

ГЛАВА 2

Принципы организации, архитектура волоконно-оптических систем передач и подсистемы синхронизации

В предыдущей главе показано, что на современном этапе развития средств связи ВОСП являются наукоёмкой отраслью техники, оптимизация и модернизация которой становится невозможной без применения аналитических методик, физического и математического моделирования. Но получить практически ценный результат можно только при использовании, с одной стороны, адекватных моделей, с другой стороны, опираясь на сложившиеся к настоящему времени основные принципы построения систем оптоволоконных телекоммуникаций, причём от выбора базового типа которых, например, от вида архитектуры и т.д., во многом будут определяться последующее обеспечение оборудованием, подбор методов резервирования и подведения служебных сигналов, расчёт параметров сети и в конечном итоге – работоспособность системы передачи.

Настоящая глава посвящена рассмотрению общих технических аспектов построения современных ВОСП. Ввиду высокой значимости систем синхронизации и одновременно их достаточной сложности большое внимание уделено существующим сегодня принципам подведения синхросигнала. Обобщены известные аналитические методики моделирования процессов, имеющих место в синхросетях (СС), а также типичные недостатки при их организации. Так как применение систем передачи на базе синхронной цифровой иерархии сегодня является практически повсеместным, значительная часть материала посвящена SDH-методам группообразования, передачи синхросигнала, а также предложена к рассмотрению статистическая математическая модель процесса передачи синхросигнала по потоку E1 в SDH-системе, позволяющая прогнозировать ошибку считывания синхросинформации.

2.1. Принципы построения современных ВОСП

Процесс развития телекоммуникационных систем показывает, что наиболее сложным и дорогостоящим звеном в задаче обеспечения надёжной связи являются такие средства передачи сигналов, как магистральные линии и устройства «последней мили». В результате сегодня под системой телекоммуникаций понимают совокупность оконечных и уплотняющих устройств, линий связи, узлов коммутации, маршрутизаторов и подобные типы оборудования, рис. 2.1. Так как, во-первых, линии связи традиционно явля-

ются дорогостоящими сооружениями, во-вторых, физические каналы в ВОСП обладают огромной полосой пропускания, то низкоскоростные сигналы абонентов (телефонные, телевизионные потоки, файловые данные и т.д.) уплотняются с получением группового линейного сигнала, который затем передаётся по магистральной линии. Объединение каналов производится с использованием технологий временного TDM-уплотнения за счёт увеличения битовой скорости и активно развивающегося оптического волнового WDM-мультиплексирования – на основе объединения различных длин волн [1] в одном волокне. К TDM-технологиям, используемым в России при построении крупных ведомственных и магистральных сетей, можно отнести следующие сети:

1. Синхронную (и плезиохронную) цифровую иерархию [1, 17];
2. Универсальный сетевой стандарт высокой пропускной способности с режимом асинхронного доступа (АТМ), [3, 4].
3. Сеть со стохастическим характером доступа к среде 1/10 Gigabit Ethernet, [1, 3, 4].

Такие системы передачи, как АТМ и Ethernet, ещё недостаточно «проникли» в Россию прежде всего по причине их незавершённости, неполной отработанности: значительной громоздкости и дороговизны для АТМ и отсутствия механизма, обеспечивающего требуемый уровень качества обслуживания для Ethernet [19], хотя не исключено, что АТМ-системы в недалёком будущем могут стать основополагающей технологией временного уплотнения [1, 4] по причине используемого принципа коммутации пакетов, а не каналов. Основным недостатком иерархической структуры сети, показанной на рис. 2.1, состоит в том, что между любой парой коммутационных станций существует всего один путь. Поэтому древовидные сети оказываются весьма чувствительными к повреждениям и коммутационного оборудования, и линий связи. На определённом этапе развития средств связи путь устранения этого недостатка лежал в организации *линий высокого использования* [25], дополняющих первичную сеть множеством соединений, и применяющихся в качестве путей первого выбора при установлении прямых соединений между коммутационными станциями с большим объемом межстанционной нагрузки. Согласно [25], под линией высокого использования понимается канал связи, предназначенный для работы с высокими битовыми скоростями.

Но как с расширением набора базовых сетевых архитектур, так и появлением технологий коммутации информационных пакетов, на которые разделяется сообщение пользователя и передаётся в зависимости от ситуации по различным физическим путям, удалось повысить надёжность систем телекоммуникаций.

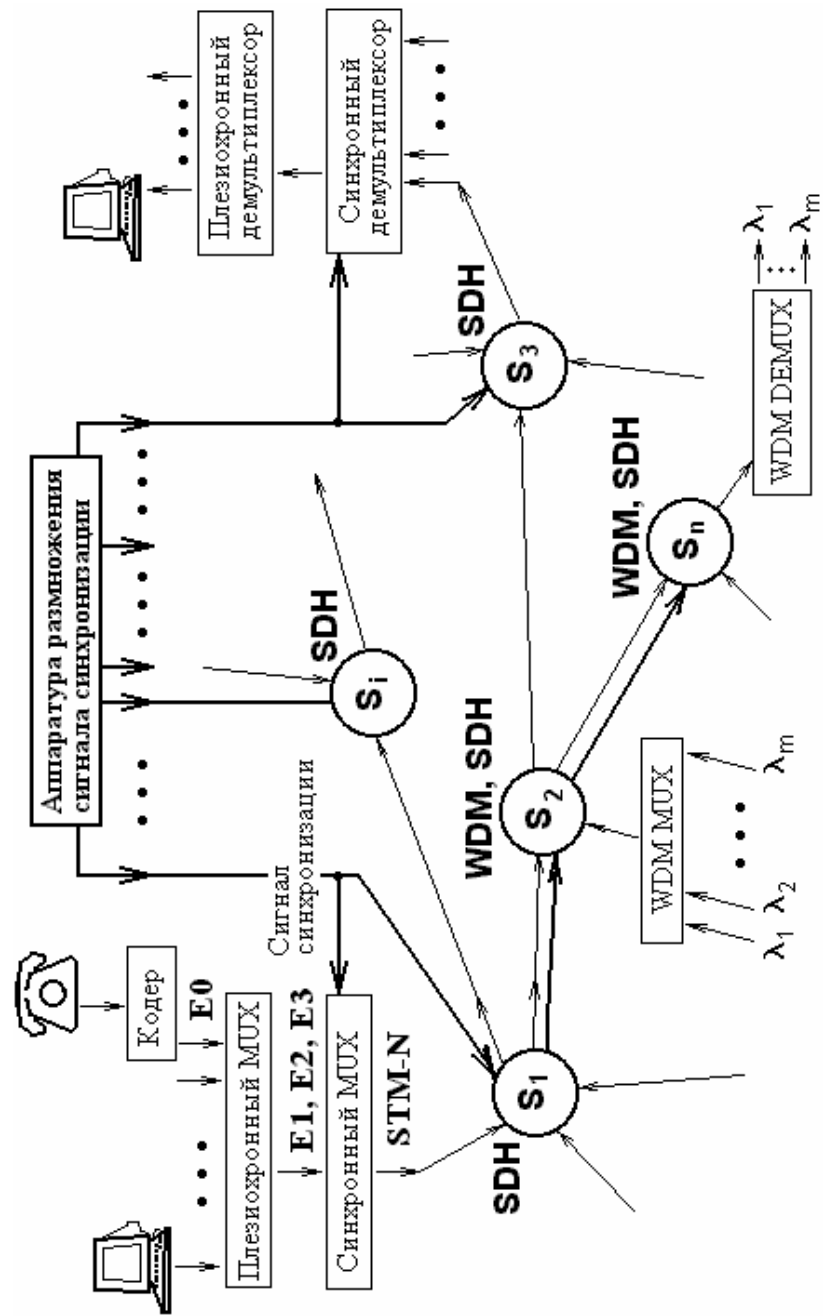


Рис. 2.1. Сеть передачи данных

Тем не менее сегодня практически повсеместно российские предприятия ТЭК используют технологии плездохронной (PDH) и синхронной (SDH) цифровых иерархий для решения задачи временного уплотнения информационных каналов. Как будет видно из дальнейшего, SDH в определённой степени допускает пакетную коммутацию путём обмена виртуальными контейнерами [17], что также способствует значительной её распространённости.

Оптическое мультиплексирование с разделением по длинам волн, или WDM-технологии, является весьма перспективным особенно с переходом к полностью оптическим системам передачи. Разработанные в конце прошлого столетия [1] WDM-сети только начинают осваиваться российскими операторами. Причинами медленного их внедрения являются высокая сложность и дороговизна. Тем не менее исследования в области WDM-технологий являются необходимым заданием на перспективу, который приведёт к реальной экономической выгоде на момент исчерпания возможностей TDM-технологии и последующего дефицита информационных каналов.

Широкое распространение, как уже упоминалось, синхронных систем передач при организации ведомственных и корпоративных сетей связано с их высокой информационной ёмкостью, гибкостью ввода (вывода) информационных потоков, способностью переносить сигналы PDH, ATM, большинства локальных сетей, таких как FDDI, и т.д., и обеспечением значительных служебных возможностей. Технология SDH – очередной этап эволюции цифровых сетей, использующих уплотнение каналов: с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ) и PDH-систем. Логическая структура SDH – это система правил, по которым производится уплотнение каналов. Если в ИКМ и PDH уплотнение производилось посредством чередования битов (байтов, циклов) и изъять уплотнённую информационную единицу не представлялось возможным без полной разборки группового потока, то в SDH каждая уплотняемая единица «оборачивается» виртуальной оболочкой, или, по-другому говоря, – погружается в виртуальный контейнер.

Так как SDH – одна из самых применяемых сегодня цифровых телекоммуникационных технологий, далее представлено краткое описание основных принципов её построения.

Согласно определению рек. G.707, SDH – это иерархический набор цифровых транспортных сигналов, предназначенных для передачи информационной нагрузки по физическим сетям. Основными структурными сигналами являются синхронные транспортные модули STM-N и виртуальные контейнеры VC верхнего (в) и нижнего (н) рангов [17]. STM-N определяет формат линейных сигналов на интерфейсах сетевых узлов. Числа $N = 1, 4, 16$ или 64 – уровни SDH, определяют скорости передачи умножением на N скорости первого уровня 155520 кбит/с. Модули STM-N всех уровней построены аналогично: $1/30$ часть цикла STM-N занимает служебный заголовок (статус синхронизации, служебная связь, контроль и управление, резервирование линейных трактов и др.). Остальное отдается под нагрузку. Линейные тракты SDH создаются на одномодовых оптоволоконных кабелях или радиолиниях.

Нагрузка, как правило, не является абсолютно синхронной с сетью SDH, поэтому она предварительно “размещается” в контейнерах С(н) или (в) - согласуются скорости передачи посредством использования *балластных битов* и *цифрового выравнивания* [17, 18]. После добавления заголовка (каналы контроля, управления, служебной связи и пр.) получаются виртуальные контейнеры VC-н нижнего ранга. В результате операций мультиплексирования и выравнивания виртуальных объектов VC-н получают виртуальные контейнеры верхнего ранга VC-в, образующие сетевые слои трактов SDH (рис. F.1, Приложение F).

Наиболее распространенный вид аппаратуры SDH – синхронный мультиплексор, выполняющий функции мультиплексирования, оперативного переключения, резервирования и ввода/вывода цифровых потоков. Контроль этих функций и управление ими осуществляются из центра управления сети по встроенным в заголовки STM-Н и VC-в каналам. Для удобства построения аппаратуры и обеспечения наиболее полного использования аппаратных ресурсов (равномерная загруженность всех узлов) существует несколько стандартных типов мультиплексоров [17]: I, II, III IV и кросс-коммутаторов I, II и III типов. В зависимости от топологии сети применяется тот или иной вариант исполнения мультиплексора. Наиболее простым примером является сегмент, связывающий два сетевых узла, рис. 2.2 а, что может быть реализовано на базе двух терминальных мультиплексоров (ТМ).



Рис. 2.2 а. Топология «точка-точка»

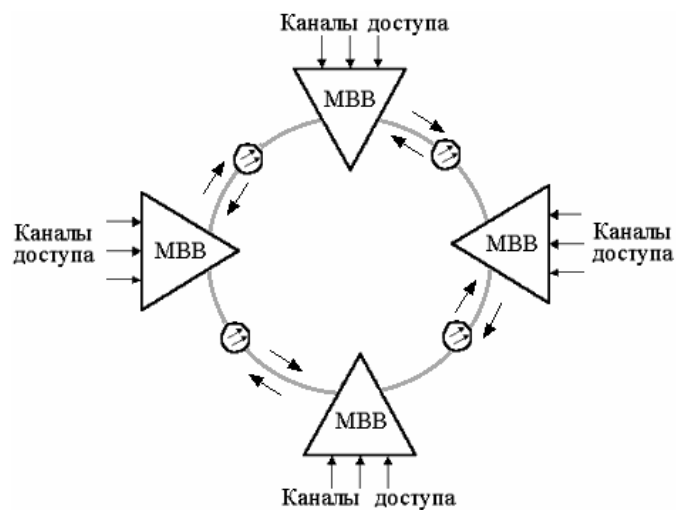


Рис. 2.2 б. Топология «кольцо»

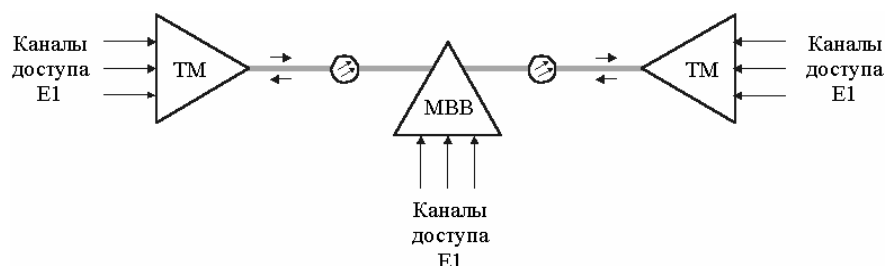


Рис. 2.2 в. Топология «последовательная линейная цепь»

Применение терминального мультиплексора I типа обосновано для решения задачи объединения плезихронных каналов доступа, как правило, E1 – тип ТМ.1.1. При использовании мультиплексоров II типа данная топология может быть составной частью радиально-кольцевой схемы (при переходе к более высокому уровню), рис. 2.2 б. В этом случае в качестве каналов доступа выступают обычно каналы STM с меньшей битовой скоростью по отношению к передаваемому в кольце синхронному модулю. Кроме того, на протяженных линейных трактах в цепь может быть включен регенератор, обеспечивающий восстановление сигнала, если нет возможности использовать оптический усилитель или требуется качественное восстановление формы импульсов. В качестве регенераторов используются мультиплексоры IV типа. Наряду с топологией «точка-точка» существуют и другие базовые топологии – звездообразная и древообразная (с иерархией центров), последовательная линейная цепь, рис. 2.2 в, и другие. Из такого базового набора обычно и реализуется сеть.

Топология «последовательная линейная цепь» используется при реализации ответвлений в ряде точек линии, где требуется обеспечить ввод/вывод каналов доступа. Она организуется на базе как терминальных мультиплексоров на обоих окончаниях линии, так и мультиплексоров ввода-вывода в точках ответвлений. Для линейных трактов, построенных на базе STM-1, в качестве ТМ выбираются мультиплексоры типа I.1, а МВВ – мультиплексоры типа III.1 либо кроссовые коммутаторы типа II [17]. Соединение «кольцо», рис. 2.2 б, удобно также и для обеспечения резервирования и при построении локальных ведомственных сетей.

Обобщенная функциональная блок-схема синхронного мультиплексора (обеспечивающего функции ТМ) представлена на рис. 2.3 для случая, когда в качестве компонентных сигналов используются сигналы E1 (2,048 Мбит/с), параметры которых соответствуют [41]. Данный мультиплексор объединяет 63 PDH-канала в синхронный модуль STM-1. Как МВВ, так и терминальные мультиплексоры, обеспечивающие объединение (ввод/вывод, переключение, перегруппирование, перенаправление и пр.) сигналов с более высокой битовой скоростью по отношению к E1, обладают, как правило, менее сложной конфигурацией [17]. Последнее связано как с меньшим количеством «шагов», в том числе выполняющих мультиплексирование, так и с бо-

лее высокой логической организацией сигнала. На рисунке номерами ①...⑤ показаны основные функциональные узлы, на которые можно условно разделить мультиплексор ТМ.1.1. Для удобства пуско-наладочных, ремонтных работ и эксплуатации схема любого из типов мультиплексоров, выполняющих функцию объединения низкоскоростных сигналов (сигналов, для которых создаются виртуальные контейнеры нижнего ранга, рис. F.1), как правило, разделена на три составляющие. На рис. 2.3 эти составляющие обозначены через {1}, {2} и {3}. Причём схема {2} (или {3}) до устройства соединения трактов высшего порядка НРС в общем случае может не соответствовать схеме {1} – в случае несоответствия входных сигналов в этих группах. Стандартная схема мультиплексора предполагает наличие эталонных точек управления: *S* – аварийная точка, *T* – точка хронирования, *Y* – точка состояния синхронизации (характеризует качество), *R* – эталонная точка регенерационной секции канала передачи данных, *U* – точка доступа к заголовку, *P* – эталонная точка секции группообразования канала передачи.

Следовательно, такие технические возможности SDH, как значительная управляемость, гибкость и высокая битовая скорость, делают эту технологию перспективной для многих сетевых операторов. Однако полноценная реализация преимуществ SDH требует улучшения ряда параметров линейного тракта по отношению к тому, на котором успешно строились PDH и ранние ИКМ-системы. В первую очередь – это повышение точности синхросигнала.

Успешная передача цифровых сигналов практически невозможна без обеспечения 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, очевидно, привёл и к резкому увеличению требований к синхросигналу. Также очевидно, что при дальнейшем повышении битовых скоростей, представляющем интерес для перспективных ВОСП и AON-сетей, не содержащих в своём составе электронных компонентов и тем самым дающих возможность сделать следующий качественный скачок по быстродействию, значимость синхронизации ещё более возрастёт. Выход на новые рубежи по скоростям переключения потребует, возможно, пересмотра технических принципов обеспечения синхросигналом [55]. В этой связи уже сегодня в системе управления тактовой сетевой синхронизацией (ТСС) России обозначен ряд перспективных направлений [17]:

- 1). Выявление новых эффективных способов получения сигналов синхронизации.
- 2). Поиск альтернатив замены существующей традиционной синхросети другими вариантами доставки эталонных сигналов времени и частоты до сетевых элементов.
- 3). Расширение возможностей управления качеством формирования и передачи синхросигналов обработкой неисправностей.

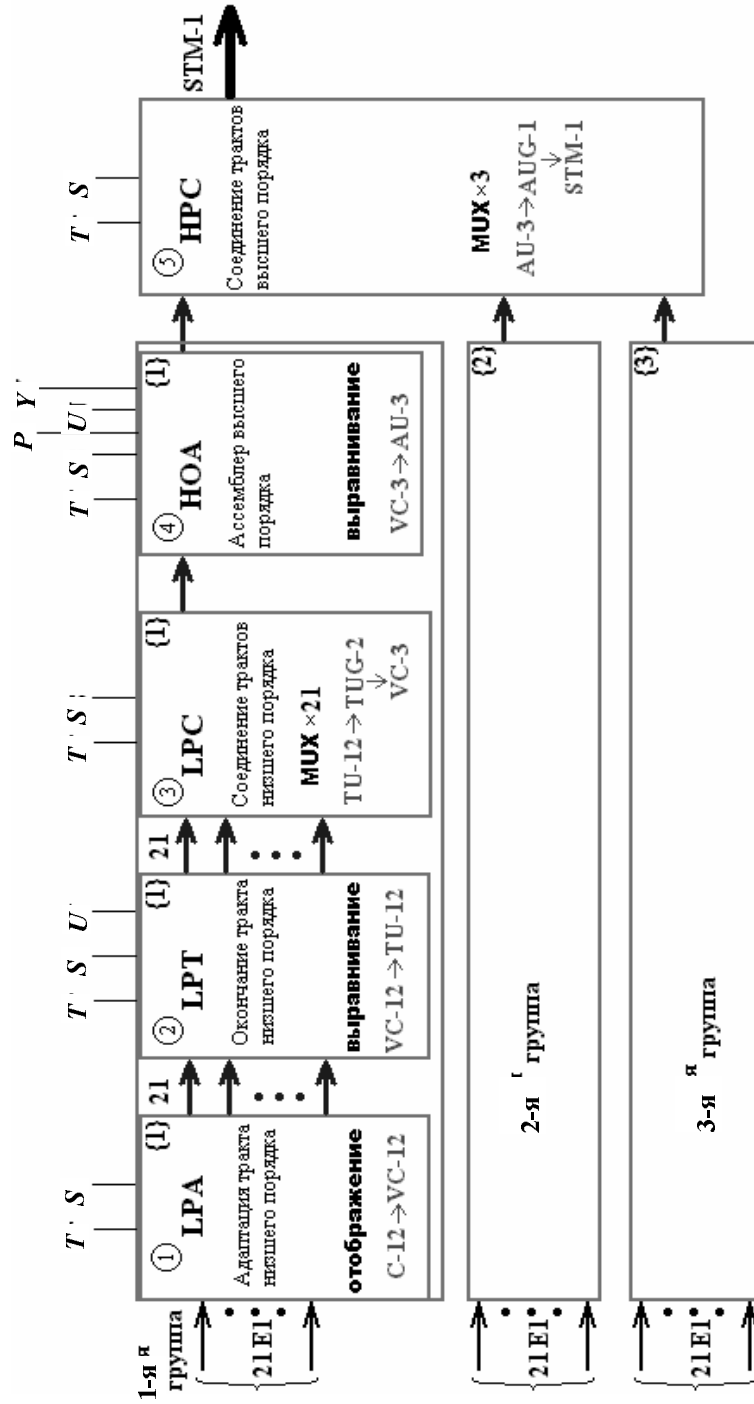


Рис. 2.3. Блок-схема синхронного мультиплексора, объединяющего 63 потока E1 в модуль STM-1

- 4). Построение автоматизированных систем управления передачей синхросигналов. Автоматизированное выявление любой возможности образования замкнутых петель.
- 5). Оптимизация размещения первичных и вторичных генераторов, резервирования синхросетей, выбор их конфигурации и эффективная оценка качества синхросигналов на различных участках сети. Минимизация количества ПЭГ и ВЗГ.
- 6). Автоматизация функций взаимодействия региональных сетей синхронизации и ТСС.
- 7). Развитие метрологического обеспечения систем синхронизации, методов эффективного распознавания состояния сети.

Современные требования к точности синхросигнала для SDH-систем составляют величину порядка $10^{-9} \dots 10^{-10}$ [29]. Нарушение рекомендации по каким-либо причинам неизбежно приводит к падению надёжности сети и ухудшению качества передачи. В [21, 22] обобщены примеры из реальной практики настройки и эксплуатации SDH-объектов уровня STM-1 на предприятиях ТЭК Республики Башкортостан, когда ухудшение точности синхросигнала приводило к заметному снижению скорости доведения информации до абонента (почти в два раза) или к обрыву соединения при модемной связи. Анализ состояния сети показал, что качество синхронизации определяется как способом передачи синхросигнала по сети, наличием его уплотнения, количеством ГСЭ в цепочке, типом используемой аппаратуры, так и возможными возмущениями и внешними воздействиями, в том числе как результат последних – нелинейными оптическими эффектами [56, 57]. Отсутствие стандартизованных методик по планированию структуры сети синхронизации в зависимости от конкретных условий эксплуатации, оценка её надёжности, качества (статуса) ведущего синхросигнала и подключаемого оборудования в ряде случаев привели к необходимости использования неоправданно дорогостоящих решений.

2.2. Системы синхронизации для волоконно-оптических систем передач

Согласно изложенному выше, одним из значимых факторов, определяющих работоспособность телекоммуникаций, является надёжная и качественная система синхронизации. Это такая техническая система, которая обеспечивает условие одновременности переключения в приёмнике и передатчике для всех пространственно распределённых сетевых элементов ВОСП. Безусловно, требование к синхронности работы тех или иных устройств 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 сто-

роны, 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 [55] - для минимизации фазовых дрожаний и возможных несоответствий приходящих 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 играет 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 система 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. Настоящий параграф посвящён обобщению известного практического технического материала по системам синхронизации.

ции SDH-систем, следующий параграф – обобщению аналитических подходов к разработке принципов синхронизации цифровых систем передач.

В системах связи существует *три основных понятия синхронизации*: фазовая, частотная и временная (то же самое, что и синхронизация по времени) [4].

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. В литературе уделено значительное внимание схемам ФАП, в частности в [9, 10] и др., в гл. 4 настоящей монографии представлен оригинальный способ коррекции синхросигнала одной из систем ФАП.

Наиболее важным типом синхронизации для системы телекоммуникаций 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) [4]. Одним из способов установления ВС для устройств сети является цикловая синхронизация [9, 25], о которой речь пойдет в следующем параграфе. Применительно к телекоммуникациям 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 [4], 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 Н.

Для достижения частотной синхронизации ГСЭ 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 сбоев 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.

2.2.1. Факторы, снижающие стабильность 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, как правило, передаются 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 синхросинхронизация 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 синхросинхронизации 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 синхросинхронизации 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 синхросинхронизацию, 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 синхросинхронизации.

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). Результирующую нестабильность тактовой частоты называют фазовым дрожанием. В зависимости от частоты фазового дрожания сигнала различают высокочастотное фазовое дрожание - *джиттер* - с частотой выше 10 Гц [15], и низкочастотное фазовое дрожание (иногда называемое дрейфом фазы) - *ван-дер* - 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. Ван-дер представляет для систем синхронизации существенный негативный фактор, который в отличие от джиттера преобразуется различными цепями и устройствами в соответствии с параметром JTF, 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 хронизирующей 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 разделе 4 настоящей главы.

Шум и помехи в электронных устройствах. Здесь одним из уязвимых звеньев является кольцо ФАП, где существует вероятность неправильного принятия хронизирующего сигнала с последующим выходом системы из режима захвата [4, 9, 10]. Тем не менее влияние шумов и помех в электронных устройствах снижает точность ФС, а не ЧС или ВС, и обычно не приводит к появлению ван-дера.

Изменения эффективной длины тракта происходят в результате расширения или сжатия среды передачи [4] или изгиба радиотракта. При удлинении тракта эффективная скорость передачи на входе приемника уменьшается, поскольку все больше и больше битов «накапливается» 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. К наиболее значительным негативным последствиям изменения длины тракта приводят 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, переносящего импульсную последователь-

ность, с последующей генерацией вандера [58]. В этой связи разработка оптических линейных сооружений представляет отдельную наукоёмкую задачу, ряд вопросов которой освещены в гл. 4 настоящей монографии.

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) [4, 9]. В качестве примера отметим, что именно требование повысить плотность хранирующей информации привело к необходимости замены линейного кода АМІ на линейный код HDB3 в системах ИКМ. Рассмотрению вариантов содержательности хранирующей информации посвящён следующий параграф.

Операции, хронлируемые от источника единственной частоты, не нуждаются в высокостабильных генераторах, поскольку все элементы испытывают однотипные изменения хронлирующего 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 приемнику), рис. 1.9 раздела 1.5.

2.2.2. Понятие о проскальзываниях

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 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. Пусть некоторое цифровое устройство генерирует цифровой сигнал с частотой f_1 , и этот сигнал с частотой f_1 записывается в оперативную память эластичного буфера, из которого считывается приемным цифровым устройством с частотой f_2 . Частоты передачи и считывания определяются частотой задающих тактовых генераторов. В случае, если $f_1 > f_2$, то буфер постепенно

переполняется, что приводит к потере информации в размере емкости буфера, возникает положительное проскальзывание. Если же $f_1 < f_2$, то считывающее цифровое устройство рано или поздно начнет считывать информацию с дублированием битов (повторное считывание), что приведет к ошибке – отрицательному проскальзыванию.

В отсутствие эластичного буфера проскальзывания возникают по мере накопления фазового сдвига сигналов передачи и приема. 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 [4, 9]. 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 [17]. Такие проскальзывания называются *неуправляемыми*, они приводят к более значительным искажениям при передаче.

Для минимизации нежелательных явлений, связанных с проскальзываниями, используют эластичные буферы размером в один или несколько циклов. Типовая схема эластичного буфера представлена на рис. 2.4 [4]. 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.

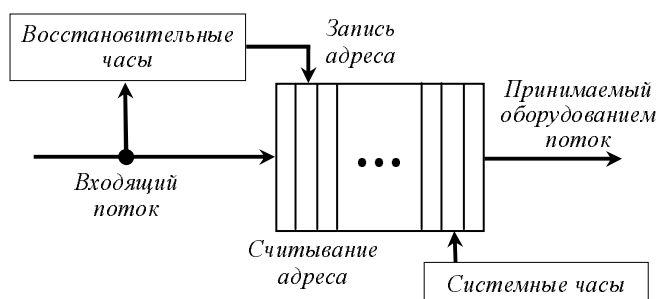


Рис. 2.4. Структурная схема эластичного буфера

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 *NES* или *NMES* (см. раздел 1.2, в НТД – *SES*) 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, [4, 21, 22]. Влияние проскальзываний на различные услуги связи и параметры каналов сети представлены в табл. F.1 [4].

2.2.3. Основные параметры системы синхронизации в SDH

В общем случае система синхронизации включает в себя:

- все цифровые устройства системы телекоммуникаций, которые можно охарактеризовать как генераторы синхросигналов;
- систему путей, по которым передается информация о единой тактовой частоте – сеть синхросигналов;
- сигналы, которые осуществляют передачу информации о тактовой частоте (непосредственно синхросигналы), и сигналы, передающие информацию о статусе синхронизации [17].

Основные параметры источников синхросигналов – это стабильность и точность генерируемой частоты.

Точностью генерируемой частоты называется отношение относительного отклонения частоты (от её номинального значения, см. выражение (1.1) раздела 1.2) к этому номинальному значению [15]. Например, отклонение в 50 пррт означает допустимую точность генерируемой частоты $5 \cdot 10^{-5}$.

Стабильностью согласно [15] 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 долговременную и кратковременную 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 кратковременной стабильностью, если в течение периода, большего t_s , то это долговременная стабильность [4]. Обычно параметры кратковременной стабильности приводятся к одной секунде, а параметры долговременной стабильности - к одним суткам. С этой точки зрения понятие точности (генератора или ведущего синхросигнала) можно связывать с его *кратковременной стабильностью*.

Представленные выше регламентируемые НТД параметры стабильности и точности предназначены для количественного отображения уровня реальной нестабильности и неточности генератора (или ведущего синхросигнала). Так, долговременная нестабильность отражает общую тенденцию в отклонении частоты синхросигнала, тогда как кратковременная нестабильность показывает случайные, фактически флуктуационные изменения частоты в короткие интервалы времени. Поэтому представленные выше параметры правильнее формулировать 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.

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 [4]. При этом генератор должен демонстрировать стабильную работу. Часто для оценки качества генератора используется *коэффициент вариации Аллана* $AVAR$ (Allan Variance), численно равный среднеквадратичному приведенному отклонению частоты:

$$\eta_{AVAR} = \sqrt{\sum_N (\Delta f / f_0)^2} . \quad (2.1)$$

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.

2.2.4. Современная концепция построения систем синхронизации

Выше был определён уровень значимости СС для цифровой связи и отмечалось, что основной движущей силой развития синхросистем является увеличение функциональной сложности и количества цифровых устройств на сетях. Поэтому различные этапы развития концепции синхронизации тесно связаны с накоплением определенной «критической массы» цифровых устройств [4], в результате чего ставились и решались различные технические задачи. На рис. 2.5 представлена диаграмма, характеризующая этапы развития СС для цифровых сетей в России.

Вначале, когда количество цифровых устройств невелико и быстродействие оставалось в рамках системы PDH, т.е. битовая скорость не выходила за пределы ≈ 30 Мбит/с, добиться их синхронной работы можно в частном порядке. Действительно, если имеется одно изолированное кольцо из трех мультиплексоров, оператор сам, не прибегая к каким-либо системным измышлениям или к дополнительному введению в эксплуатацию специальных устройств (например, ВЗГ), легко установит режим синхронизации, прописав «кто от кого» берет синхросигнал.

С ростом количества цифровых устройств на сети и появлением SDH-оборудования решать вопросы синхронизации частным образом становилось все труднее и настал момент, который потребовал системного подхода. С этого момента система синхронизации попала в зону действия системных проектировщиков [4] и стала учитываться как важный компонент сети связи. Решить вопрос «кто от кого» берет синхросигнал на этом этапе стало возможно только системно, анализируя работу всей сети. На этом этапе был сформулирован ряд несложных правил проектирования и расчета СС. Первым приемом при проектировании СС стало использование графов, уже широко применявшихся при проектировании топологии систем связи. Тогда же и было сформулировано первое основное правило при проектировании СС о том, что *граф синхронизации в отличие от графа топологии сети должен быть незамкнутым. Это стало первой элементарной концепцией построения СС.*

Дальнейший рост количества цифровых устройств на сети привел к тому, что графы синхронизации стали усложняться и потребовалось их упорядочение и создание первой настоящей концепции построения СС. Так была принята известная в проектировании *радиально-узловая модель построения СС* [15, 16]. С этого момента СС стали иерархичными, в зависимости от уровня иерархии определялись параметры синхронизации. От простых графов проектирование перешло к построению сложных радиально-узловых

графов. Появилась концепция рассмотрения *системы межузловой синхронизации (СМС)*, внутри узлов вопрос о синхронизации пока решался традиционно, т.е. методом простого графа, обычно по цепи. Схема синхронизации стала довольно разветвленной. Это привело к удлинению цепочек синхронизации, что, в свою очередь, обусловило ухудшение параметров синхросигналов, принимаемых оконечными устройствами. Одновременно на цифровой сети имело место активное введение в эксплуатацию быстродействующего SDH-оборудования, в котором битовые скорости уже составляли порядок $\approx 155 \dots 600$ Мбит/с. Поэтому для повышения качества синхронизации появилась идея использовать специализированные генераторы на сетевых узлах, которые выполняли бы функцию повышения качества параметров принимаемого синхросигнала. Данный период характеризуется системным внедрением различных типов специальных генераторов. В Приложении Г приведено краткое описание типов и параметров источников систем синхронизации.

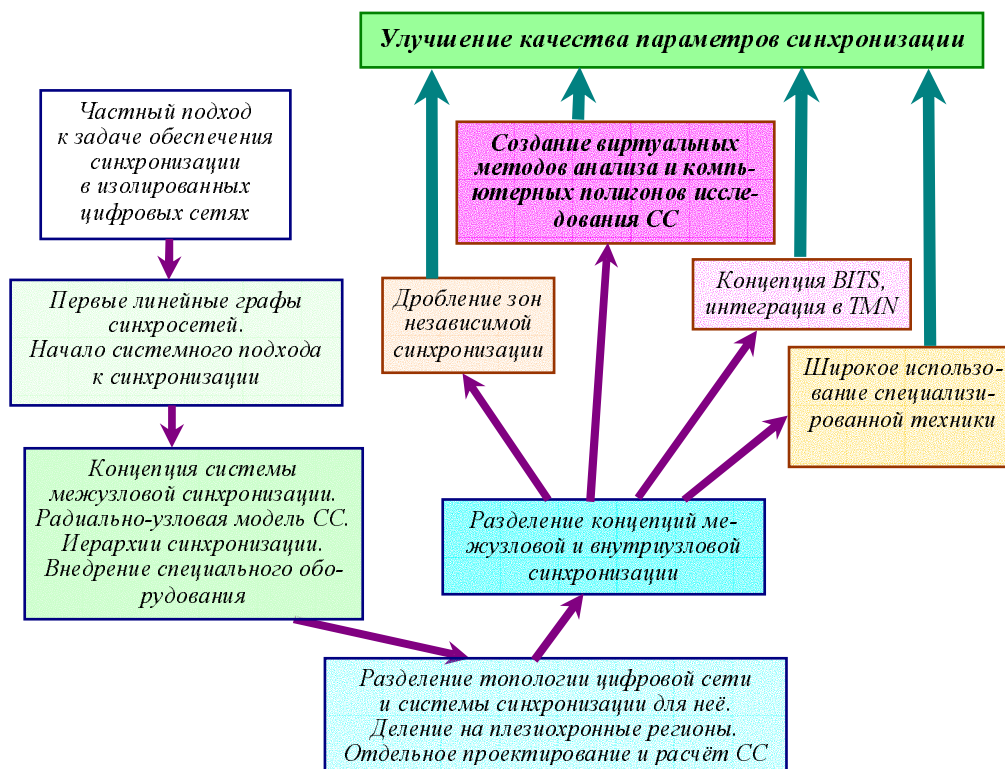


Рис. 2.5. Динамика развития концепций построения систем синхронизации

Дальнейшее наращивание сложности цифровых систем связи привело к значительному росту интереса к проектированию СС. Система синхронизации становится отдельным направлением проектирования сетей связи. Окон-

чательно проявилась такая особенность СС, как отличие графа синхронизации от топологии самой цифровой сети. Система синхронизации проектируется и создается как наложенная сеть над первичной и вторичными сетями. Основной новинкой концепции этапа является необходимость отдельного рассмотрения СС как наложенной сети. Этап характеризуется дроблением СС на регионы плезиохронной работы, поскольку одним графом межузловой синхронизации оказалось невозможно накрыть всю сеть. В результате для единой топологии сети создается несколько независимых СС, каждая из которых имеет свой радиально-узловой граф, кроме того, эти графы резервируют друг друга.

Следующий период характеризуется появлением концепции *внутриузловой (intraoffice) системы синхронизации* [4], отдельной от концепции межузловой синхронизации. Такая локальная революция в СС была связана с общей тенденцией и тем, что на узлах СС (обычно совпадающих с узлами первичной сети) количество и функциональная сложность цифровых устройств достигли «критической массы». В это время простая синхронизация «по цепи» оказалась уже недостаточной для обеспечения приемлемого качества синхросигналов. В результате решения проблемы внутриузловой синхронизации появилась концепция построения интегрированных СС (BITS), основные положения которой кратко представлены в Приложении Н. Параллельно с развертыванием систем BITS в этот период активно развивались системы диагностики и управления СС, которые затем объединились в общую концепцию TMN.

Сегодня развитие СС связано с дальнейшим развертыванием и расширением концепции построения интегрированных синхросистем. Продолжается дробление зон плезиохронной работы, расширяется роль средств диагностики и измерений физических параметров синхросигнала в режиме реального времени [3, 4], происходит дальнейшее совершенствование параметров генераторов. Как в ближайшем будущем, так и на данном этапе возможно появление интереса к компьютерному полигону моделирования процесса работы синхросети, суть которого изложена в разделе 1.1 настоящей монографии. Как уже говорилось, усложнение и самой цифровой сети, и системы синхронизации для неё вызовет развитие математического и физического моделирования, аналитического подхода к исследованию реальных процессов в системе передачи. Математическая модель одного из таких процессов, а именно процесса передачи цифрового синхросигнала по потоку E1 для SDH-сети, представлена в конце настоящей главы.

Далее кратко изложены инженерные тенденции построения современных СС.

Современная концепция построения СС характеризуется полномасштабным внедрением концепции интегрированных синхросетей, в сокращении BITS. Концепция BITS представлена в виде схемы на рис. 2.6 и включает три основные подсистемы: межузловой синхронизации (Interoffice Timing),

внутриузловой синхронизации (Intraoffice Timing) и подсистему контроля и управления качеством синхронизации (QoS).

Система межузловой синхронизации (СМС) предусматривает размещение в ключевых узлах сети генераторов синхронизации и построение системы распределения синхрочастот по сети с использованием трафиковых или выделенных каналов связи. СМС является основой любой СС и основной ее частью, поэтому именно эта подсистема BITS наиболее важна при проектировании, эксплуатации и модернизации сети. СМС имеет собственную топологию, часто отличную от топологии сети, и тесно связана со структурой телекоммуникационной сети, как первичной, так и вторичной. При расширении и реконфигурации сети связи СМС также должна изменяться и модернизироваться.

Система внутриузловой синхронизации (СВС) имеет более локальное значение по сравнению с СМС, поскольку эта система определяет порядок синхронизации различных цифровых устройств в пределах одного узла сети. В СВС могут входить специальные генераторы СС, однако в большей степени эта система строится на основе объединения генераторов, входящих в состав цифровых устройств связи, размещенных на узле. В отличие от СМС, которая должна проектироваться, строиться и обслуживаться системно, с учетом топологии и процессов, проходящей во всей сети, СВС создается локально, привязываясь к конкретному узлу связи [4]. Модернизация сети связи может требовать модификации СВС только в случае, если первая модернизирует конкретный узел или приводит к изменению параметров синхросигнала, от которого синхронизируется данный узел.

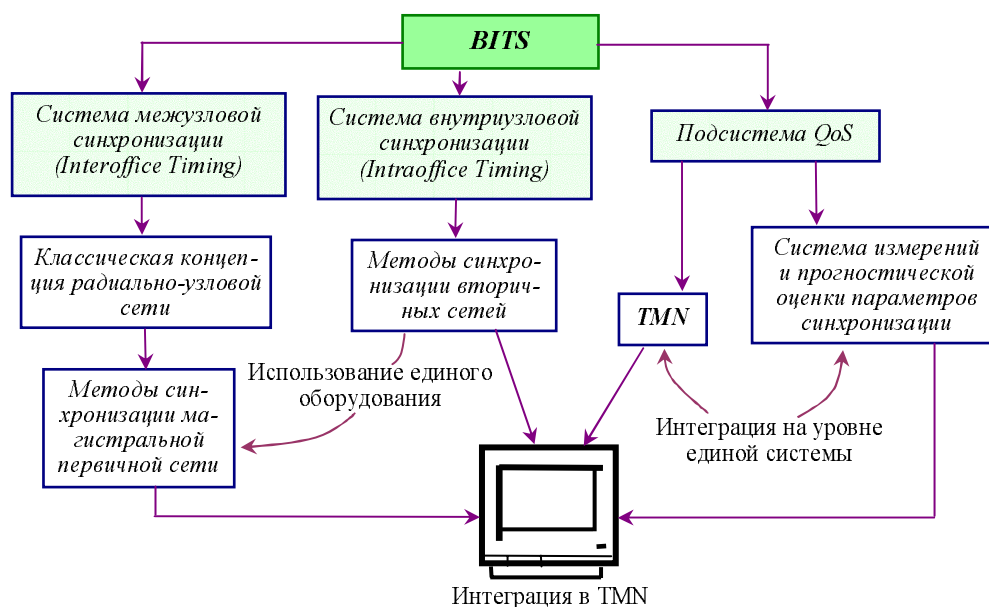


Рис. 2.6. Концепция построения интегрированных систем синхронизации (BITS)

Подсистемы СМС и СВС объединяются на основе используемого единого специального оборудования синхронизации – генераторов типа ВЗГ, МЗГ и т.д. Такая интеграция и обеспечивает концепцию интегрированных СС !

Учитывая, что в последнее время значительно повысились требования к надежности и качеству систем синхронизации, в состав современной СС уже сегодня должны включаться две дополнительные подсистемы, которые непосредственно связаны с обслуживанием СС - *подсистемы контроля и управления качеством системы синхронизации (QoS)*. Основным назначением этой системы является управление, диагностика и тестирование системы синхронизации [4].

Высокие параметры качества и надежности системы синхронизации требуют от оператора постоянного контроля за ее состоянием. Для осуществления управления СС создается система управления, интегрированная в общую платформу TMN, так что оператор имеет возможность контролировать состояние СС и осуществлять ее реконфигурацию из единого центра в режиме реального времени. Платформа TMN обеспечивает выполнение важных функций в процессах реконфигурации СС. Для этого используются сигналы о параметрах качества системы синхронизации (SSM).

Особенностью современных СС является необходимость в регулярных измерениях параметров синхросигналов. Опыт настройки и эксплуатации цифровых сетей показывает, что точный расчет параметров синхросигналов даже на сети топологии средней сложности (например, более 20...30 узлов) с учетом резервирования каналов синхронизации представляет собой достаточно громоздкую и сложную задачу [21, 22]. Сложность обусловлена не только лавинообразным нарастанием неизвестных переменных в задаче в зависимости от количества узлов на исследуемой сети, но и практической невозможностью учёта всех значимых влияющих воздействий. Решение задачи такого уровня сложности возможно только при наличии развёрнутого компьютерного полигона, базирующегося на адекватных физических и математических моделях реальных процессов в сети. В [4] также подчёркивается, что без подобных систем автоматизированного проектирования невозможно провести достоверный расчёт синхросети или цифровой сети передачи данных, и отсутствие в настоящее время таких вычислительных средств приводит к необходимости либо использования дорогостоящих средств измерений, либо заставляет проектировщиков и системных специалистов прибегать к оценочным методам анализа параметров синхросигналов в системе.

Очевидно, что применение последнего метода не дает точного значения параметров синхросигналов и гарантированного вывода о том, правильно ли выбрана топология системы синхронизации. Возникает проблема анализа корректности работы системы синхронизации.

Для решения этой проблемы сегодня на практике используется *синтез измерительной техники и современного проектирования* в том смысле, что развертывание СС и измерение параметров синхросигналов делается па-

раллельно. Важным следствием применения этого метода является то, что СС создается и модернизируется на основании данных о параметрах синхросигналов сети и требований к их параметрам. Процесс развертывания СС становится итерационным [4]: вначале создается СС как наложенная на существующую сеть система, топология такой системы делается из общих соображений, параметры синхросигналов рассчитываются оценочно; затем производятся измерения параметров синхросигналов в наиболее ключевых точках; на основании данных о параметрах синхросигналов принимается решение о модернизации определенного участка СС; затем выполняется модернизация, ее эффективность проверяется на основании измерений параметров синхросигналов в новой системе и т.д. Обычно измерения проводятся либо отдельными измерительными приборами, либо территориально-распределенными измерительными комплексами (ИКС), идеология которых подробно и достаточно последовательно описана в [3] и [4]. Кроме этого, всё более широко развивается тенденция объединения измерительной подсистемы и подсистемы управления в рамках единого программного обеспечения на основе TMN (рис. 2.6). В Приложении Н кратко представлены перечисленные подсистемы: СМС, СВС и QoS.

Следовательно, задача обеспечения синхронности работы устройств ВОСП является одной из первоочередных в отношении работоспособности цифровой системы в целом. С учётом настоящего уровня развития телекоммуникаций имеет место необходимость аналитического подхода при построении цифровых сетей, который обеспечивает системный анализ и даёт возможность достоверного прогноза. Последующий материал настоящей главы посвящён анализу и построению математических моделей устройств СС и процесса передачи синхросигнала.

2.3. Аналитические подходы к моделированию систем синхронизации

На этапе становления оптоволоконных телекоммуникаций (1975 – 85 гг. прошлого века) значительное внимание было уделено аналитическому изучению принципов обеспечения синхронности работы цифровых устройств. Согласно классификации систем синхронизации, сделанной в предыдущем разделе, подразделяющей последние на ФС, ЧС и ВС, широкое освещение в литературе нашли устройства ФС. Проведено достаточно обоснованное описание принципов их построения и математическое моделирование процесса подстройки фазы внутреннего генератора петли ФАП в соответствии с принимаемым сигналом, [9, 10, 14]. В [9] и [25] частично исследовались вопросы ВС, 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*