

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ

**Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования**

"САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА"

А.Ю. Матюхин

М.В. Лобастова

А.Б. Волчков

**Разработка цифровой системы передачи и организация
транспортной сети**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2014**

УДК 621.376.56

А.Ю. Матюхин, М.В. Лобастова, А.Б. Волчков. Разработка цифровой системы передачи и организация транспортной сети /СПбГУТ. – СПб, 2014.

Приведены исходные данные для курсового проектирования цифровой системы передачи и организации транспортной сети по курсу «Многоканальные системы передачи» и методические указания по разработке подсистем ЦСП, цикла передачи, схемы генераторной аппаратуры, схемы организации сети, алгоритма процедуры встроенного контроля ошибок для слоя организуемых трактов виртуальных контейнеров, схемы защиты в каждом сетевом слое, схемы синхронизации сети.

Предназначено для студентов старших курсов специальностей направления подготовки 210700.62 Инфокоммуникационные технологии и системы связи.

Ответственный редактор *А.Ю.Матюхин*

© Санкт-Петербургский

государственный университет телекоммуникаций

им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2014

Постановка задачи курсового проектирования

1. Содержание курсового проектирования

Современные транспортные телекоммуникационные сети используют технологии плезиохронной цифровой иерархии, синхронной цифровой иерархии и технологию мультиплексирования с разделением по длинам волн.

Для приобретения навыков разработки и проектирования цифровых систем передачи, а также транспортных сетей, построенных на их основе, предлагается разработать нетиповую локальную цифровую систему передачи и организовать на её основе транспортную сеть заданной структуры.

Пояснительная записка должна содержать:

- введение;
- перечень исходных данных;
- постановку задачи курсового проектирования;
- расчет характеристик аналого-цифрового преобразования;
- расчет цикла передачи;
- схему генераторного оборудования;
- схему организации сети;
- расчет нагрузки;
- алгоритм процедуры встроенного контроля ошибок для слоя организуемых трактов виртуальных контейнеров и параметры оценки;
- схему защиты в каждом сетевом слое;
- схему синхронизации сети.

Пояснительная записка оформляется **аккуратно** (черновики не рецензируются) на листах формата А4 или в тетрадях с листами такого формата с использованием только одной стороны листа. Другая сторона предназначена для исправления ошибок после проверки рецензентом. Листы должны иметь поля (≈ 2 см) для замечаний рецензента. Готовые проекты студентам заочной формы обучения следует сдать на рецензирование в деканат **не позднее первого дня сессии**.

2. Исходные данные

Исходные данные для курсового проектирования определяются в соответствии с номером варианта. Задание на проектирование представлено в виде четырех таблиц, образующих в совокупности несколько сот несовпадающих вариантов индивидуальных заданий.

Для студентов заочной формы обучения номера вариантов определяются цифрами номера студенческого билета:

номер варианта по табл. 1 «Каналы цифровой системы передачи» – по последней цифре номера студенческого билета;

номер варианта по табл. 2 «Требования к каналам» – по предпоследней цифре номера студенческого билета;

номер варианта по табл. 4 «Топология сети к схеме рис.1» – по последней цифре номера студенческого билета;

номер варианта по табл. 5 «Цифровые сигналы в интерфейсах узлов» – по предпоследней цифре номера студенческого билета.

Таблица 1.

Каналы цифровой системы передачи.

№	Наименование	Параметры	Номера вариантов		
			0	1	2
1	Канал телефонный	Число каналов Частота следования код.гр., кГц Число битов в код. слове, бит	6 7 – 10 8	30 Расчет Расчет	10 Расчет Расчет
2	Канал звукового вещания	Число каналов Частота следования код.гр., кГц Число битов в код. слове, бит	2 Расчет Расчет	-	-
3	Канал широкополосный	Число каналов Частота следования код.гр., кГц Число битов в код. слове, бит	-	-	1 510-600 10
4	Канал видеотелефонной связи	Число каналов Частота следования код.гр., кГц Число битов в код. слове, бит	-	1 10000 – 12000 1	-
5	Канал ПДС-0,2 кбит/с	Число каналов Частота следования код.гр., кГц Число битов в код. слове, бит	-	-	-
6	Канал ПДС-1,2 кбит/с	Число каналов Частота следования код.гр., кГц Число битов в код. слове, бит	-	-	-
7	Канал ПДС-4,8 кбит/с	Число каналов Частота следования код.гр., кГц Число битов в код. слове, бит	-	-	-
8	Канал ПДС-19,2 кбит/с	Число каналов Частота следования код.гр., кГц Число битов в код. слове, бит	2 19,4-25 3	-	-
9	Канал ПДС-1024 кбит/с	Число каналов Частота следования код.гр., кГц, осн. Частота следования код.гр., кГц, доп. Число битов в код. слове, бит, доп.	-	1 1024 0,4-0,8 4	-
10	Канал ПДС-2048 кбит/с	Число каналов Частота следования код.гр., кГц, осн. Частота следования код.гр., кГц, доп. Число битов в код. слове, бит, доп.	-	-	16 2048 3-6 1
11	Групповой канал передачи СУВ	Число каналов Частота следования код.гр., кГц Число битов в код. слове, бит	-	-	1 7-10 1
12	Канал передачи СУВ	Число каналов	24	80	

Таблица 1. Продолжение

№	Номера вариантов							
	3	4	5	6	7	8	9	10
1	-	24 Расчет Расчет	7 30 - 40 1	-	6 8 – 10 7	16 Расчет Расчет	42 32 – 40 1	10 8 – 9 7
2	-	3 13 – 18 7	4 Расчет Расчет	2 21 – 25 8	3 Расчет Расчет	-	3 Расчет Расчет	-
3	1 Расчет Расчет	-	-	1 Расчет Расчет	-	-	-	1 Расчет Расчет
4	1 8000 – 10000 1	-	-	-	-	-	-	1 2200 – 2800 5
5	-	-	-	-	10 1,6 – 2,4 1	-	-	-
6	-	-	-	-	-	20 8 – 10 1	-	-
7	-	8 5 – 7 4	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	2 20 – 26 3	-
9	-	-	-	25 1024 5 – 8 3	-	-	-	6 1024 0,8 – 1,6 5
10	12 2048 0,4 – 1,2 4	-	2 2048 0,8 – 1,6 4	-	-	1 2048 0,4 – 1,6 3	-	-
11	1 4 – 6 1	-	-	1 4 – 7 1	-	-	-	-
12	-	64	30	-	64	100	100	50

Таблица 2.

Требования к телефонным каналам

Параметры	Номера вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_{\text{н}}$, кГц	0,3	0,3	0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	0,3
$f_{\text{в}}$, кГц	3,4	2,7	3,4	4,6	4,1	2,7	3,4	3,4	4,4	3,4
$\Delta f_{\text{ф}}$, кГц	0,8	1,0	1,2	0,8	1,0	1,2	0,8	1,0	1,2	1,0
p_1 , дБм0	-40	-35	-25	-30	-35	-35	-45	-40	-30	-40
p_2 , дБм0	-10	-5	-5	-10	-10	-5	-5	-5	-5	-5
$p_{\text{ш.н}}$, дБм0	-50	-45	-50	-65	-60	-55	-60	-62	-55	-65
$a_{\text{н}}$, дБ	20	25	30	35	30	25	20	25	30	25
$P_{\text{ш.и}}$, пВт	500	500	2000	200	200	500	200	250	400	200
Номер шкалы	11	12	13	14	14	6	7	8	9	10

Требования к каналам звукового вещания

Параметры	Номера вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_{\text{н}}$, кГц	0,1	0,05	0,03	0,1	0,05	0,03	0,1	0,05	0,03	0,05
$f_{\text{в}}$, кГц	6,3	10,0	15,0	6,3	10,0	15,0	6,3	10,0	15,0	10,0
$\Delta f_{\text{ф}}$, кГц	0,5	0,5	0,3	0,8	0,5	0,5	1,0	1,0	0,8	0,5
p_1 , дБм0	-25	-25	-30	-25	-30	-35	-25	-30	-35	-27
p_2 , дБм0	0	+2	0	+6	0	0	-2	0	0	+2
$p_{\text{ш.н}}$, дБм0	-50	-55	-60	-60	-65	-70	-55	-60	-65	-60
$a_{\text{н}}$, дБ	30	35	35	30	35	25	25	30	30	34
$P_{\text{ш.и}}$, пВт	2000	500	200	500	200	60	1000	600	200	500
Номер шкалы	8	9	10	10	11	12	13	14	14	13

Требования к широкополосным каналам

Параметры	Номера вариантов									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$f_{\text{н}}$, кГц	60,6	60,6	60,6	312,3	312,3	312,3	330	312,3	60,6	60,6
$f_{\text{в}}$, кГц	107,7	107,7	107,7	551,4	551,4	551,4	530	551,4	107,7	107,7
Δf_{ϕ} , кГц	1	2	1	6	12	6	12	8	2	4
p_1 , дБм0	-5	-10	-5	-1	-4	-7	-1	-4	-11	-5
p_2 , дБм0	+5	+5	+5	+9	+9	+9	+10	+9	+5	+5
$a_{\text{н}}$, дБ	45	40	45	40	35	35	40	35	40	45
$P_{\text{ш.и}}$, пВт	2000	4000	1000	30000	50000	50000	20000	30000	3000	4000
Номер шкалы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Таблица 3.

Шкалы квантования. Для положительной ветви квантующей характеристики.

Номер шкалы	Сегмент № 2		Сегмент № 3		Сегмент № 4	
	$\frac{\Delta_2}{\Delta_1}$	$\frac{n_2}{n_1}$	$\frac{\Delta_3}{\Delta_1}$	$\frac{n_3}{n_1}$	$\frac{\Delta_4}{\Delta_1}$	$\frac{n_4}{n_1}$
1	2	3	-	-	-	-
2	4	$\frac{1}{3}$	-	-	-	-
3	8	$\frac{3}{5}$	-	-	-	-
4	8	$\frac{1}{7}$	-	-	-	-
5	4	$\frac{5}{3}$	-	-	-	-
6	2	$\frac{1}{2}$	4	$\frac{1}{2}$	-	-
7	2	$\frac{3}{4}$	4	$\frac{1}{4}$	-	-
8	2	2	8	1	-	-
9	4	1	8	2	-	-
10	2	$\frac{3}{2}$	4	$\frac{3}{2}$	-	-
11	2	1	4	1	8	1
12	2	$\frac{2}{3}$	4	$\frac{2}{3}$	16	$\frac{1}{3}$
13	4	$\frac{3}{2}$	8	$\frac{1}{2}$	16	1
14	2	1	4	$\frac{3}{2}$	16	$\frac{1}{2}$

Таблица 4.

Топология сети к схеме рис. 1

№ варианта	A–B	B–C	C–D	D–E	B–E	E–F	C–G	G–H	D–H	F–L	F–K	K–L
0	60	12	69	170	19	75						
1	31	26	16	149	31	18						
2		24	8	153	66		20		56			
3		7	38	180	19		56	29				
4	73	15		123	43		28		79			
5	70	4		141	56		32		43			
6		11	78	134	8	19				65	27	
7		29	14	153	19	34				67	16	
8			39	176		189	37	63	47	53	29	62
9			76	181		175	32	51	65	9	38	42

В таблице указано расстояние между узлами в километрах.

Таблица 5

Количество цифровых сигналов в интерфейсах узлов

При формировании трактов VC-11 и VC-12

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Минимальное количество компонентных сигналов для связи каждого локального узла с каждым*	10	9	8	7	6	5	9	10	12	11

При формировании трактов VC-2

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Минимальное количество компонентных сигналов для связи каждого локального узла с каждым*	8	7	8	7	6	5	4	4	5	6

При формировании трактов VC-3 и VC-4

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Минимальное количество компонентных сигналов для связи каждого локального узла с каждым*	6	5	4	3	6	5	4	3	4	5

* На направлениях В–Е, В–D и D–Е количество компонентных сигналов должно быть в 10 раз больше минимального. Узел С является транзитным узлом, т.е. ввод и вывод сигналов в этом узле не производится.

Пояснения к табл. 1

Эта таблица является основной, определяющей структуру системы. При ее разработке определялся принцип одинаковой сложности проектов по группам вариантов 0 – 9. В таблице для каждого варианта указаны типы и количество каналов, которые должны быть организованы в системе. Если организация канала не предусматривается, то соответствующая клетка варианта прочеркнута. Каналы, характеристики аналого-цифровых преобразователей (АЦП) которых подлежат расчету, имеют надпись «Расчет». Исходные данные для расчета следует брать из табл. 2, 3. Для каналов, расчет характеристик АЦП которых не производится, в соответствующей клетке табл. 1 указаны частота следования кодовых групп (или кодовых слов) в этом канале и число битов в кодовом слове на выходе соответствующего преобразователя. Как правило, значение частоты приведено в виде двух чисел, соединенных дефисом. В этом случае разработчику проекта представляется возможным выбрать точное значение частоты в указанных пределах. Такой выбор упрощает разработку цикла передачи и его структуру, а в реальной системе упрощает генераторное оборудование и аппаратуру цикловой синхронизации.

Поясним сказанное на примере варианта 1. По этому варианту в системе должны быть организованы следующие каналы:

30 телефонных каналов, характеристики АЦП которых подлежат расчету;

1 канал видеотелефонной связи, сигнал которого после аналого-цифрового преобразования, осуществляемого в системе, может быть представлен регулярной последовательностью битов с частотой следования от 10 до 12 МГц (цифра 1 в нижней строке свидетельствует о том, что группы цифрового сигнала состоят из одного бита);

1 канал передачи дискретных сигналов со скоростью 1024 кбит/с; преобразователь «цифра-цифра» или кодек работает с использованием метода согласования скоростей (или кодирования скорости). Частота следования битов в основном потоке равна 1024 кГц, дополнительный поток состоит из кодовых слов по 4 бита в каждом, частота следования кодовых слов дополнительного потока может быть выбрана из значений, заключенных в интервале от 0,4 кГц до 0,8 кГц;

80 каналов передачи сигналов управления и взаимодействия (СУВ), сведения о которых приведены ниже.

В табл.1 включены каналы 12 типов, что существенно меньше числа типов каналов, которые могут быть организованы на практике.

Телефонные каналы различных вариантов проектирования отличаются друг от друга шириной полосы эффективно передаваемых частот, шириной динамического диапазона и требованиями к защищенности канала от помех (см. табл. 2). Следовательно, число битов в кодовом слове телефонного канала может существенно отличаться от принятого в первичных ЦСП. То же относится и к частоте дискретизации.

Под широкополосным каналом здесь понимается первичный или вторичный широкополосный канал в зависимости от требований к нему, сформулированных в табл. 2.

Каналы передачи дискретных сигналов (передачи данных), указанные в таблице, характеризуются их пропускной способностью (число битов, передаваемых по каналу в секунду). Каналы с пропускной способностью не выше 0,2 кбит/с, 1,2 кбит/с, 4,8 кбит/с и 19,2 кбит/с спроектированы так, чтобы они были способны передавать дискретные сигналы со скоростями следования битов, равными указанным значениям и меньшими их. В остальных случаях (1024 кбит/с и 2048 кбит/с) следует полагать, что номинальная скорость следования битов по каналу постоянна.

Каналы передачи сигналов управления и взаимодействия (СУВ) являются служебными, обслуживающими различные типы коммутируемых основных каналов, но не систему передачи. В курсовом проектировании необходимость организации служебных каналов для обслуживания системы передачи должна учитываться при построении цикла системы, но их расчет заданием не предусматривается. Следует полагать, что кодовые слова каждого канала передачи СУВ на выходе кодера состоят из одного бита, а частота их повторения может быть выбрана проектировщиком из значений, заключенных в интервале (0,4 – 0,8) кГц.

Групповой канал СУВ служит для передачи всех СУВ, обслуживающих коммутируемые каналы. Соответствующая аппаратура формирования группового сигнала и его разделения на каналные СУВ не входит в состав проектируемой ЦСП.

Пояснения к табл. 2

В таблице приведены требования к каналам, подлежащим расчету согласно табл. 1, а также исходные данные, характеризующие эти каналы. При этом использованы следующие обозначения:

f_n, f_v – соответственно, нижняя и верхняя границы эффективно передаваемых частот канала;

Δf_ϕ – ширина полосы расфилтровки фильтров, используемых в дискретизаторе и восстановителе аналоговой формы сигнала;

p_1, p_2 – соответственно нижняя и верхняя границы нормируемого диапазона уровней преобразуемого сигнала в ТНОУ;

$P_{ш.н}$ – допустимое значение абсолютного уровня шумов на выходе незанятого телефонного канала или канала вещания в ТНОУ;

a_n – минимально допустимое значение защищенности передаваемого сигнала от шумов в заданном диапазоне изменения его уровней;

$P_{ш.и}$ – ожидаемое значение средней мощности шумов в канале, возникающих из-за погрешностей изготовления кодеков. Указанное значение приведено в ТНОУ и относится к полосе, равной половине частоты дискретизации;

Проектирование подсистемы аналого-цифрового преобразования обычно включает в себя синтез оптимальной шкалы квантования. Эта достаточно сложная задача в курсовом проекте не решается. Форма шкалы считается заданной. Ее номер указан в табл. 2. Параметры шкалы приведены в табл.3.

При расчете шумов квантования закон распределения вероятностей мгновенных значений преобразуемых сигналов рекомендуется принять нормальным

$$w(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-0,5\left(\frac{U}{\sigma}\right)^2},$$

где U – мгновенное значение сигнала,

σ – среднеквадратическое отклонение сигнала.

Закон распределения вероятностей мгновенных значений сигналов, передаваемых по телефонным каналам, каналам вещания и широкополосным каналам может заметно отличаться от нормального. В частности для телефонных сигналов он близок к экспоненциальному. Тем не менее МСЭ-Т рекомендует измерение защищенности сигналов от шумов квантования производить в условиях передачи сигналов с нормальным распределением вероятностей мгновенных значений. Соответственно этому расчет шумов в курсовом проекте предлагается производить исходя из нормального или гауссовского распределения вероятностей мгновенных значений преобразуемых сигналов.

Входное и выходное сопротивления телефонного канала и канала вещания следует принять равным 600 Ом, а широкополосного – 150 Ом.

Заметим также, что диапазон изменения уровней группового сигнала, передаваемого по широкополосному каналу, обычно гораздо шире, чем это указано в таблице. Необходимое сужение диапазона до значений, указанных в таблице, достигается суммированием передаваемого сигнала с некоторым дополнительным шумовым сигналом при одновременном принятии мер по стабилизации уровня образующейся суммы.

Пояснения к табл. 3

В таблице представлены 14 шкал квантования. Шкалы с первой по пятую – трехсегментные (в положительной ветви характеристики – двухсегментные), шкалы с шестой по десятую – пятисегментные (в положительной ветви характеристики – трехсегментные), шкалы с 11 по 14 – семисегментные (в положительной ветви – четырехсегментные). Все шкалы симметричные и ориентированы относительно системы координат так, как это показано на рис. 1. Номер шкалы, которую следует применять при проектировании подсистемы аналого-цифрового преобразования, указан в табл. 2.

В пределах каждого сегмента шаги квантования одинаковы, шаги квантования центрального (симметричного сегмента) равны Δ_1 . В двух примыкающих к нему сегментах значение шага квантования обозначено через Δ_2 . В следующих – Δ_3 . Число шагов квантования в первом сегменте положительной ветви характеристики равно n_1 , во втором – n_2 и т.д. Шкалы в табл. 3 характеризованы отношением

шага квантования каждого сегмента к шагу квантования первого сегмента и отношениями числа шагов в каждом сегменте к числу шагов в первом сегменте. Шкала квантования определяется однозначно, если дополнительно к указанным отношениям известны численное значение шага квантования в первом сегменте (или напряжения ограничения) и разрядность кода (или число битов в кодовом слове). Расчет требуемых значений величины шага квантования в первом сегменте и числа битов в кодовых словах выполняется студентами на стадии проектирования системы.

На рис.1 в качестве примера приведена пятисегментная характеристика с параметрами:

$$\frac{\Delta_2}{\Delta_1} = 2; \quad \frac{\Delta_3}{\Delta_1} = 4; \quad \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{2}; \quad \frac{n_3}{n_1} = \frac{1}{2} \quad \text{при } m=5.$$

Входные напряжения, соответствующие верхним границам сегментов, обозначены через

$$U_1, U_2, U_3.$$

Напряжение ограничения, соответствующее началу зоны ограничения квантующей характеристики, в данном случае равно $U_{\text{огр}} = U_3$.

Для указанных параметров шкалы (рис. 1)

$$U_1 = \frac{1}{4} U_{\text{огр}} = 8\Delta_1, \quad U_2 = \frac{1}{2} U_{\text{огр}} = 16\Delta_1, \quad U_{\text{огр}} = U_3 = 32\Delta_1.$$

В общем случае для сегментных шкал справедливо

$$U_1 = \frac{1}{1 + \sum_{k=2}^N \frac{\Delta_k}{\Delta_1} \cdot \frac{n_k}{n_1}} \cdot U_{\text{огр}},$$

$$U_l = \left(1 + \sum_{k=2}^l \frac{\Delta_k}{\Delta_1} \cdot \frac{n_k}{n_1}\right) \cdot U_1,$$

$$U_{\text{огр}} = \lambda \cdot 2^{m-1} \cdot \Delta_1,$$

где N - число сегментов в положительной ветви квантующей характеристики;

$2 \leq l \leq N$;

$$\lambda = \frac{1 + \sum_{k=2}^N \frac{\Delta_k}{\Delta_1} \cdot \frac{n_k}{n_1}}{1 + \sum_{k=2}^N \frac{n_k}{n_1}}.$$

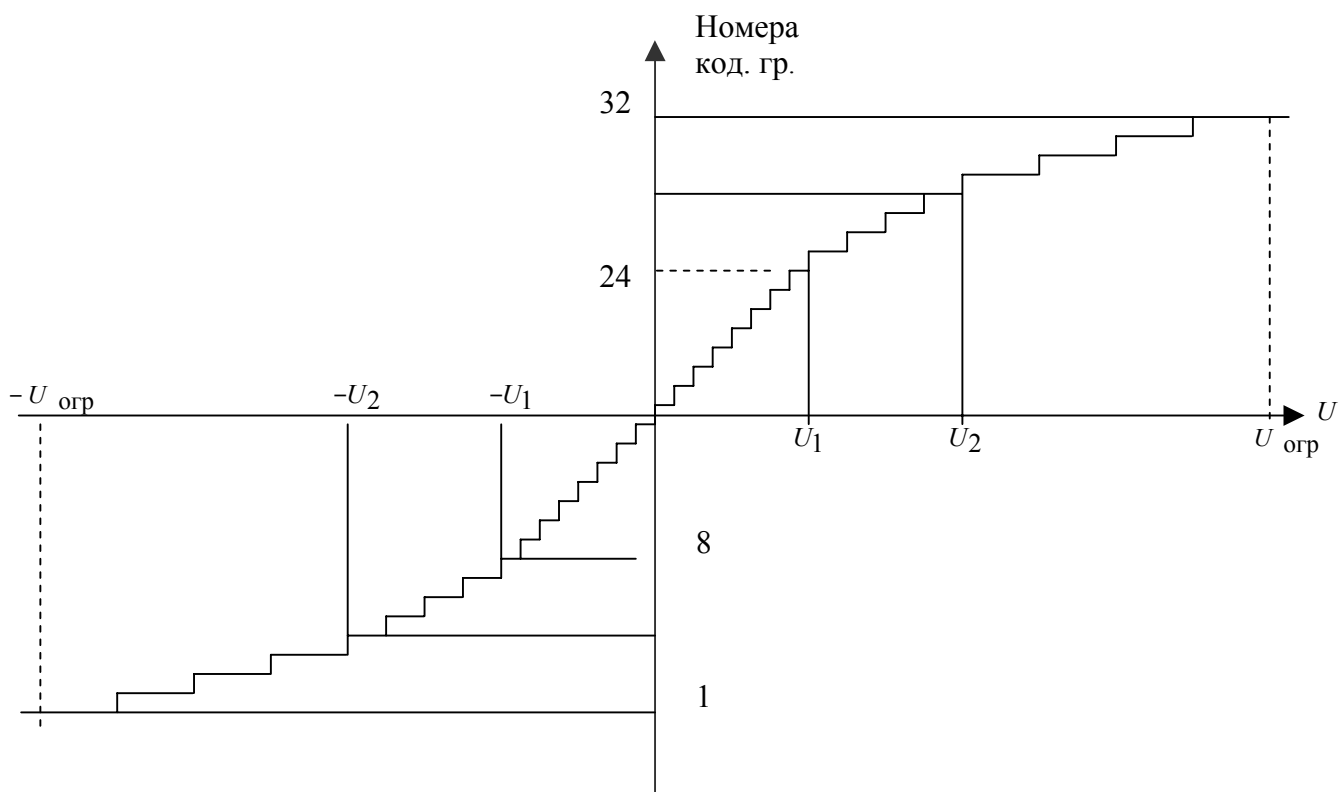


Рис. 1. Амплитудная характеристика квантования кодера

Параметры кодера: число битов в кодовом слове равно 5. Для кодирования используется симметричный код.

Алгоритм кодирования: первый бит – бит полярности, второй и третий биты – номер сегмента в двоичном коде. Но для кодирования первый сегмент надо разделить на два одинаковых по четыре шага квантования в каждом и пронумеровать сегменты – 0, 1, 2, 3. Четвертый и пятый биты – в простом арифметическом коде кодируется разность абсолютного значения входного напряжения и нижней границы сегмента с шагом квантования данного сегмента.

Кодовая группа номер 1 может иметь структуру 01111, кодовая группа номер 32 – 11111.

1. ПЕРЕДАЧА АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ

Результатом проектирования подсистемы являются следующие ее параметры, приведение окончательных и промежуточных значений которых является обязательным:

- f_d – частота дискретизации преобразуемых сигналов или частота повторения кодовых слов (кодовых групп);
- m – число битов в кодовом слове на выходе АЦП;
- $U_{огр}$ – напряжение, соответствующее порогу ограничения квантующей характеристики;
- $a_{ш}(p)$ – зависимость помехозащищенности передаваемых сигналов от их уровня в диапазоне от $(p_1 - 5)$ дБ до $(p_2 + 5)$ дБ;
- $P_{ш.н}$ – уровень шумов на выходе незанятого телефонного канала (или канала вещания) ТНОУ.

1.1. Расчет f_d

Частота дискретизации должна быть выбрана так, чтобы исходный сигнал мог быть выделен в неискаженном виде из спектра дискретизированного сигнала. Поэтому расчет заключается в выборе такого значения частоты дискретизации, при котором:

- спектр исходного сигнала не перекрывался бы спектрами продуктов дискретизации;
- ширина защитного интервала между спектральными составляющими исходного сигнала и ближайшими к ним спектральными составляющими продуктов дискретизации была бы не меньше Δf_{ϕ}

Частота дискретизации выбирается на основании теоремы В. А. Котельникова: $f_d \geq 2f_v$. Однако если дискретизируемый сигнал занимает полосу частот меньше одной октавы, т. е. для него $2f_n > f_v$, то частоту дискретизации можно также выбирать, используя выражение:

$$2f_v/(k+1) \leq f_d \leq 2f_n/k,$$

где k – целая часть отношения $f_n/(f_v - f_n)$.

Для таких сигналов учесть в расчётах полосу расфильтровки можно, определив новые значения нижней и верхней граничных частот спектра сигнала:

$$f_n' = f_n - (\Delta f_{\phi}/2) \text{ и } f_v' = f_v + (\Delta f_{\phi}/2).$$

Так, например, при

$$f_n = 100 \text{ кГц}, f_v = 160 \text{ кГц} \text{ и } \Delta f_{\phi} = 2 \text{ кГц}$$

в соответствии со сказанным можно принять:

$$161 \text{ кГц} \leq f_d \leq 198 \text{ кГц} \text{ или } f_d \geq 322 \text{ кГц}.$$

Следовательно, минимальное значение частоты дискретизации равно 161 кГц.

В пояснительной записке указываются минимальное значение частоты дискретизации и пределы его возможного изменения (по аналогии с приведенным выше примером).

Проверку правильности выбора частоты дискретизации необходимо произвести построением спектра дискретизированного сигнала для всех граничных значений частоты дискретизации.

1.2. Расчет m и зависимости $a_{ш}(p)$ для телефонного канала и канала звукового вещания

При проведении всех расчетов значение частоты дискретизации следует принять равным минимальному. Окончательный выбор значения частоты дискретизации производится при разработке цикла системы. Расчет рекомендуется выполнять в следующем порядке.

Расчет Δ_1 по допустимому уровню шумов в незанятом канале

Шумы на выходе канала складываются из шумов квантования и шумов из-за погрешности изготовления. Мощность шумов в ТНОУ равна

$$P_{ш.н.} = (P_{кв.н.} + P_{ш.и}) \cdot \frac{\Delta f}{0,5 f_d},$$

где $\Delta f = f_s - f_n$, $\frac{\Delta f}{0,5 f_d}$ – множитель, учитывающий попадание в полосу пропускания канала спектральных составляющих шума при их равномерном распределении в интервале, равном половине частоты дискретизации.

Известно, что дисперсия шумов квантования в незанятом канале равна $\frac{\Delta^2}{4}$.

Тогда мощность шумов квантования на выходе незанятого канала может быть рассчитана по формуле

$$P_{кв.н.} = \frac{\Delta_1^2}{4R}.$$

Для проектируемых каналов $R = 600$ Ом. С другой стороны, в соответствии с исходными данными мощность шумов в незанятом канале не должна быть больше, чем

$$P_{ш.н.} = 10^{0,1 * P_{ш.н.}}, \text{ мВт.}$$

$$\Delta_1 \leq \sqrt{4P_{кв.н.} \cdot R} = 2 \sqrt{\left(\frac{\Delta f}{0,5 f_d} \cdot P_{ш.н.} - P_{ш.и} \right) \cdot R},$$

где $P_{ш.н.}$, $P_{ш.и}$ должны быть выражены в ваттах, тогда шаг квантования будет иметь размерность в вольтах.

Расчет Δ_1 по допустимой защищенности сигналов от шумов на выходе канала

Пиковые значения сигналов наиболее низкого уровня сравнимы обычно с U_1 . Можно считать, что передача таких сигналов осуществляется при их линейном квантовании, и мощность шумов на выходе канала в ТНОУ равна

$$P_{ш}(p_1) \cong \left(\frac{\Delta_1^2}{12R} + P_{ш.ш} \right) \cdot \frac{\Delta f}{0,5 f_d}.$$

Защищенность сигнала от этих шумов

$$a_{ш}(p_1) = p_1 - 10 \lg \left(\left(\frac{\Delta_1^2}{12R} + P_{ш.ш} \right) \cdot \frac{\Delta f}{0,5 f_d} \cdot 10^3 \right)$$

должна быть не менее номинального значения защищенности (табл. 2). Это может иметь место только при

$$\Delta_1 \leq \sqrt{12 \cdot R \cdot \left(\frac{0,5 \cdot f_d}{\Delta f} \cdot 10^{(0,1(p_1 - a_{ш}) - 3)} - P_{ш.ш} \right)}.$$

Из двух рассчитанных предельных значений шагов квантования в первом сегменте (расчет по уровню шумов в незанятом канале и расчет по защищенности сигналов от шумов) для дальнейших расчетов следует принять наименьшее предельное значение Δ_1 .

Расчет порога ограничения

Известно, что погрешности квантования резко возрастают, и соответственно этому падает защищенность сигнала от шумов, когда мгновенные значения преобразуемого сигнала попадают в зону ограничения квантующей характеристики. Поэтому в системе следует принимать напряжение ограничения таким, чтобы при наивысшем уровне преобразуемого сигнала мгновенные значения сигнала превышали напряжение ограничения крайне редко. Пикфактор сигнала (отношение пикового значения сигнала к его эффективному или к среднеквадратическому значению) в данном случае при нормальном распределении вероятностей мгновенных значений может быть принят равным 4,0. А так как эффективное напряжение сигнала наиболее высокого уровня равно

$$U_{эфф.2.} = 10^{0,05 p_2} \sqrt{R \cdot 10^{-3}}, \text{ то}$$

$$U_{огр} = 4 \cdot U_{эфф.2.}$$

Расчет m

Из пояснений к табл. 3 следует

$$\frac{U_{огр}}{\Delta_1} = \lambda \cdot 2^{m-1},$$

тогда количество битов в кодовом слове может быть рассчитано по формуле

$$m \cong 1 + 3,33 \lg \frac{U_{\text{огр}}}{\lambda \cdot \Delta_1}.$$

В формулу следует подставить наименьшее значение шага квантования в первом сегменте из двух, полученных выше. Если значение количества битов в кодовом слове окажется дробным, то его следует округлить, увеличив до ближайшего целого (число битов в кодовом слове не может быть дробным). При округлении соответственно уменьшается значение шага квантования в первом сегменте. Значение напряжения ограничения остается без изменения.

После вычисления количества битов в кодовом слове следует по данным табл. 3, значению напряжения ограничения и количеству битов в кодовом слове рассчитать новое значение шага квантования в первом сегменте, значения шагов квантования в других сегментах и значения напряжений, соответствующих верхним границам сегментов.

Например, если Вам предписано использовать седьмую шкалу квантования, и Вами было найдено, что

$$U_{\text{огр}} = 3,5B, \text{ а } m = 8, \text{ то } \lambda = 1,75.$$

$$\Delta_1 = \frac{3,5}{1,75 \cdot 2^7} = 15,6 \cdot 10^{-3} (B) = 15,6 (мВ);$$

$$\Delta_2 = 15,6 \cdot 2 = 31,2 (мВ);$$

$$\Delta_3 = 4 \cdot 15,6 = 62,4 (мВ);$$

$$U_1 = \frac{2}{7} \cdot 3,5 = 1 (В);$$

$$U_1 = \frac{5}{7} \cdot 3,5 = 2,5 (В).$$

Расчет зависимости $a_{ш}(p)$ и уровня шумов в незанятом канале

Необходимо выполнить расчет зависимости защищенности от уровня передаваемого сигнала. Рекомендуются выбрать следующие значения уровней сигнала:

$$p_{c1} = p_1 - 5;$$

$$p_{c2} = p_1;$$

$$p_{c3} = \frac{p_1 + p_2}{2};$$

$$p_{c4} = p_2;$$

$$p_{c5} = p_2 + 5,$$

здесь p_1 и p_2 – данные о динамическом диапазоне из табл.2. Этим значениям уровней необходимо найти соответствующие значения эффективного напряжения

$$U_{ci} = 10^{0,05 \cdot p_{ci}} \cdot \sqrt{R \cdot 10^{-3}} (B).$$

В качестве исходных данных при расчете помехозащищенности используются значения $P_{ш.и}$, f_n , f_v , приведенные в табл. 3 и пояснениях к ней, и

значения f_d , $U_{огр}$, m , Δ_1 , Δ_2 , ..., U_1 , U_2 , ..., найденные в процессе проектирования АЦП.

Известно, что в системах с линейными шкалами квантования при идеально точном выполнении всех ее узлов шумы в каналах имеют две основные составляющие:

- шумы, возникающие при попадании мгновенных значений преобразуемого сигнала в зону квантования;
- шумы, возникающие при превышении мгновенными значениями порога ограничения.

Средняя мощность шумов в таких системах равна

$$P_{ш} = \left(\frac{\Delta^2}{12} + \Delta_{огр}^2 \right) \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{\Delta f}{0,5 f_d}.$$

При использовании реальных кодеков с сегментными шкалами квантования, например, с трехсегментными, основными составляющими шумов являются:

- шумы, вызванные попаданием преобразуемого сигнала в зону сегмента 1; вероятность этого события обозначим W_1 ; так как в пределах сегмента шаг постоянен и равен Δ_1 , средняя мощность этой части шумов равна

$$W_1 \cdot \frac{\Delta_1^2}{12R} \cdot \frac{\Delta f}{0,5 f_d};$$

- шумы, вызванные попаданием преобразуемого сигнала в зоны сегментов 2 и 3; соответствующие значения средних мощностей шумов равны

$$W_2 \cdot \frac{\Delta_2^2}{12R} \cdot \frac{\Delta f}{0,5 f_d}; \quad W_3 \cdot \frac{\Delta_3^2}{12R} \cdot \frac{\Delta f}{0,5 f_d};$$

- шумы, вызванные попаданием преобразуемого сигнала в зону ограничения квантующей характеристики; средняя мощность этих шумов равна

$$\frac{\Delta_{огр}^2}{R} \cdot \frac{\Delta f}{0,5 f_d};$$

- шумы, вызванные погрешностями изготовления цифровых узлов; средняя мощность этой части шумов равна

$$P_{ш.и.} \cdot \frac{\Delta f}{0,5 f_d}.$$

Таким образом, полная мощность шумов на выходе канала в ТНОУ при передаче сигнала в случае использования трехсегментной шкалы квантования, приведенной на рис. 1, равна

$$P_{ш} = \left(\left(W_1 \cdot \frac{\Delta_1^2}{12} + W_2 \cdot \frac{\Delta_2^2}{12} + W_3 \cdot \frac{\Delta_3^2}{12} + \Delta_{огр}^2 \right) \cdot \frac{1}{R} + P_{ш.и.} \right) \cdot \frac{\Delta f}{0,5 f_d}.$$

Входящие в формулу значения W_1 , W_2 , W_3 , $\Delta_{огр}^2$ полностью определяются

$$w(U), U_1, U_2, U_{огр},$$

т.е. значением плотности распределения вероятностей мгновенных значений входного сигнала и параметрами шкалы квантования:

$$W_1 = 2 \int_0^{U_1} w(U) \cdot dU; \quad W_2 = 2 \int_{U_1}^{U_2} w(U) \cdot dU; \quad W_3 = 2 \int_{U_2}^{U_{\text{огр}}} w(U) \cdot dU;$$

$$\Delta_{\text{огр}}^2 = 2 \int_{U_{\text{огр}}}^{\infty} (U - U_{\text{огр}})^2 \cdot w(U) \cdot dU.$$

Нетрудно убедиться, что при нормальном распределении вероятностей мгновенных значений сигнала, среднеквадратическое значение которых

$$U_c = U_{\text{эфф.с}},$$

вероятность попадания преобразуемых мгновенных значений сигнала в один сегмент может быть рассчитана по формуле

$$W_B = 2 \int_{U_A}^{U_B} w(U) \cdot dU = 2\Phi\left(\frac{U_B}{U_c}\right) - 2\Phi\left(\frac{U_A}{U_c}\right),$$

где $\Phi\left(\frac{U}{U_c}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{\frac{U}{U_c}} e^{-0,5t^2} dt = \Phi(x)$ – интеграл вероятностей, значения которого приведены в таблице приложения 1.

Дисперсия шумов ограничения может быть приблизительно рассчитана по формуле

$$\Delta_{\text{огр}}^2 \cong \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot U_c^2 \cdot \left(\frac{U_{\text{огр}}}{U_c}\right)^{-1} \cdot e^{-0,5\left(\frac{U_{\text{огр}}}{U_c}\right)^2} \cdot (B^2)$$

Приведенные формулы рекомендуется использовать при проектировании подсистемы аналого-цифрового преобразования с трехсегментными шкалами квантования. При применении шкал с другим числом сегментов соответственно изменяется число слагаемых в формуле для расчета полной мощности шумов на выходе канала.

Расчет защищенности сигналов от шумов выполняется в следующем порядке:

1. Расчет $W_1, W_2, W_3, \Delta_{\text{огр}}^2$ для конкретного значения U_c при известных величинах $w(U), U_1, U_2, U_{\text{огр}}$.

2. Расчет $P_{\text{ш}}$.

3. Расчет помехозащищенности по формуле $a_{\text{ш}} = 10 \lg \frac{U_c^2}{P_{\text{ш}} \cdot R}$.

Рассчитанные значения помехозащищенности следует сравнить с минимально допустимым или номинальным значением помехозащищенности, приведенным в табл. 2. График зависимости помехозащищенности от уровней передаваемого сигнала должен быть приведен в пояснительной записке к проекту.

При расчёте зависимости $a_{ш}(p)$ с помощью компьютерной программы необходимо обязательно привести подробный расчёт для четвёртой точки $[a_{ш}(p_{c4}) = a_{ш}(p_2)]$.

Результат проектирования удовлетворяет предъявляемым требованиям, если в заданном динамическом диапазоне обеспечивается

$$a_{ш} \geq a_n.$$

Если окажется, что $a_{ш} < a_n$, расчёт Δ_1 , $U_{огр}$ и m следует повторить, увеличив m на единицу, если $a_{ш}(p_1) < a_n$, или увеличив $U_{огр}$, когда $a_{ш}(p_2) < a_n$ и $a_{ш}(p_1) \geq a_n$.

Кроме того, необходимо рассчитать уровень шумов в незанятом канале, используя окончательное значение шага квантования в первом сегменте. Полученный результат не должен превышать заданного значения.

Проектирование считается выполненным правильно, если принятая разрядность кода является минимально допустимой.

1.3. Расчет m для широкополосных каналов

Особенностями, отличающими этот расчет от расчета для телефонных каналов, являются:

наличие единственного ограничения в отношении качества передачи, а именно, при передаче сигналов в заданном динамическом диапазоне ожидаемая помехозащищенность должна быть не меньше номинальной или допустимой;

более узкий динамический диапазон, для которого нормируется помехозащищенность;

более высокие требования к значению номинальной помехозащищенности передаваемых сигналов.

Следствием действия последних двух факторов является необходимость более точного расчета напряжения ограничения. Расчет числа битов в кодовом слове предлагается выполнить в следующем порядке.

Расчет Δ_1

Выполняется по допустимой защищенности сигнала от шумов по указаниям раздела 1.2.

Расчет $U_{огр}$

Известно, что составляющими шума на выходе канала являются:

- шумы, вызванные погрешностями квантования при передаче отсчетов сигнала, попадающих в зоны сегментов 1, 2, ... квантующей характеристики;
- шумы, возникающие из-за наличия зон ограничения квантующей характеристики;
- шумы, вызванные погрешностями изготовления узлов.

Минимальному значению числа битов в кодовом слове соответствует такое значение напряжения ограничения, при котором шумы второй группы примерно равны шумам первой, когда уровень сигнала наибольший, т.е. при $p_c = p_2$ должно обеспечиваться

$$\frac{\Delta_{\text{огр}}^2}{R} \cong \frac{P_{\text{ш2}} - P_{\text{ш.и}}}{2},$$

где $\frac{\Delta_{\text{огр}}^2}{R}$ – мощность шумов из-за зон ограничения;

$P_{\text{ш2}} = 10^{0,1 \cdot (p_2 - a_n)} \cdot 10^{-3}$ (Вт) – предельно допустимая мощность шумов на выходе канала в ТНОУ.

Дисперсия шумов ограничения в данном случае равна

$$\Delta_{\text{огр}}^2 \cong \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot U_{\text{эфф2}}^2 \cdot \left(\frac{U_{\text{огр}}}{U_{\text{эфф2}}} \right)^{-1} \cdot e^{-0,5 \cdot \left(\frac{U_{\text{огр}}}{U_{\text{эфф2}}} \right)^2} \text{ (В}^2\text{)}.$$

Подставляя это значение в вышеприведенную формулу, после некоторых преобразований получим

$$\left(\frac{U_{\text{огр}}}{U_{\text{эфф2}}} \right) = 0,68 \cdot \sqrt{2,03 + p_2 - 10 \cdot \lg(10^{-0,1 \cdot (a_n - p_2)} - P_{\text{ш.и}} \cdot 10^3) - 10 \cdot \lg \left(\frac{U_{\text{огр}}}{U_{\text{эфф2}}} \right)}.$$

Формула пригодна для нахождения отношения напряжения ограничения и эффективного напряжения, соответствующего верхней границе динамического диапазона сигнала, методом итераций или методом последовательных приближений. В качестве начального значения рекомендуется принять

$$\left(\frac{U_{\text{огр}}}{U_{\text{эфф2}}} \right)_{i=0} = 4.$$

Расчет рекомендуется закончить, когда полученные величины будут отличаться только во второй цифре после запятой и не более, чем на 5. Найденное отношение позволяет определить величину напряжения ограничения

$$U_{\text{огр}} = \left(\frac{U_{\text{огр}}}{U_{\text{эфф2}}} \right)_i \cdot 10^{0,05 \cdot p_2} \cdot \sqrt{R \cdot 10^{-3}} \text{ (В)}.$$

Расчет m и $a_{\text{ш}}(p)$

Расчет количества битов в кодовом слове и возможная его коррекция выполняются по указаниям подраздела 1.2. График зависимости помехозащищенности от уровня передаваемых сигналов должен быть приведен в пояснительной записке.

2. ЦИКЛ ПЕРЕДАЧИ

В разделе приведены методические указания по разработке структуры цикла и сверхцикла и расчету тактовой частоты группового цифрового сигнала проектируемой системы передачи. Отметим, что разработка цикла передачи – это вариационная задача.

Массив исходных данных для проектирования цикла и сверхцикла образуется данными, приведенными в табл. 1, и результатами проектирования подсистемы аналого-цифрового преобразования (разд. 1).

Рекомендуется полагать, что все преобразователи являются одноканальными. Цифровые потоки на выходах преобразователей следует полагать состоящими из кодовых групп, следующих друг за другом через интервалы, определяемые структурой проектируемого цикла. Следовательно, цифровые потоки удобно характеризовать частотой повторения кодовых групп и числом битов в кодовых группах.

2.1. Требования к циклу и сверхциклу

От того, каким образом построен цикл передачи, зависят такие важные параметры ЦСП, как скорость передачи, время поиска и вхождения в синхронизм при сбое синхронизации, коэффициент использования пропускной способности цифрового группового тракта и т.д.

На основании этого в курсовом проекте к циклу и сверхциклу предъявляются следующие требования.

1. Длительность сверхцикла не должна превышать (2 - 3) мс из-за ограничения максимального времени восстановления синхронизма в ЦСП.

2. Число битов в цикле и число циклов в сверхцикле ограничены:

$$\begin{aligned} N_{\text{ц}} &\leq 2000, \\ N_{\text{ц,сц}} &\leq 70, \end{aligned}$$

где $N_{\text{ц}}$ – число битов в цикле;

$N_{\text{ц,сц}}$ – число циклов в сверхцикле.

Желательно, чтобы эти числа разлагались на простые сомножители возможно меньшей величины (≤ 53), при этом упрощается генераторная аппаратура ЦСП.

3. В цикле и сверхцикле должны быть предусмотрены тактовые интервалы для передачи сигналов синхронизации. Число битов в слове циклового синхросигнала рекомендуется принимать равным (7 - 12), а в слове сверхциклового синхросигнала – (4 - 8).

4. Групповой цифровой сигнал ЦСП должен быть получен в результате объединения цифровых сигналов по кодовым группам. Кодовые слова каждого канального сигнала должны располагаться в цикле (сверхцикле) по возможности регулярней, ритмичней. Чем регулярнее поток кодовых групп, тем проще аппаратура объединения и разделения цифровых потоков, так как можно использовать устройства буферной памяти с меньшим объемом и более простой алгоритм формирования управляющих импульсных последовательностей в

генераторной аппаратуре. Для регулярного размещения битов цифровых сигналов можно цикл разделить на группы, частота повторения которых выше и кратна цикловой.

5. Допустимо в цикле и сверхцикле иметь тактовые интервалы, не занятые передачей информации. Наличие таких интервалов может быть использовано для повышения регулярности цифровых потоков, а в дальнейшем – как резерв передачи служебных сигналов.

6. Тактовые интервалы в цикле и циклы в сверхцикле рекомендуется нумеровать, начиная с единицы. Первые тактовые интервалы в цикле рекомендуется использовать для передачи сигналов цикловой синхронизации.

7. Для оценки качества проектирования цикла и сверхцикла рекомендуется рассчитать коэффициент использования пропускной способности группового цифрового тракта системы передачи по формуле

$$\eta = \frac{N_{\text{сц}} - N_{\text{ц.с.синхр.}} - N_{\text{сц.с.синхр.}} - N_{\text{св.}}}{N_{\text{сц}}},$$

где $N_{\text{сц}}$ – число битов в сверхцикле;

$N_{\text{ц.с.синхр.}}$ – число битов сигнала цикловой синхронизации в сверхцикле;

$N_{\text{сц.с.синхр.}}$ – число битов сигнала сверхцикловой синхронизации в сверхцикле;

$N_{\text{св.}}$ – число свободных тактовых интервалов в сверхцикле.

Коэффициент использования пропускной способности проектируемой ЦСП должен удовлетворять условию

$$\eta \geq 0,94.$$

Если в ЦСП групповой цифровой сигнал имеет только цикловую структуру, то формулу для расчета коэффициента использования пропускной способности необходимо изменить.

8. Известно, что для двоичных сигналов численные значения скоростей сигналов и тактовых частот одинаковы, поэтому для расчета минимального значения тактовой частоты группового цифрового сигнала проектируемой системы передачи можно использовать следующую формулу:

$$f_{\text{т мин}} = \sum_i N_i \cdot f_{\text{г.и}} \cdot m_i,$$

где i – индекс типа канала по табл.1,

N_i , m_i , $f_{\text{г.и}}$ – соответственно число каналов данного типа, число битов в кодовых группах и минимальная частота повторения кодовых групп.

Окончательное значение тактовой частоты группового цифрового сигнала не должно превышать, рассчитанного минимального значения этой частоты более чем на 15%.

2.2. Рекомендуемый алгоритм проектирования цикла

1. Подготовить таблицу исходных данных для проектирования цикла в форме табл. 6. Заполнить столбцы 2 - 7 по данным табл. 1 и по данным проектирования подсистемы аналого-цифрового преобразования (разд. 1):

столбец 2 – типы каналов ЦСП;

столбец 3 – количество каналов данного типа;

столбцы 4 и 5 – наименьшие и наибольшие значения частот следования кодовых групп; для широкополосного канала необходимо указывать два интервала возможных значений частот следования кодовых групп, если они установлены;

столбец 6 – значение частоты следования кодовых групп, если по данным табл. 1 для данного канала предусмотрено только одно значение (это же значение заносится и в столбцы 4 и 5).

столбец 7 – число битов в кодовых группах для каждого типа канального сигнала ЦСП.

Таблица 6

Параметры ЦСП (пример заполнения таблицы)

№	Тип канала	Число каналов	Min $f_{г.и}$, кГц	Max $f_{г.и}$, кГц	Оконч. $f_{г.и}$, кГц	m_i , бит	$N_{ц.и}$	$N_{сц.и}$	Номера тактовых интервалов в цикле	Номера циклов
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Телефон.	26	7,8	-	8	8	208	3328	17-72, 81-128, 145-200, 209-256	1-16
2	Вещания	1	30	34	32	8	32	512	9-16, 73-80, 137-144, 201-208	1-16
3	ПДС-1,2	1	6	12	8	1	1	16	1	1-16
4	СУВ	61	0,4	0,8	0,5	1	-	61	129, 130 133, 134	2-16 2-16 1-16
5	Цикловая синхр.	1	0,9464	28	8	7	7	112	2-8	1-16
6	Сверх-цикловая синхр.	1	0,4	0,8	0,5	4	-	4	129-132	1
7	Своб. тактовые интервал						-	63	131, 132 133, 135, 136	2-16 1 1-16

2. Рассчитать минимальное значение тактовой частоты группового цифрового сигнала проектируемой системы передачи (см. подп. 2.1, п. 8).

Принять в качестве частоты повторения циклов наименьшее значение частоты следования кодовых групп из четвертого столбца. Рассчитать ориентировочное значение числа тактовых интервалов в цикле как ближайшее большее целое отношения

$$N_{\text{ц}} = \frac{f_{\text{т мин}}}{f_{\text{ц}}}.$$

3. Оценить результат расчета числа битов в цикле.

Если $N_{\text{ц}} \leq 2000$, то групповой сигнал может быть построен на основе цикла без сверхцикла.

Если $2000 < N_{\text{ц}} \leq 2000 \cdot 70$, то наличие сверхцикла обязательно.

Более сложная ситуация складывается, когда $N_{\text{ц}} > 2000 \cdot 70$.

Единственным выходом, удовлетворяющим требованиям подраздела, является создание в проектируемой ЦСП отдельной цифровой подсистемы передачи низкоскоростных цифровых сигналов. Для создания подсистемы необходимо выбрать из табл. 6 только низкоскоростные сигналы и использовать их для расчета цикла цифровой подсистемы. Параметры низкоскоростных сигналов следует свести в другую таблицу. Принципы проектирования цикла подсистемы аналогичны принципам построения цикла ЦСП.

В курсовом проекте следует разработать цикл (при необходимости и сверхцикл) подсистемы и рассчитать значение тактовой частоты выходного сигнала подсистемы, присвоив ей обозначение $f_{\text{г. ПС}}$, при этом число битов в кодовом слове для подсистемы равно единице.

Сведения о сформированном групповом сигнале как о самостоятельном сигнале занести в отдельную таблицу, исключив из дальнейшего рассмотрения сигналы, передаваемые в подсистеме. Причем, значение тактовой частоты выходного сигнала подсистемы $f_{\text{г. ПС}}$ заносится сразу в столбцы 4, 5, и 6, т.е. оно является окончательным. Поэтому при разработке подсистемы следует учитывать упрощение формирования цикла системы в целом.

В эту же таблицу внести параметры высокоскоростных сигналов из табл. 6, передача которых не предусмотрена в подсистеме. Повторить расчет по п. 2 и оценку результатов по начальной части данного пункта. Таким образом, структура цикла подсистемы и цикла ЦСП должна быть приведена в отдельных таблицах, в табл. 6 останутся заполненными только столбцы 1-7.

4. Определить области предполагаемых значений частот повторения циклов и сверхциклов. Области разрешенных значений этих частот определяются требованиями:

$$\frac{f_{\text{т мин}}}{2000} \leq f_{\text{ц}} \leq 70 \cdot \min(\min f_{\text{г. i}}),$$
$$\min(\min f_{\text{г. i}}) \leq f_{\text{ци}} \leq \min(\max f_{\text{г. i}}).$$

5. Выбрать окончательные значения частот следования кодовых групп, частот повторения циклов и сверхциклов. Принятые значения должны удовлетворять требованиям:

$$\frac{f_{г.і}}{f_{ц}} = n_i, \text{ для } f_{г.і} \geq f_{ц},$$

$$\frac{f_{г.і}}{f_{сц}} = n_i, \text{ для } f_{г.і} < f_{ц},$$

$$\frac{f_{ц}}{f_{сц}} = N_{ц,сц},$$

где $\{n_i\}$ - целые числа;

$$f_{г.і} \in [\min f_{г.і}, \max f_{г.і}].$$

Частоты повторения циклов и сверхциклов, а также частоты следования кодовых групп не обязательно должны быть равны целому числу в килогерцах или герцах. Их значения должны быть записаны шестью цифрами, поскольку относительная погрешность установки частоты задающего генератора в ЦСП не больше $1 \cdot 10^{-5}$.

Заполнить шестой столбец табл. 6.

6. Определить число битов в кодовых словах цикловой и сверхцикловой синхронизации. При этом следует ориентироваться на результаты работ в области цикловой синхронизации, а также на параметры ЦСП плезиохронных иерархий. В частности, увеличение числа битов в сигнале синхронизации сокращает время восстановления синхронизма, повышает его устойчивость, но уменьшает коэффициент использования пропускной способности группового тракта ЦСП.

Для организации передачи сигналов телеконтроля (сигналов аварии о потере циклового или сверхциклового синхронизации, контроля достоверности в цифровом тракте и др.) в проектируемой ЦСП предполагается использование свободных битов, включенных в цикл для повышения регулярности цифровых потоков. В ЦСП излишне отдельно предусматривать организацию каких-либо каналов для передачи таких сигналов.

Ввести в табл. 6 дополнительные строки: «Канал цикловой синхронизации» и «Канал сверхцикловой синхронизации» и заполнить для этих каналов столбцы 6 и 7.

7. Рассчитать число тактовых интервалов в цикле и сверхцикле, необходимых для организации каналов каждого типа:

$$N_{ц.і} = N_i \cdot m_i \cdot n_i, \quad N_{сц.і} = N_{ц,сц} \cdot N_{ц.і}, \quad \text{для } f_{г.і} \geq f_{ц};$$

$$N_{сц.і} = N_i \cdot m_i \cdot n_i, \quad \text{для } f_{ц} > f_{г.і} \geq f_{сц}$$

По данным расчета следует заполнить восьмой и девятый столбцы таблицы.

8. Рассчитать минимально необходимое число тактовых интервалов в цикле. Очевидно, что

$$\min N_{\text{ц}} = \frac{\sum_i N_{\text{ц.и}}}{N_{\text{ц.ц}}},$$

где числитель определяется по данным столбца 9.

Количество тактовых интервалов в цикле должно превышать минимальное значение. В целях упрощения аппаратуры формирования управляющих сигналов ЦСП или генераторной аппаратуры желательно, чтобы число тактовых интервалов в цикле разлагалось на простые множители возможно меньшей величины (≤ 53).

9. Разместить кодовые слова сигналов по тактовым интервалам цикла и сверхцикла, заполнив столбцы 10 и 11 табл. 6. Размещение в цикле рекомендуется начинать с сигнала цикловой синхронизации. После размещения всех кодовых слов, передаваемых в цикле, переходят к размещению слов, передаваемых в сверхцикле. В первом цикле рекомендуется поместить сигнал сверхцикловой синхронизации.

При выполнении этого пункта рассматривается, как правило, несколько конкурирующих вариантов и выбирается лучший.

10. Ввести в таблицу дополнительную строку «свободные тактовые интервалы» и заполнить для нее столбцы 9 - 11.

11. Рассчитать коэффициент использования пропускной способности группового тракта ЦСП. Коэффициент использования должен удовлетворять требованиям, приведенным в п. 7 подраздела 2.1.

12. Рассчитать точное значение тактовой частоты цифрового группового сигнала проектируемой ЦСП по формуле

$$f_{\text{Т}} = f_{\text{ц}} \cdot N_{\text{ц}}, \text{ или}$$

$$f_{\text{Т}} = f_{\text{цц}} \cdot N_{\text{цц}}.$$

Далее необходимо привести основные параметры ЦСП. Структуру цикла следует отобразить на отдельном рисунке.

Основные параметры ЦСП по данным, приведенным в табл. 6:

$$f_{\text{ц}} = 8 \text{ кГц},$$

$$N_{\text{ц}} = 256,$$

$$f_{\text{цц}} = 0,5 \text{ кГц}, N_{\text{цц}} = 4096,$$

$$N_{\text{ц.цц}} = 16,$$

$$f_{\text{Т}} = 2048 \text{ кГц},$$

$$\eta = 0,96.$$

2.3. Разработка структурной схемы генераторного оборудования

Генераторная аппаратура включает: **задающий генератор и аппаратуру формирования управляющих импульсных последовательностей (АФУИП) для всех функциональных устройств аппаратуры ЦСП.**

При разработке цикла было введено ограничение на количество символов в цикле и задана относительная погрешность частоты задающего генератора, т.е. фактическая частота задающего генератора должна принадлежать примерно следующим значениям:

$$F_{3Г} = F_{3Г.ном} \pm F_{3Г.ном} \cdot 10 \cdot 10^{-6} = F_{3Г.ном} \pm 10(\text{ppm}).$$

Такие требования к частоте задающего генератора допускают то, что задающий генератор передающей части аппаратуры ЦСП может работать как в режиме внешней синхронизации от сети тактовой синхронизации, так и в автономном режиме. Задающий генератор приемной части должен работать в режиме внешней синхронизации по цифровому сигналу линейного тракта. К его входу должен быть подключен один из выходов ВТЧ станционного регенератора.

Номинальная частота задающего генератора может быть выбрана с учетом опыта разработки генераторов и не обязательно должна совпадать с тактовой частотой ЦСП, но на вход аппаратуры формирования управляющих импульсных последовательностей должна подаваться тактовая частота цифрового группового сигнала f_T , т.к. именно эта частота может быть получена из принимаемого цифрового сигнала.

В курсовом проекте необходимо разработать схему аппаратуры формирования управляющих импульсных последовательностей. Предварительно параметры управляющих последовательностей должны быть определены по структуре цикла и сверхцикла.

Для получения управляющих последовательностей необходимо использовать делители и умножители. Причем количество умножителей д.б. минимальным. Старайтесь избегать деления и умножения на одни и те же числа и использования в параллельных цепочках одних и тех же умножителей или делителей.

В курсовом проекте достаточно разработать схему аппаратуры формирования управляющих последовательностей, перечисленных в таблице "Параметры ЦСП" (подраздел 2.2). В случае использования подсистемы, управляющие импульсные последовательности, необходимые для функционирования подсистемы, формируются в той же АФУИП, в которой формируются управляющие последовательности для основной системы.

Достаточно привести схему аппаратуры формирования управляющих последовательностей только для передающей части аппаратуры ЦСП, т.к. для приемной части схема такая же. Для обеспечения синфазной работы демультиплексора с мультиплексором аппаратура формирования управляющих импульсных последовательностей приемной части ЦСП использует сигналы цикловой и сверхцикловой синхронизации.

3. РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ СВЯЗИ

В данном разделе необходимо разработать схему организации связи. Выбрать типы мультиплексоров и разместить их в узлах. Выбрать коды приложений для оптических интерфейсов между узлами и привести параметры выбранных интерфейсов.

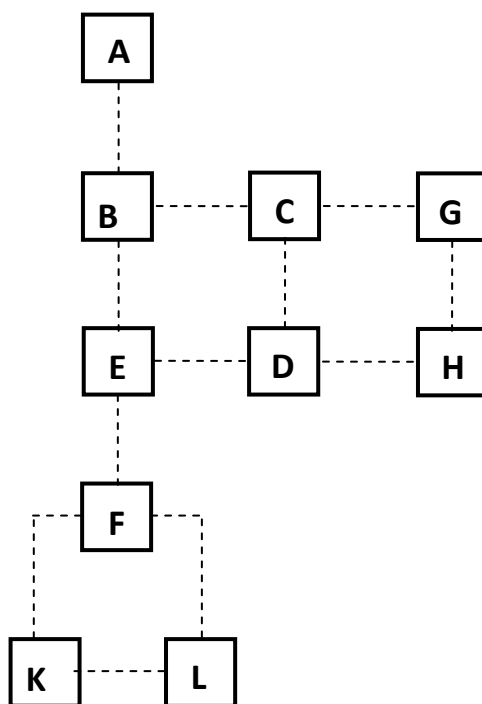


Рис. 2. Схема телекоммуникационной транспортной сети

Разработка схемы сети должна включать расчет сетевого межузлового трафика, в результате которого определяется необходимое количество компонентных потоков, передаваемых на каждом из участков сети. Здесь необходимо учесть, что каждый локальный узел должен обмениваться потоками со всеми остальными локальными узлами. Узел С является транзитным узлом, тракты в нем только переключаются, но не формируются, т.е. ввод и вывод сигналов в этом узле не производится.

Все компонентные потоки формируются ЦСП, такими же, как система передачи, разработанная в предыдущих разделах проекта. Зная скорость передачи цифрового сигнала, формируемого разработанной в проекте ЦСП, по данным табл. 7 необходимо выбрать соответствующий тип виртуального контейнера, пропускная способность которого наиболее близка к скорости передачи сформированного сигнала, но не меньше её.

На основе полученных результатов определяются уровни агрегатных потоков. Иными словами, после расчета трафика определяются уровни синхронных транспортных модулей на всех участках сети. При этом очевидно, что часть виртуальных контейнеров в STM-N могут быть необорудованными.

Таблица 7

Типы VC и их пропускная способность

Тип VC	Скорость передачи VC, кбит/с	Пропускная способность VC, кбит/с
VC-11	1 664	1 600
VC-12	2 240	2 176
VC-2	6 848	6 784
VC-3	48 960	48 384
VC-4	150 336	149 760
VC-4-4с	601 344	599 040
VC-4-16с	2 405 376	2 396 160
VC-4-64с	9 621 504	9 584 640
VC-4-256с	38 486 016	38 338 560

Следует заметить, что если полученный в результате расчета уровень агрегатного сигнала на отдельных участках сети превышает уровень **STM-64**, то на этих участках сети должна использоваться технология **OTN**. В связи с этим агрегатный сигнал должен быть представлен как сигнал **OTM**.

Далее выбираются типы мультиплексоров. Современные мультиплексоры **SDH** универсальны. Для учебных целей курсового проектирования мультиплексоры разделены на типы, отличающиеся алгоритмами мультиплексирования [1, 3]. Учитывая это, в отдельных узлах для организации связи возможно каскадное включение мультиплексоров разных типов.

Для выбора линейного оборудования необходимо для рассчитанных агрегатных сигналов выбрать коды приложения оптических интерфейсов [2]. При использовании технологии **OTN** в узлах сети нужно разместить соответствующие мультиплексоры.

Привести параметры оптических интерфейсов.

Результатом выполнения раздела должна быть схема организации сети с мультиплексорами в узлах и с кодами приложений. Пример разработки схемы сети приведен в приложении 2.

Для построения архитектурной схемы тракта одного компонентного потока необходимо привести схемы мультиплексирования. Далее, используя элементы архитектурного представления (функции адаптации, завершения и соединения), привести фрагмент транспортной сети, обеспечивающий передачу сигнала между двумя несмежными узлами.

Пример подобной структуры для двух смежных узлов показан на рис.3. За более подробным описанием функций и принципов архитектурного представления сетевых слоев следует обращаться к [1, 3].

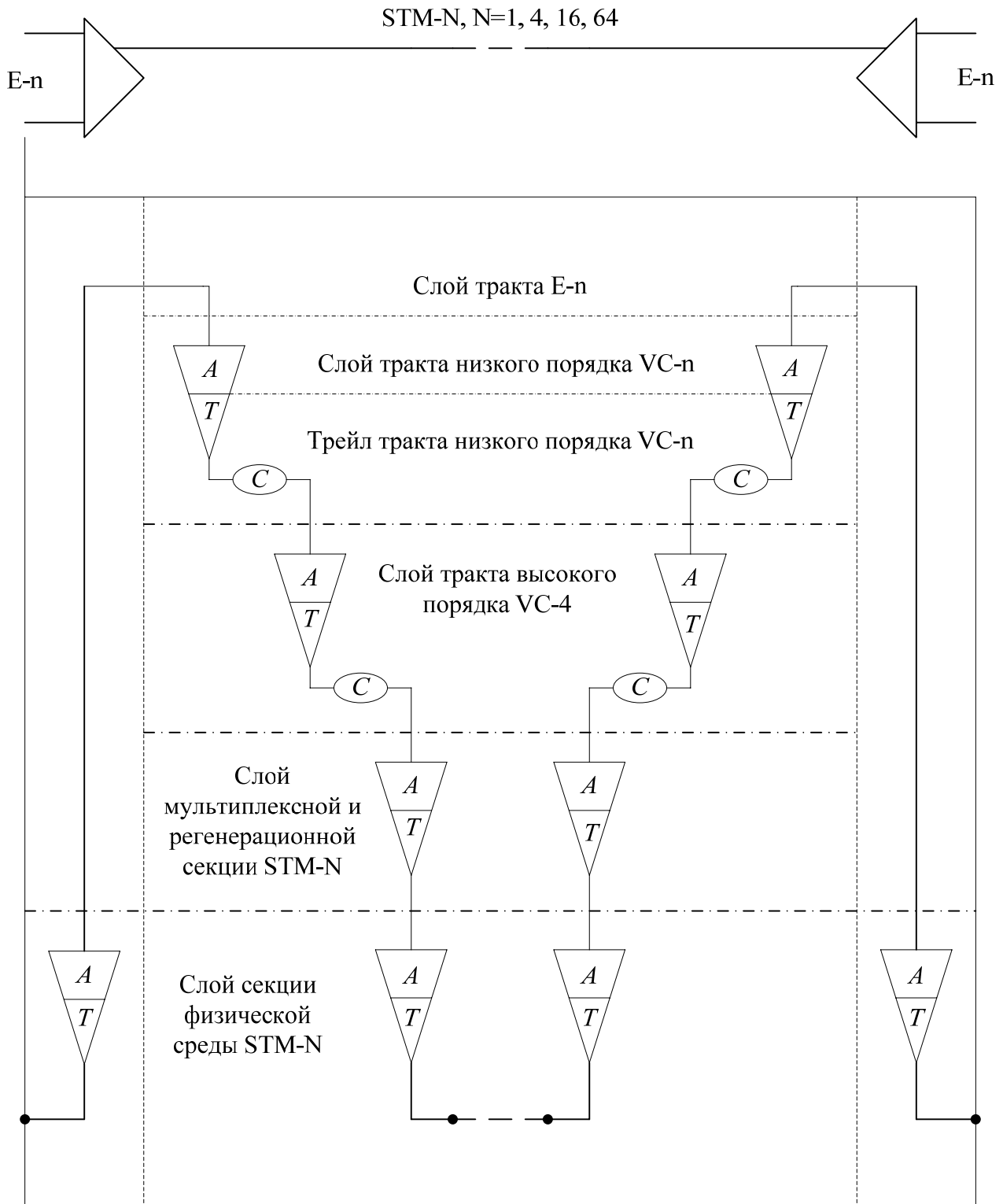


Рис. 3.

Фрагмент транспортной сети синхронной цифровой иерархии с трактами виртуальных контейнеров низкого ($n = 11, 12, 2, 3$) и высокого ($n = 4$) порядков

4. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПЕРЕДАЧИ В СЕТЕВЫХ СЛОЯХ

Передача цифровых сигналов сопровождается такими искажениями, как ошибочные символы и фазовые дрожания. В данном разделе рассматриваются показатели качества передачи цифровых сигналов, характеризующие достоверность их приема. Для оценки этих показателей в трактах транспортных сетей **SDH** используются процедуры внутреннего (встроенного) контроля.

Для анализа процедуры встроенного контроля достоверности в слое тракта заданного виртуального контейнера **VC-n** могут быть использованы материалы [1].

Результатом выполнения является алгоритм процедуры контроля качества передачи, основанной на детектировании блоков с ошибками, и параметры показателей ошибок в трактах используемых **VC-n**.

5. ЗАЩИТА В СЕТЯХ СИНХРОННОЙ ЦИФРОВОЙ ИЕРАРХИИ

Под защитой в транспортных сетях понимается не только резервирование (которое является одним из методов защиты), но и обеспечение таких вариантов работы оборудования сети и сети в целом, которые в конечном итоге приводят почти к бесперебойному функционированию. Защита в транспортных сетях включает резервные функции мультиплексоров, резервное линейное оборудование, резервные пропускные способности секций и программное обеспечение для переключения на защиту.

Для защиты используются специально заложенные свободные «емкости» между узлами. В этом случае под «емкостью» понимаются свободные трейлы и соединения, их дублирование, а также дополнительное оборудование.

Трейл (*trail* – трасса) – "транспортный объект", состоящий из связанной пары "однонаправленных трасс", который обеспечивает одновременную передачу адаптированной характерной информации сети слоя клиента в противоположных направлениях между их соответствующими входами и выходами.

Соединение (*connection*) – "транспортный объект", который состоит из связанной пары "однонаправленных соединений" способный к одновременной передаче характерной информации слоя в противоположных направлениях между их соответствующими входами и выходами.

Характерная информация (*characteristic information*) – сигнал с определенным форматом, который переносится на "сетевые соединения".

Классификация архитектуры защиты включает два метода:

(1 + 1); (m : n).

В названии архитектуры защиты первая цифра обозначает количество защитных емкостей (**P** – Protection), а вторая – количество рабочих емкостей (**W** – Working).

В качестве примера на рис. 4- 7 приведены варианты архитектуры защиты и функции матриц соединений для защиты мультиплексных секций сети **SDH**.

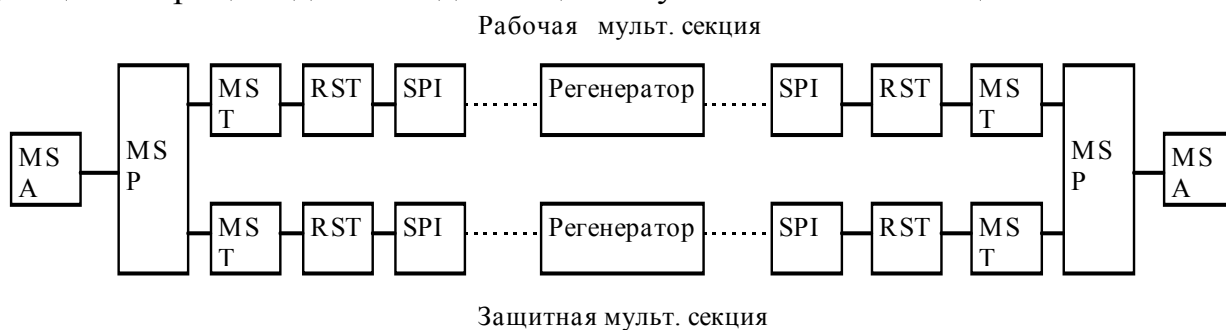


Рис. 4. Архитектура защиты мультиплексной секции **1+1**

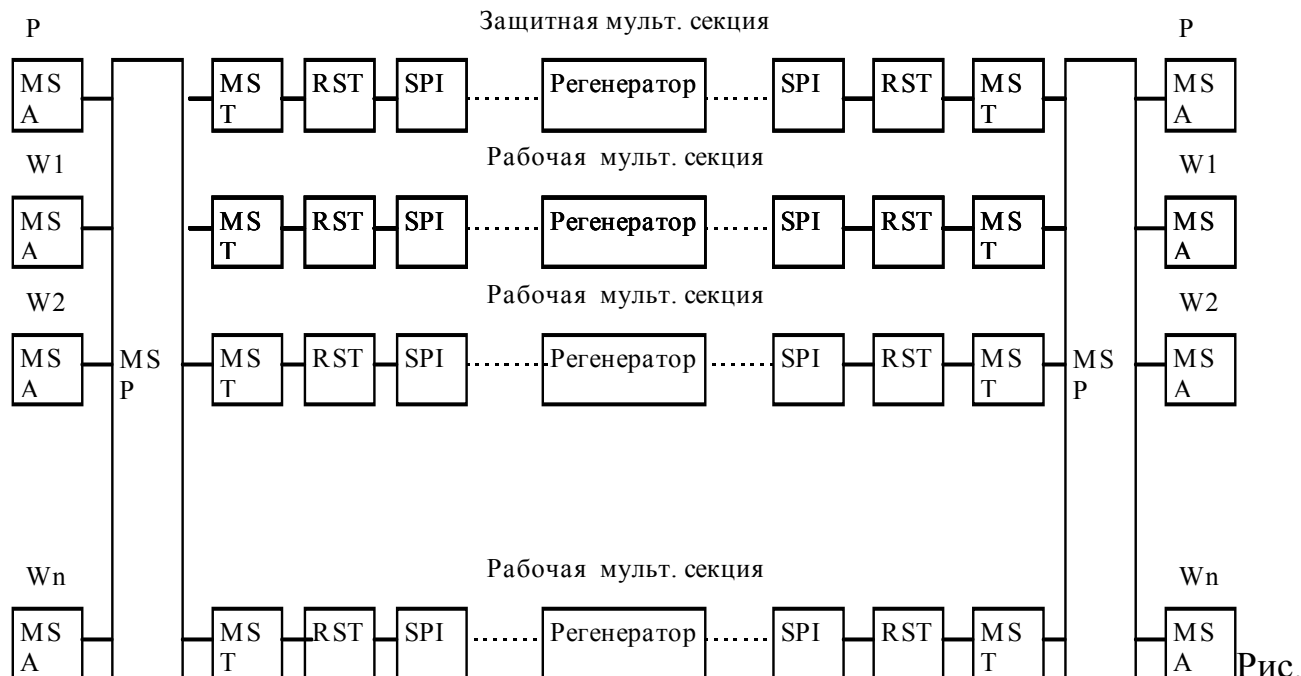
Известны два типа переключений на защиту: переключение на защиту только одного направления и двух направлений.

При переключении на защиту может использоваться канал автоматического защитного переключения (Automatic Protection Switching – **APS**).

Переключение на защиту бывает возвратимым (**m : n**) и невозвратимым (**1+1**).

Кроме того, регламентируется последовательность операций (алгоритмы переключений на защиту).

К характеристикам переключения на защиту относится также время переключения. Например, для мультиплексных секций это время не должно превышать **50 мс**.



5. Архитектура защиты мультиплексных секций 1 : n:

W1, W2, ..., Wn – рабочие мультиплексные секции;

P – защитная мультиплексная секция

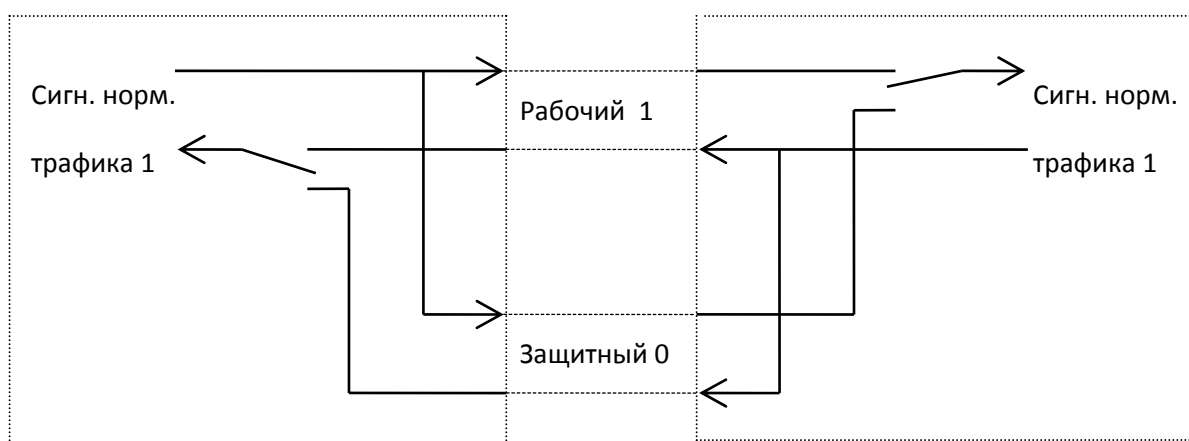


Рис. 6. Архитектура защиты 1+1. Функции матрицы соединений:

Рабочий 1 – один рабочий трейл или соединение;

Защитный 0 – один защитный трейл или соединение

Различают защиту трейлов и защиту соединений. При защите трейлов используют дополнительные матрицы соединений, так называемые матрицы

соединений защиты. Для защиты трейлов мультиплексных секций функции этих матриц показаны на рис. 6 и 7.

В топологии сети точка–точка (эта топология называется также линейной) могут использоваться методы защиты

$$(1 + 1); (1 : 1).$$

Последний метод в данном случае обладает большей экономичностью, поскольку защитный трейл может использоваться для передачи дополнительного сигнала, иногда такой сигнал называют вторичным, специальным трафиком. Дополнительный сигнал передается, когда оба трейла работоспособны. При отказе в рабочем трейле дополнительный трафик сбрасывается, а его место занимает основной трафик. Т.е. дополнительный трафик является не защищенным.

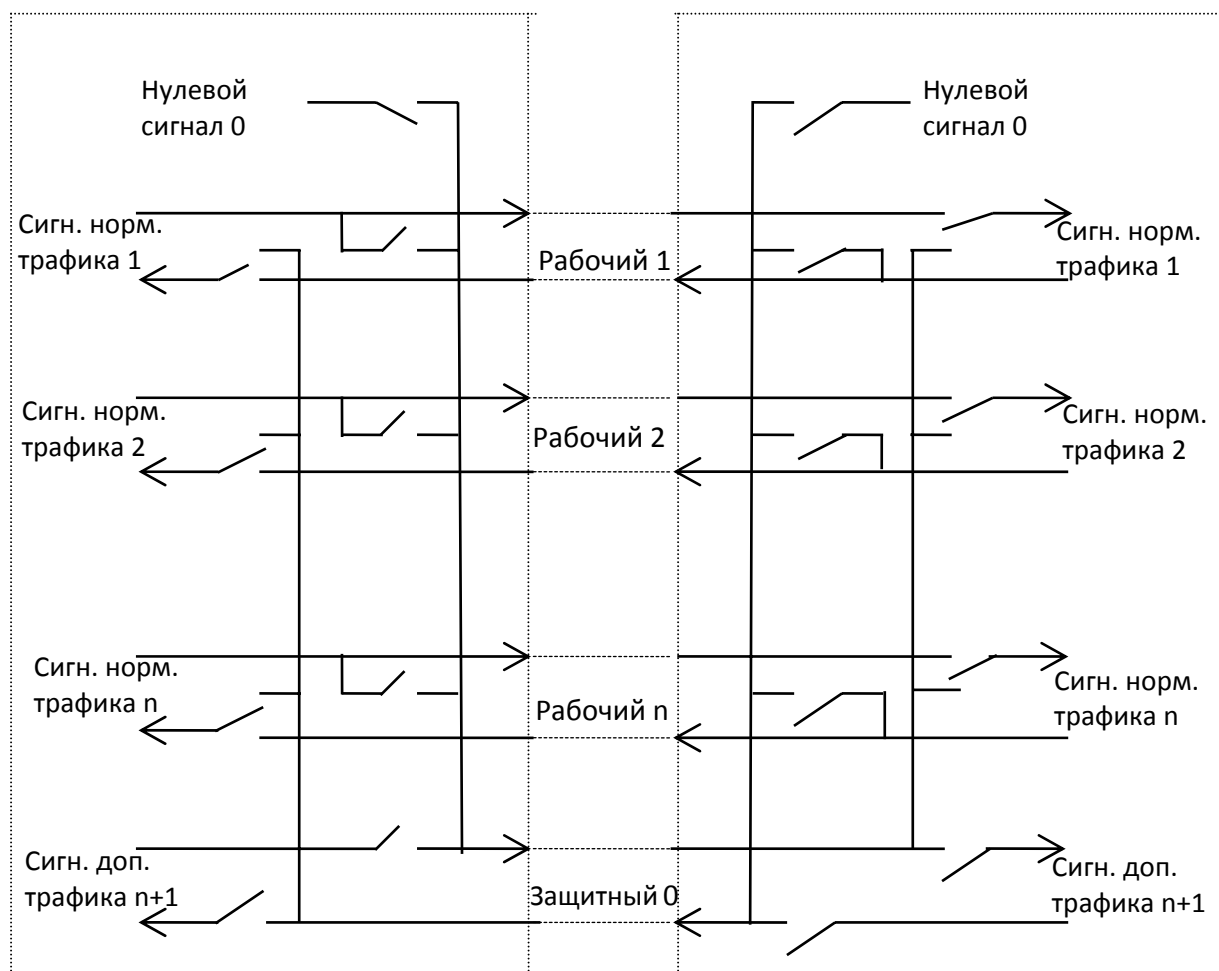


Рис. 7. Архитектура защиты $1 : n$. Функции матрицы соединений:
 рабочий 1... рабочий n – рабочие трейлы или соединения;
 защитный 0 – один защитный трейл или соединение

В топологии «кольцо» применяются следующие методы защиты:

2F SNCP RING – двухволоконное кольцо с защитой соединений подсети;

2F SP RING – двухволоконное кольцо с совместной защитой (Shared Protection) мультиплексной секции;

4F SP RING – четырехволоконное кольцо с совместной защитой мультиплексной секции;

При транспортировании сигналов уровня **STM-1** применяется только метод защиты **2F SNCP RING**. Архитектура защиты **1+1**. В каждом мультиплексоре, включенном в кольцо, передача осуществляется одновременно в двух направлениях: по часовой и против часовой стрелки. Прием же осуществляется только с одного направления. На приеме контролируется состояние **трейлов трактов**, а не мультиплексных секций. При пропадании сигнала или снижения его качества ниже допустимого предела прием будет осуществляться с другого направления.

Для защиты **трейлов** мультиплексных секций могут быть использованы:

2F SP RING – двухволоконное кольцо с совместной защитой мультиплексной секции. Архитектура защиты **1 : 1**. Этот метод предполагает защиту мультиплексной секции при транспортировании сигналов уровня **STM-4** и выше. При этом в каждой мультиплексной секции (в обоих направлениях передачи) **AU-4** разделяются на рабочие и защитные поровну. Так, для **STM-4** в каждой мультиплексной секции два рабочих и два защитных **AU-4 (AUG)**. Для **STM-16** – 8 рабочих и 8 защитных **AU-4 (AUG)**. При возникновении отказа на мультиплексной секции или в узле мультиплексоры, примыкающие к месту отказа, замыкают рабочие трейлы на резервные противоположного направления, а резервные – на рабочие. Тем самым формируется новое плоское одноволоконное кольцо;

4F SP RING – четырехволоконное кольцо с совместной защитой мультиплексной секции. Архитектура защиты **1 : 1**. В каждом направлении передачи одной мультиплексной секции все **AU-4** рабочие, а в другой защитные, т.е. рабочие и защитные **AU-4** размещаются в мультиплексных секциях, которые организуются в разных волокнах. Протокол переключения на защиту такой же, как и для двухволоконного кольца;

Основываясь на приведенных выше данных, выбрать и обосновать метод защиты на каждом из участков созданной транспортной сети. Информация о выбранном методе защиты должна быть отражена на схеме организации сети.

6. ОРГАНИЗАЦИЯ СЕТИ ТАКТОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

В результате выполнения раздела должна быть построена схема сети тактовой синхронизации, содержащая генераторное оборудование, размещаемое в каждом узле с указанием основного и резервного направлений передачи сигналов синхронизации.

При проектировании сети тактовой синхронизации предполагается, что используется принудительный иерархический метод синхронизации.

Рекомендуется использовать следующие типы генераторов:

PRC – первичный эталонный генератор (один на всю сеть);

SSU – вторичный генератор или ведомый генератор;

SEC – генератор синхронного оборудования (в каждом мультиплексоре).

Схема синхронизации должна содержать минимальное количество синхронизируемых от одного источника генераторов и не содержать замкнутых петель синхронизации.

Результатом выполнения должна быть схема синхронизации с указанием используемых генераторов в сети, и параметров их интерфейсов.

Нарушение тактовой синхронизации может привести к увеличению коэффициента ошибок, фазовых дрожаний и проскальзываниям в цифровой последовательности. В сети допускаются только управляемые проскальзывания (в цифровых коммутаторах), которые не приводят к потере цикловой синхронизации.

Для построения сети тактовой синхронизации цифровых сетей используется первичный эталонный генератор (Primary Reference Clock – **PRC**). Первичный генератор представляет собой атомный источник тактовых импульсов (цезиевый или рубидиевый генератор) с точностью не хуже 10^{-11} . Он калибруется вручную или автоматически по сигналам мирового скоординированного времени. Кроме того, необходима надежная система передачи сигнала синхронизации на все узлы сети.

Существуют два основных метода синхронизации:

главный–подчиненный (master–slave synchronization);

взаимная (mutual synchronization).

Наиболее часто в России используется метод синхронизации транспортных сетей «главный–подчиненный».

Сети синхронной цифровой иерархии разрабатываются для организации различных типовых цифровых трактов. При построении сетей синхронизации используются разные версии. Каждая версия объединяет генераторы сигналов тактовой синхронизации различного качества. В табл. 8 и 9 приведены указанные версии.

Таблица 8

Версия I. Сигналы тактовой синхронизации

Источник синхронизации	Порядок уровня качества	Параметры (по Рекомендации МСЭ-Т)
QL-PRC	Высший	G.811
QL-SSU-A		G.812, тип I или V
QL-SSU-B		G.812, тип VI
QL-SEC		G.813
QL-DNU	Низший	Для синхронизации использовать нельзя

Таблица 9

Версия II. Сигналы тактовой синхронизации

Источник синхронизации	Порядок уровня качества	Параметры (по Рекомендации МСЭ-Т)
QL-PRS	Высший	G.811
QL-STU		
QL-ST2		G.812, тип II
QL-TNC		G.812, тип V
QL-ST3E		G.812, тип III
QL-ST3		G.812, тип IV
QL-SMC		G.813
QL-ST4		
QL-PROV		
QL-DUS	Низший	Для синхронизации использовать нельзя

Приведем обозначения генераторов.

PRC – первичный эталонный генератор (генератор самого высокого уровня качества).

SEC – генератор синхронного оборудования (генератор предпоследнего уровня качества в первой версии).

SSU – ведомые или вторичные генераторы сетевых узлов (локальных или транзитных). Качество таких генераторов выше качества **SEC**.

Генератор более высокого качества синхронизирует генераторы более низкого или того же уровня качества. Имеются ограничения на число генераторов, которые могут быть связаны в распределении синхронизации. Сигналы опорных генераторов распространяются через сеть распределения, которая использует средства транспортной сети.

Возможны следующие два метода распределения синхронизации:

1) восстановление синхронизации, которое поддерживается сетью **SDH**, например, на уровне выделения сигнала хронирования из **STM-N**. Это исключает непредсказуемое влияние обработки указателя на подчиненный генератор исходящего потока;

2) получение сигнала хронирования от источника синхронизации, который не поддерживается сетью **SDH**.

В сетях **SDH** функции источников сигнала хронирования могут быть различных типов:

PRC может быть автономным генератором или синхронизироваться по радиосигналу или спутниковому сигналу;

SSU может быть автономным генератором или синхронизироваться от **PRC**. На рис. 8 приведена функциональная схема **SSU**, который выбирает один из источников синхронизации, подключенных к его входу, и распределяет его к другим элементам в узле;

SEC (внутренний генератор синхронного оборудования) может быть автономным только при потере всех сигналов хронирования от внешних источников. Синхронизируется от **PRC**, **SSU** или другого **SEC** (в аварийной ситуации, пока меняется направление синхронизации в цепочке мультиплексоров **SDH**). Функциональная схема приведена на рис. 8.

На рис. 8 также показаны возможные эксплуатационные режимы генераторов. В режиме захвата или режиме внешней синхронизации на вход схемы поступают эталоны хронирования. Одним из эталонов управляется выходной сигнал хронирования. Используется схема фазовой автоподстройки частоты. В этом режиме работы подчиненные генераторы имеют такую же среднюю частоту, как и ведущий генератор. Далее, если все эталоны хронирования недоступны, то начинается режим удержания. Это означает, что сигнал хронирования на выходе схемы сохраняет параметры режима захвата благодаря наличию устройства памяти в схеме генератора. Возможен и несинхронизированный или автономный режим, когда сигнал хронирования определяется только параметрами данного генератора, при этом недоступны входные эталоны и выходные данные памяти. Этот режим называется также режимом свободных колебаний.

В транспортной сети возможны четыре режима синхронизации:

синхронный;

псевдосинхронный;

плезиохронный;

асинхронный.

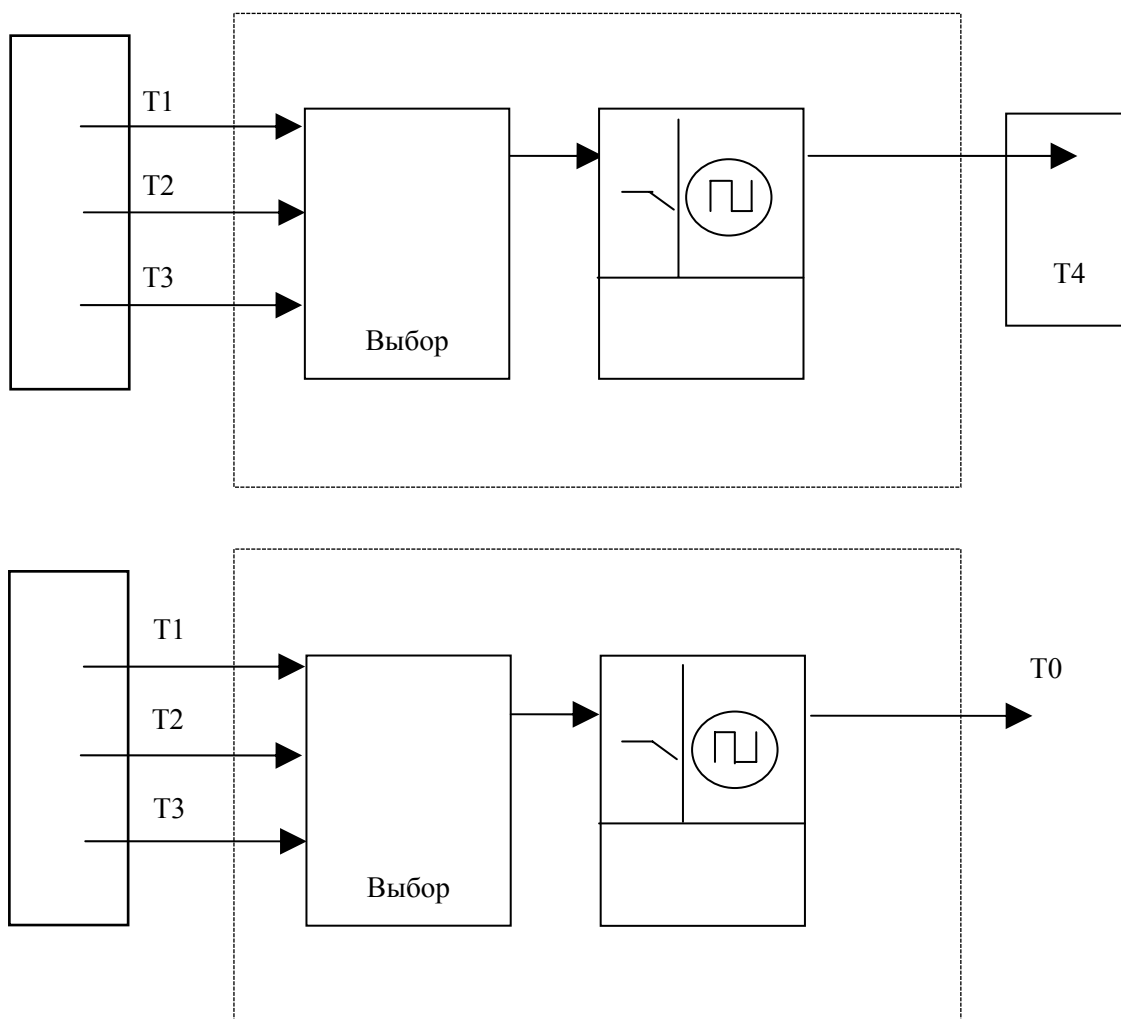


Рис. 8. Функциональные схемы SSU и SEC:

T0 – внутренний опорный сигнал хронирования;

T1 – сигнал хронирования, извлеченный из агрегатного сигнала STM-N;

T2 – сигнал хронирования, извлеченный из сигнала 2 Мбит/с;

T3 – сигнал хронирования, извлеченный из сигнала синхронизации 2 МГц

В **синхронном** режиме все генераторы в сети синхронизируются единственным **PRC**. Изменения значений указателей **TU/AU** могут происходить только случайно. В идеале в этом режиме управляемых проскальзываний в коммутаторах нет. Это нормальный режим работы в пределах одной зоны синхронизации.

В **псевдосинхронном** (как бы синхронном) режиме взаимодействуют генераторы, которые синхронизируются разными **PRC**. Однако каждый из **PRC** будет подчиняться требованиям, указанным выше, и поэтому изменение значений указателей будет произведено в элементах сети на границе между оборудованием, синхронизируемым различными **PRC**. В таком режиме имеет место низкая частота управляемых проскальзываний (одно проскальзывание в 72

суток). Это нормальный режим работы сети, обслуживаемой разными операторами.

Плезеохронный (почти синхронном) режим взаимодействия возникает, когда рабочий и защитный трейлы синхронизации к одному из ведомых генераторов в сети будут повреждены. Тогда этот SSU перейдет в режим свободных колебаний с выполнением функции удержания частоты (точность запоминания частоты $\pm 5 \cdot 10^{-10}$). Тогда, при взаимодействии синхронных мультиплексоров, синхронизируемых этим SSU, с остальными мультиплексорами сети будет возникать фазовый дрейф, который приведет к изменению значений указателей и возникновению управляемых проскальзываний. В этом случае на начальном этапе имеет место средняя частота управляемых проскальзываний (не более одного проскальзывания в течение 17 часов), но, по мере изменения собственной частоты несинхронизируемого SSU, их частота будет возрастать. Поэтому плезиохронное взаимодействие допускается только во время восстановления сети тактовой синхронизации (по российским стандартам – не более 3-х суток за год).

Асинхронный режим соответствует ситуации, при которой происходят большие смещения частоты (точность установки частоты синхронизирующего генератора ± 10 ppm). Это приводит к катастрофическому увеличению частоты управляемых проскальзываний – одно проскальзывание каждые 7 секунд. Сеть тактовой синхронизации должна строиться таким образом, чтобы асинхронный режим не возникал ни при каких аварийных ситуациях.

Если точность частоты генератора источника сигнала хронирования ниже, чем требуемая точность частоты SEC (± 20 ppm), то нарушается нормальный режим синхронизации и посылается сигнал индикации аварийного состояния (Alarm Indication Signal – AIS).

Распределение синхронизации может быть **внутриузловое** (в пределах узлов, содержащих SSU) и **межузловое**.

Распределение внутриузловое соответствует логической топологии звезды (рис. 9). Все генераторы более низкого уровня в пределах границ узла получают хронирование от генератора самого высокого уровня качества в узле. Только генератор самого высокого уровня качества в узле может восстановить хронирование по линии синхронизации от других узлов. Хронирование распределяется от элементов сети в пределах границ узла к элементам сети вне границ через среду передачи SDH.

Распределение **межузловое** соответствует древовидной топологии. Иерархические отношения между генераторами показаны на рис. 10. Такая архитектура, в которой генераторы более низкого уровня качества принимают хронирование от генераторов того же самого или высшего уровня качества, позволяет предотвратить петлю по синхронизации, а это необходимо для правильной работы сети синхронизации.

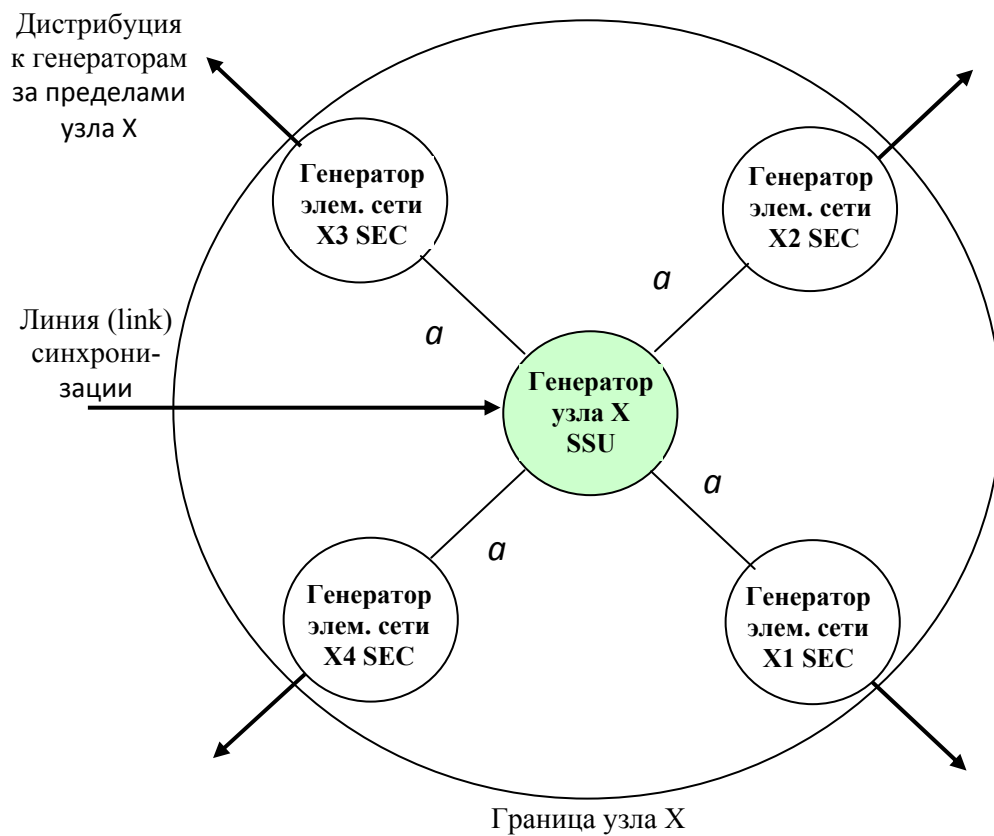


Рис. 9. Архитектура сети синхронизации. Внутриузловое распределение (дистрибуция).

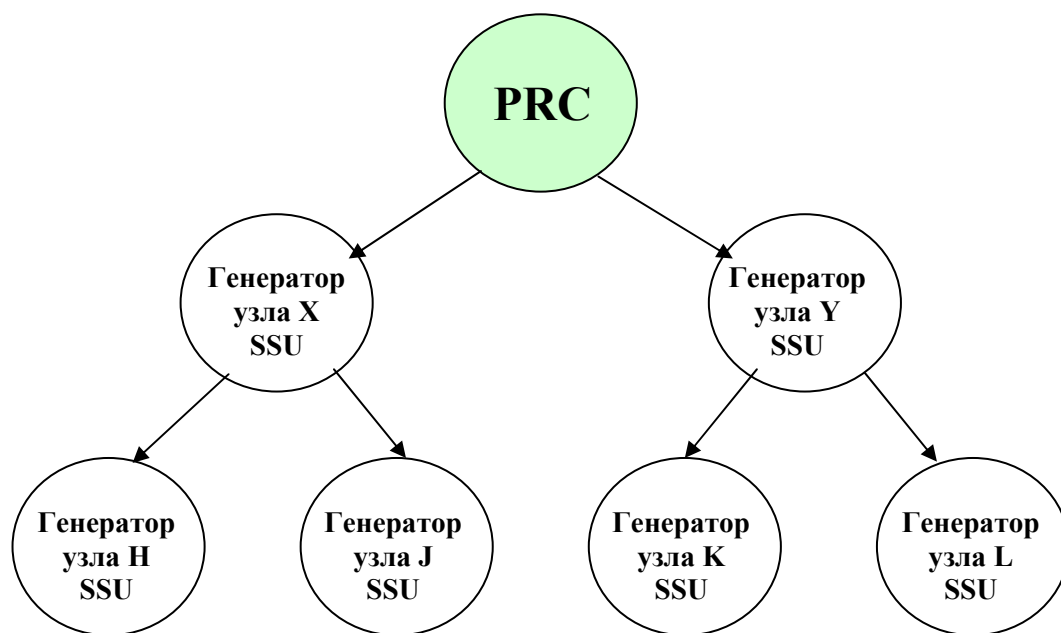


Рис.10. Архитектура сети синхронизации. Межузловое распределение

Информация о сигнале хронирования передается между узлами синхронизации. При нарушении синхронизации генератор узла должен выбирать другой эталон из предлагаемого набора. Когда нет возможности выбора, генератор узла должен входить в режим удержания.

Известна структура эталонной цепи сети синхронизации. Осуществляется метод хронирования «главный–подчиненный». Сигнал хронирования от **PRC** передается на все генераторы в цепи синхронизации. Самая длинная цепь не превышает $k \times \text{SSU}$ и содержит $n \times \text{SEC}$ между соседними **SSU**.

Качество хронирования ухудшается с увеличением числа синхронизированных генераторов и, следовательно, для практического проекта сети синхронизации число каскадно включенных элементов сети должно быть минимизировано. Для самой длинной опорной цепи синхронизации

$$k = 10; n = 6,$$

при этом общее число **SEC** не больше 60.

Величина n ограничена качеством хронирования, которое требуется для синхронизации последнего в соединении сетевого элемента. Величины k и n были получены из теоретических расчетов. В случае отказа синхронизации все элементы сети будут искать восстановление хронирования от источника с более высоким или равным по уровню качеством. Это гарантирует то, что **SEC** редко вступает в режим удержания или несинхронизированный режим. Статус синхронизации передается в заголовке мультимплексной секции.

Приложение 1.

Таблица 10.

$$\text{Интеграл вероятностей } \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * \int_0^x e^{-0,5t^2} dt$$

x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,00000	00399	00798	01197	01595	01994	02392	02790	03188	03586
0,1	03983	04380	04776	05172	05567	05962	06356	06749	07142	07535
0,2	07926	08317	08706	09095	09483	09871	10257	10642	11026	11409
0,3	11791	12172	12552	12930	13307	13683	14058	14431	14803	15173
0,4	15542	15910	16276	16640	16640	17003	17724	18082	18439	18793
0,5	19446	19497	19847	20194	20540	20884	21226	21566	21904	22240
0,6	22575	22907	23237	23565	23891	24215	24537	24857	25175	25490
0,7	25804	26115	26424	26730	27035	27337	27637	27935	28230	28524
0,8	28814	29103	29389	29673	29955	30234	30511	30785	31057	31327
0,9	31594	31859	32121	32381	32639	32894	33147	33398	33646	33891
1,0	34134	34375	34614	34850	35083	35314	35543	35769	35993	36214
1,1	36433	36650	36864	37076	37286	37493	37698	37900	38100	38298
1,2	38493	38686	38877	39065	39251	39435	39617	39796	39973	40147
1,3	40320	40490	40658	40824	40988	41149	41308	41466	41621	41774
1,4	41924	42073	42220	42364	42507	42647	42786	42922	43056	43189
1,5	43319	43448	43574	43699	43822	43943	44062	44179	44295	44408
1,6	44520	44630	44738	44845	44950	45053	45154	45254	45352	45449
1,7	45543	45637	45728	45818	45907	45994	46080	46164	46246	46327
1,8	46407	46485	46562	46638	46712	46784	46856	46926	46995	47062
1,9	47128	47193	47257	47320	47381	47441	47500	47558	47615	47670
2,0	47725	47778	47831	47882	47932	47982	48030	48077	48124	48169
2,1	48214	48257	48300	48341	48382	48422	48461	48500	48537	48574
2,2	48610	48645	48679	48713	48745	48778	48809	48840	48870	48899
2,3	48928	48956	48983	49010	49036	49061	49086	49111	49134	49158
2,4	49180	49202	49224	49245	49266	49286	49305	49324	49343	49361
2,5	49379	49396	49413	49430	49446	49467	49477	49492	49506	49520
2,6	49534	49547	49560	49573	49585	49598	49609	49621	49632	49643
2,7	49653	49664	49674	49683	49693	49702	49711	49720	49728	49736
2,8	49744	49752	49760	49767	49774	49781	49788	49795	49801	49807
2,9	49813	49819	49825	49831	49836	49841	49846	49851	49856	49861
3,0	49865									
3,5	49976									
4,0	49996									
4,5	4999966									
5,0	4999997									

Разработка схемы сети. Пример.

Исходные данные: схема сети приведена на рис. 11 и включает шесть узлов. Каждый узел с каждым должен быть связан двумя потоками E31.

Как видно из схемы, для соединения мультиплексоров, размещенных в узлах, может быть использовано два состыкованных кольца:

BCDE и **CGHD**.

Узел **С** транзитный, остальные узлы локальные. Для передачи сигналов E31 в сети синхронной цифровой иерархии используются тракты виртуальных контейнеров третьего порядка VC-3.

По схеме мультиплексирования можно определить, какое количество трактов VC-3 может быть организовано при использовании агрегатных сигналов разного уровня. Данные приведены в табл.11.

Таблица 10

Максимальное количество трактов VC-3 при использовании агрегатных сигналов разного уровня

Агрегатный сигнал	Количество трактов VC-3
STM-1	3
STM-4	12
STM-16	48
STM-64	192

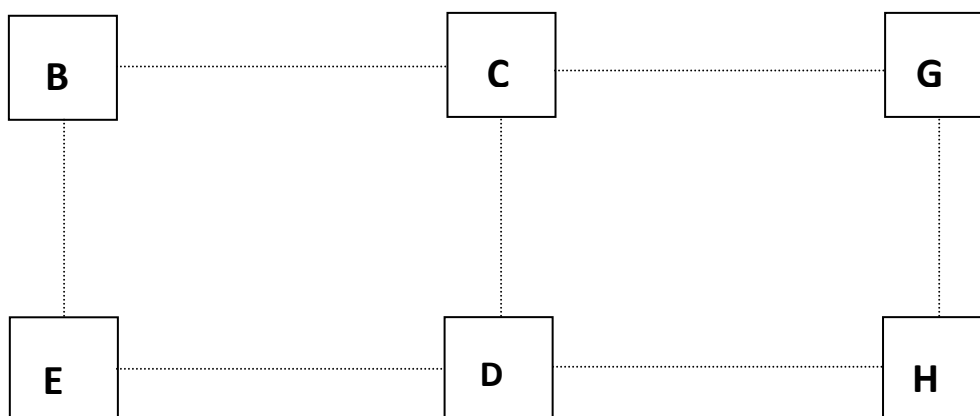


Рис. 11. Схема телекоммуникационной транспортной сети

Результатом разработки схемы организации сети должны быть:

- номера компонентных потоков в мультиплексорах для связи между узлами в сети;
- уровни агрегатных сигналов в сети;
- типы мультиплексоров и их размещение в узлах сети;
- коды приложения оптических интерфейсов

Нумерация компонентных потоков в сети

Так как в соответствии с заданием каждый локальный узел с каждым локальным узлом в сети должен обмениваться двумя потоками ЕЗ1 и, учитывая, что в сети организуется двухсторонняя передача, то есть компонентные потоки для прямой и обратной передачи между узлами должны иметь одинаковые номера, получим номера компонентных потоков. Будем считать, что в данном случае это соответствует номерам их интерфейсов в десятичном коде (см. табл. 11).

Таблица 11

Номера интерфейсов в узлах сети

Интерфейсы узла	Двухсторонняя передача между узлами	Номера интерфейсов
В	В – Е	1– 20
	В – D	21– 40
	В – H	41– 42
	В – G	43– 44
Е	Е – В	1– 20
	Е – D	45– 64
	Е – G	65– 66
	Е – H	67– 68
D	D – В	21– 40
	D – Е	45– 64
	D – G	69– 70
	D – H	71– 72
G	G – В	43– 44
	G – Е	65– 66
	G – D	69– 70
	G – H	73– 74
H	H – В	41– 42
	H – Е	67– 68
	H – D	71– 72
	H – G	73– 74

Выбор уровней агрегатных потоков

Количество трактов виртуальных контейнеров на отдельных участках сети равно количеству трактов с разными номерами на этом участке сети (табл. 12 и 13).

Таблица 12

Кольцо **BCDE**

Узел	Количество интерфейсов E31	Количество VC-3	Количество VC-3 с разными номерами в кольце
B	44	44	44
C	—	—	—
D	40	40	20
E	44	44	04
Всего в кольце:			68
Уровень агрегатного сигнала			STM-64

Таблица 13

Кольцо **CGHD**

Узел	Количество интерфейсов E31	Количество VC-3	Количество VC-3 с разными номерами в кольце
C	—	—	—
G	08	08	08
H	08	08	06
D	04	04	—
Всего в кольце:			14
Уровень агрегатного сигнала			STM-16

Узел **D** обеспечивает связь с узлами в двух кольцах: **BCDE** и **CGHD**. Кроме того, через этот узел должна обеспечиваться сквозная передача сигналов виртуальных контейнеров для связи узлов **B** и **E** одного кольца с узлами **G** и **H** другого кольца (табл. 14).

Таблица 14

Узел **D**

Узлы	Количество интерфейсов E31	Количество VC-3
B и E кольца BCDE – G и H кольца CGHD	—	8
Уровень агрегатного сигнала		STM-4

Схема организации сети

На схеме сети необходимо указать номера интерфейсов на всех портах для всех мультиплексоров в узлах, их тип или наименование.

На рис. 2 приведена схема организации сети, последовательность разработки которой показана выше. Наименование мультиплексоров составлено из наименования узла и порядкового номера. Одной линией на схеме показана двухсторонняя передача сигналов. Номера интерфейсов указаны для узлов **В** и **Г**. Для обеспечения защиты между узлами двух состыкованных колец используются и мультиплексоры узла **С**.

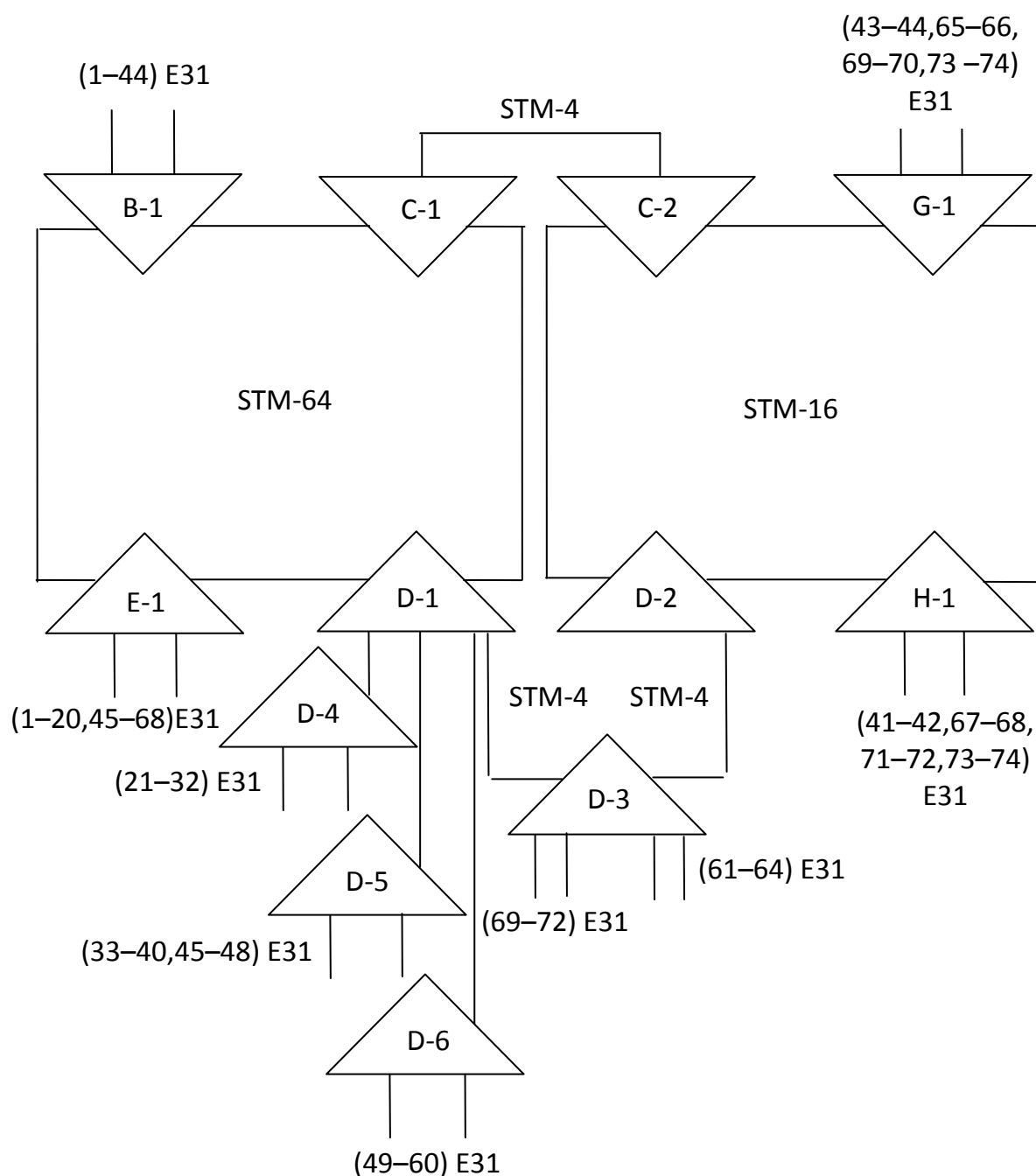


Рис. 12. Схема организации сети

Литература

1. Кулева Н.Н., Федорова Е.Л. Транспортные технологии SDH и OTN: учебное пособие / СПбГУТ. – СПб, 2009.
2. Кулева Н.Н., Федорова Е.Л. Оптические интерфейсы транспортных сетей SDH и OTN: учебное пособие / СПбГУТ. – СПб, 2009
3. Кулева Н.Н., Федорова Е.Л. Архитектурное представление сетевых слоев в процессах мультиплексирования в транспортных сетях SDH: учебное пособие. СПбГУТ. – СПб, 2004.
4. Матюхин А.Ю. Многоканальные системы передачи: учебное пособие / А.Ю. Матюхин, С.А. Курицын; СПбГУТ.– СПб, 2013.