

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

**федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
профессионального образования**

**«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ
СООБЩЕНИЯ»**

Кафедра: «Железнодорожная автоматика, телемеханика и связь»
(название кафедры)

Авторы: Волков А.С., к.тех.н, Завьялов А.М., к.тех.н, доцент
(ф.и.о., ученая степень, ученое звание)

«Каналообразующие устройства телекоммуникационных устройств и систем»

(название дисциплины)

ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ С МЕТОДИЧЕСКИМИ УКАЗАНИЯМИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ V КУРСА

Направление/специальность: **190901 Системы обеспечения движения поездов**
(код, наименование специальности /направления)

Профиль/специализация: **«Телекоммуникационные системы и сети на железнодорожном
транспорте»**

Квалификация (степень) выпускника: **специалист**

Форма обучения: **заочная**

Москва 2015 г.

С о с т а в и л : кандидат технических наук, доцент А.С Волков, кандидат технических наук, доцент А.М. Завьялов

Р е ц е н з е н т : доктор технических наук, профессор А.В. Горелик

Содержание

Введение	4
1 Задание и исходные данные на курсовую работу	5
2 Расчет защищенности сигнала от помехи в точке решения регенератора оптического тракта	11
3 Расчет минимальной чувствительности фотоприемника	15
4 Расчет быстродействия волоконно-оптической линии передачи	17
5 Расчет порога чувствительности ППМ по быстродействию	19
6. Разработка схемы скремблера и дескремблера	20
6.1 Принцип построения скремблирующих и дескремблирующих устройств	20
6.2 Разработка схемы скремблера	22
6.3 Разработка схемы дескремблера	25
7 Разработка диаграмм работы схемы типового регенератора	27
7.1 Принципы построения и классификации регенераторов	27
7.2 Разработка диаграмм работы регенератора при условии отсутствия и наличия помех в канале связи	29
Литература	33

Введение

В настоящее время транспорт и телекоммуникации являются важнейшими элементами инфраструктуры государства. Усовершенствование транспортной системы невозможно без внедрения современных цифровых средств связи, а растущие потребности железнодорожного транспорта в информационном обеспечении перевозок становятся мощным стимулом развития новых телекоммуникационных технологий.

В рамках проводимой программы информатизации осуществляется модернизация всех видов технологических систем передачи информации и переход от аналоговых к цифровым системам с коммутацией каналов и с коммутацией пакетов.

Техника передачи информации на железнодорожном транспорте использует разнообразные направляющие среды. Наряду с традиционными проводными, радио- и радиопроводными линиями связи созданы волоконно-оптические и спутниковые радиолинии связи. При этом расчет параметров и разработка схем каналообразующих устройств систем автоматики и телемеханики является актуальной технической задачей, на изучение и решение которой направлена данная курсовая работа.

1 Задание и исходные данные на курсовую работу

Тема курсовой работы: «Расчет параметров и разработка схем каналообразующих устройств систем автоматики и телемеханики».

Курсовая работа посвящена расчету параметров основных узлов каналообразующей аппаратуры и разработке схем каналообразующих устройств, применяемых в телекоммуникационных системах и сетях, а также в аппаратуре автоматики и телемеханики железнодорожного транспорта.

Оформленная курсовая работа должна содержать пояснительно-расчетную записку с приложением необходимых схем и рисунков.

В пояснительно-расчетной записке необходимо привести данные задания, обзорную и расчетную части, описание работы устройств, выводы, перечень использованной литературы.

В процессе расчета величин и параметров элементов необходимо сначала привести расчетную формулу, затем подставить цифровые значения и полученный результат в принятых единицах измерения (СИ) округлить до практически необходимого номинального значения. Схемы надо выполнять в соответствии с ГОСТ-ами на условные обозначения.

При возникновении затруднений в процессе выполнения задания можно лично или письменно - через факультет или кафедру - обратиться к преподавателю за консультацией.

Курсовая работа должна быть подписана исполнителем. Работа, выполненная по варианту, не соответствующему шифру студента, не проверяется и зачету не подлежит. **Вариант №0 используется только для примера расчетов.** Если последняя или предпоследняя цифра шифра является нуль та выполняется вариант с номером 10.

По исходным данным, приведенным в табл. 1.1 – 1.5, требуется:

1. Выполнить расчет защищенности сигнала от помехи в точке решения регенератора оптического тракта.
2. Выполнить расчет минимальной чувствительности фотоприемника на ЛФД и р-і-n диоде. По результатам расчетов оценить выигрыш.
3. Выполнить расчет быстродействия волоконно-оптической линии передачи при условии, что используются мультиплексоры синхронной цифровой иерархии (STM-4 и STM-16).
4. Рассчитать пороговое значение чувствительности приемно-передающего модуля цифровой системы передачи работающей по оптическому кабелю.
5. Разработать схему скремблера (дескремблера). При помощи алгебраических выражений пояснить принцип работы системы скремблер-дескремблер.
6. Пояснить принцип работы регенератора.
7. Изобразить диаграммы работы регенератора в случае отсутствия ошибок в канале и в случае их наличия.

Таблица 1.1 – Исходные данные для выполнения 2, 3 раздела (вариант выбирается по последней цифре шифра зачетной книжки)

Вариант	STM	f_T , МГц	λ , мкм	$P_{ВХ}$, дБм	η	T , °К	$C_{ОС}$, пФ	$A_{ПЗ\ TR}$, дБ	Q_{TR}
0	16	2500	1,55	- 28	0,85	293	0,12	≥ 27	22,4
1	4	622	1,55	- 28	0,8	285	0,6	≥ 32	26
2	4	622	1,31	- 26	0,82	280	0,15	≥ 31	23,7
3	16	2500	1,55	- 27	0,65	290	0,18	≥ 28	20,9
4	4	622	1,55	- 28	0,74	282	0,085	≥ 27	23,5
5	16	2500	1,55	- 25,8	0,87	280	0,11	$\geq 26,9$	22,1
6	4	622	1,55	- 27,2	0,77	284	0,17	$\geq 32,1$	25,8
7	16	2500	1,31	- 25,6	0,9	280	0,12	≥ 28	20,5
8	16	2500	1,55	- 26	0,88	288	0,14	$\geq 28,6$	24,6
9	4	622	1,31	- 29	0,6	271	0,2	≥ 25	22,1
10	4	622	1,55	- 25	0,77	289	0,19	$\geq 26,8$	20,9

Таблица 1.2 – Исходные данные для выполнения раздела 4 (вариант выбирается по предпоследней цифре шифра)

Вариант	λ , мкм	L_{PY} , км	σ , пс/нм·км	$\Delta\lambda$, нм	B , Мбит/с
0	1,55	80	18,2	0,5	140
1	1,55	55	16,8	0,37	140
2	1,31	72	17,1	0,3	34
3	1,55	68	15,9	0,25	140
4	1,31	77	17	0,38	140
5	1,55	71	18,5	0,46	140
6	1,55	58	16,2	0,39	140
7	1,55	50	18	0,4	140
8	1,55	90	19,1	0,45	140
9	1,31	70	18,5	0,39	140
10	1,55	60	17,5	0,55	140

Таблица 1.3 – Исходные данные для выполнения раздела 5 (вариант выбирается по последней цифре шифра)

Вариант	B , Мбит/с	$p_{ПЕР}$, дБ	Вариант	B , Мбит/с	$p_{ПЕР}$, дБ
0	41,242	- 4	6	41,242	- 3,9
1	41	- 4,5	7	41	- 4,4
2	34	- 5	8	34	- 2,9
3	41	-3,5	9	41,242	- 3,1
4	41	- 4,8	10	41	- 3,5

Таблица 1.5 – Исходные данные для выполнения раздела 6 (вариант выбираем по предпоследней цифре шифра)

Вариант	Порождающий многочлен генератора ПСП	Последовательность подлежащая скремблированию
0	$g(x)=1+x+x^9+x^{10}$	$I=(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,1,0,1,0,1,0,0,1,1,0,0,1)$
1	$g(x)=1+x^2+x^7+x^{10}$	$I=(1,0,1,0,1,0,1,0,1,1,1,0,1,0,1,0,1,1,1,1,1,0,1,1,0,0,1,1,0,1)$
2	$g(x)=1+x^3+x^7+x^{11}$	$I=(1,0,0,0,1,0,1,0,0,1,1,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,1,0,0,1,1,1,0,1)$
3	$g(x)=1+x^2+x^9+x^{10}$	$I=(1,1,1,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,0,0,1,1,1,0,0,1,1,0,0,1)$
4	$g(x)=1+x^2+x^5+x^{10}$	$I=(1,0,1,1,0,0,0,1,0,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,0,0,1,1,1,1,1)$
5	$g(x)=1+x^3+x^5+x^{11}$	$I=(1,0,1,1,0,0,1,1,0,1,1,1,1,1,1,0,1,1,0,1,1,1,1,0,0,0,1,0,0,1)$
6	$g(x)=1+x^5+x^9+x^{10}$	$I=(1,0,1,1,0,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,0,1,0,1,1,0,1,0,0,1)$
7	$g(x)=1+x^9+x^{10}$	$I=(1,0,0,1,0,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,1,1,0,1,0,1,0,0,1,0,0,1,0,1,1)$
8	$g(x)=1+x^9+x^{12}$	$I=(1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1)$
9	$g(x)=1+x^2+x^6$	$I=(1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,1,0,0,1)$
10	$g(x)=1+x^5+x^{10}$	$I=(1,1,0,1,0,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,1,1,1,1,0,1,1,0,1)$

Таблица 1.5 – Исходные данные для выполнения раздела 7 (вариант выбирается по последней цифре шифра)

Вариант	Линейный цифровой сигнал (вектор) на входе регенератора	Конфигурация ошибки воздействующей на линейный цифровой сигнал
0	c=(1,0,1,0,0,0,0,1,1,0,1,1,1)	s=(0,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,0,1)
1	c=(1,1,1,0,0,1,0,1,0,0,1,0,1)	s=(0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1)
2	c=(1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,1,0,1)	s=(0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0)
3	c=(1,0,1,0,1,0,0,1,0,0,1,0,1)	s=(1,0,1,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0)
4	c=(1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,1,1,1)	s=(1,0,0,0,1,0,0,0,0,0,1,0,1)
5	c=(1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,1,0,1)	s=(1,1,1,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0)
6	c=(1,1,1,0,1,0,1,1,0,1,1,0,1)	s=(0,1,0,0,1,0,0,0,1,0,0,1,0)
7	c=(1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,1,1)	s=(0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,0)
8	c=(1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,1,1)	s=(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0)
9	c=(1,1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1)	s=(0,0,0,0,1,0,0,1,0,1,0,1,0)
10	c=(1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1)	s=(0,1,1,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0)

2 Расчет защищенности сигнала от помехи в точке решения регенератора оптического тракта

В приемнике оптического модуля (ПрОМ) на сигнал главным образом воздействуют собственная и дробовая помехи.

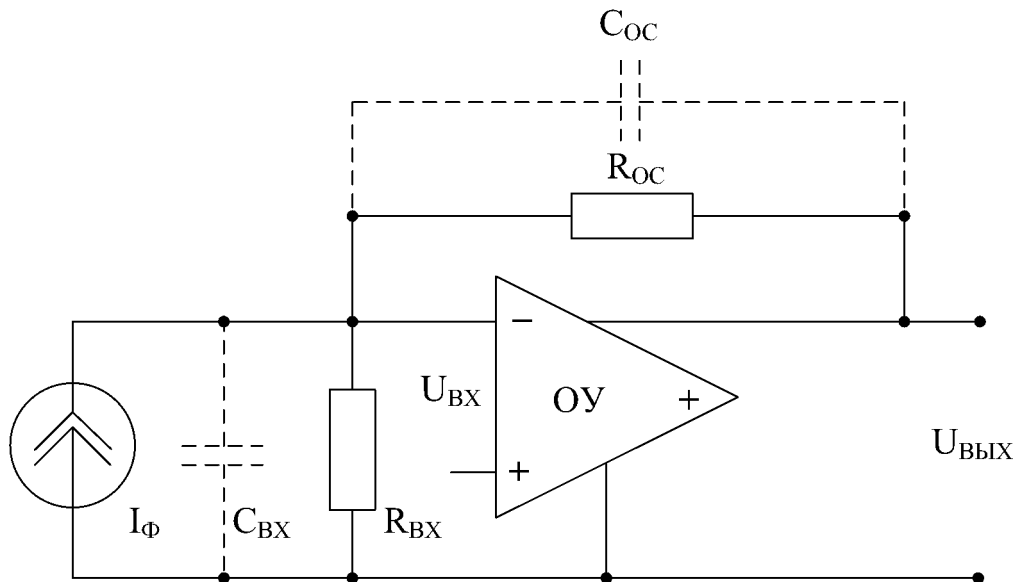


Рис. 2.1 – Типовая схема усилителя фотодетектора

Собственная помеха определяется тепловой помехой, действующей на входе малошумящего усилителя фотодетектора (МУс) и его внутренними помехами. Дробовая помеха обусловлена квантовой природой процессов, происходящих в фотодетекторе (блок фотоприемника ФПр). В качестве МУс обычно используют так называемый трансимпедансный усилитель, являющийся преобразователем «ток-напряжение». Такой усилитель (рис. 2.1) состоит из операционного усилителя (ОУ) с большим коэффициентом усиления по напряжению и резистора R_{oc} , посредством которого создается глубокая общая обратная связь, параллельная по входу и выходу. Резистор $R_{вх}$ отображает динамическое сопротивление диода ФПр, цепей его смещения и входное сопротивление ОУ. Конденсатор $C_{вх}$ отображает суммарную емкость фотодетектора, монтажа и входную емкость ОУ, а конденсатор C_{oc} - паразитную емкость в точках подключения R_{oc} . Обычно $R_{вх} > R_{oc}$, $C_{вх} > C_{oc}$. При выполнении названных условий можно записать: $U_{вых}/I_{\phi} \cdot Z_{oc}$, на низких частотах $U_{вых}/I_{\phi} \cdot R_{oc}$, снижение коэффициента передачи более, чем в $\sqrt{2}$, раз происходит выше граничной частоты $f_{гр} = (2 \cdot \pi \cdot R_{oc} \cdot C_{oc})^{-1}$. Если входной оптический сигнал представляет собой последовательность в коде NRZ, граничную частоту можно положить равной тактовой частоте сигнала, тогда сопротивление резистора обратной связи должно удовлетворять условию:

$$R_{oc} \leq (2 \cdot \pi \cdot f_T \cdot C_{oc})^{-1}. \quad (2.1)$$

Действующее значение тока тепловой помехи на входе МУс можно

определить по формуле Найквиста:

$$I_{\text{ш}} = (4 \cdot k \cdot T \cdot f_B / R)^{1/2}, \quad (2.2)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$, Дж/град - постоянная Больцмана; T - температура в градусах Кельвина; f_B , Гц - полоса частот, в которой определяется ток помехи; R , Ом - сопротивление резистора, создающего ток помехи.

В данном случае можно полагать $f_B = 0,7 \cdot f_T$ и $R = R_{\text{ос}}$. Внутренние помехи усилителя удобно учитывать посредством его коэффициента помехи $F_{\text{ус}}$, показывающего, насколько снижается помехозащищенность сигнала, проходящего через этот усилитель. Таким образом, ток собственной помехи на входе усилителя будет равен:

$$I_{\text{сп}} = (4 \cdot k \cdot T \cdot F_{\text{ус}} \cdot 0,7 \cdot f_T / R_{\text{ос}})^{1/2}. \quad (2.3)$$

Действующее значение тока дробовой помехи на входе усилителя фотодетектора определяется по формуле Шоттки:

$$I_{\text{дп}} = [2 \cdot q \cdot I_{\phi} \cdot M^{(2+\rho)} \cdot f_B]^{1/2}, \quad (2.4)$$

где $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$, К - заряд электрона; I_{ϕ} - среднее значение фототока; M - коэффициент лавинного умножения; f_B - полоса частот, в которой определяется дробовой ток, ρ - коэффициент, зависящий от свойств материала фотодиода (для кремниевых диодов $\rho \approx 0,2 \dots 0,4$, для германиевых $\rho \approx 1$, для диодов из фосфида индия и других материалов $\rho \approx 0,8$).

Среднее значение фототока I_{ϕ} связано со средней мощностью светового излучения на входе ФПр $P_{\text{вх}}$ посредством монохроматической токовой чувствительности:

$$S_i = I_{\phi} / P_{\text{вх}} = \frac{\lambda \cdot \eta \cdot q}{(h \cdot c)}, \quad (2.5)$$

где λ - длина волны излучения; η - квантовая эффективность; $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$, Дж·с - постоянная Планка; c — скорость света в пустоте.

Если выразить λ в мкм, то:

$$S_i = \lambda \cdot \eta / 1,24 \text{ А/Вт}. \quad (2.6)$$

Для рin-диодов $M=1$, для фотодиодов с лавинным умножением (ЛФД) выходной фототок в M раз больше первичного.

Определим ожидаемое отношение сигнал-помеха Q на выходе усилителя. Можно считать, что последующие элементы ПрОМ практически не ухудшают этого отношения, следовательно, это отношение будет характеризовать помехозащищенность сигнала в точке решения регенератора (ТРР):

$$Q = \frac{I_{\phi} \cdot M}{[(2 \cdot q \cdot I_{\phi} \cdot M^{(2+\rho)} + 4 \cdot k \cdot T \cdot F_{\text{ус}} / R_{\text{ос}}) \cdot f_B]^{1/2}}. \quad (2.7)$$

В оборудовании, обладающем невысокого качества, в формулу (2.5) следует ввести также среднеквадратическое значение темнового тока, определяемого случайной тепловой генерацией носителей под воздействием фонового излучения, не связанного с полезным сигналом:

$$\tilde{I}_T^2 = 2 \cdot e \cdot I_T \cdot M^{(2+\rho)} \cdot f_B, \quad (2.8)$$

где I_T - среднее значение темнового тока, величина которого для германиевых фотодиодов равна $I_T = 1 \dots 8 \cdot 10^{-7}$ А, а для кремниевых $I_T = 1 \dots 8 \cdot 10^{-8}$ А.

Исследуя выражение (2.5) на максимум, как функцию M , находим коэффициент лавинного умножения, при котором отношение сигнал-помеха будет максимально.

$$M_{\text{опт}} = \left[\frac{4 \cdot k \cdot T \cdot F_{\text{yc}}}{(R_{\text{oc}} \cdot q \cdot \rho \cdot I_{\Phi})} \right]^{1/(2+\rho)}. \quad (2.9)$$

Можно показать, что при оптимальном коэффициенте умножения отношение мощностей дробовой и собственной помех равно $2/\rho$.

Для pin-диодов $M=1$ и дробовой шум пренебрежимо мал. Поэтому можно записать:

$$Q = \left[\frac{I_{\Phi}^2 \cdot R_{\text{oc}}}{(4 \cdot k \cdot T \cdot F_{\text{yc}} \cdot f_B)} \right]^{1/2}. \quad (2.10)$$

Величину $(4 \cdot k \cdot T \cdot F_{\text{yc}} \cdot R_{\text{oc}})^{1/2} = i_{\text{эш}}$, $A/\sqrt{f_B}$ называют эквивалентным шумовым током и обычно указывают среди параметров усилителей фотодетекторов на pin-диолах. В этом случае:

$$Q = \frac{I_{\Phi}}{(i_{\text{эш}} \sqrt{f_B})}. \quad (2.11)$$

Пример определения помехозащищенность в точке решения регенератора для синхронной цифровой сети

Определить помехозащищенность в ТРР для цифровой синхронной сети третьей ступени иерархии (STM-16, $f_T = 2,5$ ГГц) с длиной волны передатчика $\lambda = 1,55$ мкм, если уровень входного сигнала $p_{\text{вх}} = -28$ дБм, фотоприемник выполнен в одном случае на pin-диоде, а в другом на ЛФД. Материал ЛФД - фосфид индия, квантовая эффективность в обоих случаях $\eta = 0,85$. Усилитель работает при комнатной температуре $T = 293^\circ \text{К}$, паразитная емкость в цепи обратной связи $C_{\text{oc}} = 0,12$ пФ.

Найдем максимально допустимое значение R_{oc} :

$$R_{\text{oc}} = (2 \cdot 3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^9 \cdot 0,12 \cdot 10^{-12})^{-1} \approx 530 \text{ Ом}.$$

Средняя входная оптическая мощность на входе фотоприемника равна:

$$P_{\text{вх}} = 10^{0,1 \cdot p_{\text{вх}}} = 10^{0,1 \cdot (-28)} = 1,585 \cdot 10^{-3} \text{ мВт} = 1,585 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}.$$

Монохроматическая токовая чувствительность равна:

$$S_i = 1,55 \cdot 0,85 / 1,24 = 1,06 \text{ А/Вт},$$

тогда среднее значение фототока:

$$I_{\Phi} = 1,06 \cdot 1,585 \cdot 10^{-6} = 1,68 \cdot 10^{-6} \text{ А}.$$

Определим отношение сигнал-помеха в случае использования pin-диола:

$$Q = \left[\frac{(1,68 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 530}{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 2 \cdot 0,7 \cdot 2,5 \cdot 10^9} \right]^{\frac{1}{2}} = 5,14.$$

Тогда:

$$A_{\text{пз}} = 20 \lg 5,14 = 14,22 \text{ дБ.}$$

При использовании ЛФД оптимальный коэффициент умножения находится:

$$M_{\text{опт}} = \left[\frac{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 2}{530 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,8 \cdot 1,68 \cdot 10^{-6}} \right]^{\frac{1}{2+0,8}}} = 7,52.$$

Рассчитаем отношение сигнал-помеха в ТРР, равное:

$$Q = \frac{1,68 \cdot 10^{-6} \cdot 7,25}{\left[\left(2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,68 \cdot 10^{-6} \cdot 7,25^{(2+0,8)} + 4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot \frac{293 \cdot 2}{530} \right) \cdot 0,7 \cdot 2,5 \cdot 10^9 \right]^{\frac{1}{2}}} = 20,7.$$

Соответственно помехозащищенность в ТРР:

$$A_{\text{пз}} = 20 \lg 20,7 = 26,3 \text{ дБ.}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что выигрыш по сравнению с фотоприемником на рpn-диоде составляет примерно 12 дБ.

Собственная помеха и дробовая (при условии ее лавинного умножения) имеют Гауссовское распределение мгновенных значений, что позволяет достаточно просто оценить в этих случаях коэффициент ошибки регенератора.

3 Расчет минимальной чувствительности фотоприемника

Часто требуется решение обратной задачи: по требуемой помехозащищенности $Q_{тр}$, которая определяется допустимым коэффициентом ошибок регенератора и эксплуатационным запасом, найти соответствующую (минимальную) чувствительность фотоприемника $p_{мин}$. Минимальная чувствительность соответствует минимальной средней мощности оптического сигнала на его входе:

$$P_{мин} = 10^{0,1 \cdot p_{мин}} \cdot 10^{-3} \text{ Вт.} \quad (3.1)$$

Для фотоприемника на pin-диоде из формул (2.5) и (2.10) следует, что

$$P_{мин} = \left(\frac{Q_{тр}}{S_i} \right) \cdot \left(\frac{4 \cdot k \cdot T \cdot F_{yc} \cdot f_B}{R_{oc}} \right)^{1/2}. \quad (3.2)$$

Если задан эквивалентный шумовой ток $i_{эш}$, то это выражение упрощается:

$$P_{мин} = Q_{тр} \cdot i_{эш} \cdot \sqrt{\frac{f_B}{S_i}}. \quad (3.3)$$

Минимальная чувствительность фотоприемника составит:

$$p_{мин} = 10 \lg \left(\frac{P_{мин}}{1 \text{ мВт}} \right) \text{ (дБм)}. \quad (3.4)$$

Аналогичная задача для фотоприемника на ЛФД решается несколько сложнее. Для этого в формулу (2.7) следует подставить значение оптимального коэффициента лавинного умножения, найденное из формулы (2.9). Следует учесть также, что при оптимальном коэффициенте умножения отношение мощностей дробовой и собственной помех равно $2/\rho$, то есть $U_{дп}^2 = 2 \cdot U_{сп}^2 / \rho$. Отсюда выражение для минимальной средней мощности оптического сигнала на входе фотоприемника:

$$P_{мин} = S_i^{-1} \cdot \left[\frac{Q_{тр}^2 \cdot \left(1 + \frac{2}{\rho} \right) \cdot f_B}{\left(\frac{4 \cdot k \cdot T \cdot F_{yc}}{R_{oc}} \right)^{-\rho/(2+\rho)} \cdot (q \cdot \rho)^{-2/(2+\rho)}} \right]^{2+\rho/2 \cdot (1+\rho)}. \quad (3.5)$$

Соотношение (3.5) справедливо, если помеха не зависит от уровня сигнала. Такая ситуация характерна для фотоприемника на pin-диоде, где дробовую составляющую помехи можно не учитывать. Для фотоприемника на ЛФД характерно увеличение помехи при прохождении импульса и снижение при прохождении паузы за счет дробовой составляющей. Соотношение (3.5) может использоваться и в этом случае, но порог принятия решения в регенераторе должен быть принят несколько ниже среднего значения напряжения сигнала.

Пример расчета минимальной чувствительности фотоприемника на рпн-диоде.

$$Q_{\text{пр}} = 22,4.$$

$$P_{\text{мин}} = (22,4/1,06) \cdot \left(\frac{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 2 \cdot 0,7 \cdot 2,5 \cdot 10^9}{530} \right)^{1/2} = 6,91 \cdot 10^{-6} \text{ Вт.}$$

$$p_{\text{мин}} = 10 \lg(6,91 \cdot 10^{-3}) = -21,6 \text{ дБм.}$$

Пример расчета минимальной чувствительности фотоприемника на ЛФД.

Определим минимальную чувствительность фотоприемника на ЛФД при условиях, указанных в предыдущих примерах. Минимальную среднюю мощность на приеме определим по формуле (3.5):

$$P_{\text{мин}} = 1,06^{-1} \cdot \left[\frac{22,4^2 \cdot \left(1 + \frac{2}{0,8} \right) \cdot 0,7 \cdot 2,5 \cdot 10^9}{\left(\frac{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 2}{530} \right)^{-0,8/(2+0,8)} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,8)^{-2/(2+0,8)}} \right]^{2+0,8/2 \cdot (1+0,8)} =$$

$$= 1,895 \cdot 10^{-6} \text{ Вт.}$$

Тогда минимальная чувствительность фотоприемника рассчитываем:

$$p_{\text{мин}} = 10 \lg(1,895 \cdot 10^{-3}) = -27,2 \text{ дБм.}$$

Следовательно, можно сделать вывод, что выигрыш по сравнению с предыдущим случаем, составляет примерно 6 дБ.

4 Расчет быстродействия волоконно-оптической линии передачи

Быстродействие волоконно-оптической линии (ВОЛП) определяется инертностью элементов приемо-передающего модуля (ППМ) и дисперсионными свойствами оптического волокна. Расчет быстродействия сводится к определению допустимого и ожидаемого быстродействия и их сравнения.

Допустимое быстродействие цифровых ВОЛП зависит от характера передаваемого сигнала скорости передачи линейного цифрового сигнала и определяется по формуле:

$$t_{\text{доп}} = \frac{\beta}{B} \text{ нс}, \quad (4.1)$$

где β - коэффициент, учитывающий характер линейного цифрового сигнала (линейный код) и равный 0,7 для кода NRZ и 0,35 для всех других; B - скорость передачи линейного цифрового сигнала.

Ожидаемое быстродействие ВОЛП (как совокупности волоконно-оптической системы передачи и оптического кабеля) равно:

$$t_{\text{ож}} = \sqrt{t_{\text{пер}}^2 + t_{\text{пр}}^2 + t_{\text{ОВ}}^2} \text{ нс}, \quad (4.2)$$

где $t_{\text{пер}}$ - быстродействие передающего оптического модуля (ПОМ), зависящее от скорости передачи линейного цифрового сигнала и типа источника излучения; $t_{\text{пр}}$ - быстродействие ПрОМ, определяемое скоростью передачи линейного цифрового сигнала и типом фотодетектора; $t_{\text{ОВ}}$ - уширение импульса оптического излучения импульса при его прохождении по оптическому волокну кабеля регенерационного участка, которое равно для многомодового ОВ:

$$t_{\text{ОВ}} = 10^3 \cdot \frac{L_{\text{пу}}}{\Delta F} \text{ нс}, \quad (4.3)$$

где ΔF - относительная полоса пропускания ОВ, МГц/км, а для одномодового ОВ:

$$t_{\text{ОВ}} = 10^{-3} \cdot \sigma \cdot \Delta\lambda \cdot l_{\text{пу}} \text{ нс}, \quad (4.4)$$

где σ - коэффициент хроматической дисперсии оптического волокна, пс/нм·км; $\Delta\lambda$ - среднеквадратическая ширина полосы оптического излучения, нм; равная 24...40 нм для светоизлучающих диодов и 0,2...5 нм для полупроводниковых лазерных диодов.

Быстродействие ПОМ и ПрОМ для типовых скоростей передачи приведено в таблице 4.1.

Если $t_{\text{ож}} < t_{\text{доп}}$, то выбор типа кабеля и длины регенерационного участка выполнены верно.

Величина $t_{\text{ож}} - t_{\text{доп}} = \Delta t$ - запас по быстродействию. При достаточно большом его значении можно ослабить требования к компонентам ВОЛП. Если $t_{\text{ож}} > t_{\text{доп}}$, то следует выбрать ПОМ, ПРОМ и ОК с другими параметрами.

Таблица 4.1 – Быстродействие ПОМ и ПРОМ для типовых скоростей передачи

Быстродействие ППМ	Скорость передачи цифрового потока, Мбит/с						
	8	34	140	565	155	622	2500
$t_{\text{пер}}, \text{нс}$	5	3	0,5	1,15	1	0,1	0,05
$t_{\text{пр}}, \text{нс}$	4	2,5	0,4	0,1	0,8	0,08	0,04

Пример расчета быстродействия волоконно-оптической линии передачи.

Определить быстродействие ВОЛП при работе на длине волны $\lambda = 1,55$ мкм по ОВ, отвечающему Рек. G.652 МСЭ-Т, если длина регенерационного участка $l_{\text{py}} = 80$ км, коэффициент хроматической дисперсии $\sigma = 18,2$ пс/нм·км, $\Delta\lambda = 0,5$ нм. Скорость передачи информационного потока $V = 140$ Мбит/с, линейный код типа 10B1P1R.

Найдем значение допустимого быстродействия:

$$t_{\text{доп}} = \frac{0,35}{140 \cdot 10^6} = 2,5 \text{ нс.}$$

Найдем величину уширения импульса при его прохождении по регенерационному участку:

$$t_{\text{ов}} = 18,2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 80 = 0,728 \text{ нс.}$$

Найдем ожидаемую величину быстродействия $t_{\text{ож}}$, подставив в нее значения $t_{\text{пер}} = 0,5$ нс и $t_{\text{пр}} = 0,4$ нс, взятых из табл. 2.1, получим:

$$t_{\text{ож}} = \sqrt{0,5^2 + 0,4^2 + 0,728^2} = 0,97 \text{ нс.}$$

Вывод. Сравнение полученных значений показывает, что условие $t_{\text{ож}} < t_{\text{доп}}$ выполняется и, следовательно, основные параметры ВОЛП и ее компонентов выбраны правильно.

5 Расчет порога чувствительности ППМ по быстродействию

Одной из основных характеристик ППМ является его чувствительность, т. е. минимальная детектируемая мощность (МДМ) оптического сигнала длительностью $\tau = 1/B$, устойчиво обнаруживаемая фотодетектором ППМ.

Ориентировочно величина уровня МДМ $p_{\min}$ может быть определена по формулам:

$$p_{\min} = \begin{cases} -55 + 11 \cdot \lg B, & \text{если } B \leq 50 \text{ Мбит/с;} \\ -55 + 10 \cdot \lg B, & \text{если } B > 50 \text{ Мбит/с;} \end{cases} \quad (5.1)$$

для pin-фотодиодов и

$$p_{\min} = \begin{cases} -70 + 10,5 \cdot \lg B, & \text{если } B \leq 50 \text{ Мбит/с;} \\ -70 + 10 \cdot \lg B, & \text{если } B > 50 \text{ Мбит/с;} \end{cases} \quad (5.2)$$

для лавинных фотодиодов (ЛФД).

Зная абсолютный уровень МДМ $p_{\min}$ и уровень передачи ППМ, можно получить оценку энергетического потенциала ВОСП по быстродействию:

$$\mathcal{E}_t = p_{\text{пер}} - p_{\min}, \text{ дБ} \quad (5.3)$$

Пример расчета порога чувствительности ППМ по быстродействию.

Определить уровень МДМ $p_{\min}$ и энергетический потенциал по быстродействию для ЦВОСП со скоростью передачи линейного цифрового сигнала, равной $B = 41,242$ Мбит/с и уровнем передачи равным $p_{\text{пер}} = -4$ дБ. Фотодетектор реализован на основе ЛФД.

Воспользуемся формулой (5.2):

$$p_{\min} = -70 + 10,5 \lg 41,242 = -53 \text{ дБм.}$$

Приближенное значение энергетического потенциала по быстродействию будет равно:

$$\mathcal{E}_t = -4 - (-53) = 49 \text{ дБ.}$$

Вывод. Полученное значение энергетического потенциала соответствует возможностям данной ЦВОСП по быстродействию.

6 Разработка схемы скремблера и дескремблера

6.1 Принцип построения скремблирующих и дескремблирующих устройств

Улучшение ЛЦС с целью упрощения устройств выделения тактовой частоты линейных регенераторов реализуется с помощью процесса, называемого *скремблированием*, т. е. использования пары преобразующих устройств: *скремблера* на передаче и *дескремблера* на приеме (рис. 6.1 и рис 6.2)

Скремблирование заключается в преобразовании исходного двоичного сигнала в сигнал, близкий к случайному, имеющему биномиальное распределение вероятностей появления (при равновероятном появлении символов 1 и 0), т. е. осуществляется рандомизация произвольного информационного сигнала.

В отличие от сигналов с произвольными статистическими параметрами, для которых вероятности появления символов и групп символов могут быть произвольными, в цифровом случайном (скремблированном) сигнале вероятность появления любой комбинации является не произвольной, а определяется в соответствии с биномиальным законом вероятностью появления одного символа и длиной серии.

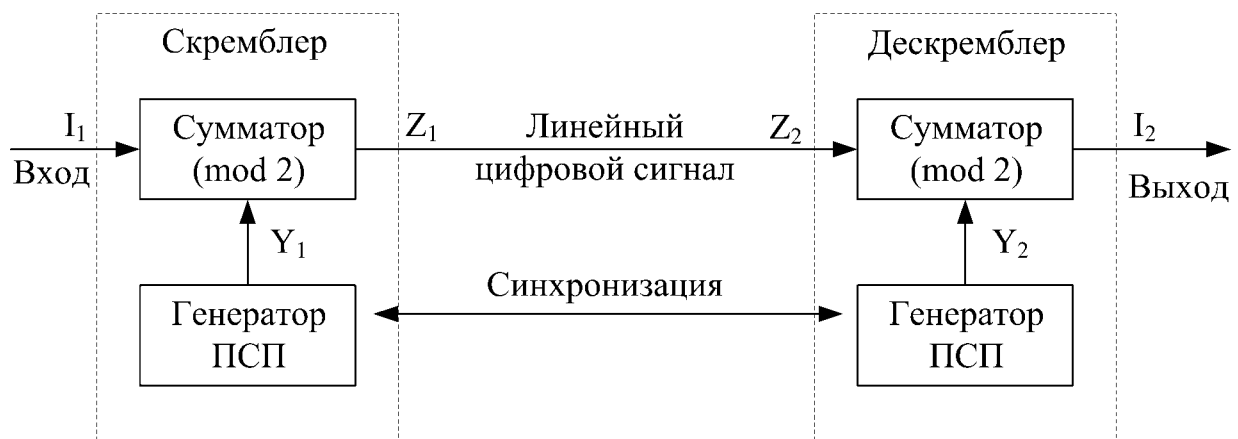


Рис. 6.1 Скремблер – дескремблер

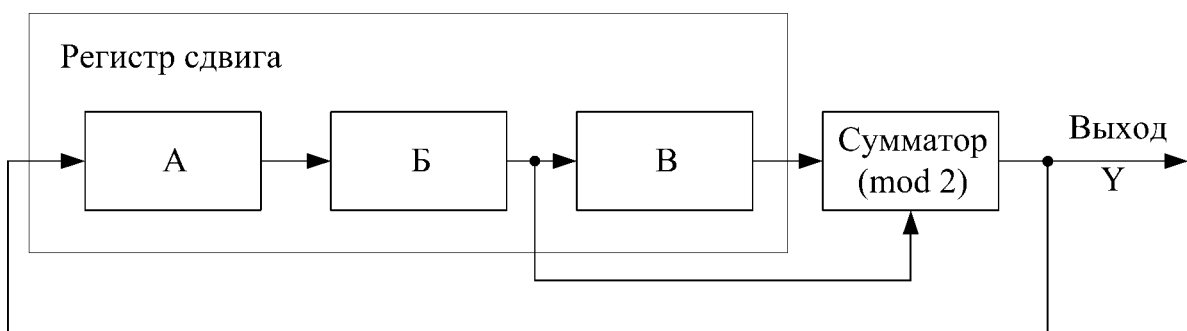


Рис. 6.2 Генератор ПСП

Скремблирование может выполняться с различными целями. Наиболее распространенная цель — защита передаваемых данных от несанкционированного доступа. Для ее достижения разработано множество методов кодирования и схемных решений. Но нас интересует иная задача, связанная с «разравниванием» спектра сигнала и повышением надежности синхронизации приемника с источником передаваемых по линии данных. Применительно к этой задаче цель скремблирования состоит в исключении из потока данных длинных последовательностей 0 и 1 и периодически повторяющихся групп битов. Для этого необходимо преобразовать данные так, чтобы они выглядели как случайные, т.е. лишенные какой-либо видимой закономерности.

К достоинствам скремблированного ЛЦС можно отнести.

- возможность достаточно точного расчета параметров выделителя актовой частоты линейных регенераторов, так как может быть определена вероятность появления любой комбинации в ЛЦС;
- универсальность, которая заключается в возможности сквозной передачи скремблированного сигнала по сети связи через любые цифровые тракты, так как скремблирование; исходной двоичной последовательности осуществляется без преобразования его в другой вид, а выделение исходного сигнала производится только в приемном оборудовании оконечной станции;
- уменьшение влияния статистических параметров исходного сигнала на фазовые дрожания цифрового сигнала в линии;
- обеспечение возможности контроля качества передачи при нарушении чередования полярности импульсов при использовании скремблирования в сочетании с кодом ЧПИ.

В общем случае в М-разрядном регистре обратная связь подключается к разрядам с номерами М и N ($M > N$). Выбор оптимального значения N для заданного М - непростая задача. Каждый генератор формирует последовательность битов с максимальным периодом повторения, равным $2^M - 1$. В такой последовательности встречаются все М-разрядные коды, за исключением нулевого. Этот код представляет собой своеобразную «ловушку» для данной схемы: если бы нулевой код появился в регистре, дальнейшая последовательность битов была бы также нулевой. Но при нормальной работе генератора ПСП попадания в ловушку не происходит.

В схеме, приведенной на рис. 6.1, скремблер и дескремблер выполнены на основе рассмотренных генераторов псевдослучайных последовательностей. Оба генератора имеют одинаковую разрядность и однотипную структуру обратных связей. Все процессы, протекающие в системе передачи данных, синхронизируются от тактового генератора (на рисунке не показан). Этот генератор размещен на передающей стороне системы и может принадлежать источнику данных либо скремблеру. В каждом такте на вход скремблера подается очередной бит передаваемых данных, а в сдвиговом регистре накопленный код продвигается на один разряд вправо.

6.2 Разработка схемы скремблера

Исходными данными для разработки схемы скремблера является порождающий многочлен генератора ПСП из таблицы 1.5 $g(x)=1+x+x^9+x^{10}$. Степень при формальной переменной x порождающего многочлена $g(x)$ генератора ПСП указывает на наличие связи с сумматором в схеме генератора ПСП. Следовательно, схема генератора ПСП имеет вид:

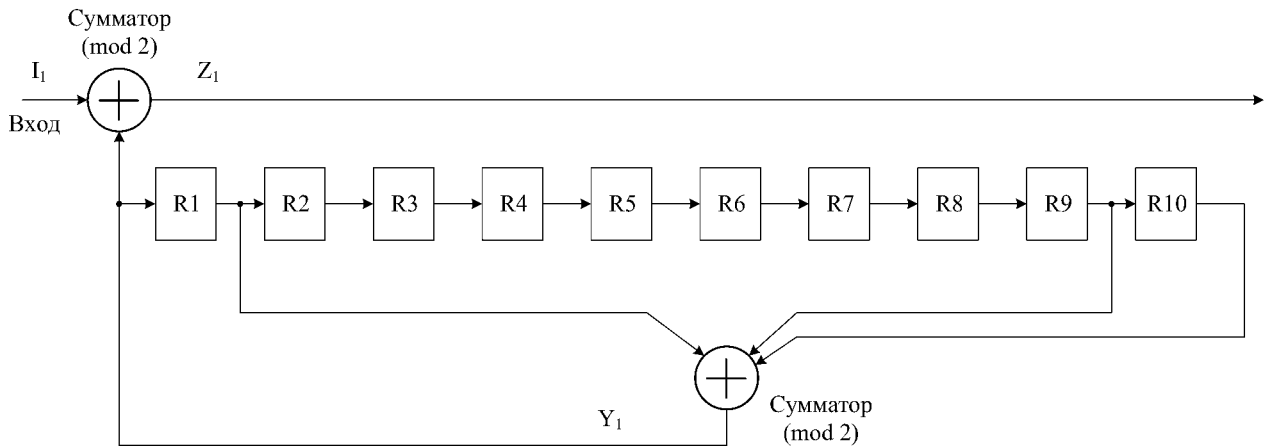


Рис. 6.3 Схема скремблера

Для описания работы схемы скремблера – дескремблера воспользуемся основными алгебраическими соотношениями:

$$Z_1 = I_1 + Y_1; \quad (6.1)$$

$$I_2 = Z_2 + Y_2 = I_1 + Y_1 + Y_2 = I_1; \quad (6.2)$$

$$Z_1(x) = I_1(x) + Y_1(x); \quad (6.3)$$

$$I_2(x) = Z_2(x) + Y_2(x) = I_1(x) + Y_1(x) + Y_2(x) = I_1(x). \quad (6.4)$$

В выражениях (6.1) - (6.4) введены следующие обозначения:

- I_1 – вектор информационной (входной) последовательности;
- I_2 – вектор информационной (выходной) последовательности;
- Y_1 – вектор последовательности генератора ПСП скремблера;
- Y_2 – вектор последовательности генератора ПСП дескремблера;
- Z_1 – вектор скремблированной последовательности на выходе скремблера;
- Z_2 – вектор скремблированной последовательности на входе дескремблера;
- $I_1(x)$ – многочлен информационной (входной) последовательности;
- $I_2(x)$ – многочлен информационной (выходной) последовательности;
- $Y_1(x)$ – многочлен последовательности генератора ПСП скремблера;
- $Y_2(x)$ – многочлен последовательности генератора ПСП дескремблера;
- $Z_1(x)$ – многочлен скремблированной последовательности на выходе скремблера;

- $Z_2(x)$ – многочлен скремблированной последовательности на входе дескремблера.

Опишем работу генератора ПСП следующим образом:

Таблица 6.1 – Работа схемы генератора ПСП

Такт	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	R ₉	R ₁₀	Вих.
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
4	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
5	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1
6	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1
7	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
10	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
11	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
12	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0
13	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
14	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
15	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
16	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
20	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
21	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
22	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1
23	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1
24	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1
25	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1
26	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
28	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
29	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
30	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0

Выполним проверку:

1	
$1+x+x^9+x^{10}$	$1+x+x^9+x^{10}$
$x+x^9+x^{10}$	$1+x+x^2+x^3+x^4+x^5+x^6+x^7+x^8+x^{18}+x^{19}+$
$x+x^2+x^{10}+x^{11}$	$+x^{20}+x^{21}+x^{22}+x^{23}+x^{24}+x^{25}+x^{26}+x^{36}$
$x^2+x^9+x^{11}$	
$x^2+x^3+x^{11}+x^{12}$	
$x^3+x^9+x^{12}$	
$x^3+x^4+x^{12}+x^{13}$	
$x^4+x^9+x^{13}$	
$x^4+x^5+x^{13}+x^{14}$	
$x^5+x^9+x^{14}$	
$x^5+x^6+x^{14}+x^{15}$	
$x^6+x^9+x^{15}$	
$x^6+x^7+x^{15}+x^{16}$	
$x^7+x^9+x^{16}$	
$x^7+x^8+x^{16}+x^{17}$	
$x^8+x^9+x^{17}$	
$x^8+x^9+x^{17}+x^{18}$	
x^{18}	
$x^{18}+x^{19}+x^{27}+x^{28}$	
$x^{19}+x^{27}+x^{28}$	
$x^{19}+x^{20}+x^{28}+x^{29}$	
$x^{20}+x^{27}+x^{29}$	
$x^{20}+x^{21}+x^{29}+x^{30}$	
$x^{21}+x^{27}+x^{30}$	
$x^{21}+x^{22}+x^{30}+x^{31}$	
$x^{22}+x^{27}+x^{31}$	
$x^{22}+x^{23}+x^{31}+x^{32}$	
$x^{23}+x^{27}+x^{32}$	
$x^{23}+x^{24}+x^{32}+x^{33}$	
$x^{24}+x^{27}+x^{33}$	
$x^{24}+x^{25}+x^{33}+x^{34}$	
$x^{25}+x^{27}+x^{34}$	
$x^{25}+x^{26}+x^{34}+x^{35}$	
$x^{26}+x^{27}+x^{35}$	
$x^{26}+x^{27}+x^{35}+x^{36}$	
x^{36}	
$x^{36}+x^{37}+x^{45}+x^{46}$	
$x^{37}+x^{45}+x^{46}$	

Следовательно:

$$Y_1(x) = 1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + x^5 + x^6 + x^7 + x^8 + x^{18} + x^{19} + x^{20} + x^{21} + x^{22} + x^{23} + x^{24} + x^{25} + x^{26} + x^{36}.$$

Представим вектор информационной (входной) последовательности из таблицы 1.5 в виде многочлена:

$$I_1(x) = 1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + x^5 + x^6 + x^7 + x^8 + x^9 + x^{10} + x^{11} + x^{12} + x^{18} + x^{20} + x^{22} + x^{25} + x^{26} + x^{29}.$$

Тогда:

$$\begin{aligned} Z_1(x) &= 1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + x^5 + x^6 + x^7 + x^8 + x^{18} + x^{19} + x^{20} + x^{21} + x^{22} + x^{23} + x^{24} + x^{25} + x^{26} + x^{36} + \\ &+ 1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + x^5 + x^6 + x^7 + x^8 + x^9 + x^{10} + x^{11} + x^{12} + x^{18} + x^{20} + x^{22} + x^{25} + x^{26} + x^{29} = \\ &= x^9 + x^{10} + x^{11} + x^{12} + x^{19} + x^{21} + x^{23} + x^{24} + x^{29} + x^{36} \end{aligned}$$

6.3 Разработка схемы дескремблера

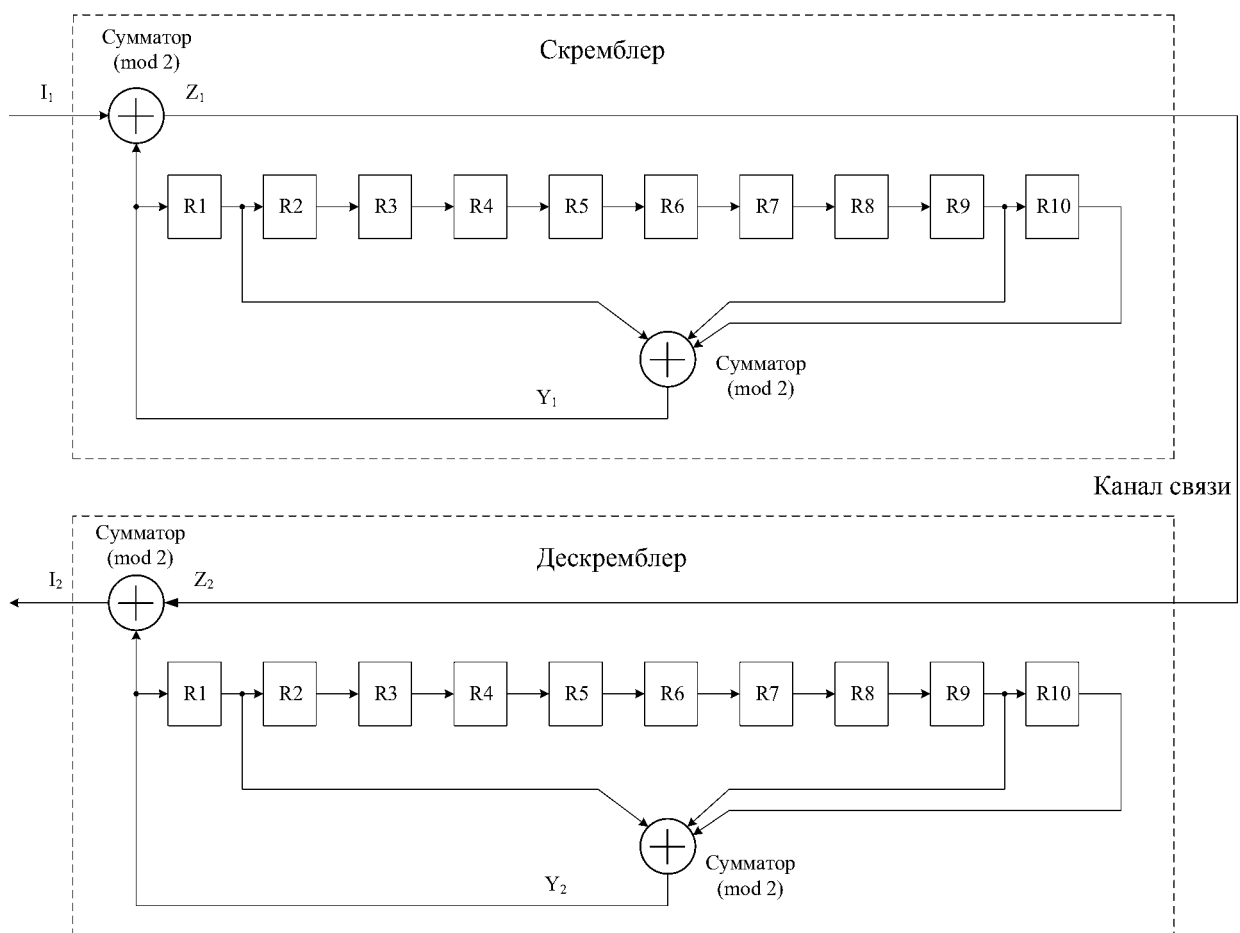


Рис. 6.3 Схема скремблера – дескремблера

Таблица 6.2 Работа системы скремблер – дескремблер

I_1	Y_1	Z_1/Z_2	Y_2	I_2
1	1	0	1	1
1	1	0	1	1
1	1	0	1	1
1	1	0	1	1
1	1	0	1	1
1	1	0	1	1
1	1	0	1	1
1	1	0	1	1
1	1	0	1	1
1	1	0	1	1
1	0	1	0	1
1	0	1	0	1
1	0	1	0	1
1	0	1	0	1
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
1	1	0	1	1
0	1	1	1	0
1	1	0	1	1
0	1	1	1	0
1	1	0	1	1
0	1	1	1	0
0	1	1	1	0
1	1	0	1	1
1	1	0	1	1
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
1	0	1	0	1

7 Разработка диаграмм работы схемы типового регенератора

7.1 Принципы построения и классификации регенераторов

Линейный цифровой сигнал (ЛЦС), проходя по линии связи, испытывает ослабление, подвергается воздействию различного вида помех и искажений, что приводит к деформациям формы и длительности импульсов, уменьшению их амплитуды и случайным временным сдвигам и задержкам сигнала.

С целью снижения межсимвольных искажений форма импульса ЛЦС имеет плавные передний и задний фронты, обеспечивающие минимум последствий переходных процессов, обусловленных ограничениями полосы частот линейного тракта. Для передачи по кабельным линиям используются видеоимпульсы, описываемые, например, функцией вида $f(t) = U_m \cdot \exp(-\beta^2 t^2)$, называемые еще колокольными, или видеоимпульсы типа выпрямленной синусоиды.

Для устранения или уменьшения указанных деформаций ЛЦС в линейном тракте через определенные расстояния устанавливаются линейные регенераторы (ЛР), задача которых состоит в усилении сигналов, коррекции постоянных и переменных амплитудно-частотных искажений, восстановлении амплитуды, формы и длительности импульсов ЦЛС, а также временных соотношений между соседними символами. Этот процесс называется регенерацией цифрового сигнала и позволяет очистить от помех и искажений сигнал, прошедший через участок линии связи - регенерационный участок (РУ) и восстановить его в такой форме, какую он имел на входе РУ. Процесс регенерации ЛЦС, в широком смысле, состоит в опознавании переданных символов на фоне помех, восстановлении в соответствии с опознанными символами формы, амплитуды и временного положения импульсов и пробелов и передачи их на вход следующего РУ. Опознавание символов ЛЦС осуществляется методом однократного отсчета, заключающегося в сравнении амплитуды регенерируемого сигнала с эталонным пороговым уровнем (порогом опознавания) в момент опознавания, априорно соответствующий наибольшей вероятности верного опознавания. Если в момент опознавания уровень сигнала превышает порог опознавания, то принимается решение о том, что на вход регенератора поступил импульс (единица), если не превышает - пробел (нуль). В процессе опознавания символа положительной полярности регенерируемый сигнал сравнивается с положительным пороговым напряжением (током), отрицательной полярности - с отрицательным пороговым напряжением (током).

Число РУ в линейном тракте может достигать нескольких десятков (и даже сотен). Отношение сигнал-помеха на выходе каждого ЛР практически одинаково, т. е. внешние аддитивные помехи и шумы (внутреннего и внешнего происхождения), не зависящие от сигнала, практически полностью подавляются в пределах одного РУ и вдоль всего линейного тракта ЦСП не накапливаются. В этом состоит основное отличие ЦСП от аналоговых систем передачи, в которых шумы и помехи усиливаются вместе с полезным сигналом,

к этим шумам добавляются собственные шумы линейных усилителей и передаются от усилителя к усилителю. Происходит накопление помех и шумов, в результате чего отношение сигнал-помеха уменьшается.

Регенераторы видеоимпульсов, используемые в ЦСП ИКМ-ВРК, можно классифицировать по различным признакам:

- по способу синхронизации по тактовой частоте или получения хронизирующей информации (далее будем использовать этот термин, как равноправный термину синхронизация по тактовой частоте информации);
- по способу использования хронизирующей информации в процессе регенерации;
- по виду порогового и решающего устройства.

По способу получения хронизирующей информации ОР можно разделить на регенераторы с самохронированием (или с внутренней синхронизацией) и полным восстановлением временных интервалов и регенераторы с внешним хронированием (или внешней синхронизацией).

В регенераторах с самохронированием колебания тактовой частоты, необходимые для формирования последовательности стробирующих импульсов, выделяются непосредственно из спектра входного ЛЦС. Для выделения хронизирующего сигнала используются устройства выделения тактовой частоты (УВТЧ) из спектра ЛЦС. При использовании регенераторов с внешним хронированием к цифровому сигналу примешивается синусоидальный хронизирующий сигнал. Этот сигнал может также передаваться по отдельной цепи.

Передача хронизирующего сигнала по специальной паре кабеля неэкономична. Кроме того, она сопряжена со значительными трудностями из-за возникающей необходимости точной коррекции фазовых характеристик хронизирующей и рабочей пары на каждом РУ с целью получения одинакового группового времени прохождения (ГВП) для частотных составляющих ЛЦС и хронизирующего сигнала. Если специальный хронизирующий сигнал передается по рабочей паре, то в каждом ЛР необходимо выполнить следующие операции: выделить этот сигнал узкополосными фильтрами; подавить (например, с помощью заграждающих фильтров) составляющие, близкие к тактовой частоте, на выходе ЛР; вновь замешать в линейный сигнал хронизирующее колебание. Такие устройства получаются достаточно сложными, но в последнее время в связи с проблемами тактовой сетевой синхронизации находят применение. Поэтому широкое применение получили ЛР с самохронированием с использованием различных способов построения УВТЧ.

Хронизирующая информация может быть получена как из входного ЛЦС (регенераторы прямого действия), так и из его выходного сигнала (регенераторы обратного действия). Недостатком регенератора обратного действия является наличие цепи обратной связи, что снижает устойчивость регенератора и повышает требования к стабильности и точности работы его узлов.

По способу использования хронизирующего сигнала для управления работой ЛР различают регенераторы с полным и частичным восстановлением

временных соотношений (или, как иногда говорят, с полной или частичной регенерацией). В регенераторах с полным восстановлением временных соотношений используется схема выделения тактовой частоты, на выходе которой формируется стробирующая последовательность импульсов тактовой частоты, управляющая работой ЛР. При частичном восстановлении временных соотношений для выделения тактовой частоты используется только узкополосный фильтр (УФ), напряжение с выхода которого сфазированно таким образом, чтобы положительные (или отрицательные) его полупериоды совпадали с регенерируемыми импульсами, поступающими с выхода порогового устройства ЛР.

7.2 Разработка диаграмм работы регенератора при условии отсутствия и наличия помех в канале связи

Основное применение получили регенераторы прямого действия с полным восстановлением временных соотношений. Обобщенная структурная схема типового регенератора этого типа приведена на рис. 7.1, а временные диаграммы, поясняющие принцип его работы, показаны на рис. 7.2.

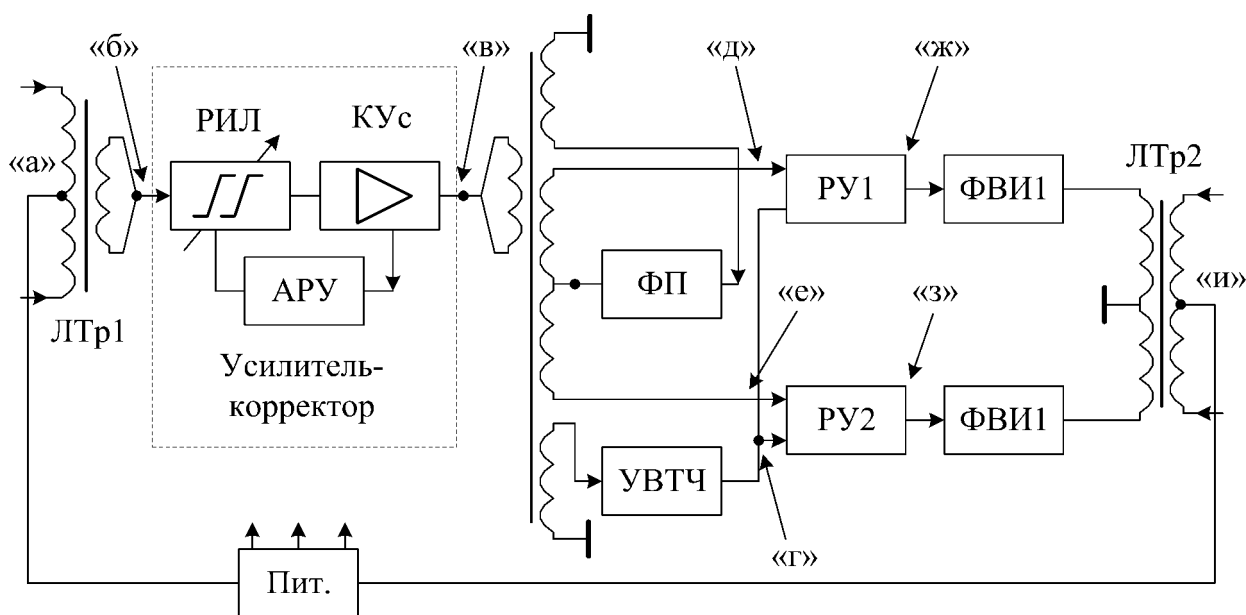


Рис. 7.1 – Структурная схема типового регенератора

В процессе регенерации ЦЛС выполняются следующие основные операции:

- усиление регенерируемых импульсов и коррекция их формы (коррекция амплитудно-частотных искажений, обусловленных частотной характеристикой затухания регенерационного участка и ограничением полосы частот линейного цифрового тракта);
- сравнение значений амплитуд откорректированных импульсов с пороговым (эталонным) значением;
- стробирование откорректированных импульсов, в результате чего

создаются такие условия, при которых импульсы на выходе регенератора формируются в строго определенные моменты времени;

- формирование новых импульсов с заданными параметрами и временными соотношениями.

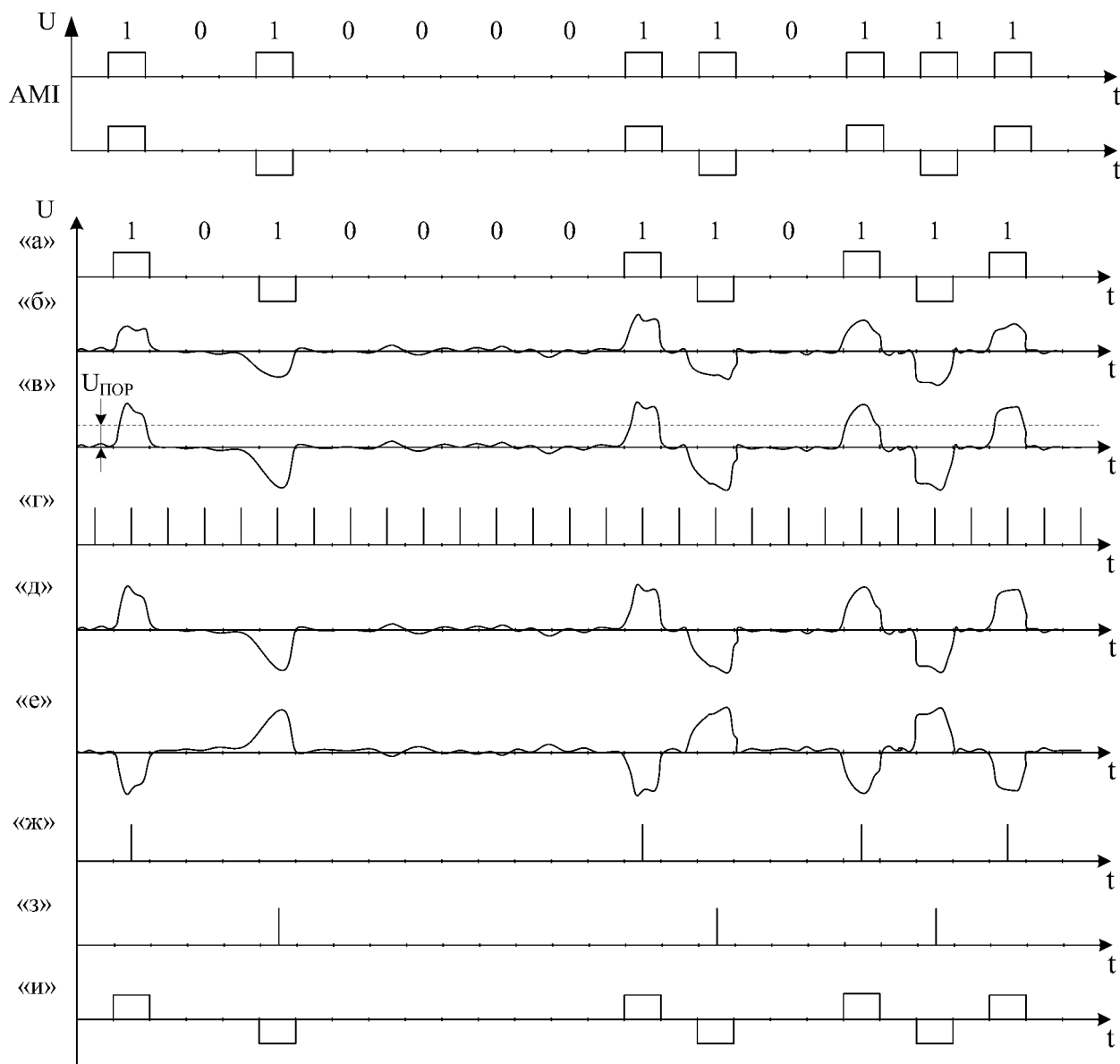


Рис. 7.2 – Временные диаграммы работы линейного регенератора (без ошибок)

На входе регенерационного участка, т.е. на выходе предыдущего регенератора (станционный - передающей станции или линейного) одна из реализаций цифрового сигнала имеет вид (рис. 7.2, а). После прохождения регенерационного участка на вход ЛР подается искаженный и задержанный на некоторое время ЛЦС (рис. 7.2, б). Через линейный трансформатор (ЛТр₁) этот сигнал поступает на вход усилителя-корректора, в состав которого входят: регулируемая искусственная линия РИЛ, обеспечивающая коррекцию переменных амплитудно-частотных искажений, корректирующий усилитель

КУс, предназначенный для компенсации затухания регенерационного участка и коррекции постоянных частотных искажений схема автоматической регулировки усиления АРУ, необходимая для изменения параметров РИЛ в соответствии с изменениями затухания регенерационного участка.

Коррекция формы импульсов осуществляется для уменьшения влияния одних импульсных посылок на другие за счет концентрации энергии импульсов в тактовых интервалах T . Это позволяет уменьшить вероятность ошибочной регенерации символов. Вид сигнала, формируемого на выходе усилителя-корректора, показан на рис. 7.2, в.

К выходу усилителя-корректора через трансформатор Tr подключено устройство выделения тактовой частоты УВТЧ, на выходе которого формируется последовательность коротких стробирующих импульсов. Эти импульсы фазированы относительно входных символов таким образом, что оказываются в середине тактовых интервалов, где амплитуда входных символов максимальна. Это также способствует уменьшению вероятности ошибки в процессе регенерации. Стробирующие импульсы (рис. 7.2, г) подаются на решающие устройства $РУ_1$ и $РУ_2$ каналов регенерации положительных и отрицательных символов ЛЦС соответственно. Кроме того, на РУ через Tr подаются скорректированные и усиленные импульсы, смещенные на величину порогового напряжения $U_{пор}$, вырабатываемого устройством формирования порога ФП, (рис. 7.2, д, е). Устройство формирования порога содержит выпрямитель, работающий на инерционную нагрузку, и вырабатывает постоянное напряжение, равное половине амплитуды выходных импульсов усилителя-корректора.

Поскольку АРУ обеспечивает постоянство амплитуды импульсов на выходе усилителя-корректора, то порог решения остается практически неизменным. В некоторых схемах ЛР система АРУ воздействует не на параметры усилителя-корректора, а на величину порогового напряжения, однако такое решение оказывается менее эффективным.

В РУ осуществляется стробирование (опробывание) в каждом такте поступающих символов. Если в момент прихода на РУ стробирующего импульса входной сигнал имеет положительную полярность (т. е. разность между выходным сигналом усилителя-корректора и пороговым напряжением положительна), то на выходе РУ формируется импульс, поступающий на вход соответствующего формирователя выходных импульсов ФВИ (рис. 7.2, ж, з). Если указанная разность отрицательна, то импульс на выходе РУ не формируется.

В ФВИ, который может быть реализован в виде ждущего мультивибратора, при поступлении импульсов с выхода РУ формируются импульсы соответствующей формы, амплитуды и длительности, следующие с тактовой частотой. Поскольку ФВИ₁ и ФВИ₂ подключены к линии через дифференциальный трансформатор, то импульсы на выходе ЛТр₂ будут иметь разную полярность (рис. 7.2, и).

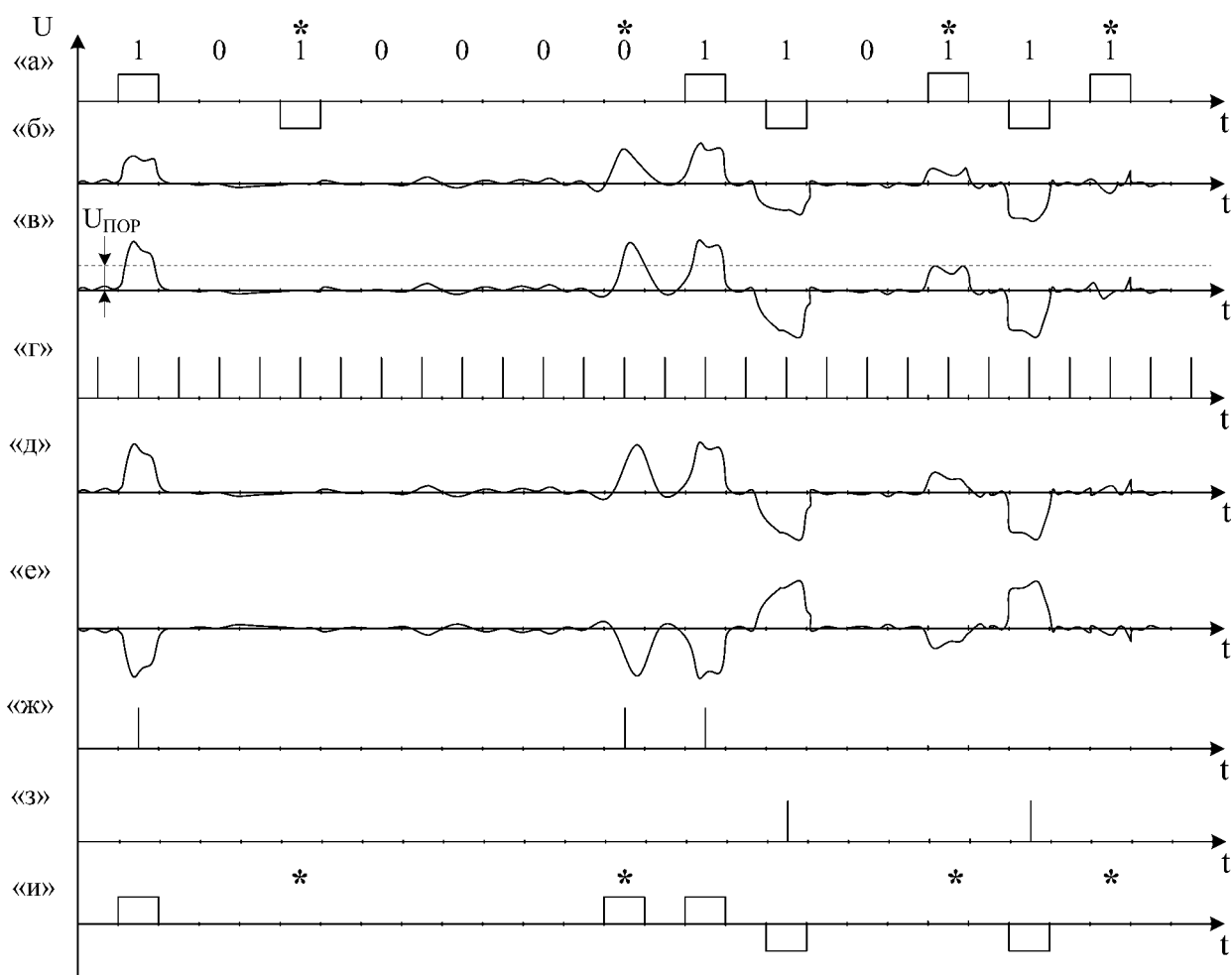


Рис. 7.3 – Временные диаграммы работы линейного регенератора (с ошибками)

Как видно из принципа работы регенератора, ошибка при регенерации может иметь место, если величина помехи окажется больше (меньше) порогового напряжения $U_{\text{пор}}$. В качестве примера на рис. 7.3 показан процесс возникновения ошибок при передаче четырех из тринадцати символов (эти символы помечены *).

Электропитание необслуживаемых регенерационных пунктов НРП производится дистанционно из обслуживаемых регенерационных пунктов стабилизированным током. Питание ЛР ЦСП по симметричным кабелям осуществляется по фантомным цепям, организуемым по тем же парам, по которым передается ЛЦС (рис. 7.1). В случае использования коаксиальных кабелей электропитание осуществляется по внутренним проводникам коаксиальных пар.

Литература

1. Рекомендация ITU-T G.957 Оптические интерфейсы для оборудования и систем синхронной цифровой иерархии.
2. Рекомендация ITU-T G.652 Характеристики одномодового волоконно-оптического кабеля.
3. Рекомендация ITU-T G.653 Характеристики одномодового волоконно-оптического кабеля со сдвигом дисперсии.
4. Рекомендация ITU-T G.654 Характеристики одномодового волоконно-оптического кабеля с затуханием, минимизированным на волне 1550 мкм.
5. Рекомендация ITU-T G.655 Характеристики одномодового волоконно-оптического кабеля с ненулевой дисперсией.
6. Крухмалев В.В., Гордиенко В.Н., Моченов А.Д. Цифровые системы передачи. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 351 с.
7. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. – М.: Радио и связь, 2000. – 468 с.
8. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDH. – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 1999. – 148 с.