

## ГЛАВА 2

### Взаимосвязь работоспособности сети ОКС № 7 с качеством сетевой синхронизации

Глава посвящена краткому описанию временных рабочих характеристик базовой платформы системы ОКС № 7. Подсистема МТР обеспечивает функционирование компонентов сети в режиме реального времени, по этой причине её работоспособность существенно зависит от состояния синхронизации. Приведены основные подходы к построению систем синхронизации для современных цифровых систем передач. Представлен анализ возмущающих факторов и известных аналитических подходов к математическому описанию и моделированию систем синхронизации.

#### **2.1. Рабочие характеристики платформы МТР. Требования к задержкам сигнальных сообщений**

Подсистема передачи сообщений МТР ОКС № 7 является общей для различных пользователей, следовательно, её рабочие характеристики должны удовлетворять требованиям различных служб. Эти требования могут различаться и меняться в зависимости от ряда факторов: архитектуры сети, установленных на ней приложений, и т.д. С целью удовлетворения этих различных требований подсистема МТР была задумана таким образом, чтобы соответствовать наиболее строгим требованиям подсистем пользователей, предусмотренным в момент выработки спецификаций. Рабочие характеристики платформы МТР, определённые в рекомендации [67], следует понимать как параметры, обеспечивающие способность подсистемы передавать сообщения переменной длины заданным образом для различных пользователей. Для эффективного достижения требуемых рабочих характеристик следует учитывать три группы факторов:

- 1) зависящих от задач и требований различных пользователей. По сути, эти требования сводятся к сокращению длительности передачи сообщений, защите против различных типов отказов и гарантий доступности при регламентируемой нагрузке;
- 2) зависящих от свойств сигнального трафика, его структуры и колебаний нагрузки в сети;
- 3) влияния внешних возмущающих воздействий, в том числе харак-

теристик средств передачи (например, интенсивности ошибок, точности синхросигнала).

В рекомендациях МСЭ-Т определены следующие основные показатели качества функционирования МТР [5]:

- вероятность приема сигнальной единицы с необнаруженной ошибкой должна быть ниже  $10^{-10}$ ;
- общая вероятность потери сигнального сообщения из-за отказа МТР должна быть ниже  $10^{-7}$ ;
- вероятность передачи сигнального сообщения в неправильной последовательности (включая дублирование сообщений) вследствие сбоев в части передачи сообщений должна быть ниже  $10^{-10}$ ;
- случайная величина задержки значащей сигнальной единицы вследствие повторных передач на одном звене сигнализации не должна превышать 300 мс с вероятностью  $10^{-4}$ ;
- среднее значение нагрузки на одно звено сигнализации не должно превышать 0,2 Эрл. Допускается увеличение нагрузки до 0,4 Эрл в ситуациях сбоев и перегрузок при переходе на резервные звенья сигнализации и альтернативные маршруты;
- коэффициент времени неготовности пучка маршрутов сигнализации не должен превышать в сумме 10 минут в год. Понятие времени неготовности пучка маршрутов сигнализации определяется неготовностью различных элементов сети сигнализации (звеньев и пунктов сигнализации), а также структурой этой сети. Неготовность пучка маршрутов в сети уменьшается дублированием звеньев, трактов и маршрутов сигнализации;
- коэффициент неготовности (по значению вероятности ошибки) пункта сигнализации SPR с функциями подсистемы SCCP для услуг без установления соединения должен быть ниже  $10^{-4}$ .

Общее время передачи сообщений в сети ОКС № 7  $T_0$  относится к сигнальному сообщению двух оконечных пунктов сигнализации (рис. 2.1).

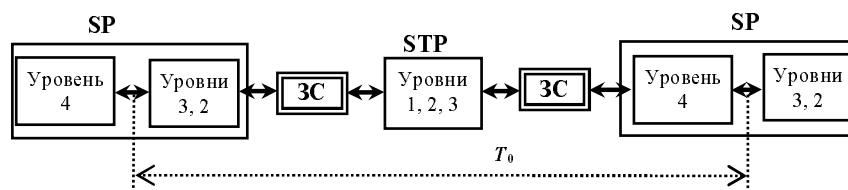


Рис. 2.1. Функциональная схема общей длительности передачи сообщения в сети ОКС № 7

Оно начинается в момент, когда сообщение покидает подсистему пользователя (уровень 4) в исходящем пункте, и заканчивается, когда сообщение поступает в подсистему пользователя (уровень 4) в пункте назначения. При передаче сообщений по сети сигнализации используется несколько компонентов сети. В общем случае можно выделить следующие основные компоненты длительности передачи сообщений:

- длительность передачи в подсистеме МТР (уровни 2 и 3) в исходящем пункте  $T_{ms}$  (рис. 2.2);
- длительность передачи в транзитном пункте сигнализации  $T_{cs}$  (рис. 2.3);
- длительность приема подсистемы передачи сообщений МТР (уровни 2 и 3) в пункте назначения  $T_{mp}$  (рис. 2.4);
- длительность распространения сообщения по звену данных сигнализации (уровень 1)  $T_p$  (рис. 2.5);
- задержка, вызванная образованием очередей  $Q$ .

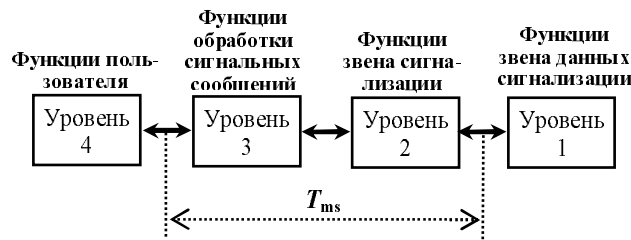


Рис. 2.2. Функциональная схема длительности передачи платформой МТР

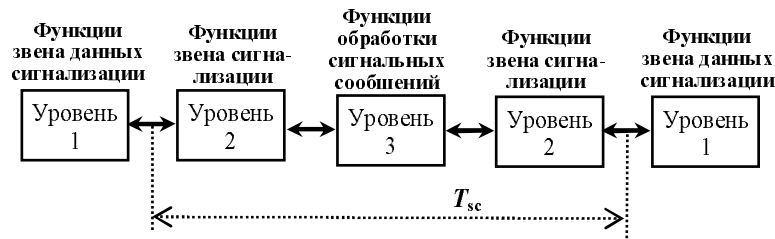


Рис. 2.3. Функциональная схема длительности передачи сообщений в транзитных пунктах сигнализации

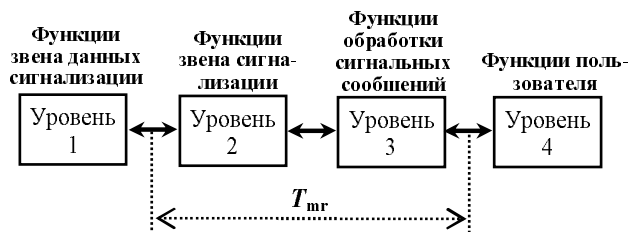


Рис. 2.4. Функциональная схема длительности приёма платформой МТР

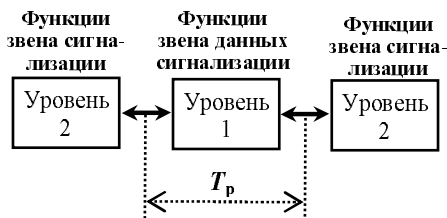


Рис. 2.5. Функциональная схема длительности распространения в канале данных

Общую длительность передачи сообщений при отсутствии значительных очередей  $T_{0a}$  можно определить по формуле [5]:

$$T_{0a} = T_{ms} + \sum_{i=1}^{n+1} T_{p,i} + \sum_{i=1}^n T_{cs,i} + T_{mr}, \quad (2.1)$$

где  $n$  - количество транзитных пунктов сигнализации STP.

Общую длительность передачи сообщений при наличии каких-либо искажений, приводящих к появлению очередей,  $T_0$  можно определить по следующей формуле [5]:

$$T_0 = T_{0a} + \sum_{i=1}^{n+2} (Q_t - Q_a), \quad (2.2)$$

где  $Q_t$  - длительность общей дополнительной задержки, вызванной образованием очередей в случае действия искажений;  $Q_a$  - длительность задержки, вызванной образованием очередей при отсутствии искажений (т.е., как правило, всегда присутствующей в сети).

Подсистема передачи сообщений обрабатывает сообщения, поступающие от различных подсистем пользователей в режиме разделения времени (сначала обрабатывается одно сообщение, затем следующее и т.д.). Это приводит к тому, что возможны дополнительные задержки сигналов, если необходимо обработать за данный интервал времени более одного сообщения. Образуется очередь, сообщения из которой передаются в порядке поступления. Для анализа задержек сигнальных сообщений в МТР используется математический аппарат теории массового обслуживания. Представленные в рекомендации [67] формулы вычисления длительностей задержек, вызванных образованием очередей, получены в основном на основе модели очередей M/G/1 с приоритетами [68]. Формулы составлены для случая отсутствия дополнительных задержек, связанных с влиянием искажающих факторов, и согласно [5], справедливы при действии следующих предположений и допущений:

- функция плотности вероятности распределения моментов поступления сообщений (или то же самое: длительностей между этими моментами времени) – экспоненциальная (M);
- функция распределения длительности обслуживания – произвольная (G);
- число обслуживаемых приборов – один (1);
- приоритет обслуживания относится к приоритету передачи на уровне 2 модели ВОС;
- длительность распространения сообщения по шлейфу звена сигнализации – постоянная величина, включая длительность обработки в оконечных устройствах.

Если в системе возможны ошибки при передаче значащей сигнальной единицы с интенсивностью появления выше установленной, то дополнительно предполагается следующее:

- ошибка при передаче значащей сигнальной единицы является случайной величиной (без указания закона вероятности распределения);
- ошибки статистически независимы;
- дополнительная задержка, вызванная повторной передачей ошибочной сигнальной единицы, рассматривается как часть времени ожидания соответствующей сигнальной единицы на приёмной стороне.

При оценке реальной длительности передачи сообщений для конкретной подсистемы пользователя необходимо учитывать следующие параметры:

- длину сигнальной единицы;
- нагрузку сигнального трафика;
- значение битовой скорости передачи.

В рекомендациях и российских технических спецификациях, посвящённых ОКС № 7, приведён регламент значений длительностей задержек поступления (передачи) сообщений – для их средних значений и максимально допустимых (на уровне 95%). В Приложении **В** представлены некоторые наиболее употребимые из этих значений. Как будет показано в по-

следующих разделах монографии, увеличение длительностей реальных задержек приводит к нарушениям в передаче сообщений, а следовательно, к снижению качества обслуживания. Параметры *качества обслуживания* (*Grade of Service - GoS*) и *качества услуг* (*Quality of Service - QoS*) определены в рекомендациях МСЭ-Т серии E.700. Так, в рекомендациях [69] и [70] нормируется количество пунктов коммутации и соответствующее число транзитных пунктов сигнализации для гипотетического (обладающего среднестатистическими параметрами) соединения в сети ОКС № 7 при различных видах связи (см. Приложение В). Там же приведены нормы на длительность *сквозных задержек* (*end-to-end delay*) для типовых сигнальных соединений при различных видах связи. Необходимо отметить, что нормирование количества транзитных пунктов в сети сигнализации между источником и приёмником сигнального сообщения имеет непосредственное отношение к зависимости работоспособности сети ОКС № 7 от качества подводимой синхронизации (или параметра точности подводимого сигнала частотной синхронизации [3, 4]) к каждому сетевому узлу.

Высокая значимость систем синхронизации и необходимость в получении *достаточной* синхронизации характерны не только для сетей ОКС № 7, но и для других цифровых систем передач, в основу работоспособности которых положено требование одновременности переключения в приёмнике и передатчике. Если сигналы с битовыми скоростями в пределах до нескольких десятков Мбит/с могли быть синхронизированы импульсной последовательностью с относительным уходом частоты (точностью) порядка  $10^{-6} \dots 10^{-7}$ , то рост битовых скоростей до сотен и тысячи Мбит/с (в сетях синхронной цифровой иерархии), очевидно, привёл и к резкому увеличению требований к синхросигналу [1, 3, 4, 71, 72 и др.]. Также очевидно, что при дальнейшем повышении битовых скоростей, что представляет интерес для перспективных систем передач, значимость синхронизации ещё более возрастёт.

Следует помнить, что хотя рабочая битовая скорость передачи сигнального сообщения в системе ОКС № 7 составляет 64 кбит/с, данный поток подлежит уплотнению в общий выделенный канал сигнализации с повышением битовой скорости до 2048 кбит/с (поток E1 псевдосинхронной цифровой иерархии [71]), который в свою очередь также уплотняется (до 155 Мбит/с и выше) для передачи по линейному тракту в пределах звена сигнализации. Этапы уплотнения являются необходимой процедурой в связи с дороговизной линейных магистральных соединений и очевидным дефицитом информационных каналов. Возможные нарушения в передаче высокоскоростного синхронного модуля (STM-1, -4, -16) могут приводить и к увеличению ошибок в сигнальных сообщениях, что, в свою очередь, может являться причиной сбоев при передаче информации пользователя.

Безусловно, к искажающим факторам, влияющим на работоспособность цифровых систем передач, следует относить не только точность син-

хронизации. В практике эксплуатации имеют место аппаратные отказы, частичная потеря работоспособности средств связи под действием внешних электромагнитных и электростатических полей, широкополосной вибрации, акустического шума, фоновых излучений, и т.д. [73, 74]. Тем не менее в телекоммуникационных системах основных и ведомственных операторов, предоставляющих услуги цифровой связи, перечисленные негативные воздействия в меньшей степени сказываются на работоспособности сети, чем неоптимальный подбор сетевых параметров (архитектурной топологии, маршрутов, включая отсутствие (наличие) возможности динамической маршрутизации, и т.д.), приводящий в конечном итоге к нарушениям в системах служебного обеспечения. Как показывает опыт настройки и эксплуатации реальных волоконно-оптических систем передач (ВОСП) [7...9], наиболее значимым фактором влияния является степень работоспособности системы синхронизации, в том числе с точки зрения её оптимального (для данной ВОСП) построения. Именно СС обеспечивает условие одновременности переключения в приёмнике и передатчике для всех пространственно распределённых сетевых устройств.

Безусловно, требование к синхронности работы тех или иных компонентов некоторой системы имеет место и в других областях техники. Синхронность также важна при построении датчика, преобразователя физических величин, или электронно-вычислительной машины, и т.д. Но в приведённых примерах, с одной стороны, пространственная локализованность объекта оправдывает в некоторой степени упрощённый подход к принципам обеспечения синхронности работы составляющих его частей, с другой стороны, там, где требуется высокое быстродействие, налицо достаточно интересные и оригинальные подходы к синхронизации. Например, обеспечение синхронности работы частей сложных электронно-вычислительных устройств, основанных на больших и сверхбольших интегральных схемах (БИС и СБИС), базируется на оптическом подведении синхросигнала [75] - для минимизации фазовых дрожаний и возможных несоответствий входящих фронтов. При этом все остальные сигналы – данные, управление, прочие служебные – обрабатываются в электронном виде. Становится очевидным тот факт, что для ВОСП, с одной стороны, характеризующихся значительной пространственной распределённостью, с другой стороны, обладающих достаточно сложными функциональными устройствами, работающими на высоких битовых скоростях, системы синхронизации должны занимать особое место, и для обеспечения синхронности работы компонентов ВОСП нужны глобальные и серьёзные технические решения.

Существенную роль в увеличении интереса к синхросетям при построении ВОСП определяет развитие последних. В результате уровень проблем, связанных с синхронизацией, является зависящим от общего количества цифровых устройств на сети. При малом количестве цифровых устройств проблемы синхронизации могут быть решены в частном порядке, и система синхронизации не рассматривается операторами как отдельная сис-

тема в составе сети. Однако при увеличении количества цифровых устройств проблемы синхронизации уже не могут быть рассмотрены частно и должны рассматриваться системно. С этим связана определенная локальная революция в подходе: появление определенной «критической массы» цифровых устройств на сети приводит к необходимости рассматривать систему синхронизации как отдельную составную часть системы электросвязи. С дальнейшим увеличением количества цифровых устройств, повышением их сложности и ростом битовых скоростей начинают меняться и концепции построения СС. Ставшие уже классическими методы начнут терять эффективность, изживать себя. Уже в ближайшем будущем возникнет необходимость в разработке принципиально новых подходов к обеспечению синхросигналом устройств ВОСП. Здесь следует ожидать резкого возрастания интереса не только к практической стороне построения СС, но и к аналитическим и теоретическим аспектам систем синхронной связи.

Как для модернизации и совершенствования известных технических решений, так и выявления новых направлений исследования, способных привести к практически значимым результатам, необходима систематизация существующих технических аспектов построения СС для ВОСП и аналитических моделей синхронной связи. Поэтому с целью обобщения современного состояния СС далее в настоящей главе приведены основные принципы построения и параметры современных систем синхронизации, а также аналитические подходы к моделированию последних.

## **2.2. Системы синхронизации для волоконно-оптических систем передач. Параметры системы синхронизации в SDH**

В общем случае система синхронизации включает в себя [1]:

- все цифровые устройства системы телекоммуникаций, которые можно охарактеризовать как генераторы синхросигналов;
- систему путей, по которым передается синхроинформация (в том числе информация о единой тактовой частоте) – сеть синхросигналов;
- сигналы, которые осуществляют передачу синхроинформации – непосредственно синхросигналы, передающие информацию о тактовой частоте, и сигналы, передающие информацию о статусе синхронизации [71], цикловые синхросигналы, сигналы обслуживания в системе синхронизации и др.

В современных системах связи существуют *три основных понятия синхронизации*: фазовая, частотная и временная (то же самое, что и синхронизация по времени) [1].

*Фазовой синхронизацией* (ФС) называется соответствие фаз принятого и переданного сигналов. Для ее достижения используют такие компоненты, как фазовращатели, фазовые детекторы, системы фазовой автоподстройки



(ФАП), и т. д. В практике систем связи схемы ФАП применяются с целью достижения ФС между линейным сигналом и цепью приемника [77, 78].

Наиболее важным типом синхронизации для телекоммуникационных систем является *частотная синхронизация* (ЧС), которая означает согласованность генераторов различных цифровых устройств в сети по частоте. В случае идеально согласованных генераторов они работают с одинаковой частотой. Тогда скорость передачи цифровой информации с высокой степенью точности равна скорости приема, в результате в системе связи отсутствуют проскальзывания и нет ошибок, связанных с нарушениями синхронизации. Одной из основных целей сетевых операторов является повышение частотной согласованности ГСЭ.

*Временная синхронизация* (ВС) или синхронизация по времени предусматривает, что все устройства в сети имеют единое время. Это время обычно согласуется со всемирным скоординированным временем (UTC - Coordinated Universal Time), [1]. Одним из способов установления ВС для устройств сети является *цикловая синхронизация*, [72, 77], о которой речь пойдет в следующем параграфе. Применительно к телекоммуникационным системам суть цикловой ВС заключается в том, что каждой информационной единице (посылке, модулю, виртуальному контейнеру, в том числе циклу, и прочее) присваивается некоторая временная метка. На приемной стороне метка сравнивается с текущим временем приёмника и анализируется принципиальная возможность детектирования (считывания, преобразования) этой посылки после её передачи по сети. В случае превышения задержки передачи определенного порога посылка считается недействительной. Такая схема защиты является довольно мощной, однако требует, чтобы все рабочие станции в сети были синхронизированы как по частоте, так и по времени. Хотя в настоящее время ВС представляет собой совершенно независимую от частотной синхронизации задачу [1], тем не менее в практике построения ВОСП появляются методы интегрального решения обеих задач. Примером может служить система BITS. Поскольку в настоящее время имеет место тенденция к интеграции решений частотной и временной синхронизации, краткое описание концепции BITS представлено в Приложении Е.

В настоящей монографии основное внимание уделено системам ЧС: разработке оригинальных методов оценки и повышения их реальной работоспособности. С одной стороны, это связано с наибольшей значимостью систем ЧС в обеспечении работоспособности всей телекоммуникационной системы и одновременно значительной сложностью их моделирования. С другой стороны, недостаточной освещённостью в литературных источниках вопросов работоспособности систем ЧС в противовес широко представленным в литературе подходам и методам моделирования систем ФС и ВС [77, 78 и др.].

Так, для достижения частотной синхронизации ГСЭ в системе связи необходимо решить следующие технические задачи:

- установить и поддерживать единую тактовую частоту (или кратную частоту) для всех устройств сети, чтобы система работала с единой скоростью приёма и передачи импульсных последовательностей. Поддержание синхронности должно происходить в любое время независимо от изменений в структуре сети, возможных сбоях в каналах и узлах, в том числе при наличии скачков фазы или частоты, при перестроении сети, ее расширении и т.д.;
- компенсировать задержку передачи между узлами коммутации (и ее колебания из-за различных изменений), доведя ее до целого значения периода цикла, чтобы установленные временные метки (в наиболее простом случае – фронты импульсов цикловой последовательности) в каждой линии временного уплотнения совпадали как можно точнее.

Основными параметрами источников частотных синхросигналов являются точность и стабильность генерируемой частоты.

*Точность* (или степень точности) генерируемой частоты, согласно [1, 3, 4] характеризуется относительным её отклонением от номинального значения. Здесь необходимо заметить, что данный регламентируемый параметр (и представленный ниже параметр – стабильность) предназначен для количественного отображения уровня реальной неточности (и нестабильности) генератора (или ведущего синхросигнала). Поэтому с аналитической точки зрения правильнее формулировать такую характеристику, как *неточность* (и *нестабильность*), а уже точность и стабильность выражать через них как обратные величины. Тем не менее из-за того, что стандарты и руководящие документы представляют данные параметры именно таким образом, дальнейший текст во избежание путаницы с НТД написан в согласии с действующими стандартами.

В свете сказанного точность генерируемой или подводимой частоты определяется следующим выражением:

$$\sigma_{\text{вед}} = \Delta f / f_{\text{ном}}, \quad (2.3)$$

где величина  $\Delta f$  представляет собой отличие частот ведомого и ведущего генераторов, может также определяться как абсолютная величина рассинхронизации (несоответствия частот) между сетевыми узлами,  $f_{\text{ном}}$  – номинальная частота синхронизации, установленная НТД. Так, например, отклонение в 50 ррт означает допустимую точность генерируемой частоты  $5 \cdot 10^{-5}$ .

*Стабильностью* согласно [3, 4] называется свойство данного генератора поддерживать режим генерации частоты в допустимом диапазоне её отклонения в течение заданного (длительного) промежутка времени. Параметр стабильности также измеряется в относительных единицах отклонения частоты от номинальной, однако включает в себя промежуток времени наблюдений, например, стабильность может быть равна  $10^{-10}$  за сутки.

По времени наблюдений, согласно регламенту НТД, разделяют долгосрочную и краткосрочную стабильности генераторов. Параметры временной стабильности оцениваются в пределах  $t_s = 10^3 \dots 10^4$  с: если параметры стабильности анализируются до  $t_s$ , это называется краткосрочной стабильностью, если в течение периода, большего  $t_s$ , то это долгосрочная стабильность [1]. Обычно параметры краткосрочной стабильности приводятся к одной секунде, а параметры долгосрочной стабильности - к одним суткам. С этой точки зрения понятие точности (генератора или ведущего синхросигнала) можно связывать с его *краткосрочной стабильностью*.

Долгосрочная нестабильность отражает общую тенденцию в отклонении частоты синхросигнала, тогда как краткосрочная нестабильность показывает случайные, фактически флуктуационные изменения частоты в короткие интервалы времени.

Аналогично определяется стабильность работы генератора в различных условиях, например, температурная стабильность. В реальной эксплуатации стабильность работы генератора в различных условиях чрезвычайно важна, поэтому в процессе выбора источника синхронизации и сертификационных измерений различным параметрам стабильности этого класса (например, температурной стабильности) уделяется большое внимание. Обычно измерения параметров стабильности работы генераторов в зависимости от внешних условий делаются в лабораториях при проведении промышленных и сертификационных измерений – путём помещения генератора в различные температурные условия, в том числе со скачками температуры от 18 до 26 °С [1]. При этом генератор должен демонстрировать стабильную работу. Часто для оценки качества генератора используется *коэффициент вариации Аллана AVAR* (Allan Variance), численно равный среднеквадратическому приведенному отклонению частоты:

$$\eta_{AVAR} = \sqrt{\sum_N (\Delta f / f_0)^2} \quad (2.4)$$

В Приложении **F** для иллюстрации стабильности и точности представлены графические варианты работы генератора с номинальной частотой  $f_0$ . Там же кратко описаны такие параметры синхросигналов, как *TIE*, *MTIE*, *TVAR* и *TDEV*, которые в той или иной степени связаны с анализом вандера.

Топологическая архитектура систем синхронизации предполагает радиальную иерархическую структуру. Образование замкнутых колец в СС не допускается – из-за появления эффекта ухода частоты внутри кольца с последующим серьёзным нарушением работоспособности сети. Обзор современных принципов построения, иерархий и методов взаимодействия СС с различными источниками первичных синхросигналов (в плезиохронном режиме) приведён в Приложениях **E** и **F**.

### 2.3. Факторы, снижающие стабильность и точность синхросигналов

Для достижения синхронности работы сетевых устройств необходимо передать информацию о тактовой частоте всем подключенным ГСЭ. Для этой цели используются синхросигналы или сигналы синхронизации, которые должны передаваться в виде отдельных линейных сигналов. Широко распространённый вариант синхросигналов для SDH: импульсная последовательность вида 0, 1, 0, 1, 0 с битовой скоростью 2,048 Мбит/с; или(и) гармонический сигнал с частотой 2,048 МГц. В ряде случаев синхроиформация выделяется из информационного сигнала, например, путём деления частоты высокоскоростного сигнала STM-1. В любом случае, в процессе передачи информационных или синхросигналов по сети, они подвергаются различным воздействиям, в результате качество синхроиформации ухудшается с последующим нарушением параметров синхронизации в сети.

Здесь необходимо оговорить тот факт, что, уже успев привыкнуть к цифровым способам передачи сообщений со всеми их широкими возможностями в смысле качества и надёжности, по отношению к синхроиформации по-прежнему приходится довольствоваться аналоговым вариантом передачи. Если речевой сигнал, видео, и т.д. кодируют в цифровую форму, разбивая аналоговый сигнал по уровню и по времени, то синхроиформацию, или в конечном итоге информацию об абсолютном значении длительности (периода колебаний или между двумя импульсами логической единицы), представляется возможным передавать только в виде именно таких эталонных сигналов – гармонических и импульсных. Из-за этого существует широкий набор причин, приводящих к искажению синхроиформации.

В практике современных телекоммуникаций нестабильности хронизирующих сигналов возникают как по физическим причинам из-за внешних помех и изменения физических параметров линии, так и по алгоритмическим причинам (например, джиттер стаффинга и смещение указателей в АСГ в случае, когда синхросигнал уплотняется совместно с другими информационными потоками). Результирующую нестабильность тактовой частоты называют фазовым дрожанием. В зависимости от частоты фазового дрожания сигнала различают высокочастотное фазовое дрожание - *джиттер* - с частотой выше 10 Гц, [3, 4], и низкочастотное фазовое дрожание (иногда называемое дрейфом фазы) - *вандер* - с частотой ниже 10 Гц. Параметры джиттера наиболее сильно влияют на параметры фазовой синхронизации, на ЧС и ВС практически влияния не оказывают вследствие несложности его устранения – в наиболее простом случае использованием компараторной схемы. Вандер представляет для систем синхронизации существенный негативный фактор, который в отличие от джиттера преобразуется различными цепями и устройствами в соответствии с параметром JTF [1], легко проходит без изменений через цепи ФАП, может значительно накапливаться в сети и затем воздействует на СС.

Основными физическими причинами нестабильности частоты являются: электромагнитная интерференция; шум и помехи, воздействующие на цепь синхронизации в электронных схемах приемника; изменения длины тракта, в том числе изменения скорости распространения, доплеровские сдвиги от подвижных оконечных устройств; низкая плотность и нерегулярное поступление хранирующей информации. Основной алгоритмической причиной нестабильности частоты в SDH-сетях является режим выравнивания скоростей с использованием битового или байтового стаффинга и смещение указателей. Моделированию процесса передачи синхросигнала по потоку E1 в SDH-сети с прогнозом его точности на приеме уделено внимание в главе 3 настоящей главы.

**Шум и помехи в электронных устройствах.** Здесь одним из уязвимых звеньев является кольцо ФАП, где существует вероятность неправильного принятия хранирующего сигнала с последующим выходом системы из режима захвата [1, 77, 78]. Тем не менее влияние шумов и помех в электронных устройствах снижает точность ФС, а не ЧС или ВС, и обычно не приводит к появлению вандера.

**Изменения эффективной длины тракта** происходят в результате расширения или сжатия среды передачи [1] или изгиба радиотракта. При удлинении тракта эффективная скорость передачи на входе приемника уменьшается, поскольку все больше и больше битов «накапливаются» в среде передачи. Аналогично, при укорочении тракта битовая скорость на входе приемника увеличивается, поскольку число битов, «накопленных» в линии, уменьшается. После того как длина тракта стабилизируется, восстанавливается номинальная скорость передачи цифрового сигнала. Наиболее значительные негативные последствия, связанные с изменением длины тракта, характерны для радиосигналов. Здесь имеют значение возможные изменения в скорости распространения и доплеровские сдвиги. В оптоволоконных системах имеют место нелинейные эффекты, интерференционные искажения и дисперсия, которые могут приводить к уширению импульсов и замедлению скорости распространения оптического сигнала, переносимого импульсную последовательность, с последующей генерацией вандера.

**Низкая плотность поступления хранирующей информации.** Основное требование к коду в цифровой системе передачи состоит в том, чтобы он обеспечивал получение *достаточной* хранирующей информации для установления и поддержания колебаний тактовой частоты в приемнике на конце линии. Если уровень хранирующей информации зависит от цифрового сигнала, то фазовые дрожания в восстановленных колебаниях тактовой частоты увеличиваются в течение периодов времени с относительно низкими плотностями импульсов, от которых зависит хронирование. Амплитуда фазовых дрожаний зависит не только от плотности импульсов, но также и от *структуры цифрового сигнала* (в смысле содержания хранирующей информации), [1, 77]. В качестве примера отметим, что именно требование

повысить плотность хранимой информации привело к необходимости замены линейного кода АМІ на линейный код HDB3 в системах ИКМ. Рассмотрению вариантов содержательности хранимой информации посвящён следующий параграф.

Операции, хранимые от источника единственной частоты, не нуждаются в высоко стабильных генераторах, поскольку все элементы испытывают однотипные изменения хранимого колебания (в случае, когда допустимо пренебречь искажениями при передаче колебания от источника частоты к синхронизируемому элементу). Другая ситуация возникает, когда имеет место переход от одного синхронизируемого оборудования к другому (например, от передатчика к приёмнику), рис. 2.6.

Алгоритм логического преобразования сигнала в любом типе аппаратуры начинается с записи входящего сигнала в буфер (элемент памяти). Эта операция следует после оптоэлектронного преобразования и преобразования кода (из передаваемого линейного кода в код NRZ). Изъятие скремблера и последующие логические операции производятся после считывания записанного сигнала из входного буфера. При этом запись в буфер производится на частоте передатчика, а считывание из буфера и дальнейшие логические преобразования – на частоте приёмника [71]. Появляющееся отличие частот передатчика и приёмника под влиянием как кратковременных, так и долговременных случайных изменений частоты (то же самое – девиация временного интервала  $\theta(t)$ ) приводит к тому, что запись импульсов сигнала передатчика и считывание их схемой приёмника производятся на разных скоростях. В информационном сигнале наблюдается *рассогласование*. К особенно непредсказуемым результатам в смысле сказанного выше (характер функции  $\theta(t)$ ) приводит ситуация, когда передатчик информационных сигналов находится в условиях, существенно отличающихся от условий, в которых находится ведущий генератор (передатчик синхросигнала) для рассматриваемого приёмника, рис. 2.6.

Опыт настройки и эксплуатации сетей показывает, что нарушения в СС могут приводить к значительному ухудшению услуг связи в цифровой сети. В зависимости от типа услуг это влияние разное: одни услуги более устойчивы к нарушениям синхронизации в сети, а другие – менее. В любом случае нарушения синхронизации приводят к деградации качества услуг и значительным сбоям в работе сети.

Основным следствием влияния неточной синхронизации и рассогласования сигналов на параметры каналов цифровых систем связи являются проскальзывания. *Проскальзыванием* называется повторение или исключение группы символов в синхронной (или плезиохронной) последовательности двоичных символов в результате различия между скоростями считывания и записи буферной памяти. В отсутствие эластичного буфера проскальзывания возникают по мере накопления фазового сдвига сигналов передачи и приёма. В этом случае в зависимости от среднего уровня несоответствия

частот генераторов будут возникать битовые проскальзывания, т.е. ошибки в считывании бита. Современные цифровые сигналы в области связи структурированы (как правило, на циклы или кадры), и битовые проскальзывания будут нарушать цикловую синхронизацию. С точки зрения алгоритмов взаимодействия цифровых устройств менее опасными являются цикловые проскальзывания, которые приводят к потере цикла информации, но не приводят к нарушению цикловой синхронизации [1, 77]. Запрос о потерянном цикле отправляется на передающую сторону, и цикл повторяется. В то же время одно битовое проскальзывание в современных цифровых АТС может привести к потере до 3 циклов информации, что необходимо для восстановления цикловой синхронизации [71]. Такие проскальзывания называются *неуправляемыми*, они приводят к более значительным искажениям при передаче.

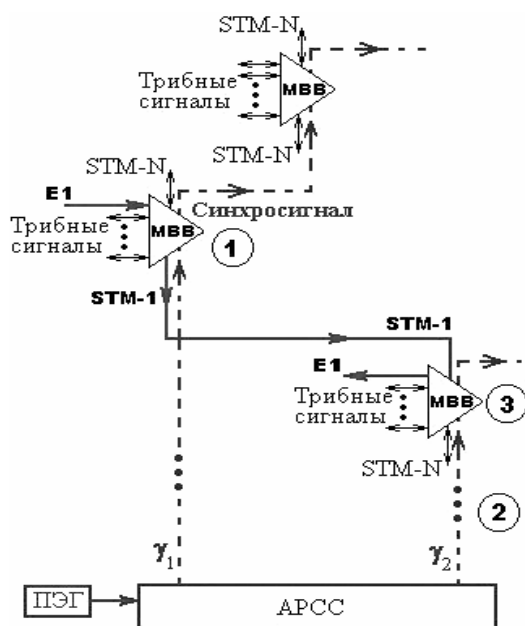


Рис. 2.6. Схема представления возможности передачи информационного и синхросигналов к какому-либо узлу (например, 3) из различных узлов сети (соответственно 1 и 2). Сигналы синхронизации от АРСС к узлу 1 и к узлу 3 передаются по разным линиям, соответственно, в общем случае – имеют различное качество;  $\varpi_1$  и  $\varpi_2$  – параметры, характеризующие точность синхросигнала, реально поступающего на мультиплексоры.

На рисунке обозначены: АРСС – аппаратура размножения сигнала синхронизации, МВВ – мультиплексор ввода-вывода, ПЭГ – первичный эталонный генератор

Для минимизации нежелательных явлений, связанных с проскальзываниями, используют эластичные буферы размером в один или несколько циклов. В этом случае реализуется *механизм управляемых проскальзываний*:

в момент переполнения буфера вся информация в нем полностью стирается, буфер опустошается. Это приводит к потере одного цикла информации, но не к потере цикловой синхронизации. Управляемые проскальзывания в настоящее время являются единственно допустимыми в цифровых сетях связи. В нормативных документах под проскальзываниями понимают управляемые проскальзывания.

В практике эксплуатации проскальзывания приводят к появлению параметра *секунд неготовности канала (UAS)*. Современные методики измерения параметров канала ИКМ предусматривают отключение режима измерения вероятности ошибки *PE* (в НТД - параметра ошибки *BER*) при потере большого массива данных [3, 4]. В этом случае время, в течение которого происходила потеря (для управляемого и неуправляемого проскальзываний теряется 1...3 цикла информации), считается как время неготовности канала. В практике эксплуатации существуют и другие причины, приводящие к появлению параметра *UAS*: нарушение связности линии, частичный обрыв кабеля, и т.д. Поэтому определить работоспособность системы синхронизации и степень её влияния на параметры сети путем простого контроля параметров цифровых каналов по *PE* не всегда возможно. Применяется также классический алгоритм анализа *СС*, который рассматривает потерю большого массива данных в соответствии с количеством секунд с ошибками (*number of error second – NES*) или количеством сильно пораженных секунд (*number more of error second – NMES*) и только после 10 последовательных *NES* рассматривает это время как время неготовности канала. В этом случае проскальзывания в процессе измерений будут приводить к появлению *NES*. В любом случае наличие проскальзываний приводит к взрывному росту *PE* (появлению пакетного *BER*), так что на гистограмме значения параметра *BER* выглядят в виде пакетов. Важно также отметить, что ошибки, возникающие в сети из-за нарушений в *СС*, редко касаются одного узла. Обычно нарушения в *СС* распространяются ниже по иерархии синхронизации и приводят к каскаду узлов с ошибками [1, 7, 8]. Влияние проскальзываний на различные услуги связи и параметры каналов сети представлено в табл. F.1 [1].

#### **2.4. Анализ аналитических подходов к моделированию параметров систем синхронизации**

На этапе становления оптоволоконных телекоммуникационных систем (75-85 гг. прошлого века) значительное внимание было уделено аналитическому изучению принципов обеспечения синхронности работы цифровых устройств. Согласно классификации систем синхронизации, сделанной выше, подразделяющей последние на *ФС*, *ЧС* и *ВС*, широкое освещение в литературе нашли устройства *ФС*. Проведено достаточно основательное описание принципов их построения и математическое моделирование процесса



подстройки фазы внутреннего генератора петли ФАП в соответствии с принимаемым сигналом, [77 – 79]. Вопросы ВС частично исследовались в [77] и [72], связанные с решением о достоверности факта синхронной работы приёмного и передающего устройств по анализу комбинации принятых символов. В настоящее время этот метод получил название *цикловой синхронизации (ЦС)*. Задача частотной синхронизации, наиболее важная для цифровых систем передач и заключающаяся в основном в эффективном обеспечении синхронинформацией (информацией об эталонной частоте) сетевых устройств, в научной литературе практически не представлена. В [80] изучен вопрос о вариациях частоты в замкнутых связанных колебательных системах, в которых отсутствует какой-либо внешний синхросигнал. Принципиальным требованием при организации современных синхросетей, как уже было отмечено выше, является их радиально-узловая топологическая структура и иерархический принцип подведения синхросигнала.

Значительное время молчаливо действовало предположение о безусловной высокой точности подводимого синхросигнала, если последний является высокочастотным [77] (с частотой, близкой к частоте сигнала данных) и для его передачи использован отдельный канал. Возможные нестабильности и нарушения в системе синхронизации связывали с работой системы ФАП или входными цепями приёмника, [79]. Согласно монографии [79], задержка в считывании такта, что является, возможно, основным искажающим синхросигнал фактором, может быть обусловлена низкой инерционностью фотодетектора и цепей усилителя, а также задержкой решения из-за влияния шума. Сегодня при построении современных средств телекоммуникаций применяются быстродействующие полупроводниковые приборы с низкой инерционностью и низким уровнем шума, а значительный вклад как в задержку такта, так и в изменение его длительности на определённом ГСЭ вносит, прежде всего, сам способ подведения синхросигнала к этому ГСЭ. И, как показано в предыдущем разделе и Приложениях **Е** и **Ф**, неточность синхронизации возрастает с увеличением номера ГСЭ в цепочке, и в меньшей мере зависит от типов используемых ФАП и фотодетектора. С другой стороны, отработка электронных схем сетевых устройств привела к их высокой эффективности, что имеет место в настоящее время.

Отсутствие рассмотрения ЧС в научных монографиях, по-видимому, связано как с низкими битовыми скоростями, так и небольшой сложностью телекоммуникационных систем, что было справедливо некоторое время спустя. Тогда тезис о достаточной стабильности внутренних генераторов [77] совместно с установленной цикловой синхронизацией в значительной мере оправдывал себя. Более того, предлагались решения о выделении синхронинформации непосредственно из модулированного сигнала данных. Согласно [77], это должно было сэкономить не только канал (задействованный под синхросигнал), но и, возможно, обеспечить меньшие затраты мощности при обеспечении синхронизации – так как мощность в канале одновременно использовалась как для передачи информации, так и синхронизации. Там

же приведены схемы систем ФАП, фильтрующих сигнал данных. Значительное внимание в [77] уделено вопросам выбора формы синхроимпульса для случая отдельного канала с целью минимизации ошибки ФАП, а также проведена оценка оптимальной частоты синхросигнала  $f^{\text{syn}}$  по отношению к рассматриваемому сигналу данных частоты  $f^{\text{sig}}$ .

Таким образом, ряд положений, полученных при математическом моделировании процессов установления синхронизма в работе цифровых устройств, к настоящему моменту потерял свою актуальность. Тем не менее такой подход, как цикловая синхронизация, является достаточно ценным и для современных цифровых сетей. В отношении данного метода в [77] проведено математическое моделирование работы приёмника, синхронизируемого посредством заимствованных или добавочных символов, передаваемых совместно с сигналами данных.

Задача решается в два этапа: сначала проверяются гипотезы о соответствии принятого случайного процесса переданным меткам синхронизации, в случае положительного результата – отслеживаются найденные метки с заданной точностью посредством ФАП. Поиск меток проводится среди фиксированного объёма выборки. Автором [77] получены математические выражения для максимума апостериорной информации для произвольного алфавита источника и синхронизатора (устройства, вырабатывающего метки). Проведена оптимизация времени задержки решения для различных типов решающих устройств. Предложены различные варианты синхронизирующих последовательностей (кодовых комбинаций), наиболее существенно отличающихся от сигнала данных в зависимости от типа канала и приёмного решающего устройства. Математическая модель построена для приёмника, ориентированного для систем электрической связи, где используется трёхуровневый алфавит (-1, 0 и 1).

Ввиду высокой значимости цикловой синхронизации при обеспечении синхронности работы цифровых устройств, ниже представлены основные технические аспекты данного метода в современном видении.

Чтобы опознать индивидуальные временные интервалы в пределах цикла временного группообразования, в приемном устройстве используется счетчик, синхронизированный с форматом цикла передающего устройства. Точно так же, как и для синхронизации по тактовым частотам, для установления и поддержания циклового синхронизма требуется определенная избыточность. Под избыточностью в отношении ЧС прежде всего понимается отдельный канал. Согласно [72], основными способами установления циклового синхронизма являются следующие:

- 1) ЧС при помощи добавочного символа;
- 2) ЧС при помощи заимствованного символа;
- 3) ЧС при помощи добавочного канала;
- 4) статистическая ЧС;
- 5) ЧС при помощи запрещенных в линии комбинаций.

Заметим, что цикловая синхронизация в отличие от ЧС – это цифровой способ передачи синхронинформации.

При выборе метода цикловой синхронизации основными соображениями являются: время, требуемое для установления циклового синхронизма, воздействие ошибок в канале на поддержание циклового синхронизма, соотношения между тактовой частотой в линии и получаемой из нее частотой дискретизации [72], требуемая избыточность и сложность схем циклового синхронизатора. Серьезность последствий потери циклового синхронизма и время, требуемое для его восстановления, зависят от характера передаваемых сообщений. Поскольку потеря ЦС означает потерю информации во всех уплотнённых каналах при группообразовании, среднее время между выходами из циклового синхронизма должно быть как можно больше. При передаче речи допустимы редкие выходы из ЦС, если синхронизм восстанавливается достаточно быстро для того, чтобы минимизировать длительность сигнала помехи в выходном речевом сигнале. Длительное отсутствие ЦС в телефонной сети приводит к потере управляющих сигналов внутриканальной сигнализации, что может быть интерпретировано как разъединение.

Для передачи данных длительность времени восстановления не столь критична, как частота появления этого события, поскольку в большинстве протоколов передачи данных процедуры восстановления исходного состояния и повторной передачи сообщения осуществляются независимо от того, сколько данных потеряно. Последствия будут проявляться в виде снижения итоговой скорости доведения информации до абонента. Кроме этого, потеря ЦС может приводить к включению аварийной сигнализации, которая, в свою очередь, вызывает автоматическое переключение на резервную систему [71].

Условия выхода из циклового синхронизма возникают в двух случаях. Во-первых, когда задающий генератор приемного устройства теряет синхронизм с тактовой частотой в линии, например, из-за неуправляемого проскальзывания в импульсной последовательности на счётчике. Во-вторых, выходы из ЦС могут появляться в результате ошибок в канале, создающих ложные признаки данного события. Поэтому для минимизации вероятности ошибочных поисков ЦС требуется значительная избыточность в подаваемой синхронинформации. Фиксация потери циклового синхронизма происходит в случае, когда искажения синхросигнала (количество фактов отклонения параметров от регламентируемых значений) превышает некоторый порог за период наблюдения. Во всех способах ЦС (кроме статистического), рассмотренных далее, в информационный поток вводятся специальные биты или кодовые комбинации. Эти сигналы не обязательно должны передаваться в каждом цикле. Уменьшение их плотности позволяет снижать также и требуемую избыточность, что важно для систем с битовым группообразованием, т.е. систем PDH, но повышает вероятность потери ЦС.

*Цикловая синхронизация с помощью добавочного символа.* В этом способе производится введение дополнительного бита (тактового интервала, содержащего метку циклового синхросигнала) в информационный цикл с распознаванием его на приёмной стороне. Значение такого бита, как правило, изменяется от цикла к циклу. Тем самым приёмник считывает чередующуюся последовательность вида 1010..., которая получится, если из каждого цикла гипотетически изъять метку синхросигнала. Ожидаемое время вхождения в ЦС начиная со случайной точки определяется по следующему правилу [72]:

$$\begin{array}{l} \text{Время} \\ \text{вхождения} \\ \text{в ЦС} \\ (t_{in,CCR}) \end{array} = \begin{array}{l} \text{Среднее число} \\ \text{битов, проверенных} \\ \text{прежде, чем был ус-} \\ \text{тановлен ЦС} \end{array} \times \begin{array}{l} \text{Среднее число битов,} \\ \text{необходимых для опре-} \\ \text{деления того, что дан-} \\ \text{ная позиция не является} \\ \text{позицией циклового} \\ \text{синхросигнала} \end{array}$$

Так, при наихудшем стечении обстоятельств справедливо следующее соотношение:

$$t_{in,CCR} = \frac{N_{CR}}{2} \cdot 2N_{CR} = N_{CR}^2 \text{ [тактовых интервалов]}, \quad (2.5)$$

где  $N_{CR}$  – количество битов в цикле, включая бит ЦС.

Для сигнала E1, имеющего 193 бита в цикле [71], время установления ЦС составляет 37249 тактовых интервалов, или 24,125 мс. Существует так называемое *среднемаксимальное время установления ЦС*. Это среднее время, требуемое для установления циклового синхронизма в предположении, что необходимо подвергнуть распознаванию все биты, прежде чем будет найден бит циклового синхросигнала. Очевидно, что среднемаксимальное время вдвое больше среднего значения времени установления ЦС при случайной начальной точке, определяемого выражением (2.5). Величину  $t_{in,CCR}$  можно уменьшить с помощью применения более сложных методов поиска, например, представленных в [77]. В одном из таких методов в каждый момент времени изучается принимаемый бит, но поиск начинается на несколько тактовых интервалов раньше позиции, где должен находиться цикловый синхросигнал. Метод эффективен в случае, когда кратковременное снижение точности частотной синхронизации вызывает небольшой сдвиг в работе счетчика. В другом методе используется параллельный поиск путем одновременной проверки всех позиций битов на наличие циклового синхросигнала. При такой процедуре поиска синхронизм устанавливается после того, как на последней из  $N_{CR} - 1$  позиции информационных битов будет окончательно определено, что там нет циклового синхросигнала [72]. Вероятность события  $P_{отс,ЦС}$ , при котором ни на одной позиции информационных битов не будет обнаружен цикловый синхросигнал за  $n^*$  или меньшее число циклов, выглядит следующим образом:

$$P_{\text{отс, ЦС}} (\text{число циклов} < n^*) = \left[ 1 - \left( \frac{1}{2} \right)^{n^*} \right]^{N_{\text{CR}} - 1}. \quad (2.6)$$

Положив значение  $P_{\text{отс, ЦС}} = 1/2$ , [77], можно определить среднее количество циклов для установления ЦС:

$$n^* = -\log_2 \left[ 1 - \left( \frac{1}{2} \right)^{N_{\text{CR}} - 1} \right]. \quad (2.7)$$

Подставив  $N_{\text{CR}} = 193$ , получаем в результате  $n^* = 8,1$  циклов, или примерно 1 мс.

Существуют стратегии, когда производится непрерывная проверка всех позиций битов, даже когда система находится в синхронизме. В этом случае, если будет обнаружена потеря ЦС, произойдет немедленное его установление.

*Цикловая синхронизация с помощью заимствованных символов.* Введение дополнительного символа в передаваемый цифровой сигнал приводит к возрастанию битовой скорости в линии, что является неэкономичным. Кроме этого, вводимые символы циклового синхросигнала могут вызвать аperiodичность моментов дискретизации сигнала при передаче или на приеме [72]. Цикловая синхронизация с помощью заимствованных символов представляет такой метод, когда без изменения скорости передачи информационные биты периодически заменяются битами, несущими заданную последовательность циклового синхросигнала. Такой метод аналогичен так называемым методам информационного доуплотнения в канале путём частичного замещения спектра одного сигнала другим с допустимым уровнем ошибок или искажений [81]. Если частота замен не связана непосредственно с частотой повторения информационных циклов, то эти замены могут быть распределены по всем каналам. Очевидно, что такой метод может применяться не всегда. Ограничения в применении будут аналогичными представленным в [81].

*Цикловая синхронизация с помощью добавочного канала* в основном идентична предыдущему методу за исключением того, что здесь символы циклового синхросигнала добавляются такой группой, что образуется добавочный TDM-канал. В результате этого скорость передачи в индивидуальных каналах и скорость передачи агрегатного потока находятся в целочисленном соотношении. Такое соотношение позволяет избежать появления аperiodичности, которая возникает при добавлении одиночного символа. Время установления ЦС в этом случае будет определяться следующим количеством тактовых интервалов [72]:

$$n_{CR} = \frac{N_{CR}^2}{2 \cdot (2^{L_{CR}} - 1)}, \quad (2.8)$$

$L_{CR}$  - длина комбинации циклового синхросигнала. Выражение (2.8) справедливо при равновероятном появлении единиц и нулей.

*Статистическая цикловая синхронизация.* Известно [82], что отдельные биты ИКМ-последовательности не являются полностью случайными, а проявляют определенные статистические свойства в зависимости от сочетаний битов во всей кодовой комбинации. Следовательно, цикловый синхронизм индивидуальных кодовых комбинаций может быть установлен путем наблюдения за статистическими свойствами считываемых разрядов. Очевидное преимущество статистической цикловой синхронизации состоит в возможности избежать появления аperiodических последовательностей без вынужденного ухудшения качества информационных каналов. Но тот факт, что при статистической синхронизации не выявляются отдельные каналы и имеется зависимость характеристик синхронизации от передаваемых сообщений, не позволяет ее использовать в большинстве приложений.

*Цикловая синхронизация с помощью запрещенных в линии комбинаций.* Для установления ЦС без привлечения какого-либо добавочного бита(ов) может быть использована комбинация, обозначающая например, границу цикла [71], которая запрещена для передачи информационного сигнала и по этой причине относительно несложно распознается. Но, как показано в [72], данный способ является эффективным для многоуровневого алфавита, в частности, для биполярного сигнала, где имеются дополнительные сигнальные уровни, что не приемлемо для ВОСП. К другому недостатку можно отнести также наличие вероятности двусмысленного считывания такой комбинации при возникновении битовой ошибки в ней. Основным достоинством способа, по мнению автора [72], является тем не менее низкая вероятность формирования ложной потери ЦС.

Таким образом, известные аналитические подходы к изучению синхросистем оставляют практически без рассмотрения процесс доведения синхροинформации до абонентских коммутационных станций, который при построении современных телекоммуникационных систем является весьма важным. Построение математических моделей в системах ЧС, учитывающих различные возмущающие воздействия, технические особенности оборудования, и другие конкретные условия эксплуатации, обеспечит возможность оптимизации и масштабирования синхросетей при минимизации использования дорогостоящих специализированных устройств и итераций настройки. Препятствием на пути аналитического подхода, основанного на математическом, физическом и натурном моделировании, является сложность теоретического анализа реально происхо-

дящих на цифровой сети процессов. Тем не менее даже небольшое развитие данного направления представляет значительную научную и практическую ценность. В этой связи последующие разделы настоящей монографии посвящены математическому моделированию процесса приёма реального частотного синхросигнала (в том числе передаваемого по потоку E1 в SDH-системе). Известно [3, 4], что такой способ организации синхросети не рекомендован к использованию. Тем не менее он, во-первых, по-прежнему является весьма употребимым в России, во-вторых, в ряде случаев (например, при организации ведомственных сетей) может оказаться весьма приемлемым прежде всего по критерию «качество-цена».

### **Резюме**

Сегодня для систем передач характерны значительная пространственная распределённость, многофункциональное строение и высокое быстродействие. Кроме того, в основу их действия заложен принцип одновременности переключения в приёмнике и передатчике. В этой связи задача обеспечения синхронности работы составляющих ВОСП устройств является одной из основополагающих, и системы синхронизации приобретают всё более весомую роль в обеспечении работоспособности цифровых систем передач. В частности, структурированные сигнальные единицы ОКС № 7 подсистем, ориентированных на работу в режиме реального времени, могут подвергаться искажениям в случае нарушений в системе синхронизации.

Анализ технических принципов, на которых базируются системы синхронизации, показал, что их правомерно разделить на фазовую синхронизацию, частотную и временную. Значительное внимание при аналитическом подходе, основанном на математическом моделировании, в литературе уделено ФС-системам. По-видимому, это связано с тем, что некоторое время назад именно устройства ФС являлись основным из источников нестабильности синхросигнала. Среди аналитических подходов к задаче ВС в настоящее время имеет практическую ценность метод синхронизации цифровых последовательностей по проверке гипотезы о соответствии принятого случайного процесса переданным меткам синхронизации, получивший название метода цикловой синхронизации. Выбор метода ЦС из ряда широко употребляемых зависит от технических особенностей как системы передачи, так и оборудования.

Аналитический подход к вопросам обеспечения устройств связи частотной синхронизацией, т.е. информацией об эталонной частоте (или частоте ведущего генератора) при иерархическом способе построения синхросетей, в литературе практически не представлен. Учитывая, что ЧС является наиболее важной на современном этапе развития систем телекоммуника-

ций, построение математических и физических моделей процессов передачи синхросигнала является актуальной задачей.

Анализ работоспособности систем телекоммуникаций, проведённый на основе результатов их настройки и эксплуатации показал, что к наиболее серьёзным и негативным последствиям приводят такие искажения в ЧС, как изменение длительности такта (в импульсном синхросигнале, передаваемом например, по потоку E1, 2,048 Мбит/с), или изменение частоты гармонического синхросигнала. Результатом таких искажений является различие скоростей записи и считывания информации в сетевых устройствах, что ведёт к проскальзываниям и в конечном итоге - к потере информации или замедлению скорости её доведения до абонента (что является результатом повторных посылок сообщений под управлением протоколов ОКС № 7). Для снижения последствий неточной ЧС применяются устройства эластичной памяти, снижающие частоту неуправляемых проскальзываний, а также дающих возможность в определённой мере управлять этим явлением.

Для улучшения качества работы систем телекоммуникаций и обеспечения эффективности их дальнейшего прогресса необходимо улучшать точность синхросигнала (прежде всего в частотной синхросистеме). Реально улучшить точность синхросигнала на конкретном сетевом элементе можно как улучшением точности подводимого синхросигнала, так и уменьшением количества транзитных узлов, расположенных на пути последнего. Одним из вариантов может служить рекомендация к применению концепции BITS, которая предполагает как наличие специализированных устройств, снижающих дрейф частоты, так и подведение синхросигнала независимо от каналов данных, в частности, не прибегая к уплотнению синхроканала в SDH-модуль.

Тем не менее сегодня в России остаётся широко употребляемым вариант передачи импульсного синхросигнала по потоку E1 с уплотнением его в STM-N модуль ввиду дороговизны задействования отдельного канала под синхросигнал. Метод выделения синхрочастоты из STM-N модуля оказывается адекватным не во всех случаях, так как требует входного сигнала со статусом PRS.