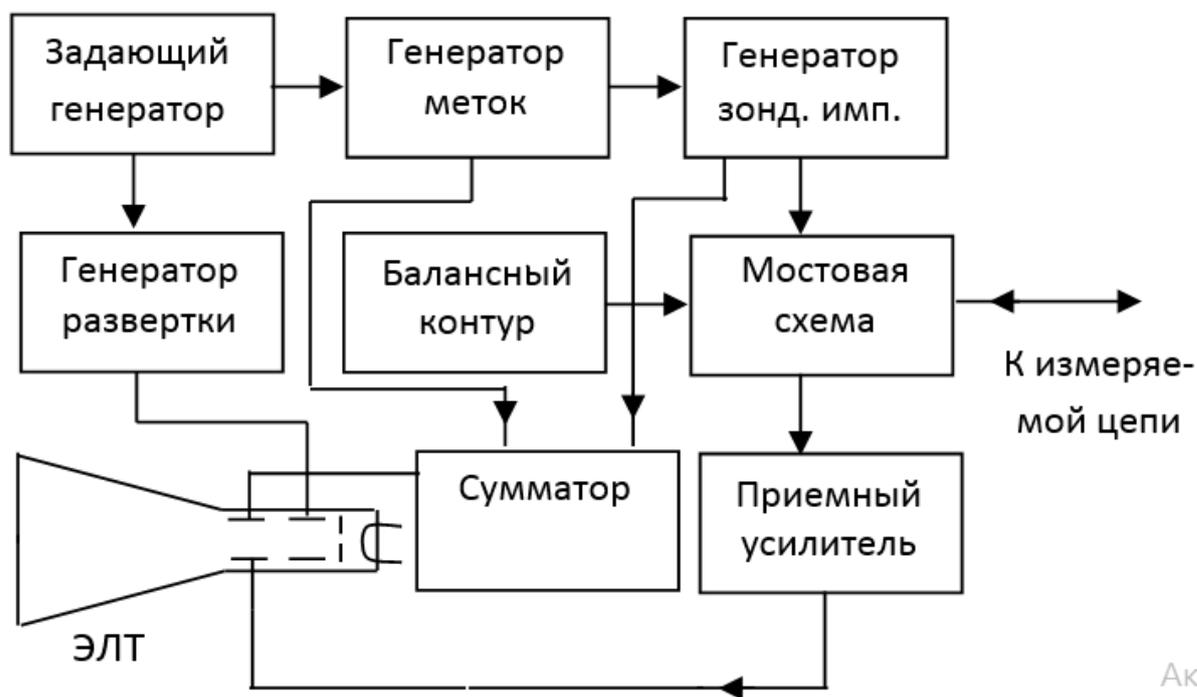


Рисунок 4 – Обобщенная схема приборов для импульсных измерений

В состав прибор входят:

- генератор зондирующих импульсов определенной амплитуды и формы, следующих с постоянной частотой повторения;
- приемник измерительных импульсов (на схеме приемный усилитель), который должен обладать необходимой чувствительностью и достаточно широкой полосой пропускания;
- индикатор (ЭЛТ), измеряющий промежутки времени, выражающиеся в микро- и наносекундах, между посылкой зондирующих и приходом отраженных импульсов.

Кроме того, схемы импульсных приборов содержат ряд дополнительных устройств и элементов (корректоры, интегратор, дифференциальный трансформатор, балансный и нагрузочный контуры и др.), совершенствующих работу и расширяющих технические возможности приборов.

Задающий генератор вырабатывает высокостабильные синусоидальные колебания, необходимые для управления работой генератора масштабных меток, генератора импульсов и блока ждущей развертки. Генератор импульсов вырабатывает зондирующие импульсы необходимой длительности, формы и частоты. Частота посылок импульсов должна быть такой, чтобы интервал между соседними импульсами не был меньше вре-

мени пробега импульсом двойной длины измеряемой линии. Однако частота не должна быть слишком малой, так как при малой частоте могут быть заметными мелькания на экране ЭЛТ импульсного прибора.

Генератор масштабных меток, вырабатывает кратковременные импульсы, следующие один за другим через определенные промежутки времени.

Генератор развертки предназначен для получения напряжения, изменяющегося пропорционально времени. Вырабатываемое этим генератором пилообразное напряжение подается на горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ. В результате световое пятно, постепенно двигаясь слева направо, чертит на экране горизонтальную линию (прямой ход), а затем быстро возвращается в исходное положение (обратный ход). Описанный процесс многократно повторяется. Чтобы обратный ход светового пятна не затруднял наблюдений, его обычно «гасят» в течение времени обратного хода, подавая на управляющий электрод специальные импульсы, как это обычно делается в осциллографах.

Для того, что бы обеспечить постоянную скорость движения развертывающего светового пятна вдоль горизонтальной оси (оси времени) необходимо во время прямого хода высокая линейность нарастания пилообразного напряжения. При этом расстояния между двумя любыми точками вдоль горизонтальной оси на экране будут пропорциональны времени, затрачиваемому на прохождение световым пятном этих расстояний. Горизонтальная линия развертки в некотором масштабе изображает исследуемую линию связи. Поэтому необходимо выбрать скорость развертки, во столько раз меньше скорости распространения импульса по линии, во сколько раз длина экрана трубки меньше удвоенной длины рассматриваемого участка цепи.

В приборе используется ждущая развертка, т.е. генератор развертки включается одновременно с посылкой в линию зондирующего импульса. Начало отсчета на линии развертки можно отметить с помощью ослабленного зондирующего импульса, подаваемого на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ. На эти же пластины через приемный усилитель подается также отраженный импульс, поступающий с линии. Он создает на экране трубки вертикальный выброс. Расстояние между началами зондирующего и отраженного импульсов и определяет в известном масштабе расстояние до неоднородности линии.

При линейной развертке точность определения расстояния до места расположения неоднородности определяется точностью градуировки, ко-

торая, в свою очередь, зависит от диаметра экрана ЭЛТ. Обычно применяются ЭЛТ диаметром порядка 100 мм. Масштаб при этом получается мелким, и поэтому точность отсчета расстояния небольшая. Применение трубок с большим диаметром приводит к значительному удорожанию прибора, а главное, не дает все же радикального решения задачи. Поэтому для повышения точности измерений развертку включают не одновременно с посылкой зондирующего импульса, а с задержкой - спустя некоторое время. Время задержки выбирают таким, чтобы развертка началась несколько ранее и заканчивалась несколько позднее прихода в приемник отраженного импульса. Применение так называемой задержанной развертки позволяет просматривать импульсные характеристики отдельных участков линии в разных масштабах, что равносильно значительному увеличению диаметра трубки. Задержку развертки можно получить различными способами: с помощью фазорегулятора, искусственных линий и т.п.

Следует отметить, что в большинстве современных приборов применяются цифровые методы обработки и отображения отраженных сигналов. Такие приборы обеспечивают более высокую точность измерений и большие удобства в эксплуатации. В данном разделе рассмотрены принципы действия аналогового прибора, поскольку при этом имеется возможность «заглянуть» внутрь ящика и пояснить взаимодействие его частей. При описании современного прибора пришлось бы ограничиться фотографией его внешнего вида и перечислением основных характеристик, поскольку внутреннее устройство большинства современных приборов является секретом фирмы.

При постоянной и известной скорости развертки расстояние от неоднородности до места повреждения может быть определено с помощью накладной сетки. Отсчет при этом должен производиться от начала зондирующего импульса, что предопределяет необходимость одновременного просмотра всей измеряемой линии.

Более совершенным методом является использование калибрационных меток. Эти метки вырабатываются специальным генератором и подаются на сумматор, где складываются в определенной пропорции с зондирующими импульсами и поступают на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ.

Для защиты приемного усилителя от перегрузки напряжением зондирующего импульса в схеме предусмотрена мостовая схема и балансный контур (аналогично схеме на рис.1.26). Если сопротивление

балансного контура соответствует входному сопротивлению измеряемой цепи во всем спектре частот импульса, то мостовая схема оказывается сбалансированной для зондирующего импульса, и он не попадет в приемный усилитель. Для импульса, отраженного от неоднородности, мостовая схема разбалансирована, - поэтому отраженный импульс попадает на усилитель и далее на горизонтальные пластины ЭЛТ.

Практически невозможно полностью сбалансировать входное сопротивление цепи в широком диапазоне частот, поэтому ослабленный зондирующий импульс через усилитель попадает на трубку, где просматривается в начале оси времени, в результате чего уменьшается точность измерения начального участка цепи и получается так называемая «мертвая зона». Балансный контур служит для согласования прибора с входным сопротивлением измеряемой коаксиальной пары.

При прохождении вдоль коаксиальной пары зондирующего импульса последний изменяется по форме, амплитуде и длительности. Искажение зондирующего импульса зависит от его длительности, а также типа и длины коаксиальной пары. Затухание импульса увеличивается прямо пропорционально длине коаксиальной пары, и вы короче длительность импульса $t_{и}$, тем больше затухание.

Из-за искажений зондирующего импульса уменьшается его амплитуда, а форма как бы растягивается, в результате чего увеличивается его длительность. Следовательно, без коррекции зондирующего импульса, которая позволяет восстановить амплитуды отраженных импульсов, полученные данные окажутся искаженными.

В современных импульсных приборах применяется принцип одновременной коррекции амплитуды и фазы. Характеристики корректирующего контура определяются характеристиками затухания и фазы коаксиальных пар, а также формой и длительностью зондирующих импульсов. Как правило, погрешность коррекции импульса в импульсных приборах не превышает $\pm 0,5$ дБ.

Импульсные приборы характеризуются следующими основными параметрами: формой, длительностью и амплитудой зондирующих импульсов, частотой их следования, чувствительностью и длительностью развертки прибора. Указанные характеристики разных приборов весьма различны и зависят от параметров измеряемых линий, частотного диапазона и требований в отношении точности измерений.

3 Домашнее задание

Изучить основы теории, изложенные в настоящих методических указаниях и учебной литературе:

- Хромой Б. П. Метрология и измерения в телекоммуникационных системах (Том 2) – М.: ИРИАС, 2008. – 560 с.

По заданию преподавателя подготовить доклад на тему:

«Типы и основные технические характеристики современных рефлектометров».

Быть готовым к ответам на контрольные вопросы по теме практического занятия.

4 Контрольные вопросы

1. Приведите выражение для определения расстояния до места повреждения линии с помощью рефлектометра.

2. Из каких соображений рассчитывается период следования зондирующих импульсов рефлектометра?

3. Приведите вид осциллограммы зондирующего и отраженного импульсов рефлектометра для случая $Z_H = Z_C$.

4. Приведите вид осциллограммы зондирующего и отраженного импульсов рефлектометра для случая $Z_H > Z_C$.

5. Приведите вид осциллограммы зондирующего и отраженного импульсов рефлектометра для случая $Z_H < Z_C$.

6. Поясните назначение балансного контура в структурной схеме рефлектометра.

УДК 621.39

Составители: В.Г. Довбня, Д.С. Коптев

Рецензент:

Доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий
кафедрой космического приборостроения и систем связи

В. Г. Андронов

Измерения мультиплексоров ввода – вывода в цифровых сетях связи: методические указания по выполнению практической работы / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.Г. Довбня, Д.С. Коптев. – Курск, 2023. – 22 с.

Методические указания по выполнению практической работы содержат все необходимые теоретические сведения для изучения всех видов измерений мультиплексоров ввода – вывода в цифровых сетях связи и список контрольных вопросов для самопроверки изучаемого материала.

Методические указания соответствуют учебному плану по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», а также рабочей программе дисциплины «Измерения в телекоммуникационных системах».

Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», очной формы обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 08.08.2023. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. 1,278. Уч.-изд. л. 1,157. Тираж 100 экз. Заказ. 801. Бесплатно
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

1 Цель практической работы

Ознакомиться с измерениями мультиплексоров ввода – вывода в цифровых сетях связи.

2 Классификация измерений в системах SDH

Технология SDH представляет собой многомерный объект, каждое измерение которого является одним из методов его классификации.

Первый способ классификации состоит в разделении на группы компонентов сети. В сетях SDH можно выделить мультиплексоры ввода – вывода, мультиплексоры, коммутаторы и регенераторы. Следовательно, одна из «осей» классификации измерений состоит в разделении на следующие группы: измерение параметров мультиплексоров ввода – вывода, измерение параметров мультиплексоров, измерение параметров коммутаторов, измерение параметров регенераторов, анализ сети в целом.

Второй способ классификации учитывает структуру тракта SDH. В тракте SDH можно выделить следующие уровни анализа: уровень нагрузки, маршрут низкого уровня, маршрут высокого уровня, секционный уровень.

Третий способ классификации рассматривает методы проведения измерений, отражающие функциональное и стрессовое тестирование.

Функциональное тестирование выполняется путем пассивного мониторинга и предусматривает выполнение измерений, связанных с проверкой функционирования как отдельных элементов тракта, так и сети в целом.

Стрессовое тестирование позволяет имитировать различного вида ситуации в сети и проверять реакцию на них элементов сети. Такой вид тестирования проводится с отключением трактов.

Группа измерений мультиплексоров ввода – вывода (МВВ) является одной из самых важных и включает в себя 10 отдельных групп измерений, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Группы измерений МВВ в системах SDH

№	Описание группы
1	Функциональные тесты МВВ секционного уровня
2	Стрессовое тестирование МВВ секционного уровня
3	Функциональные тесты МВВ маршрута низкого

	уровня
4	Стрессовое тестирование МВВ маршрута низкого уровня
5	Функциональные тесты МВВ маршрута высокого уровня
6	Стрессовое тестирование МВВ маршрута высокого уровня
7	Функциональные тесты МВВ уровня нагрузки
8	Стрессовое тестирование МВВ уровня нагрузки
9	Функциональные тесты МВВ уровня маршрута
10	Стрессовое тестирование МВВ уровня маршрута

Большое количество измерений этой группы определяется тем, что мультиплексор ввода – вывода представляет собой чрезвычайно важный элемент сетей SDH, осуществляющий, с одной стороны, загрузку и выгрузку потоков PDH в сеть SDH, а с другой стороны – формирование синхронного транспортного модуля (STM) – информационной структуры, состоящей из информационной нагрузки и секционного заголовка, объединенных в блочную цикловую структуру с периодом повторения 125 мкс, передающейся со скоростью, синхронизированной с сетью. Таким образом, МВВ как сетевой элемент находится на границе сопряжения сетей PDH и SDH, и, следовательно, параметры его функционирования чрезвычайно важны для работы всей сети SDH. В результате на всех этапах эксплуатации системы SDH выполняются измерения, связанные с анализом работы МВВ.

2 Функциональное тестирование МВВ

2.1 Функциональные тесты МВВ уровней маршрутов

Группы функциональных тестов МВВ уровней маршрутов включают различные методы анализа формирования заголовков маршрутов высокого и низкого уровней.

Как следует из рисунка 1, все измерения уровня маршрутов связаны с формированием виртуальных контейнеров VC – 11, VC – 12, VC – 2, VC – 3, VC – 4.

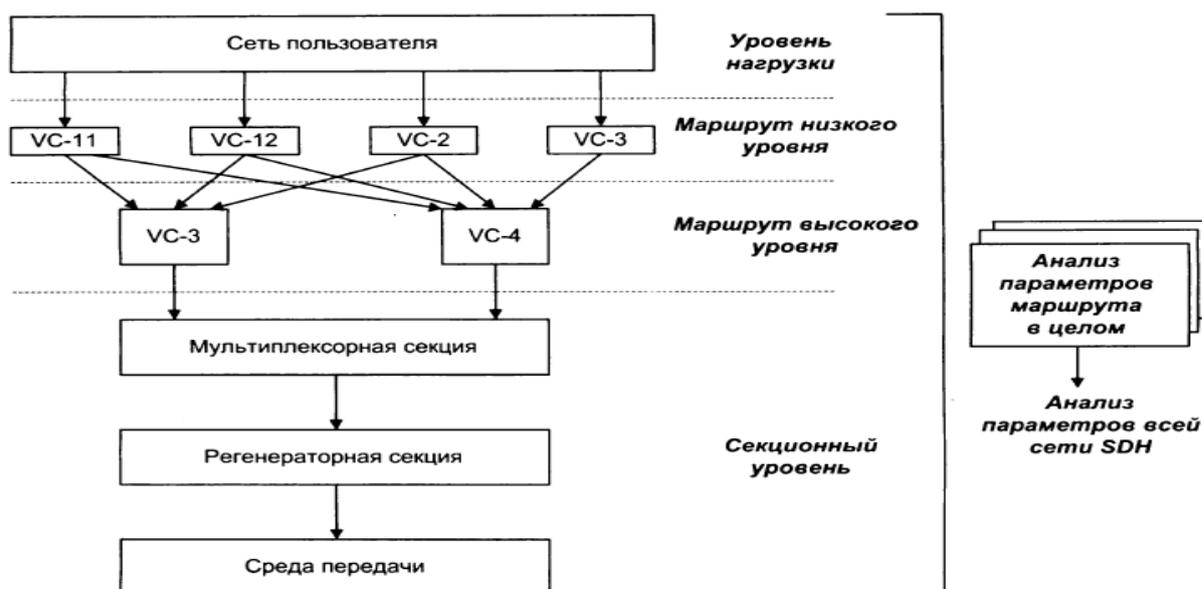


Рисунок 1 – Архитектура системы SDN

Виртуальный контейнер (Virtual Container, VC) – информационная структура, предназначенная для «транспортировки» в сети SDN стандартных цифровых потоков PDH, состоящая из информационной посылки и дополнительных байтов маршрута – трактового заголовка. В зависимости от скорости передачи «транспортируемых» потоков организуются виртуальные контейнеры низкого порядка (LOVC) и высокого порядка (HOVC). Скорости передачи данных для различных типов виртуальных контейнеров представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Типы виртуальных контейнеров и их скорости передачи

Тип виртуального контейнера, VC – n	VC – 11	VC – 12	VC – 2	VC – 3	VC – 4
Скорость, Мбит/с	1,6	2,176	6,78	48,384	149,76

Основным элементом формирования виртуальных контейнеров являются заголовки высокого уровня (НО – РОН) и низкого уровня (ЛО – РОН). Использование того или другого типа заголовка зависит от типа загружаемой нагрузки (загружаются ли потоки E1 или потоки E3/E4).

Основным объектом измерений групп маршрутов высокого и низкого уровня являются заголовки маршрутов.

Функциональные тесты МВВ маршрута высокого уровня включают в себя:

- анализ поля индикатора маршрута J1;
- анализ типа полезной нагрузки и правильности формирования поля C2;

- мониторинг каналов обслуживания F2, F3;
- анализ сверхцикловой структуры в байтах H4.

Структура заголовка маршрута высокого уровня представлена на рисунке 2.

J1	Индикатор маршрута
B3	Мониторинг качества (код ВР-8)
C2	Указатель типа полезной нагрузки
G1	Подтверждение ошибок передачи
F2	Сигналы обслуживания
H4	Индикатор сверхцикла
F3	Сигналы обслуживания
K3	Автоматическое переключение
N1	Мониторинг взаимного соединения (ТСМ)

Рисунок 2 – Структура заголовка маршрута высокого уровня

Необходимо подробнее остановиться на параметрах, подлежащих функциональному тестированию МВВ маршрута высокого уровня.

Поле идентификатора маршрута (J1) передается в 16 – ти последовательных циклах и состоит из 15 – байтовой последовательности идентификаторов маршрута и 1 байта контрольной суммы, служащей для идентификации ошибок в трассе маршрута. Идентификаторы маршрута представляют собой последовательность ASC II – символов в формате, соответствующем ITU – T E.164. Оно используется для того, чтобы принимаемый терминал получал подтверждение о связи с определенным передатчиком.

Указатель типа полезной нагрузки C2 определяет тип полезной нагрузки, передаваемой в контейнере. Значение байта C2 и соответствующие типы нагрузки приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения указателей типа полезной нагрузки C2

Бинарный вид	Шестнадцатеричная система счисления	Значение
0000 0000	00	Контейнер не загружен
0000 0001	01	Контейнер загружен
0000 0010	02	Структура TUG
0000 0011	03	Синхронный TU – n
0000 0100	04	Асинхронная загрузка 34

		или 45 Мбит/с
0001 0010	12	Асинхронная загрузка 140 Мбит/с
0001 0011	13	Загрузка АТМ
0001 0100	14	Загрузка MAN
0001 0101	15	Загрузка FDDI
1111 1110	FE	Тестовый сигнал по Q.181
1111 1111	FF	VC – AIS в случае поддержки TCM

Байты F2 и F3 используются оператором для решения внутренних задач обслуживания системы передачи и образуют выделенный служебный канал.

Байт H4 является указателем и используется при организации сверхциклов SDH, он указывает на номер цикла VC – 2, VC – 3 в сверхцикле TU – 1, TU – 2, соответственно.

Анализ перечисленных полей дает информацию о корректности формирования структуры виртуальных контейнеров верхнего уровня VC – 3 и VC – 4.

Аналогично к функциональным тестам маршрута низкого уровня относятся:

- анализ поля идентификатора маршрута J2;
- анализ информационного поля байтов V5.

Поле идентификатора маршрута J2 по структуре и своему назначению аналогично полю идентификатора маршрута верхнего уровня J1.

Байт V5 несет информацию о контроле четности, индикации ошибок и типе загрузки. Структура байта V5 представлена на рисунке 3.

BIP-2		REI	RFI	L1	L2	L3	RDI
1	2	3	4	Указатель типа нагрузки			
1	2	3	4	5	6	7	8
				0	0	0	Контейнер не загружен
				0	0	1	Контейнер загружен, нагрузка не специфицирована
				0	1	0	Асинхронная загрузка
				0	1	1	Бит-синхронная загрузка
				1	0	0	Байт-синхронная загрузка
				1	1	0	Тестовый сигнал по Q.181
				1	1	1	VC-AIS

Рисунок 3 – Структура байта V5

Назначение полей байта V5: ВР – 2 – контроль четности VC – 12; REI – Remote Error Indication – сообщение подтверждения ошибки ВР – 2 (ошибка удаленного конца); RFI – Remote Fault Indication – неисправность на удаленном конце; Remote Defect Indication – индикация дефекта на удаленном конце – передается в случае потери цикловой синхронизации.

Для организации измерений используется схема, представленная на рисунке 4.



Рисунок 4 – Схема функционального тестирования МВВ уровней маршрутов

В данной схеме от системы управления сетью SDH оператор получает данные о параметрах загрузки и выгрузки потоков PDH тестируемого МВВ, куда включаются данные о типах и параметрах загружаемых потоков (например, загружаются только потоки E1 или поток E4) а также о методе загрузки (асинхронная, синхронная). На основании этих данных анализируется информация заголовков, высокого или низкого уровня, передаваемых в потоке STM – 1. Для проведения измерений анализатор включается в поток без нарушения связи.

В последнее время общей тенденцией в измерительных приборах для анализа параметров сети SDH стало использование графических экранов и средств графического отображения результатов данных. Как видно из рисунка 5, в качестве результата измерений отображаются наименования всех информационных полей заголовков и их содержимое.

Результаты анализа информационного поля индикатора маршрута

			HO-POH	TU	LO-POH
J0	X	X	J1	V1	V5
0	0	0	0	68	84
F1	X	X	B3	V2	J2
0	0	0	28	0	0
H3			C2	V3	N2
0	0	0	2	0	0
H2	H33		G1	V4	K4

J1=0
J2=0

Результаты анализа информационного поля C2

		HO-POH	TU	LO-POH
X		J1	V1	V5
0		0	68	84
X		B3	V2	J2
0		28	0	0
0		C2	V3	N2
0		2	0	0
2	H33	G1	V4	K4
0		0	0	0

C2=2
Структура TUG

Результаты анализа информационного поля H4

AU	H1	Y1	Y2	H2	H1	H2	H31	H32	H33	G1
MS	88	93	93	0	FF	FF	0	0	0	0
	B2	B2	B2	K1			K2			F2
	8F	7C	CA	0	0	0	0	0	0	0
	D4			D5			D6			H4
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	FC

Анализ полей указателей: H4=FC
H1=68
H2=0
H31=H32=H33=0

Результаты анализа информационного поля V5

		TU	LO-POH
J1	V1	V5	
0	68	84	
33	V2	J2	
28	0	0	
C2	V3	N2	
2	0	0	
H1	V4	K4	

V5=84
эквивалентно -
10000100
10 - BIP - 2
0 - REI=0
0 - RFI=0
0 - RDI=0

Рисунок 5 – Результаты функционального тестирования MBW маршрутов высокого и низкого уровней

Результаты анализа поля идентификатора типа нагрузки (C2), представленные на рисунке 5, показывают, что в исследуемом контейнере используется структурирование в виде TUG – наиболее часто встречающийся вариант структуры SDH. Данный вывод сделан на основании таблицы 3.

Результат анализа цикловой структуры H4 представлен вместе с результатами анализа других указателей секционного уровня. Как видно из рисунка 5, H4=FC (16 – ричная система счисления), что означает 252 VC – 12 в составе контейнера VC – 4. Указатель H1=68 (16 – ричная система счисления) показывает, что отображается 104 контейнер VC – 4 в составе STM – 1.

Анализ информационного поля V5 довольно сложный процесс, требующий определенных навыков. Значение V5 представленное в 16 – ричном виде равно 84, что соответствует бинарному 10000100. Далее полученные восемь цифр необходимо преобразовать побитово в соответствии с рисунком 3. В результате видно, что сигналы об ошибках и неисправностях RDI, RFI и REI отсутствуют, форма загрузки потока – асинхронная загрузка.

Стоит сказать, что анализ каналов управления на этапе эксплуатации практически не используется.

2.2 Функциональные тесты МВВ секционного уровня

Функциональные тесты МВВ секционного уровня включают в себя анализ параметров оптического интерфейса и анализ секционного заголовка. Структура секционного заголовка представлена на рисунке 6.

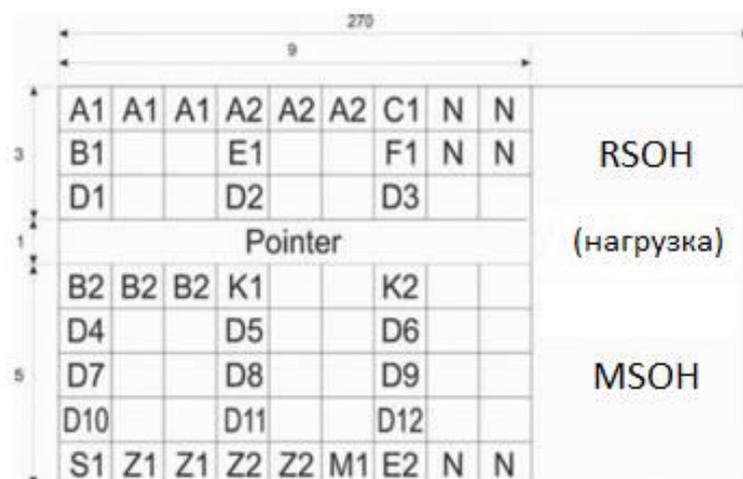


Рисунок 6 – Структура секционного заголовка (SOH)

Рассмотрим более подробно состав заголовка. Назначение представленных на рисунке 6 байтов следующее:

A1, A2 – Сигналы цикловой синхронизации;

D1 – D3 – Канал 192 кбит/с для управления регенерационной секцией;

D4 – D12 – Канал 576 кбит/с для управления мультиплексорной секцией;

C1 – Идентификатор STM – 1;

E1, E2 – Служебные каналы голосовой связи;

F1 – Зарезервирован под задачи создания канала передачи данных управления;

S1 – Индикатор качества синхронизации;

B1 – Контроль четности (VIP – 8);

B2 – Контроль четности (VIP – 24);

M1 – Подтверждение ошибки VIP (FEVE);

K1, K2 – Управление резервным переключением;

Z1, Z2 – Зарезервированы под будущие задачи;

N – Зарезервированы для национального применения;

Остальные байты зарезервированы для будущего использования.

Функциональному тестированию МВВ секционного уровня подлежит лишь подзаголовок мультиплексорной секции MSOH.

Тестирование данного подзаголовка включают в себя простую проверку корректности структуры MSON и не включают отдельные измерения, связанные с анализом каждого информационного поля в составе MSON.

Анализ параметров оптического интерфейса включает измерение следующих параметров оптического линейного сигнала: тип линейного кодирования, частота линейного оптического сигнала и её постоянное отклонение.

Эти параметры измеряются обычно в режиме параллельного подключения анализатора к выходному или входному линейному потоку MBW (рисунок 7).

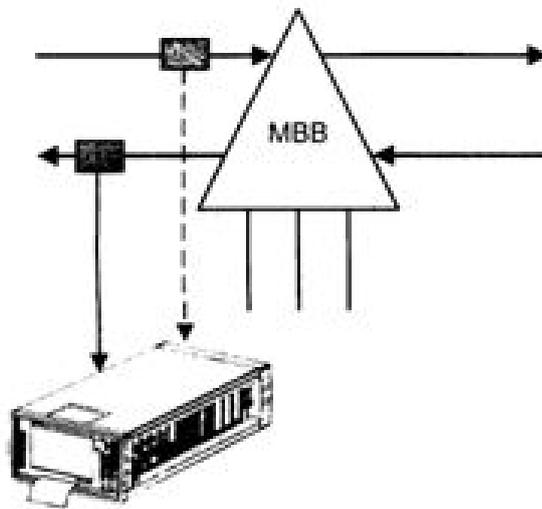


Рисунок 7 – Схема измерения параметров оптического интерфейса

На рисунке 8 показаны возможные результаты измерений физического уровня в виде экранов анализатора Flexacom. На левом экране показаны данные о типе линейного кодирования в оптическом интерфейсе – SM1 (155 Мбит/с). На правом экране показаны результаты анализа частоты линейного сигнала. На экране показана номинальная частота 155520000 Гц, реально измеряемая частота 155523018 Гц, и её отклонение от номинального значения (19,34 ppm). Отклонение выражено в миллионных частях от средней величины. Отдельным информационным полем экрана показано соответствие сдвига частоты линейного сигнала установленному пороговому значению по ITU – T (в данном примере указано соответствие).

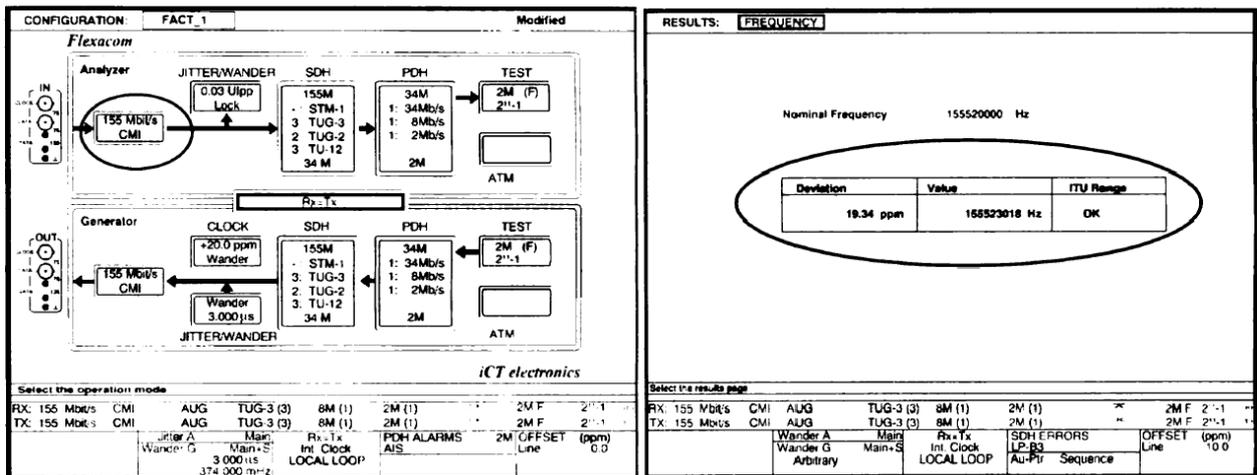


Рисунок 8 – Результаты измерений физического уровня

2.3 Функциональные тесты МВВ уровня нагрузки

Функциональные тесты МВВ уровня нагрузки включают в себя измерения различных параметров ошибок МВВ.

Схемы организации измерений представлены на рисунке 9.

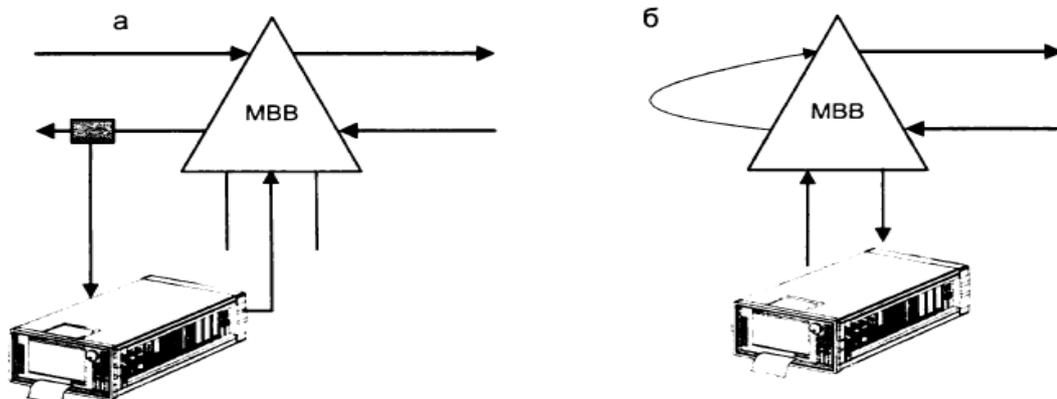


Рисунок 9 – Схемы измерения параметров ошибок МВВ

Измерения параметров ошибки выполняется на всех участках тракта SDH во время приема – сдаточных испытаний системы передачи, а также в процессе эксплуатации для проверки качества трактов цифровой системы передачи. Стоит отметить, что параметры ошибки представляют собой наиболее важный параметр оценки качества любых цифровых систем передачи.

На практике обычно применяются две схемы измерений, касающихся МВВ: схема комбинированного измерения параметров ошибок PDH/SDH (рисунок 9, а) и схема измерения параметров ошибок только на уровне нагрузки МВВ (рисунок 9, б).

В обоих случаях для измерений параметров ошибок выделяется специальный тестовый канал для загрузки псевдослучайных последовательностей (ПСП) (обычно канал E1, поскольку это минимально возможная скорость загрузки/выгрузки). Анализатор выступает как генератор нагрузки PDH и обеспечивает загрузку в МВВ тестового сигнала, содержащего ПСП. Для проведения комбинированных измерений PDH/SDH анализатор подключается параллельно через оптический разветвитель и обеспечивает выделение тестового сигнала с ПСП из потока STM – N. Сравнение двух сигналов дает возможность обнаружить ошибки передачи.

Для проведения измерений только на уровне нагрузки по заданному тестовому каналу с ПСП в сети SDH должен быть сделан шлейф (рисунок 9, б). Анализатор в этом случае выступает как генератор и анализатор PDH и обеспечивает измерение параметров ошибок.

Перед началом проведения измерений необходимо настроить пороговые величины параметров для заданного МВВ в виде экранного меню настроек анализатора Flexcom (рисунок 10).

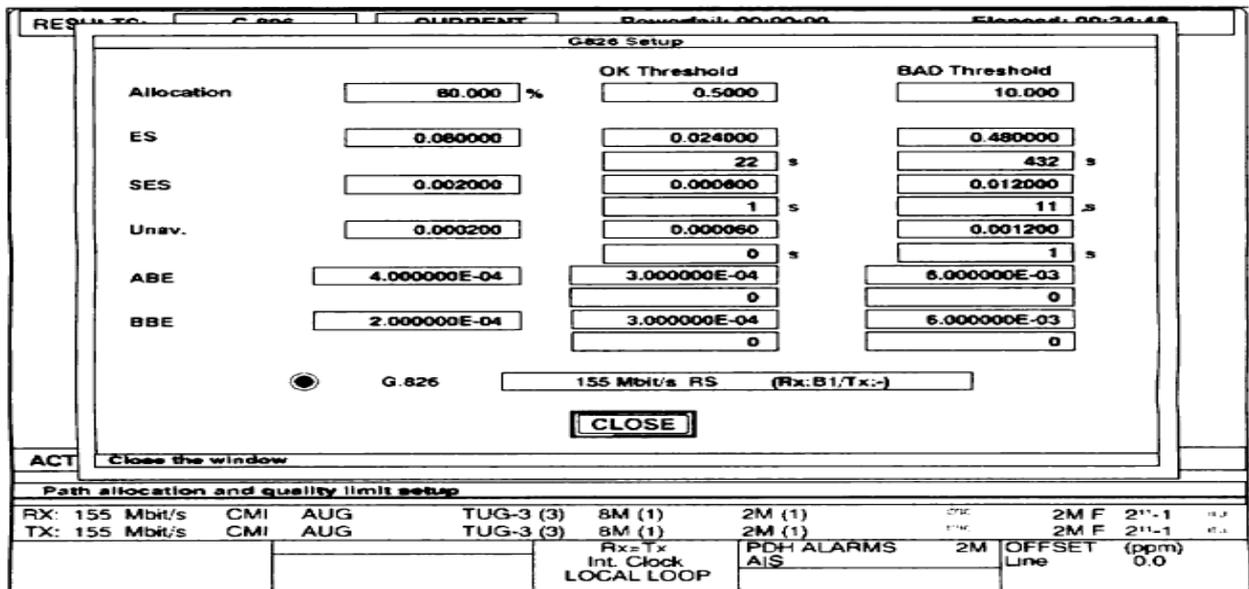


Рисунок 10 – Экранное меню настроек анализатора Flexcom

Суть процесса настройки анализатора состоит в установке абсолютных (в секундах) и относительных (в %) параметров в соответствии с двумя порогами качества: приемлемое качество (OK) и плохое качество (BAD).

В результате проведения измерений основных параметров (UAS, ES, SES, ABE, BBE) оператор сразу видит, приемлемо ли качество

измеряемого цифрового канала. Подробнее хотелось бы остановиться на данных измеряемых параметрах.

UAS (unavailability seconds) – время неготовности канала, которое начинает отчет с момента обнаружения 10 последовательных интервалов SES.

SES (several errors second) – количество секунд, пораженных ошибками, интервал времени, измеряемый в секундах, пораженный ошибками несколько раз. Подсчет SES производится только во время готовности канала.

ES (errors second) – интервал времени поражения всеми видами ошибок в канале, находящемся в состоянии готовности.

BBE (background block error) – блок с фоновыми ошибками, не являющийся частью SES, применяется при анализе ошибок по блокам. Фоновая ошибка – ошибка вследствие действия стационарного шума в канале.

ABE (availability block error) – отношение числа блоков с фоновыми ошибками ко всему количеству блоков в течении времени готовности канала.

Пороговые значения определяются рабочими параметрами MBV и условиями его работы и обычно задаются оценочно оператором.

В итоге измерений получаются результаты, пример которых представлен на рисунке 11.

RESULTS:		G.826	CURRENT	Powerfail:	00:00:00	Elapsed	00:02:41
Result	Path	ITU		[SETUP]			
Check over	0000 blocks/s	155 Mbit/s RS (Rx:B1/Tx:-)					
G.826 Analysis: Near end							
	Count	Rate	OK/deg/bad				
ES	10	0.072464	DEGRADED				
SES	10	0.072464	BAD				
BBE	0	0.00000E+00	OK				
US	23	0.142857	BAD				
ABE	61029	ABER	5.5280E-02	BAD			
G.826 Analysis: Far end							
	Count	Rate	OK/deg/bad				
ES	0	0.000000	OK				
SES	0	0.000000	OK				
BBE	0	0.00000E-00	OK				
US	0	0.142857	BAD				
ABE	0	ABER	0.0000E-00	OK			
ET	00:02:41	Path	US	23			
ACTION: PDH ALARMS [AIS] OVER [2 Mbit/s]							
Select the PDH alarm to be generated							
RX: 155 Mbit/s	CMI	AUG	TUG-3 (3)	8M (1)	2M (1)	2M F	2 ¹¹⁻¹
TX: 155 Mbit/s	CMI	AUG	TUG-3 (3)	8M (1)	2M (1)	2M F	2 ¹¹⁻¹
			Rx=Tx	PDH ALARMS	2M	OFFSET	(ppm)
			Int. Clock	AIS	Line		0.0
			LOCAL LOOP				

Рисунок 11 – Результаты измерений по параметру ошибки

На рисунке 11 представлен результат измерений по параметрам ошибки. Результаты измерений соотносятся с установками теста, изображенными на рисунке 10. С учётом заданных порогов параметры SES, UAS и ABE оказываются не в норме, тогда как параметр BBE – в норме. Параметр ES находится между приемлемым качеством и плохим и обозначен на экране как параметр деградации качества (DEGRADED). На удаленном конце не в норме только параметр готовности маршрута (US). Из полученного результата можно сделать вывод, что тестируемый маршрут нестабилен.

2.4 Функциональные тесты MBV уровня маршрута

Переходя к функциональным тестам MBV уровня маршрута, необходимо отметить, что эта группа измерений представляет собой расширение описанных выше функциональных тестов MBV на пару MBV. Функциональные тесты MBV уровня маршрута предусматривают:

- анализ корректности передачи информационных полей сформированного модуля STM – 1;
- анализ процедур демультимплексирования на удаленном конце.

Для проведения указанных измерений в точках генерации STM – 1 и приема STM – 1, ограничивающих тестируемый маршрут, через оптические разветвители подключаются анализаторы SDH (рисунок 12).

Каждый анализатор используется для получения данных о составе информационных полей заголовков POH и SOH. Затем данные сравниваются и на основании такого сравнения делается вывод о том, какие изменения в параметры заголовков вносит маршрут, а, следовательно, как это повлияет на параметры демультимплексирования потока.

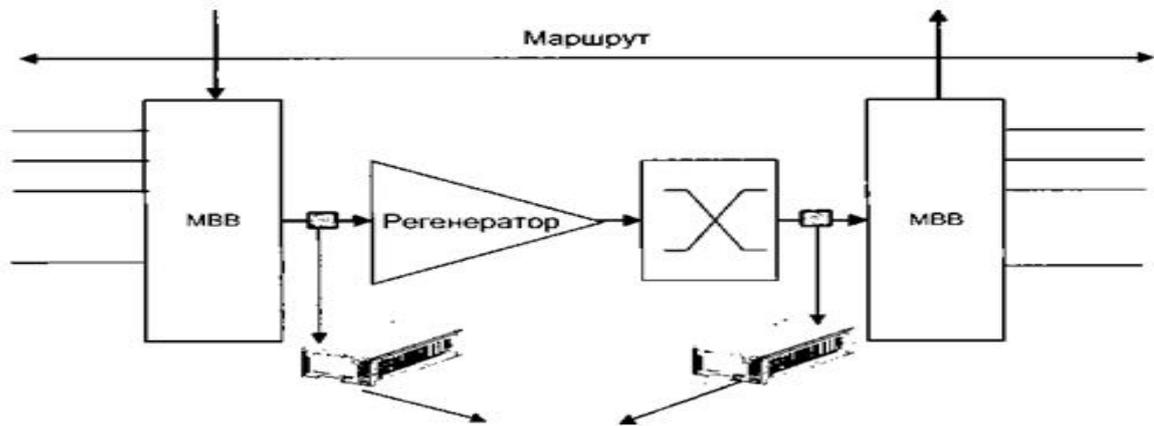


Рисунок 12 – Функциональные тесты МВВ уровня маршрута
3 Стрессовое тестирование МВВ

Стрессовым тестированием называется изучение процессов на участках сетей связи и поведение компонентов сети по схеме «воздействие – отклик». Любые измерения этих групп характеризуются двумя группами параметров: параметрами воздействия и параметрами отклика системы на оказываемое воздействие.

Рассматривая стрессовое тестирование МВВ, можно выделить следующие группы измерений: тестирование на уровне маршрутов высокого и низкого уровней, секционного уровня, на уровне нагрузки, на уровне маршрута.

Из перечисленных групп первые три относятся к анализу конкретного МВВ, последняя является расширением методологии первых трех на пару МВВ.

Рассмотрим первые три группы. Сразу следует отметить, что для всех измерений перечисленных групп существует две возможные схемы организации измерений, представленные схематически на рисунке 13.

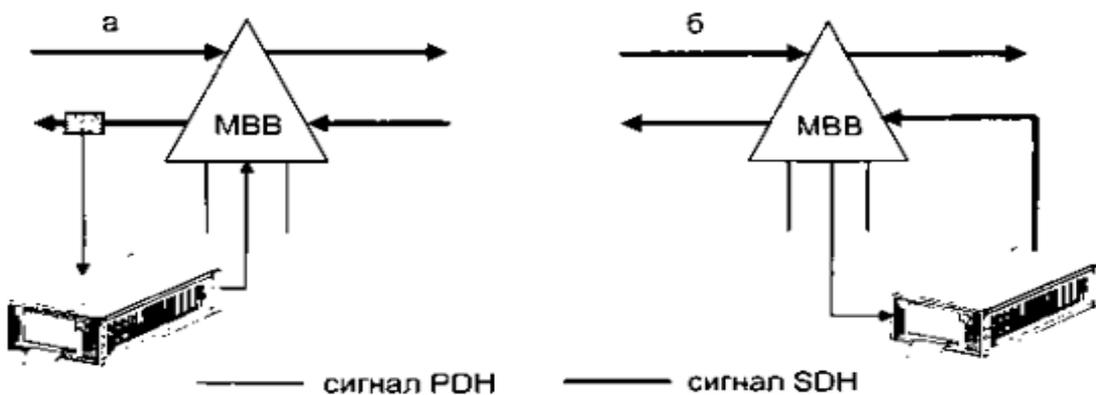


Рисунок 13 – Схемы организации стрессового тестирования МВВ

Схемы отличаются по тому, подвергается ли стрессовому тестированию процедура мультиплексирования или демультимплексирования.

Для проведения стрессового тестирования процедуры мультиплексирования анализатор подключают к МВВ, как показано на рисунке 13, а. Стрессовое воздействие осуществляется через загружаемый поток PDH, в качестве отклика рассматриваются параметры транспортного модуля STM – 1. Для этого анализатор подключается к потоку STM – 1 через оптический разветвитель без нарушения связи.

Стрессовое воздействие на процедуру демультимплексирования предусматривает внесение неисправностей через параметры потока STM – 1 и анализ в качестве параметров отклика параметров выгружаемых потоков PDH. Для этого анализатор должен подключаться к МВВ непосредственно по потоку STM – 1 (рисунок 13, б), т.е. МВВ должен на время проведения измерений отключаться от системы передачи. Эта особенность измерений приводит к тому, что стрессовое тестирование нарушает работу системы SDH и не может быть рекомендовано для эксплуатационных измерений.

3.1 Стрессовое тестирование МВВ на уровне маршрутов высокого и низкого уровней

Основными параметрами уровня маршрутов является содержимое информационных полей LO – РОН и НО – РОН. Для стрессового тестирования этих групп возможны два направления измерений:

– как влияют параметры LO – РОН и НО – РОН на параметры нагрузки (рисунок 13, б);

– как параметры нагрузки влияют на содержимое информационных полей LO–РОН и НО–РОН (рисунок 13, а).

Стрессовое тестирование не стандартизировано в существующих методиках и предоставляет оператору широкий спектр действия. Учитывая это, сформулированы параметры воздействия и соответствующего отклика с указанием схемы организации измерений по рисунку 13 (а или б соответственно). Результаты такого анализа представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры воздействия и отклика стрессового тестирования маршрутов высокого и низкого уровней

Параметры воздействия	Параметры отклика	Схема
Измерение состава заголовка маршрута	Реакция системы управления – неисправность маршрута	б
Измерение состава поля С	Реакция системы управления	б
Внесение ошибки четности	Реакция системы управления, BER	б
Внесение сигналов неисправности REI, RFI, RDI	Реакция системы управления, параметры ошибок на выходе (BER), готовности канала (AU, UAS)	б
Внесение рассинхронизации по линейному сигналу	Джиттер на выходе, рассинхронизация на выходе, BER, проскальзывания, параметры готовности канала (AU, UAS), реакция система управления	б
Обрыв сигнала (AIS) по SDH	Реакция системы управления, AU, UAS, BER	б
Смещение указателей	Джиттер на выходе, BER, проскальзывания	б
Рассинхронизация загружаемого потока	Смещение указателей, BER	а
Внесение ошибки цикловой синхронизации	Реакция системы управления, BER, сигналы о неисправности	а
Обрыв сигнала по PDH	Реакция системы управления, BER	а
Внесение джиттера по PDH	Смещение указателей, BER, параметры готовности канала (AU, UAS)	а

3.2 Стрессовое тестирование MBW на секционном уровне

Стрессовое тестирование на секционном уровне связано с имитацией неисправности информационных полей заголовка SON и анализа отклика

на эти воздействия. Следовательно, стрессовое тестирование на секционном уровне во многом аналогично стрессовому тестированию уровня маршрутов, рассмотренному выше.

Таким образом для стрессового тестирования этой группы также возможны два направления измерений:

- анализ влияния параметров SOH на параметры нагрузки (рисунок 13, б);
- анализ влияния параметров нагрузки на содержимое информационных полей SOH (рисунок 13, а).

Так же как и для уровня маршрутов можно сформировать таблицу воздействий и откликов.

Таблица 5 – Параметры воздействия и отклика стрессового тестирования секционного уровня

Параметры воздействия	Параметры отклика	Схема
Измерение состава заголовка MSON	Реакция системы управления – неисправность секционного уровня	б
Внесение ошибки четности	Реакция системы управления, BER	б
Внесение сигналов неисправности REI, RFI,	Реакция системы управления, параметры ошибок на выходе (BER), готовности канала (AU, UAS)	б
Внесение рассинхронизации по линейному сигналу	Джиттер на выходе, рассинхронизация на выходе, BER, проскальзывания, параметры готовности канала (AU, UAS), реакция система управления	б
Смещение указателей AUG	Джиттер на выходе, BER, проскальзывания	б
Внесение джиттера по PDH	Смещение указателей, AU, BER, параметры готовности (AS, UAS)	а

3.3 Стрессовое тестирование МВВ на уровне нагрузки и маршрута

Стрессовое тестирование МВВ на уровне нагрузки и маршрута может выполняться в двух направлениях: влияние параметров нагрузки на параметры синхронного транспортного модуля (STM) и влияние параметров нагрузки на одном конце маршрута на параметры в другой конце.

Схема стрессового тестирования по нагрузке предусматривает использование двух анализаторов PDH/SDH, один из которых работает в режиме генерации нагрузки PDH и внесения различных воздействий, а второй используется для анализа отклика системы передачи на уровне нагрузки и мониторинга параметров потока STM и анализа параметров нагрузки. Схема стрессового тестирования по нагрузке представлена на рисунке 14.

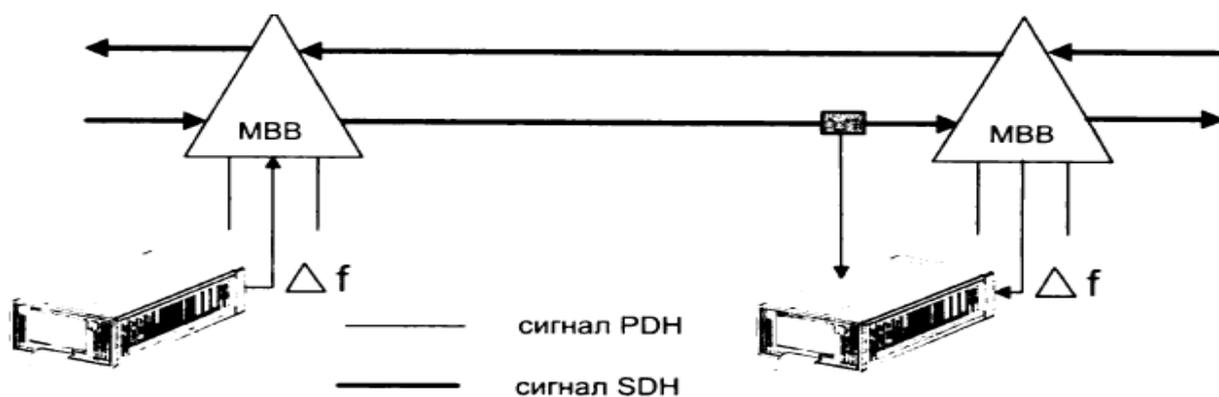


Рисунок 14 – Схема стрессового тестирования по нагрузке на уровне маршрута

Предлагаемая схема может иметь различные варианты. Например, можно для измерений устанавливать шлейф по сети SDH и проводить измерения по шлейфу с использованием одного анализатора. В качестве измерительного прибора могут использоваться не только комбинированные анализаторы PDH/SDH, но и более дешевые анализаторы PDH, а также анализаторы ИКМ в случае, если измерения относятся только к МВВ с загрузкой потоков E1. В каждом из перечисленных вариантов описываемая схема упрощается, а перечень измеряемых параметров уменьшается. Например, при организации измерений с использованием только анализаторов PDH невозможно осуществлять в процессе измерений мониторинг параметров потока STM.

Использование в схеме анализаторов ИКМ позволяет проводить стрессовое тестирование только на уровне загрузки и выгрузки потоков E1. Часто это оказывается достаточным, поскольку загрузка/выгрузка потоков E1 наиболее часто используется в реальных сетях, однако такая схема очевидно не покрывает всех задач стрессового тестирования уровня нагрузки.

Стрессовое тестирование на уровне маршрута выполняется в режиме генерации/анализа потоков PDH, загружаемых в систему SDH.

Параметрами воздействия могут быть: внесение битовой и цикловой ошибок, имитация низкого качества канала (высокий процент ошибок во входящем сигнале), имитация нарушений в цикловой структуре входящего сигнала, внесение сдвига по частоте входящего сигнала (для реализации таких измерений анализатор обычно синхронизируется от мультиплексора для внесения определенного сдвига по частоте), внесение джиттера, внесение ослабления цифрового сигнала по уровню, имитация различных сигналов о неисправности в системах PDH.

Параметрами измеряемого отклика являются: анализ работы световой индикации мультиплексора, его самодиагностики, выходных сигналов индикации неисправностей, выходной параметр ошибки (BER), последовательности ошибок (SES), распределение ошибок, получаемое анализом гистограмм и хронограмм, джиттер на выходе, амплитуда передаваемого сигнала, анализ принимаемых сигналов о неисправностях в системах PDH.

4 Домашнее задание

1. Изучите по конспекту лекций и литературе разделы о проведении функционального и стрессового тестирования мультиплексоров ввода – вывода:

– Бакланов, И. Г. Технологии измерений первичной сети. Часть 1. Системы E1, PDH, SDH. [Текст]/ И. Г. Бакланов – Москва: Эко – Трендз, 2000. С. 95 – 110.

2. Подготовьте доклад на основе изученного материала.

3. Ответьте на контрольные вопросы

4. Ознакомьтесь с дополнительной литературой по данной теме.

5 Контрольные вопросы

1. Какова классификация измерений технологии SDN как многомерного объекта?
2. Дайте определения функционального и стрессового тестирования?
3. Чем обусловлено большое количество измерений мультиплексоров ввода – вывода?
4. Что представляют собой функциональные тесты МВВ маршрута высокого уровня и низкого уровня?
5. Что является результатом функционального тестирования МВВ маршрута высокого уровня и низкого уровня?
6. Какие операции включает в себя функциональное тестирование МВВ секционного уровня?
7. Измерение каких параметров включает в себя анализ параметров оптического интерфейса?
8. Как называются схемы измерений функционального тестирования МВВ уровня нагрузки?
9. Что предусматривают функциональные тесты МВВ уровня маршрута?
10. Какие направления измерений подразумевает стрессовое тестирование на уровне маршрутов высокого и низкого уровней?

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
О.Г. Локтионова
« 8 » 08 2023 г.



ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОШИБОК И ФАЗОВОГО ДРОЖАНИЯ

Методические указания
по выполнению практической работы
для студентов, обучающихся по специальности
10.05.02 «Информационная безопасность
телекоммуникационных систем»
по дисциплине «Измерения в телекоммуникационных системах»

Курск 2023

УДК 621.39

Составители: В.Г. Довбня, Д.С. Коптев

Рецензент:

Доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий
кафедрой космического приборостроения и систем связи

В. Г. Андронов

Измерение коэффициента ошибок и фазового дрожания:
методические указания по выполнению практической работы / Юго-Зап.
гос. ун-т; сост.: В.Г. Довбня, Д.С. Коптев. – Курск, 2023. – 13 с.

Методические указания по выполнению практической работы содержат все необходимые теоретические сведения для изучения теоретических основ методов измерения коэффициента ошибок и фазового дрожания в цифровых системах передачи, а также список контрольных вопросов для самопроверки изучаемого материала.

Методические указания соответствуют учебному плану по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», а также рабочей программе дисциплины «Измерения в телекоммуникационных системах».

Предназначены для студентов, обучающихся по специальности 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», очной формы обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 08.08.2023. Формат 60x84/16.
Усл. печ. л. 0,755. Уч.-изд. л. 0,684. Тираж 100 экз. Заказ. 803. Бесплатно
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

1 Цель практической работы

Изучение методики измерения коэффициента ошибок и фазового дрожания в цифровых сетях связи

2 Ошибки по битам и их влияние на параметры цифровой передачи

При передаче цифрового сигнала по ЦСП возникают ошибки, в результате которых вместо информационной 1 может быть принят 0, и наоборот. В ЦСП предъявляются жесткие требования к вероятности ошибок $P_{\text{ош}}$. Известно, что при вероятности $P_{\text{ош}}=10^{-8}$ ухудшение качества речевых сигналов трудно обнаружить на слух, при $P_{\text{ош}}=10^{-5}$ не возникает серьезного ухудшения качества речи. Значение $P_{\text{ош}}=10^{-3}$ рассматривается как аварийное состояние ЦСП. Соответственно для каналов ТЧ номинальной цепи ЦСП протяженностью 2500 км можно считать допустимым вероятностью ошибок $P_{\text{ош}}=10^{-6}$. Так как ошибки, возникающие на одном регенерационном участке, не зависят от ошибок, возникающих на других участках, то результирующая вероятность ошибок всей ЦСП равна сумме вероятностей на отдельных участках, и значение последней можно определить по формуле $l \cdot 10^{-6}/2500$, где $l = 2 \dots 10$ км — длина регенерационного участка. В результате допустимое значение вероятности ошибок на регенерационном участке имеет порядок 10^{-10} . В системах передачи данных эти требования еще жестче, $P_{\text{ош}}=10^{-12}$ и менее. Таким образом, требуемый диапазон определяемых значений вероятности ошибок составляет $10^{-3} \dots 10^{-12}$

Качество цифрового тракта по уровню ошибок делят на три категории:

1. Нормальное – $BER < 10^{-6}$;
2. Пониженное – $10^{-6} < ber < 10^{-3}$ (предаварийное состояние);
3. Неприемлемое – $BER > 10^{-3}$ (аварийное состояние).

Причинами возникновения ошибок при передаче цифрового сигнала являются наряду с его собственными искажениями шумы и помехи различного происхождения (тепловые шумы, межсимвольные помехи, помехи от взаимных влияний, импульсные помехи, возникающие в различных узлах АТС и др.), а также фазовое дрожание сигнала, проявляющееся в некотором смещении положения принимаемых импульсов относительно синхроимпульсов. Вид преобладающих помех в

значительной мере зависит от вида используемой линии связи. Фазовое дрожание обусловлено не идеальностью синхронизации регенераторов и приводит к смещению момента принятия решения (момента отсчета) в решающем устройстве регенератора от оптимального значения. Очевидно, что вероятность ошибок зависит от соотношения сигнал-шум на входе регенератора, и при известной зависимости, измеряя последнее, можно косвенно оценить значение вероятности ошибок.

2 Измерение коэффициента ошибок

В общем случае КО определяется отношением числа элементов цифрового сигнала, принятых с ошибками к общему числу элементов, принятых в течение времени измерения:

$$K_{\text{ош}} = N_{\text{ош}} / N = N_{\text{ош}} / VT \quad (1)$$

где $N_{\text{ош}}$ – число ошибочно принятых элементов; N – общее число принятых элементов; V – скорость передачи; T – время измерения.

Элементом цифрового сигнала обычно является бит (двоичная единица измерения), и тогда КО является оценкой вероятности ошибок в приеме бита. В то же время часто информация передается в виде последовательности символов, каждый из которых состоит из нескольких бит (например, восьми), либо блоками, содержащими сотни и тысячи бит. Для большинства систем наличие одной или нескольких ошибок в неизвестном разряде символа или блока делает его бесполезным или ненадежным. В этом случае в качестве элемента цифрового сигнала можно рассматривать соответственно символ или блок.

Так как КО является лишь оценкой вероятности ошибок, необходимо знать качество этой оценки. Его можно характеризовать средним квадратическим значением σ абсолютной погрешности этой оценки

$$\sigma = \left| \frac{K_{\text{ош}}(1 - K_{\text{ош}})}{N} \right|^{1/2} \approx \left(\frac{K_{\text{ош}}}{N} \right)^{1/2} = \frac{K_{\text{ош}}}{\sqrt{N_{\text{ош}}}}, \quad (2)$$

и относительным значением погрешности δ для заданной доверительной вероятности P_d :

$$\delta = t_p \sigma / K_{\text{ош}} = t_p / \sqrt{N_{\text{ош}}}, \quad (3)$$

где t_p – коэффициент, определяемый через интеграл вероятностей для заданной доверительной вероятности. Из этого выражения можно определить число ошибок $N_{\text{ош}}$, которое должно быть сосчитано в процессе измерения, чтобы с заданной доверительной вероятностью P_d

методическая погрешность оценки вероятности ошибок не превышала заданного значения δ :

$$N_{\text{ош}} = (t_p / \delta)^2. \quad (4)$$

Например, при $P_d = 0,95$ значение $t_p=1,96$, и для получения относительной погрешности $\delta = 0,2$ заданное число ошибок $N_{\text{ош}}=96$, а для $\delta=0,5$ $N_{\text{ош}}=16$.

Из приведенных выражений можно также оценить требуемое время измерения: $T = N_{\text{ош}}/BK_{\text{ош}}$. Например, при $B = 64$ кбит/с и требуемом числе ошибок $N_{\text{ош}} = 10 \dots 100$ для $K_{\text{ош}}=10^{-6}$ получим требуемое время измерения 2,5... 25 мин, а для $K_{\text{ош}}=10^{-10}$ даже при больших скоростях требуемое время измерения может достигать многих десятков часов. Это обстоятельство определяет главнейший недостаток измерителей коэффициента ошибок (ИКО).

Измерение КО дает сведения лишь о том, какое число ошибок может иметь место за определенное время измерения, но не позволяет судить о распределении ошибок во времени. Для определения последнего можно измерять интервалы времени между моментами появления соседних ошибок. На основании множества таких измерений можно построить гистограммы, отражающие распределение интервалов времени, свободных от ошибок, можно определить среднее значение такого интервала времени и др.

Наряду с исследованием распределения во времени одиночных ошибок ведется изучение вопросов группирования соседних или близких по времени ошибок в пакеты и изучение статистики таких пакетов. Пакет ошибок определяется как совокупность некоторого числа бит, начинающаяся и заканчивающаяся ошибочно принятыми битами и отделенная от соседней защитным интервалом длиной не менее n бит. Ошибки, расположенные ближе чем на n бит, объединяются в один пакет. В соответствии с рекомендациями МЭС-Т и требованиями ГОСТ 26783—85 «Измерители коэффициентов ошибок в системах передачи с ВРК. Типы и основные параметры» для ИКО устанавливаются следующие измеряемые параметры: коэффициент ошибок $K_{\text{ош}}$; число ошибок $N_{\text{ош}}$ за регламентированный интервал времени измерения $T_{\text{изм}} = 10^n$, где $n = -2, -1, 0, 1, 2, 3$; интервал времени измерения T_N , за который накопилось регламентированное число ошибок $N_{\text{ош}}$; процент временных интервалов $\delta_T\%$, в течение которых КО не превышает допустимого значения $\delta_T = 100 \sum T_i / T$, где T_i — временной интервал, в течение которого КО не превысил допустимого значения, T — общее время измерения; число $m_{N=0}$

односекундных интервалов, в течение которых полностью отсутствуют ошибки; число $m_{N \neq 0}$ односекундных интервалов, в течение которых присутствуют ошибки.

Из рассмотрения этих параметров видно, что их измерение связано с обнаружением и счетом числа ошибок, а также с измерением определенных временных интервалов. По методу измерения КО ГОСТ устанавливает два типа ИКО:

ИКО-1 – средства измерения КО, основанные на методе обнаружения ошибок путем сравнения единичных элементов принимаемого измерительного псевдослучайного сигнала с переданным (эталонных сигналов);

ИКО-2 – основанные на методе обнаружения ошибок в рабочем цифровом сигнале электросвязи путем определения нарушений алгоритма формирования кода в принятом цифровом сигнале (запрещенных комбинаций). Принцип работы такого прибора (ИКО-2) основан на определении числа импульсов, нарушающих структуру линейного кода. Число нарушений, подсчитанное относительно общего числа импульсов, прошедших линейный тракт, определяет коэффициент ошибки.

Очевидно, что ИКО-1, использующие специальный измерительный сигнал, требуют перерыва связи, в то время как ИКО-2 позволяют измерять КО без перерыва связи и могут использоваться для непрерывного контроля качества связи. С другой стороны, ИКО-1 позволяют измерять КО для отдельных компонентов ЦСП при их изготовлении и в процессе строительства ЦСП.

Существует 2 основных метода:

1. На принимающем конце задается фиксированное число наблюдаемых бит и регистрируется соответствующее число бит с ошибками.

Например, если число ошибочно принятых бит оказалось равным 20, а заданное общее число принимаемых бит – 10^6 , то коэффициент ошибок составит $20/10^6 = 20 \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-5}$.

Достоинством такого подхода является точно известное время измерения, а недостатком – невысокая надежность измерения при малом числе ошибок.

2. Время измерений определяется заданным числом ошибок. Измерение длится до тех пор, пока, например, не будет зафиксировано 100 ошибок. Затем на основании соответствующего числа битов данных вычисляется коэффициент ошибок.

Его недостаток заключается в том, что неизвестно время измерений, которое при малых коэффициентах ошибок может оказаться очень большим. Кроме того, вполне возможно, что счетчик бит данных заполнится полностью, и измерения прекратятся. Поэтому такой способ используется редко.

3 Измерение фазового дрожания

Как уже отмечалось, фазовое дрожание является важным параметром, определяющим вероятность ошибок ЦСП. Возникновение фазового дрожания сигнала регенератора обусловлено тем, что сам синхронизирующий сигнал, задающий моменты отсчета в решающем устройстве регенератора, вырабатывается из приходящего сигнала, и поэтому его параметры зависят от структуры сигнала, его искажений, шумов и помех, а также инструментальных погрешностей отдельных узлов регенератора. Все это приводит к случайным изменениям периода синхронизирующего сигнала около своего номинального значения, а соответственно ведет и к дрожанию выходного сигнала регенератора. Благодаря узкой полосе пропускания резонансного контура, используемого для выделения тактовой частоты синхронизирующего сигнала, в регенераторе происходит подавление высокочастотных (>10 кГц) составляющих фазового дрожания. В то же время низкочастотные составляющие (<10 кГц) в процессе многократной регенерации накапливаются. В качестве основных характеристик фазового дрожания обычно используют его среднеквадратическое и пиковое значения, полагая закон распределения нормальным.

Известны различные методы измерения фазового дрожания. Оно может быть измерено осциллографическим методом по глаз-диаграмме. В целом сложность решения задачи измерения фазового дрожания существенно зависит от наличия или отсутствия в месте измерения опорного синхронизирующего сигнала тактовой частоты, относительно которого и измеряется фазовое дрожание. При его наличии решение задачи существенно упрощается. При его отсутствии опорный сигнал формируют из самого исследуемого сигнала. Для этого может использоваться принцип выделения тактовой частоты, применяемый в регенераторах. Однако чаще используются автономные генераторы тактовой частоты с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ) на основе информации, извлекаемой из исследуемого сигнала.

По методу измерения фазового дрожания можно выделить методы:

1. Осциллографический метод;
2. Метод с использованием фазового детектора (ФД);
3. Метод, основанный на преобразовании фазового сдвига в импульсы напряжения с амплитудой, пропорциональной этому сдвигу.

Метод измерения с использованием осциллографа имеет несколько ограничений. Во-первых, максимальная амплитуда дрожания фазы, которая может быть измерена, ограничена 1 ЕИ. Во-вторых, из-за высокого уровня собственных шумов осциллографа этот метод обладает низкой чувствительностью. Кроме этого, данный метод не дает никакой информации относительно спектральных характеристик или характера изменения дрожания фазы.

Многие ограничения схемы измерения дрожания фазы с помощью осциллографа могут быть преодолены в схеме с использованием фазового детектора, который сравнивает фазу восстановленного тактового сигнала тестируемого устройства или оборудования со свободным от дрожания фазы источником тактового сигнала. В этом случае напряжение на выходе фазового детектора пропорционально дрожанию фазы сигнала с восстановленной тактовой частотой, причем диапазон метода фазового детектора может быть расширен за пределы 1 ЕИ с использованием делителя частоты.

На рисунке 1 приведена структурная схема прибора с использованием внешнего опорного сигнала тактовой частоты f_T , выполненная на фазовом детекторе. В качестве фазового детектора используется логический сумматор по модулю два (устройство исключающего ИЛИ).

Исследуемый сигнал S через входное устройство, а опорный сигнал через устройство регулируемой задержки поступают на фазовый детектор, с выхода которого получая импульсную последовательность с длительностью импульсов, пропорциональной относительным фазовым сдвигам обоих сигналов.

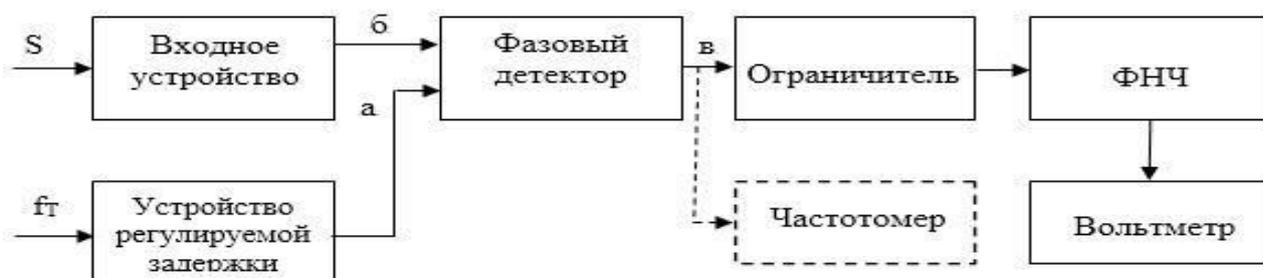


Рисунок 1 – Структурная схема прибора с использованием внешнего опорного сигнала тактовой частоты f_T , выполненная на фазовом детекторе

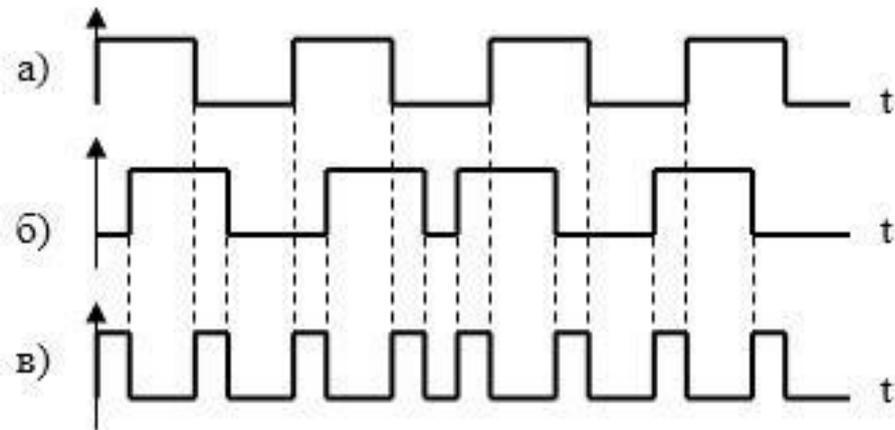


Рисунок 2 – Диаграмма, иллюстрирующая работу прибора с использованием внешнего опорного сигнала тактовой частоты f_T , выполненная на фазовом детекторе.

Постоянная составляющая, выделяемая фильтром нижних частот (ФНЧ), после стабилизации амплитуды импульсов в ограничителе измеряется вольтметром постоянного тока. Показания вольтметра пропорциональны среднему значению фазового дрожания.

Наряду с вольтметром для измерения среднего значения фазового дрожания можно использовать быстродействующие цифровые измерители временных интервалов (ЦИВИ), в частности цифровые частотомеры (на рис. 1 показано штриховой линией) в режиме измерения длительности импульсов с усреднением за n импульсов. При погрешности дискретизации ± 100 нс и $n=10^4$ результирующая погрешность из-за дискретизации уменьшается $\sqrt{n} = 100$ раз, т. е. до ± 1 нс.

Устройство регулируемой задержки позволяет компенсировать постоянную составляющую фазового дрожания. Критерием его настройки является минимум показаний вольтметра. В этом случае показания будут пропорциональны среднему значению модуля фазового дрожания, т. е. среднему арифметическому значению E случайной величины фазового дрожания. Для нормального закона распределения фазового дрожания его среднее квадратическое значение $\sigma = E\sqrt{\pi/2}$, так что шкала вольтметра (ЦИВИ) может быть проградуирована непосредственно в средних квадратических значениях фазового дрожания.

Для калибровки прибора следует подать на оба входа опорный сигнал и, установив определенное время задержки, регулировкой уровня ограничения добиться нулевых показаний вольтметра.

Возможны и другие способы измерения среднего квадратического значения фазового дрожания, основанные на предварительном

преобразовании длительности импульсов с ФД в пропорциональное напряжение, которое может быть усилено. При его измерении квадратичным вольтметром получим среднее квадратическое значение фазового дрожания, а при измерении пиковым вольтметром — пиковое значение.

На рисунке 3 приведена структурная схема, в которой имеется внутренний генератор опорного сигнала с ФАПЧ, управляемый напряжением, поступающим с выхода фазового детектора через узкополосный ($f_{гр} < 10$ Гц) ФНЧ. В этом случае фазовый детектор усложняется, так как для работы ФАПЧ генератора необходимо обеспечить на его выходе разную полярность импульсов в зависимости от знака фазового сдвига.

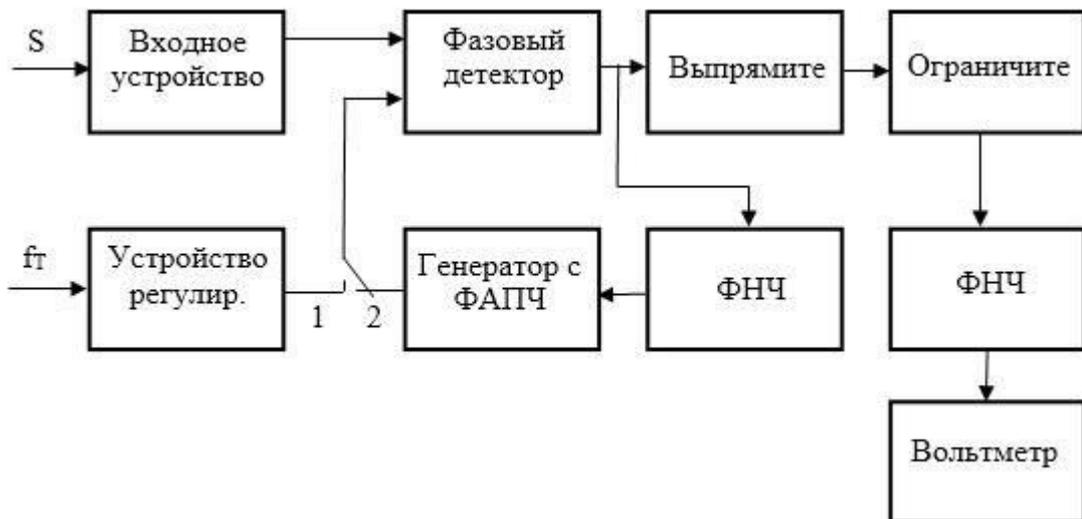


Рисунок 3 – Структурная схема прибора с внутренним генератором опорного сигнала с ФАПЧ, управляемым напряжением

Фазовая автоподстройка частоты позволяет автоматически компенсировать постоянную составляющую фазового дрожания на выходе фазового детектора. При этом, поскольку импульсы на выходе последнего в отличие от предыдущего случая разнополярные, то перед ограничителем включен выпрямитель.

Для калибровки прибора необходимо разомкнуть цепь управления ФАПЧ генератора и его сигнал через устройство с известным временем задержки подать и на сигнальный вход (на рис. 3 не показано). Затем, регулируя, например, уровень ограничения, добиться показаний, соответствующих введенной задержке. При использовании внешнего опорного сигнала в данном устройстве возникает возможность

осуществить автоматическую компенсацию постоянной составляющей фазового дрожания автоматическим управлением регулируемой задержкой с помощью сигнала с выхода ФНЧ.

Обычно фазовое дрожание отдельного регенератора очень мало, и поэтому для целей измерения его необходимо преобразовать в изменения амплитуды напряжения, которое можно усилить. Структурная схема такого прибора приведена на рисунке 4. Для указанного преобразования исследуемый сигнал S через входное устройство поступает на формирователь строба, который в момент прихода фронтов импульсов формирует короткие стробы, замыкающие ключ. На сигнальный вход ключа поступает напряжение треугольной формы, получаемое из напряжения генератора опорного сигнала с ФАПЧ с помощью интегратора. В результате на выходе ключа образуются короткие импульсы, модулированные по амплитуде. При отсутствии фазового сдвига их амплитуда равна нулю, а при его наличии — пропорциональна фазовому сдвигу u и имеет знак, определяемый направлением сдвига. Эти импульсы расширяются в аналоговом запоминающем устройстве ЗУ на время $T/4$, определяемое длительностью импульса с формирователя импульсов. Таким образом ключ и запоминающее устройство образуют аналоговое устройство выборки и запоминания, с выхода которого получаем импульсы постоянной длительности, с амплитудой пропорциональной фазовому сдвигу, и знаком, определяемым направлением фазового сдвига. Показания квадратичного вольтметра будут определять среднее квадратическое значение фазового дрожания, а пикового — максимальное значение.

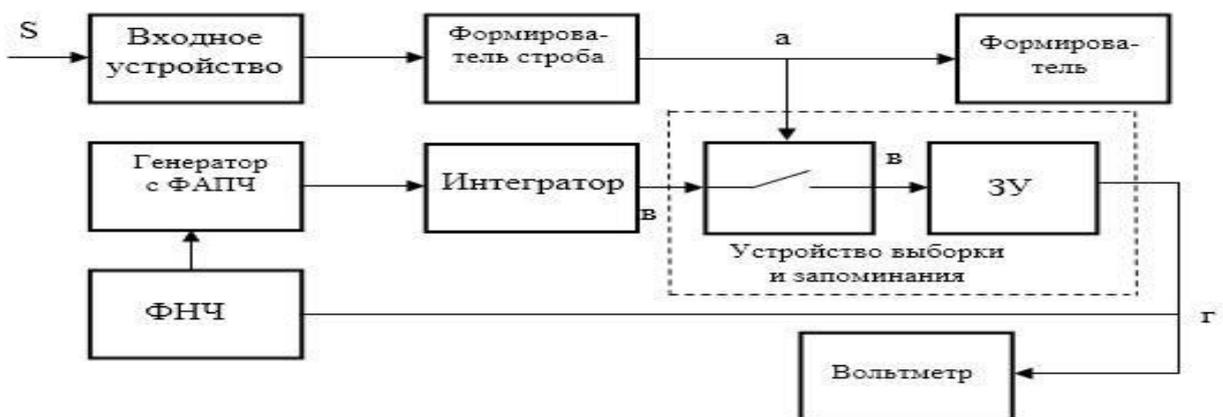


Рисунок 4 – Структурная схема прибора с преобразователем напряжения в изменение амплитуды

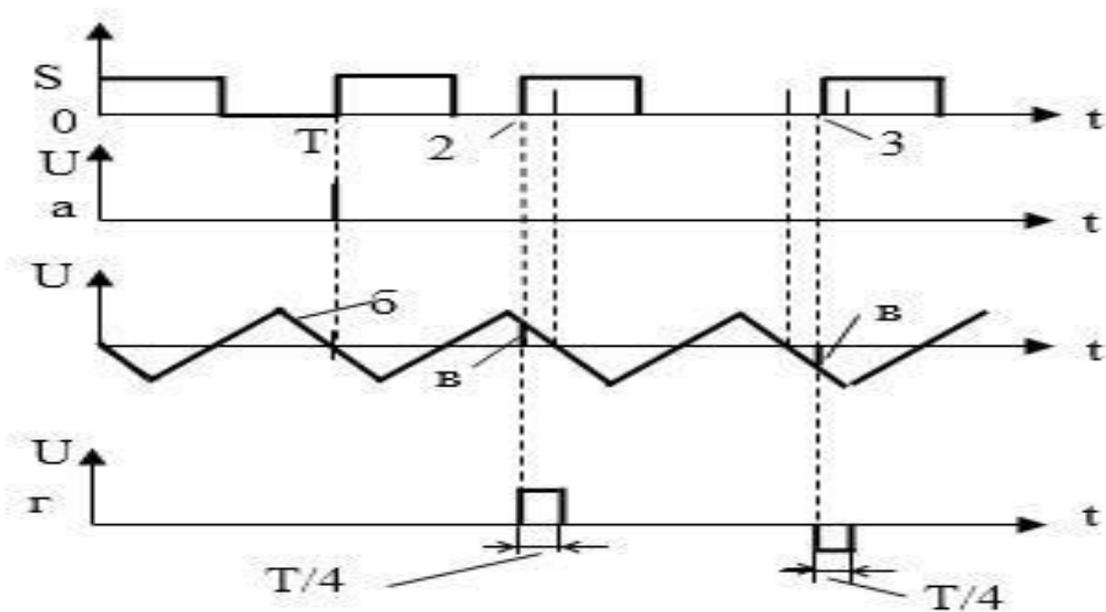


Рисунок 5 – Диаграмма, иллюстрирующая работу прибора с преобразователем напряжения в изменение амплитуды

Погрешность рассмотренных устройств определяется инструментальными погрешностями основных преобразователей и сильно зависит от частоты сигнала, так как с ее увеличением временные сдвиги, соответствующие одному и тому же фазовому дрожанию, пропорционально сокращаются. Поскольку фазовое дрожание зависит от структуры сигнала, то при использовании тестовых сигналов для уменьшения методической погрешности измерения необходимо применять псевдослучайные последовательности.

4 Домашнее задание

1. Изучите по конспекту лекций и литературе разделы об измерениях коэффициента ошибок и фазового дрожания:
 - М.А. Ракк. Измерения в цифровых системах передачи. – Москва, 2004. С. 13 – 20, 133 – 146.
2. Подготовьте доклад на основе изученного материала.
3. Ответьте на контрольные вопросы.
4. Ознакомьтесь с дополнительной литературой по теме.

5 Контрольные вопросы

1. Как характеризуется качество цифрового тракта по уровню ошибок?

2. Каковы причины возникновения ошибок при передаче цифрового сигнала?

3. Что понимается под коэффициентом ошибок?

4. Как характеризуется качество оценки коэффициента ошибок? По каким параметрам?

5. Назовите основные параметры измерителей коэффициента ошибок (ИКО)?

6. Какие типы измерителей коэффициента ошибок (ИКО) существуют? Принцип работы ИКО. Плюсы и минусы ИКО-1 и ИКО-2?

7. Методы измерений коэффициента ошибок. Плюсы и минусы данных методов.

8. Что такое фазовое дрожание? Чем оно обусловлено?

9. Назовите основные методы измерения фазового дрожания. Перечислите плюсы и минусы этих методов.