

ПРИЛОЖЕНИЕ F

Алгоритм синхронного группообразования и характеристики сигналов синхронизации

I. Схема алгоритма синхронного группообразования

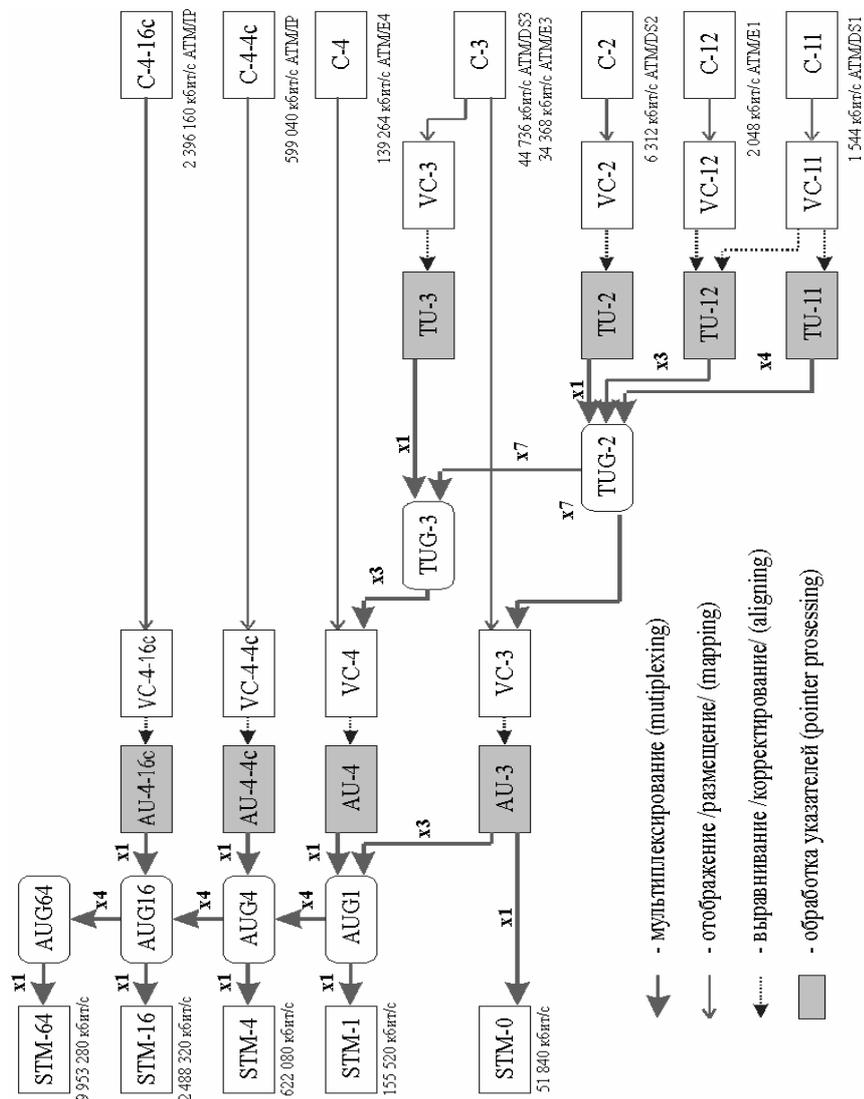


Рис. F.1. Схема АСГ при мультиплексировании SDH по рекомендации МСЭ-Т G.707, редакция 03/96. Виртуальные объекты обозначены в соответствии с МСЭ-Т G.707

II. *О значимости синхронизации*

Явление синхронизма движений или колебаний присуще не только технике передачи и обработки сигналов. Его можно наблюдать в самом, казалось бы, неожиданном приложении, в том числе в биологии, радиофизике и т.д., практически во всех областях сферы деятельности человека и в природе. Ниже представлены несколько примеров синхронизма и захвата колебаний для пояснения значимости синхронизации.

Как показано в [10], при генерации переменного тока существенную роль играет синхронизация генераторов, которые в данном случае представляют нелинейные источники колебаний, соединенные параллельно. Хотя каждый из них имеет свой собственный блок управления, зависимый от внешних воздействий, но при надлежащем соединении большого числа этих генераторов получается высокая стабильность частоты энергетической сети, практически не зависящей от случайно меняющейся нагрузки. Так, если ротор одного генератора начнет вращаться быстрее, чем другие, т.е. опережать их по фазе, то при наличии взаимной синхронизации он будет затормаживаться или ускоряться другими генераторами. Это является результатом взаимодействия данного генератора с остальными и эквивалентно влиянию некоторого управления со стороны сети, обеспечивающего стабильность частоты. Система многих генераторов работает при этом как единое целое и выступает одним из примеров самоорганизующейся системы. Однако этот вид фазового синхронизма может быть и разрушен. Бедственная энергетическая авария произошла на восточном побережье США и Канады в 1966 году из-за размыкания большого реле магистральной линии, идущей на Канаду. Внезапное падение нагрузки привело к тому, что вырабатываемую энергию было некуда девать, генераторы стали выпадать из фазового синхронизма друг с другом, вызывая тем самым потерю устойчивости во всей сети. В результате один за другим автоматические предохранители стали отключать другие линии. Другим примером взаимной синхронизации, обеспечивающей устойчивость частоты в системе, является всемирная система синхронизации времени [10], позволяющая с применением радиолокационного отражения сигналов или ретрансляции их через спутники синхронизировать по эталонным (ведущим) часам любые часы, находящиеся в пространственно-разнесенных точках (см. также Приложение Г).

Как уже отмечалось, эффект захвата частоты (или колебаний) был замечен и за пределами области техники и систем связи. В разделах биофизики, где изучаются ритмические явления, захватывание является ключевым моментом исследования биологических ритмов, потому что внутренние органы организма синхронизируются друг с другом, в то время как сами организмы синхронизируются относительно окружающей среды. Так, явление сердцебиения является результатом взаимодействия клеток. Иногда в сердце случается нечто подобное «провалу генерируемой энергии», и клетки выпадают из синхронизма. Биение сердца прекращается, и, если не применить дефибрилляцию, человек умирает. Дефибрилляция, т.е. внешнее возбуждение сердца, может восстановить взаимную синхронизацию клеток, и они снова будут сокращаться синхронно. Почти каждый живой организм оказывается захваченным или синхронизированным с окружающей его средой. Расписание работы, привычные перерывы, маршрут разносчика газет и тому подобные действия синхронизированы с суточным вращением Земли.

Изучение циркадных [10] ритмов позволило установить, что чередование дня и ночи является главным фактором захватывания для большинства живых организмов. Если сделать инверсию суточного цикла человека, поместив его в искусственное окружение, ритм которого находится в противофазе с привычным (например,

быстро переместить его на другую сторону земного шара), то потребуется около недели, чтобы *восстановить его температурный цикл*. Это дает некоторое представление о том, насколько долго восстанавливается захватывание, или синхронизация.

В эпоху винтомоторных самолетов солнечный свет, отражаясь от плоскостей пропеллера, создавал иногда у пилотов ощущение полета вниз. Это объясняется эффектом фазовой синхронизации, при котором фотостимуляция может действовать так, что захватываются определенные ритмы, вырабатываемые мозгом. Было замечено, что вращающиеся маяки ночью во время дождя также могут привести к неприятностям при управлении самолетом, вплоть до потери сознания пилотами. Свет от этих маяков может быть отражен от капель воды с такой частотой и фазой, что произойдет захватывание определенных ритмов мозга. Если пилот утомлен, то результат может оказаться весьма печальным.

Эффект синхронизма внешних явлений с биоритмами мозга является свойственным не только человеку. Если поместить рядом нескольких мигающих в темноте светлячков, то можно заметить, что спустя некоторое время их мигания окажутся взаимно захваченными или синхронизированными по фазе. Внутренний механизм миганий, очевидно, обусловлен чувствительностью к свету, а тот факт, что они происходят только ночью, показывает, что мигания синхронизированы сменой дня и ночи.

Захватывание представляет интерес также для физиков-атомщиков, специалистов, изучающих гидродинамику, метеорологов и океанографов. Складывается мнение [10], что эффект захвата колебаний можно использовать для стабилизации плазмы.

III. Влияние проскальзываний на параметры каналов первичной сети и качественные параметры услуг связи

Таблица F.1

Первичная сеть	Влияние на параметры каналов
На основе PDH	Проскальзывания; потеря цикловой информации; рост NES, NMES (разд. 1.2); пакетные ошибки
На основе SDH	Смещение указателей, появление алгоритмического джиттера
Услуги (вторичные сети)	Влияние на качественные параметры
Телефонная связь	Появление импульсных помех в виде щелчков Искажение строки
Факсимильная связь	Потеря данных, всплески BER
Передача данных в канале ТЧ (модемная, ADSL, HDSL, ...)	Замирание кадра на экране
Видео	Потеря соединения
Кодированные данные (вокодер)	

Для услуги телефонии одно проскальзывание приводит к появлению щелчка в трубке. Этот щелчок не всегда слышен, таким образом, единичные проскальзывания незначительно влияют на параметры качества телефонной связи. Обычно несколько щелчков в минуту дает вполне приемлемое качество телефонной связи. Изучение во-

проса о влиянии проскальзываний на передачу факсимильных сообщений, согласно [4], показало, что единичное проскальзывание приводит к нарушению качества или потерям строк сообщения факса группы 3. Проскальзывание может приводить к нарушениям в передаче до 8 строк сообщения, что соответствует 2 мм по вертикали. В случае нескольких проскальзываний передаваемую страницу необходимо повторно переслать (табл. F.1). Воздействие проскальзываний на передачу данных в разговорном канале приводит к появлению последовательностей ошибок длительностью от 10 мс до 1,5 с в зависимости от модемного протокола и скорости передачи. В случае соединения по видеотелефону проскальзывание обычно приводит к потере видеоканала и необходимости восстановления соединения.

Воздействие проскальзываний на каналы передачи данных зависит от используемого для этого протокола. Обычно проскальзывания приводят к потере части информации и необходимости ее передачи заново, что в современных протоколах делается автоматически. Таким образом, проскальзывания приводят к увеличению времени передачи за счет дополнительного времени на повторную передачу. При передаче цифровой видеoinформации (например, видеоконференц-связь) проскальзывания вызывают деградацию качества видеоизображения в виде пропадания кадра или его замирания на период до 6 с. Длительность деградации видеосигнала зависит от типов кодирования и технологии компрессии.

Для цифровых линий, таких как SDH, эффект проскальзываний приводит к множественным ошибкам в канале. Следует отметить, что в ряде широко используемых протоколов высокого уровня, предназначенных для применения в высококачественных цифровых системах, таких как ОКС-7, PRI, NetFusing, CC15#7 [49] и других, потеря даже одного бита приводит к обрыву соединения. Использование операции «стаффинга» бит [17] – передачи импульсов, не несущих информации, предназначенных для возможного удаления или дополнения (отрицательный или положительный «стаффинг»), при проскальзывании уменьшает вероятность потери информации, но снижает скорость передачи данных.

Наиболее существенное ухудшение проскальзывания вносят в кодированные данные (например, вокодерную телефонию, передачу с шифрованием и т.д.). В результате проскальзывания теряется ключ кодирования. В этом случае принимаемые данные не могут быть расшифрованы до тех пор, пока ключ не будет передан заново. Таким образом, все данные будут потеряны. В ряде систем с защитой информации повторная передача ключа не допускается, поскольку в этом случае нарушается уровень защиты данных. По этой причине для таких специальных сетей норма "1 проскальзывание в сутки" вряд ли будет считаться приемлемой.

Один из общих подходов к управлению проскальзываниями состоит в том, чтобы обеспечить их появление только в форме повторения или удаления целого цикла, а не его части. Тогда счетчики тактовых интервалов и логические устройства цикловой синхронизации, связанные с группообразованием, остаются синхронизированными [25]. Если разница между значениями тактовой частоты цифрового сигнала на входе и выходе эластичной памяти составляет Δf , то среднее время между проскальзываниями [25]:

$$T_{sleep} = \frac{N^{sleep}}{\Delta f}. \quad (F.1)$$

В (F.1) N^{sleep} – число битов, изымающихся или повторяющихся при проскальзывании. Согласно [30], частота проскальзываний F^{sleep} за 1 секунду на сети высокого качества

должна быть не выше, чем

$$F^{sleep} \leq \hat{F}^{sleep} = 7.986 \cdot 10^3 \cdot \frac{\Delta f}{f_{nom}}. \quad (F.2)$$

Здесь f_{nom} – номинальная частота синхронизации, $\varpi = \Delta f/f_{nom}$ – точность синхронизации. Из (F.2) следует, что при синхронизации двух элементов сети, каждый из которых имеет свой генератор с точностью $\pm 10^{-11}$ ($\Delta f \cong 2 \times 10^{-11}$), проскальзывание возникает в среднем один раз за 72 дня в течение не менее 98.9 % времени наблюдения, что и является требованием рекомендации [30].

IV. Нормирование количества проскальзываний в PDH-сетях

Современная технология построения ВОСП не позволяет совсем устранить проскальзывания в цифровой первичной сети. Единственное, что оказывается возможным - это нормировать параметры проскальзываний. Нормирование этих параметров дано в G.822, где устанавливаются нормы в рамках гипотетической модели коммутируемого соединения ISDN (HRX). Эта модель описана в G.801, G.821 и G.826. Гипотетическая модель соединения HRX представляет собой коммутируемое соединение длиной 27500 км, которое состоит из участков трех типов: двух национальных секций и одной секции международного качества, объединяющей две национальные сети. Нормирование параметров на проскальзывания выполняется как для национальных, так и для международных участков соединения.

Таблица F.2

Категория качества	Количество проскальзываний	Продолжительность участка времени, %
<i>a</i>	< 5 за 24 часа	> 98,9
<i>b</i>	> 5 за 24 часа, но < 30 за 1 час	< 1,0
<i>c</i>	> 30 за 1 час	< 0,1

Нормирование параметров проскальзываний выполняется для трех периодов времени использования канала 64 кбит/с (см. табл. F.2), которые определяют три категории качества (*a*, *b* и *c*). В большую часть времени (98,9%) использования канала допускается менее 5 проскальзываний в сутки (категория *a*). Считается, что такой уровень проскальзываний не нарушает предоставления услуг ISDN. В течение коротких промежутков времени допускается превышение этой нормы. Так, допускается норма менее 30 проскальзываний в час в течение 1% использования канала. Такой уровень проскальзываний предполагает предоставление услуг ISDN среднего и низкого качества. Наконец, для 0,1% времени использования канала допускается более 30 проскальзываний в час, что подразумевает невозможность предоставления услуг ISDN.

Таблица F.3

Участок HRX	Допустимый процент от количества проскальзываний, %
Международного качества	8
Каждый участок национального качества	6
Каждый участок локального качества	40

Описанные проскальзывания по участкам HRX распределяются следующим образом (табл. F.3). Как видно из таблицы, большая часть проскальзываний прихо-

дится на участки локального качества. Фактически описанные нормы предусматривают для большей части времени использования канала на участках национального качества одно проскальзывание в 80 часов, а для участков международного качества - одно проскальзывание в 60 часов.

V. Стабильность и точность генератора

На рис. F.2, *a* показана очень хорошая работа генератора - стабильная и точная. Генератор рис. F.2, *б* работает стабильно, но не точно, рис. F.2, *с* - точно, но не стабильно, на рис. F.2, *д* показана неточная и нестабильная работа генератора. Неточность в работе генератора связана с наличием постоянного отклонения генерируемой частоты (частотным сдвигом). В случае высокой стабильности генератора передаваемые от него синхросигналы будут иметь постоянный частотный сдвиг. Нестабильная работа генератора, наоборот, характеризуется наличием переменного сдвига частот и переменной вариации. Такие вариации можно характеризовать как собственный вандер генератора.

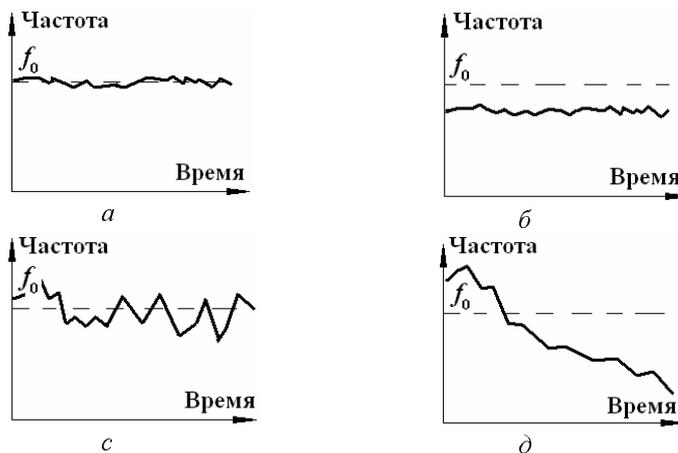


Рис. F.2. Различные варианты стабильности работы генераторов

VI. Ошибка временного интервала TIE и MTIE

Чтобы пояснить параметр *TIE*, рассмотрим прием (или передачу) цифрового сигнала Ef_2 , который сравнивается с эталонным сигналом Ef_1 (рис. F.3). Как видно из рисунка, сигнал Ef_2 имеет сдвиг по фазе относительно эталонного сигнала. Оценить этот сдвиг можно через параметр времени, который получил название ошибки временного интервала *TIE* (*Time Interval Error*), [28]. Сравнивая сигнал синхронизации с эталонным сигналом, согласно рекомендации, измеряют параметры *TIE*: текущее значение, среднее значение за период измерений, различные зависимости параметра *TIE* от времени наблюдения и т.д., максимальное значение параметра *TIE*. Измерение параметра *TIE* осуществляется как в абсолютных единицах (единицы времени), так и в приведенных единицах относительно тактового интервала (например, *UI*). Величина $1UI$ - это время, необходимое для передачи 1 бита информации в данной системе передачи.

Данный параметр TIE аналогичен введённому в разделе 1.5 понятию рассогласования R . Отличие состоит в том, что в случае TIE предполагается только сдвиг импульсных последовательностей, равно так же как и в известной модели приёма сигнала [14], а рассогласование предполагает случайное блуждание длительности импульсов E_{f_2} относительно E_{f_1} .

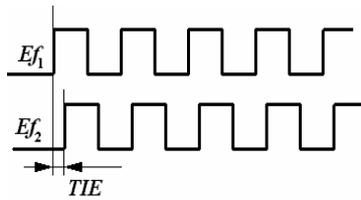


Рис. F.3. Иллюстрация TIE

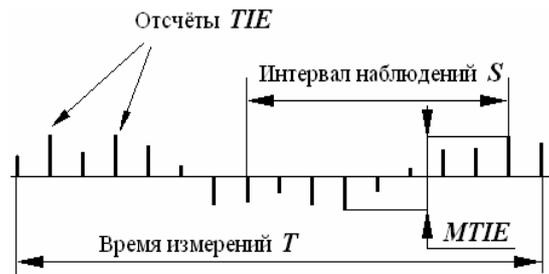


Рис. F.4. Параметры TIE и $MTIE$

Параметр TIE в настоящее время не представляет нормативной ценности для анализа параметров синхросигналов. Пусть в произвольном синхросигнале с определенным шагом дискретизации измеряется значение TIE в течение некоторого времени измерений T . Если ввести параметр интервала измерений S , за который осуществляется оценка максимального пикового отклонения TIE (этот параметр в НТД получил название $MTIE$ - максимальной ошибки временного интервала, или МОВИ), то для $MTIE$ будет справедливо [4]

$$MTIE = TIE^{\max}|_S - TIE^{\min}|_S = TIE^{\max}|_S + |TIE^{\min}|_S|. \quad (F.3)$$

Очевидно, что значение параметра $MTIE$ зависит от размера интервала S . Обычно в качестве характеристики синхросигнала используется зависимость $MTIE(S)$, которая является одной из основных характеристик источников синхронизации, [4, 15]. Поскольку для измерений параметров $MTIE$ обычно используются интервалы наблюдений S в 1 секунду или более, на этот параметр оказывают влияние как вандер, так и джиттер, однако обычно амплитуда джиттера намного меньше, так что ею можно пренебречь для широкого диапазона случаев. Таким образом, основным фактором, влияющим на параметр $MTIE$, является вандер.

Известно, что нарушения синхронизации в SDH-системе приводят к смещениям указателей в АСГ. Рассмотрим, как это связано с параметрами TIE и как можно оценить частоту смещений указателей по параметру TIE . Для этого предположим, что в сети есть некоторое частотное рассогласование, в результате которого точность синхронизации (выражение (1.1) раздела 1.2) будет ограничена величиной 10^{-11} (рис. F.5). При передаче данных со скоростью 155,520 Мбит/с передача одного бита занимает: $t_b = 1/\mathcal{G}_{STM-1} \cong 6,4 \cdot 10^{-9}$ с. Поскольку смещение указателей в АУ (рис. F.1) предусматривает согласно рекомендации смещение трех байтов или 24 битов, то одно смещение указателей составляет временной сдвиг $TIE = 154$ нс. При нестабильности в 10^{-11} время возникновения одного смещения получается делением TIE на параметр нестабильности и составит 15400 с или 4,2 часа. Аналогичные вычисления для нестабильности в 4,6 прт ($4,6 \cdot 10^{-6}$) дают время возникновения одного смещения 33,4 мс.

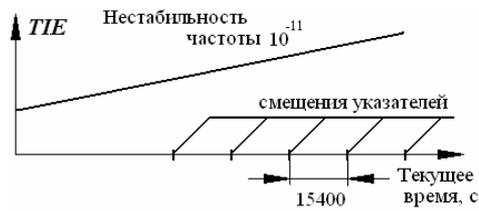


Рис. F.5. Нестабильность частоты и смещения указателей

Другой пример. Параметры TIE и $MTIE$ синусоидального сигнала, отличающегося от опорного по частоте (рис. F.6), равны между собой: $MTIE = TIE$. Этот результат получается как по измерениям в течение одного такта, так и по совокупности N тактов.

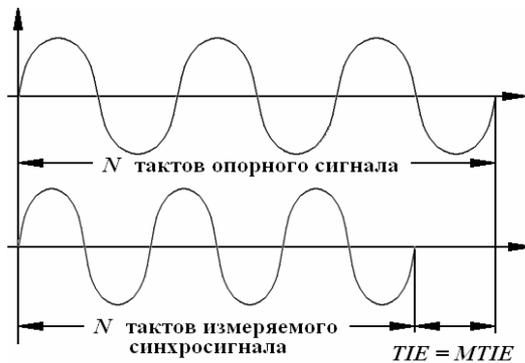


Рис. F.6. Анализ TIE и $MTIE$ синусоидального сигнала

Согласно изложенному выше, а также [24], работа устройства (генератора) должна характеризоваться точностью и стабильностью.

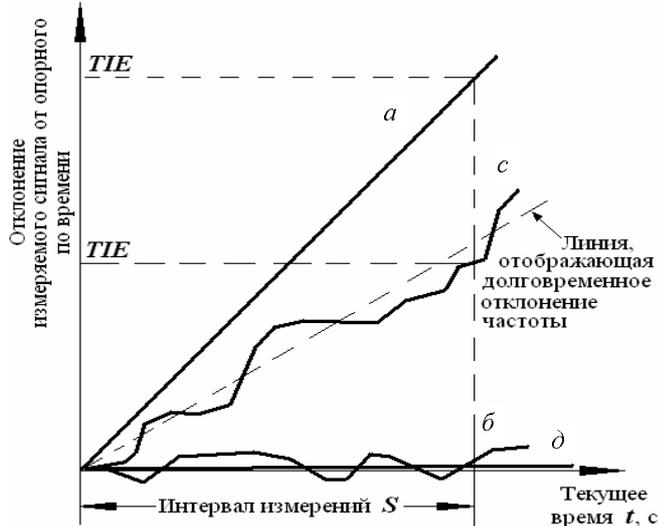


Рис. F.7. Взаимосвязь между параметрами стабильности и точности работы генераторов и TIE

Безусловно, что эти параметры связаны с параметрами генерируемых синхросигналов, в том числе с TIE . На рис. F.7 показаны следующие режимы: a – генератор имеет постоянное отклонение частоты, которое порождает линейный рост TIE . Синхросигнал приходит от точного, но не стабильного генератора, что приводит к TIE и вандеру; b – синхросигнал от стабильного, но не точного генератора; c – сигнал

от нестабильного и неточного генератора; и δ – практически идеальная работа генератора – стабильная и точная и соответствующий параметр $TIE = 0$ вне зависимости от S .

VII. Временная вариация $TVAR$ (Time Variance) и девиация времени $TDEV$

Перечисленные выше характеристики практически не учитывают вариацию частоты синхросигнала. Для того чтобы включить такую характеристику в качестве одного из параметров, согласно рекомендации, используется временная вариация $TVAR$, которая представляет собой среднеквадратичное отклонение временных TIE и численно равна

$$TVAR(\tau) = \sigma^2(\tau) = \frac{1}{6} \cdot [(\Delta^2 x)^2] \cong \frac{1}{6} \cdot (N - 3n + 1) \cdot \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[\frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} (x_{j+2n+k} - 2x_{j+n+k} + x_{j+k})^2 \right], \quad (F.4)$$

где $\tau = n \cdot \tau_0$, τ_0 - время дискретизации при измерении TIE ; N - количество тактов на интервале измерения, x - величина TIE .

Согласно выражению (F.4), $TVAR$ измеряется в квадратных единицах времени. Для определения физического смысла искомой величины в качестве характеристики вариации частоты используется параметр девиации частоты $TDEV$ (Time Deviation), равный $TDEV = \sqrt{TVAR}$. Этот параметр, как следует из определения $TVAR$, зависит от времени измерений τ , так же как параметр $MTIE$ зависит от величины интервала наблюдений S . Согласно [4], для характеристики устройства или синхросигнала параметр $TDEV$ дается в виде зависимости $TDEV(\tau)$.

В современной практике анализа качества синхросигналов считается достаточным использовать две зависимости: $MTIE(S)$ и $TDEV(\tau)$. Согласно определениям этих параметров, они в высокой степени являются вторичными, что затрудняет выявление причин нарушений качества системы синхронизации на основании только этих двух характеристик. Тем не менее в практике построения и отладки телекоммуникаций только эти две зависимости считаются основными при анализе качества системы синхронизации.

ПРИЛОЖЕНИЕ G

Типы и параметры источников систем синхронизации

Приведено краткое описание типов и параметров источников (генераторов), применяемых для получения синхросигнала.

VIII. Типы генераторов систем синхронизации

По физическим принципам построения источники систем синхронизации или генераторы разделяются на два основных типа: кварцевые и атомные, [4] (рис. G.1).

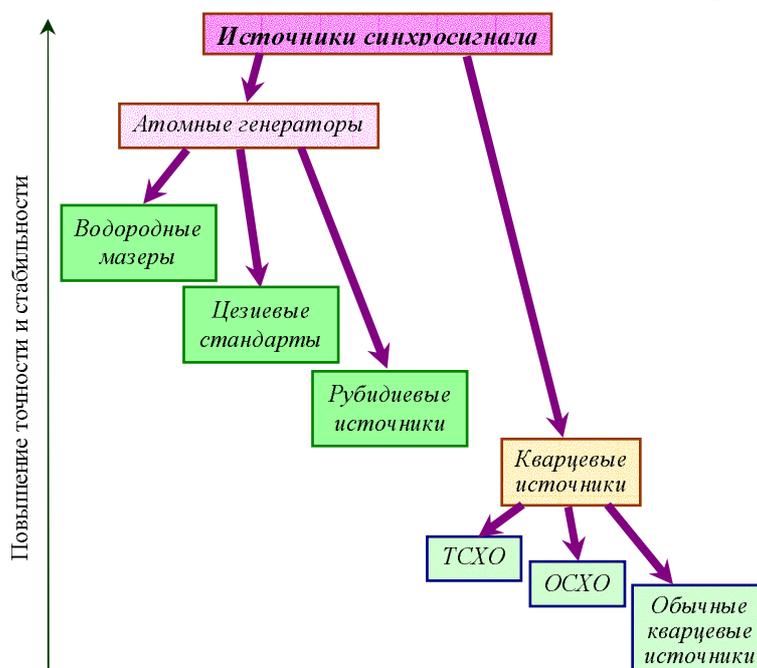


Рис. G.1. Иерархия источников синхронизации

К первой группе относятся три типа источников: обычные кварцевые, кварцевые с температурной компенсацией ТСХО (Temperature Compensated Crystal Oscillator) и охлаждаемые кварцевые источники ОСХО (Oven Compensated Crystal Oscillator). Атомные источники разделяются на три типа: водородные мазеры, цезиевые стандарты и рубидиевые источники. Кварцевые источники частоты в той или иной степени используют пьезоэлектрические свойства кварца, тогда как атомные источники частоты работают на принципе резонансного лазерного излучения [39]. Все шесть основных типов источников синхронизации различаются своими принципами и параметрами точности, имеют свои особенности построения, которые довольно подробно описаны, например, в [59, 60]. Наибольшую точность и стабильность гене-

рируемого сигнала дают водородные мазеры, затем идут цезиевые стандарты, рубидиевые источники частоты, ТСХО, ОСХО и обычные кварцевые источники. Пропорционально уменьшается стоимость. Высокая стоимость водородных мазеров приводит к тому, что их практически не используют в телекоммуникационных приложениях, а только для лабораторных комплексов, в авиации и космонавтике. Следовательно, в телекоммуникациях используются пять источников, которые обеспечивают параметры работы, приведенные в табл. G.1 [59].

Таблица G.1

Характеристика	Тип источника синхронизации				
	Кварцевый обычный	ТСХО	ОСХО	Цезиевый стандарт	Рубидиевый источник
Основная частота резонатора		10 кГц – 100 МГц		9192631770 Гц	6834682613 Гц
Обеспечиваемые выходные частоты		10 кГц – 100 МГц		1, 5, 10 МГц	1, 5, 10 МГц
Относительный кратковременный дрейф частоты, 1 с	10^{-9}	10^{-9}	$10^{-9} \dots 10^{-10}$	$10^{-11} \dots 10^{-13}$	$10^{-11} \dots 10^{-12}$
Относительный долговременный дрейф частоты, 1 сутки	10^{-7}	10^{-8}	$10^{-7} \dots 10^{-9}$	$10^{-13} \dots 10^{-14}$	$10^{-12} \dots 10^{-13}$
Относительный долговременный дрейф частоты, большой временной интервал	10^{-6} в год	$10^{-8} \dots 10^{-7}$ в год	$10^{-9} \dots 10^{-11}$ в год	10^{-13} в год	10^{-11} в месяц
Внешние факторы, воздействующие на параметры	Давление, температура, физические параметры кварца			Магнитные поля, температура	Магнитные поля, температура, атмосферное давление
Причины, влияющие на долговременную стабильность	Старение кварца, старение электронных компонентов, окружающая среда			Старение компонентов	Старение источников света, окружающая среда

Видно, что кварцевые генераторы обеспечивают достаточно высокий уровень кратковременной стабильности, но их параметры долговременной стабильности довольно низкие. Атомные генераторы характеризуются на несколько порядков более высокими параметрами стабильности. Наиболее мощными источниками являются цезиевые стандарты, которые обеспечивают высокие параметры как долговременной, так и кратковременной стабильности. В отличие от них рубидиевые генераторы обеспечивают высокие параметры кратковременной стабильности, но их параметры долговременной стабильности довольно низкие в сравнении с цезиевыми стандартами. Следует отметить, что приведенные в табл. G.1 характеристики являются общими и могут не соответствовать параметрам конкретных систем. Параметры стабильности часто зависят от технологического процесса [4]: насколько точно изготовлен генератор. В этой связи часто кварцевые генераторы по параметрам *могут превосходить* параметры стабильности рубидиевых генераторов.

Говоря о других характеристиках, необходимо отметить, что цезиевые стандарты из-за используемых в их составе цезиевых трубок лазеров являются стационарным оборудованием. Рубидиевые генераторы используют в своем составе рубидиевый лазер и являются более компактными. Промышленность выпускает рубидиевые генераторы, которые могут с успехом применяться в аэрокосмической промышленности, поскольку они компактны и предъявляют меньшие требования к окружающей среде. В последнее время появились рубидиевые генераторы, которые могут монтироваться в виде компонентов на платах [60]. Кварцевые генераторы являются ещё более портативными устройствами.

В табл. G.2 приведены основные типы генераторов, используемых в системах связи.

Таблица G.2

Источник	Стабильность	Габариты	Стоимость
Цезиевый	Высокая	Станционное оборудование	Высокая
Рубидиевый	Средняя	Портативные устройства	Средняя
ТСХО	Средняя	Компоненты	Средняя
ОСХО	Средняя	Компоненты	Средняя
Обычн. кварц	Низкая	Микросхема	Низкая

Часто для задач синхронизации используются источники на основе глобальной системы позиционирования GPS [4], которая изначально создавалась для целей навигации и определения местоположения объекта на земной поверхности. В основе системы лежит использование низкоорбитальных спутников системы NAVSTAR. Одновременно над горизонтом в любой точке земного шара наблюдаются минимум три спутника. На спутниках размещаются генераторы высокой стабильности (цезиевые стандарты), которые обеспечивают генерацию сигналов заданного вида. В сигнале содержится точное время (UTC) и частота для синхронизации приемников. Приемники GPS на основе триангуляции осуществляют расчет координат объекта на земной поверхности. В качестве побочных данных приемник GPS может восстанавливать из принимаемого сигнала частоту с достаточно высокой стабильностью.

Особенностью синхросигнала, генерируемого приемником GPS, является его высокая долговременная стабильность, поскольку система GPS в целом работает стабильно, и низкая кратковременная стабильность, которая зависит от количества спутников над горизонтом в каждый конкретный промежуток времени и может варьироваться по времени достаточно широко.

IX. Режимы работы генераторов синхронизации.

Задача построения комбинированных источников синхросигнала.

Рабочие параметры источников синхросигнала

Все описанные выше типы источников имеют свои достоинства и недостатки. Существенно, что большая их часть может работать как в независимом, так и в подчиненном режиме (disciplined), когда его частота сравнивается с принимаемым синхросигналом от другого источника. В этом случае петля ФАП на входе источника позволяет подстраивать генерируемый синхросигнал по отношению к другому синхросигналу. Естественно, режим подчиненной работы отсутствует для источников на базе приемников GPS (далее источников GPS), потому что последние фактически уже подчинены системе GPS.

Наличие двух режимов работы позволяет создавать различные комбинированные источники в соответствии с теми требованиями, которые к ним предъявляются. В качестве примера рассмотрим стабильность работы описанных выше генераторов в двух режимах, рис. G.2. В качестве параметра стабильности работы генератора на рис. G.2 выбрана вариация Аллана (*AVAR*) и описывается ее зависимость от вре-

мени для двух режимов работы: независимый (free) и подчиненный (discipl), [4]. На рисунке приведены характеристики для кварцевых источников ОСХО и ТСХО, для рубидиевых генераторов (Rb) и для источников GPS.

Видно, что для большинства генераторов вариация Аллана растет с увеличением времени анализа. Это означает, что долговременная стабильность этих источников ниже, чем кратковременная. Исключение составляют источники GPS, для которых долговременная стабильность выше, чем кратковременная.

В результате анализа свойств различных источников синхросигнала было найдено удачное инженерное решение: при объединении параметров источников GPS (по долговременной стабильности) и рубидиевых и кварцевых стандартов (по кратковременной стабильности), комбинированный таким образом источник по параметрам приближается к цезиевому стандарту, хотя стоит в 2-3 раза дешевле. Действительно, если рубидиевый генератор использовать в подчиненном от источника GPS режиме, то его кратковременная стабильность будет лучше рубидиевого генератора (рис. G.2), а долговременная стабильность, для достижения которой используются цезиевые стандарты, будет гарантироваться параметрами источника GPS.

Полученное комбинированное решение нашло широкое применение в мировой практике, поскольку позволило расширить количество точных и стабильных генераторов на сетях, так что даже небольшие частные операторы могут позволить себе иметь *собственную независимую систему синхронизации*.

Второе изменение в принципах построения синхросетей - наличие подчиненного режима работы генераторов, являющихся основой построения *системы синхронизации*. В результате каждый генератор синхросигнала, находясь в системе синхронизации, может работать как в независимом, так и в подчиненном режиме. Такой системный подход к генераторам потребовал модифицировать описанные выше параметры с учетом различных режимов их использования.

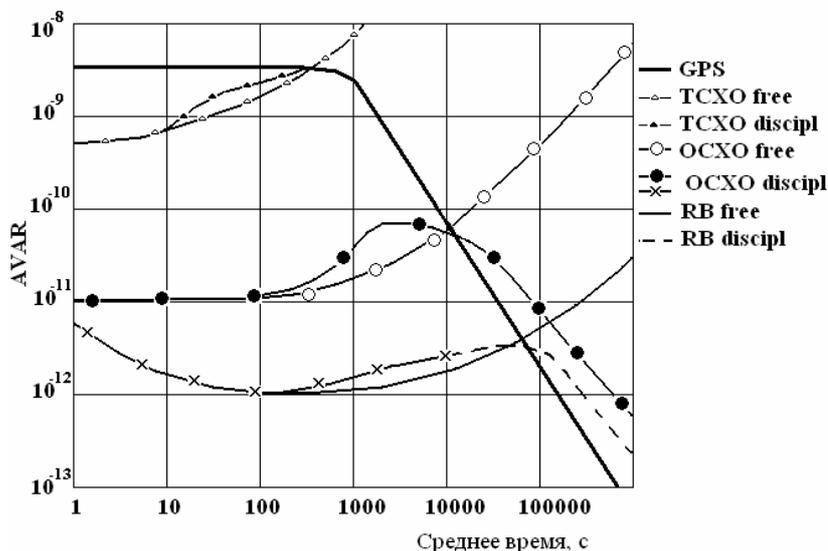


Рис. G.2. Зависимость параметра AVAR от времени для различных типов источников синхронизации в разных режимах работы

Согласно [4], основными параметрами источников синхросигналов являются: точность, долговременная и кратковременная стабильности и вариация Аллана. Эти параметры по-разному влияют на разные режимы использования генераторов.

1. Для режима независимой работы, когда генератор не имеет внешнего контролирующего сигнала и работает в полной мере независимо, т.е. изначально его частота не была выставлена по сравнению с каким-либо устройством (такой режим в западной прессе получил название free-run), определяются *параметры точности и стабильности*.

2. В поддерживающем режиме работы (holdover) генератор не имеет внешнего контролирующего сигнала, однако обеспечивает поддержание предварительно установленной частоты. Для этого режима был установлен *параметр поддержания* (hold-in range), который равен максимальному отклонению частоты входного сигнала от номинальной, при которой генератор может ее воспринять и поддерживать синхронный режим работы. Вторым параметром для данного режима работы является *время поддержания*, которое определяется временем перехода от режима поддержания до режима независимой работы. Режим поддержания играет важную роль при построении современных синхросетей. Фактически это режим работы генератора в подчиненном режиме, который «потерял» опорный сигнал. В этом случае генератор должен начать работу в режиме поддержания, пока по истечении определенного времени синхронизация не будет восстановлена. Время поддержания в этом случае определяет максимальное время на устранение неисправности в синхросети, по истечении которого параметры источника никак не будут зависеть от наличия самой системы, он перейдет в режим независимой работы. Все параметры источника в поддерживающем режиме важны, поскольку позволяют рассчитать параметры синхросигналов в случае сбоя на каком-либо участке системы передачи в зависимости от времени от начала сбоя.

3. Для режима восстановления синхронизации вводится *параметр восстановления* (pull-in range), равный максимальному отклонению частоты контролирующего сигнала от номинальной, которое может быть преодолено генератором при его дальнейшей работе в синхросети. Иллюстрацией может служить описанный выше пример, когда в сети происходит сбой. В этом случае генератор начинает работать в поддерживающем режиме, и его частота отклоняется от частоты контролирующего сигнала в соответствии с параметрами поддержания, собственной стабильностью и точностью. Если через некоторое время сбой будет устранен и вновь появляется контролирующий синхросигнал, между его частотой и частотой генератора будет иметь место отличие. Если это различие частот оказывается меньше параметра восстановления, то генератор восстанавливает синхронный режим работы автоматически, если больше – он должен заново вводиться в систему оператором.

Итак, согласно нормируемым характеристикам синхросигналов (*TIE*, *MTIE* и *TDEV*) и источников синхронизации, основные рабочие параметры генератора, используемые для описания его работы в сети, будут следующими:

- 1) точность генерации частоты;
- 2) стабильность в режиме независимой работы;
- 3) параметр и время поддержания в режиме подчиненной работы в сети;
- 4) параметр восстановления в режиме подчиненной работы в сети;
- 5) маски *MTIE* и *TDEV* для генерируемого синхросигнала.

ПРИЛОЖЕНИЕ Н

Структурные подсистемы концепции построения современных систем синхронизации

Приведено краткое описание основ построения основных подсистем концепции построения современных систем синхронизации для цифровых сетей передачи.

Х. Структура системы межузловой синхронизации (СМС)

СМС является основой системы синхронизации и представляет собой объединение задающих генераторов (первичных, вторичных, местных и т.д.), расположенных на узлах синхросети. Таким образом, СМС представляет собой принципиально *распределенную систему*. Согласно [4], принципы проектирования и топологии СМС находятся в зависимости от установленного режима работы генератора(ов). В мировой практике существуют несколько таких режимов, соответственно и схемы синхронизации сети могут быть разделены на схемы принудительной, независимой (плезиохронной) и взаимной синхронизации. На рис. Н.1 показана схема *независимой синхронизации*, которая используется для плезиохронной работы телекоммуникационных узлов, например, при взаимодействии национальных систем связи, каждая из которых имеет свою систему синхронизации.

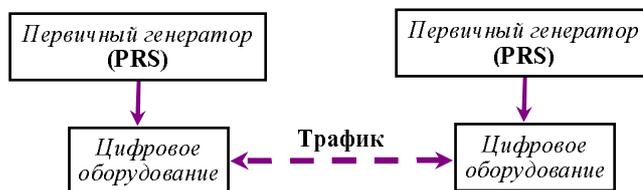


Рис. Н.1. Схема независимой синхронизации

Согласно предлагаемой схеме, цифровое оборудование в сети синхронизируется независимо и взаимодействует друг с другом только через каналы трафика. Различие тактовых частот, неизбежное для такой схемы, будет приводить к появлению в ней проскальзываний и появлению точек рассинхронизации. Схема независимой синхронизации в сетях связи используется редко, в частности, для синхронизации в спутниковом канале [4].

Другим вариантом построения СМС является использование *принципа принудительной синхронизации*, когда один узел сети синхронизируется от другого. Такая схема принята в международной практике как схема построения СМС выделенных сетей или их участков, поскольку обеспечивает наибольшую стабильность работы системы. Принцип принудительной синхронизации предусматривает построение иерархической структуры синхронизации с одним или несколькими первичными генераторами синхросигнала (рис. Н.1). Наличие нескольких графов синхронизации дает возможность резервирования целей синхронизации. Так, например, на рис. Н.2 показаны как основные пути синхронизации (P - primary), так и резервные пути син-

хронизации (S - secondary). Каждое устройство в сети может переходить от основного источника синхронизации к резервному в случае потери канала взаимодействия с основным источником. Такая система обладает повышенной надежностью и реализована на всех современных сетях связи. Кроме того, иерархическая топология синхросети соответствует топологии самой системы связи, чем легко достигается взаимодействие обеих сетей.

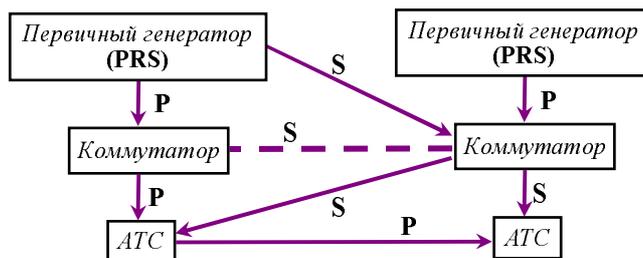


Рис. Н.2. Схема принудительной синхронизации

Взаимная синхронизация, принцип которой представлен на рис. Н.3, предусматривает синхронизацию равноправных устройств путем усреднения тактовых частот. Например, в схеме, представленной на рис. Н.3, любое цифровое устройство схемы получает синхросигналы от трех соседних и синхронизирует свой тактовый генератор с усредненным значением тактовой частоты. Согласно [4], по мнению ряда авторов, вариант взаимной синхронизации обеспечивает достаточно высокую точность, но имеются теоретические работы, в которых делаются противоположные выводы, например [61]. Автором [61] показано, что при взаимной синхронизации возможен постепенный уход частоты всего кольца. Кроме этого, и в практике построения современных синхросетей этот вариант не нашел большого распространения. По-видимому, с точки зрения операторов это обусловлено следующим:

- территориально распределенные синхросети не могут обеспечить высокой надежности соединений по методу полносвязной сети, в этом случае самоусреднение технически реализовать сложно;
- большое количество устройств в сети приводит к резкому увеличению количества соединений по синхронизации, что также нежелательно;
- сбой любого устройства в схеме приводит к значительной деградации всей синхросети;
- схема взаимной синхронизации предусматривает равноправность устройств, что находится в противоречии с иерархической структурой систем связи.

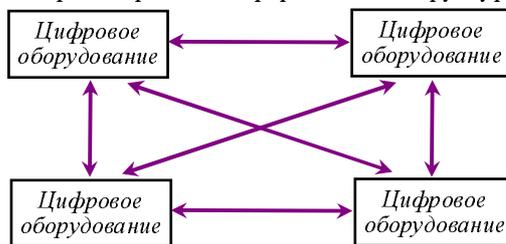


Рис. Н.3. Схема взаимной синхронизации

Обычно схема взаимной синхронизации используется не в распределенных, а в централизованных системах, например для конфигурации составного первичного эталонного генератора (ПЭГ PRS - Primary Reference Source), в состав которого могут входить несколько резервных цезиевых стандартов [4]. Одной из схем резервирования может быть схема взаимной синхронизации. Кроме того, она может использоваться как схемотехнический метод достижения высокой точности частоты в электронных устройствах.

Таким образом, из перечисленных схем работы генераторов для построения СМС используются схема независимой синхронизации и схема принудительной синхронизации с иерархичной системой распределения синхрочастот.

XI. Структура и иерархия СМС

Согласно основной задаче системы синхронизации - добиться равных частот всех генераторов в сети - естественно прийти к выводу, что для всей сети должен существовать один задающий генератор, который является эталоном частоты для данной системы. Такой генератор называется *первичным эталонным генератором* (ПЭГ). Он работает в независимом режиме и обеспечивает эталонный синхросигнал наивысшей стабильности. Обычно в качестве ПЭГ (PRS) используется цезиевый стандарт, реже - комбинированный источник Rb+GPS (рубидиевый генератор с приемником GPS), [59, 60]. Стабильность PRS выбирается максимально возможной и составляет порядок 10^{-12} - 10^{-13} , иногда даже выше. От PRS синхросигналы распределяются по каналам передачи ко всем генераторам синхросигналов. С точки зрения синхросети, все остальные генераторы будут *вторичными задающими генераторами* (ВЗГ). Все они работают в режиме принудительной синхронизации и образуют многоуровневую иерархию источников синхронизации (рис. Н.4).

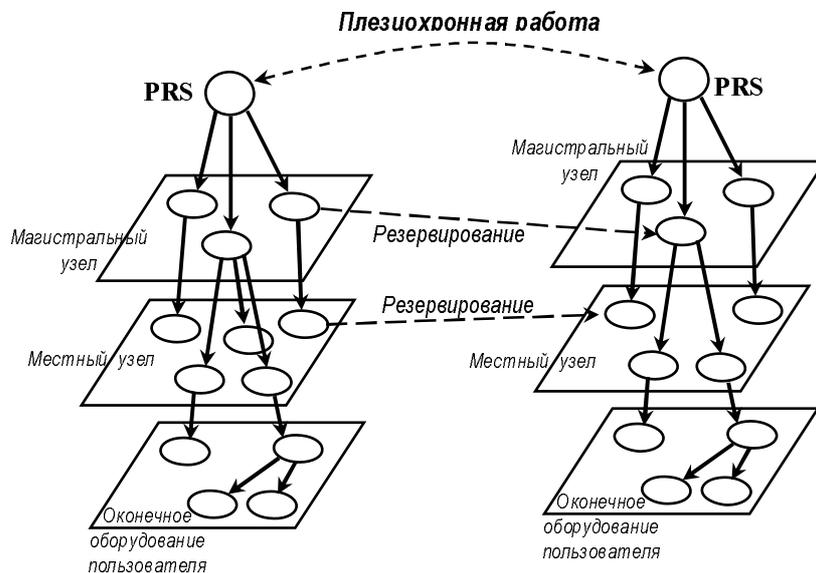


Рис. Н.4. Структура иерархии ITU-T системы межузловой синхронизации

В зависимости от уровня иерархии, источник должен иметь определенные параметры. Источники более низкого уровня берут синхросигнал от источников более высокого уровня, хотя допускаются связи между источниками внутри одного уровня [4]. В результате каждый источник синхронизации в системе связи синхронизирован по цепи от первичного эталонного генератора. По мере распределения синхросигнала (по сети) его параметры ухудшаются, так что до низких уровней он доходит с параметрами стабильности на 4...5, а иногда и больше порядков хуже, чем синхросигнал, генерируемый PRS. Чем длиннее цепочка, тем больше ухудшение параметров синхросигнала. Поэтому при построении синхросети и ее модернизации одним из основных законов является: *проектировать систему синхронизации таким образом, чтобы количество переприемов синхросигнала было минимальным для каждого направления.*

Чтобы добиться этого, иногда требуется разделить систему связи на несколько регионов и разместить в каждом регионе PRS. В этом случае для каждого региона строится своя иерархия под управлением PRS, а регионы взаимодействуют друг с другом по схеме независимой синхронизации (плезиохронной работы). Для повышения надежности синхросети внутри каждого региона плезиохронной работы обеспечивается резервирование синхронизации, часто регионы плезиохронной работы взаимно резервируют друг друга на различных уровнях.

Так, например, система межузловой синхронизации ВСС РФ состоит из 5 регионов плезиохронной работы [48]. Образование регионов плезиохронной работы может происходить как по причинам технического плана, так и по административно-политическим причинам. В первом случае разделение синхросети на несколько регионов плезиохронной работы связано с необходимостью сократить цепочки распределения синхросигналов. Для системы синхронизации России это связано с большой территорией, хотя дробление на региональные системы лишь косвенно и связано с пространственным удалением генераторов друг от друга. Как правило, синхросеть начинает развиваться как единая иерархия с одним PRS. С ростом количества цифровых устройств происходит удлинение цепочек распределения синхросигналов, так что окончательное оборудование получает синхросигналы неприемлемого качества. Тогда происходит разделение на два или более региона плезиохронной работы, что приводит к уменьшению цепочек. Затем каждый регион начинает развиваться по тем же законам, что в конечном итоге приводит к дроблению внутри региона и т.д.

В результате система межузловой синхронизации начинает разделяться на регионы плезиохронной работы; по мере увеличения количества цифровых устройств и усиления требований к параметрам синхросигналов на уровне окончательного оборудования количество зон плезиохронной работы увеличивается, размер зон уменьшается, т.е. происходит процесс территориального дробления синхросети. Разделение последней на регионы плезиохронной работы может происходить также в связи с желанием оператора иметь свою независимую синхросеть и свой PRS. Вторым примером является размещение PRS на территории сетей ведомственных операторов и создание синхросети, совершенно не зависимой от операторов сети общего пользования, [21, 22]. В рамках этой сети могут также существовать несколько хозяйственно независимых операторов, каждый из которых, исходя из желания полной независимости от другого оператора, может разместить свой PRS и создать зону плезиохронной работы.

ХII. Различные виды иерархий источников синхронизации. Дробление уровней иерархии

Вторым фактором, влияющим на параметры синхросигнала в сети, являются параметры источников передачи/приема синхросигналов, т.е. узлов транзитной передачи последних.

Построенная по иерархическому принципу синхросеть включает в себя иерархию генераторов синхросигналов. Как уже отмечалось, все генераторы СМС разделяются на две категории - первичные эталонные генераторы (обычно сеть имеет один или несколько таких генераторов, по количеству зон плезиохронной работы) и вторичные задающие генераторы. Последние разделяются на специальные генераторы (SSU - Synchronization Supply Unit) и генераторы, входящие в состав аппаратуры передачи и коммутации (SEC - Synchronous Equipment Clock). Обычно обе категории генераторов имеют сходные параметры и исполнение, однако требования к ним различаются, [4, 59, 60].

Стандартами, в том числе [62], предусмотрено разделение всех ВЗГ на несколько уровней иерархии. Принадлежность к определенному уровню иерархии определяет предельные параметры данного источника. Развитие синхросети и усиление требований к ее параметрам приводит к необходимости совершенствовать генераторы синхросигналов. В результате в дополнение к пространственному дроблению возникает *внутреннее многоуровневое дробление*, когда для улучшения качества синхросигнала создаются различные промежуточные уровни иерархии.

Современные стандарты различают две иерархии генераторов: американскую ANSI и общеевропейскую, основанную на стандартах ITU-T/ETSI [1]. Отечественные стандарты основаны на европейской иерархии, в то же время необходимо признать, что американская иерархия более проработана и детализирована.

Европейская иерархия включает в себя 4 уровня генераторов синхронизации: первичный источник - PRS; источник магистральной сети - Transit Node; источник местной сети - Local Nod терминальное (оконечное) оборудование - CPE (Customer Promise Equipment), [62].

Американская иерархия первоначально включала в состав 4 уровня Stratum [4], соответствующие общеевропейской иерархии, однако параметры реальных сетей и развитие генераторов синхронизации привело к необходимости описать в стандартах дополнительные 3 уровня, которые получили обозначение с префиксом E (от Enhanced - усовершенствованный). Таким образом, в настоящее время иерархия ANSI включает всего 7 уровней: Stratum 1 первичный эталонный генератор PRS; Stratum 2E; Stratum 2 - источник магистральной сети; Stratum 3E; Stratum 3 - источник местной сети; Stratum 4E; Stratum 4 - терминальное (оконечное) оборудование. Дробление американской иерархии источников представляет собой естественный результат развития цифровой системы связи. Особенностью американского рынка является большое количество частных операторов связи, поэтому процессы развития и внедрения новых технологий телекоммуникаций в США идут быстрее, чем в Европе. В области развития систем синхронизации американский рынок намного опережает европейский. Поэтому намеченная несколько лет назад тенденция многоуровневого дробления на американском рынке синхросетей скорее всего является объективной тенденцией и проявилась бы в Европе, если бы не определенная инерция процесса стандартизации.

ХIII. Параметры источников синхронизации разных иерархий

В зависимости от уровня иерархии нормируются параметры источников синхронизации. Для европейской иерархии такая стандартизация описана в G.811, G.812. Параметры этих источников синхронизации представлены в табл. Н.1.

Таблица Н.1

Параметр	PRS	Источник магистральной сети	Источник местной сети	CPE
Точность	$1 \cdot 10^{-11}$	Нет треб.	Нет треб.	$5 \cdot 10^{-5}$
Нач. смещение частоты	Нет треб.	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-8}$	Не стандартизованы
Долговременная стабильность	Нет треб.	$1 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-8}$	
TIE	По маске MTIE	1 мкс	1 мкс	Нет треб.
Смещение фазы	н/д	61 ppm	61 ppm	Нет треб.

Европейскими стандартами ITU-T/ETSI определяются параметры *MTIE* и *TIE* для различных уровней иерархии. Эти параметры обычно выражаются в виде масок *MTIE* и *TIE* и приведены ниже для PRS, SSU, SEC и цепи в системе PDH (рис. Н.5 ... Н.8).

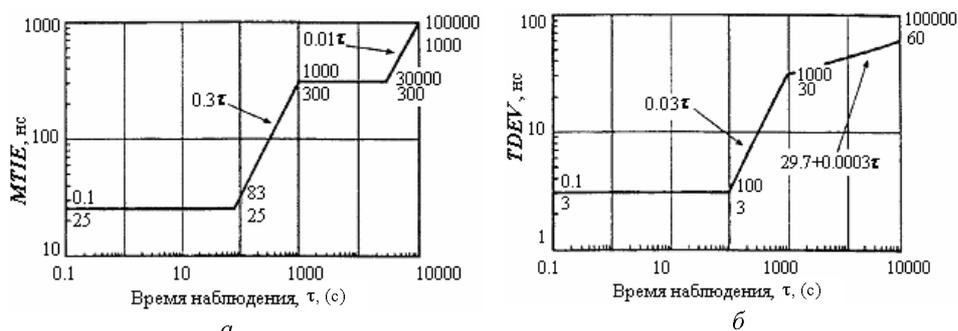


Рис. Н.5. Параметры *MTIE* (а) и *TDEV* (б) для PRS

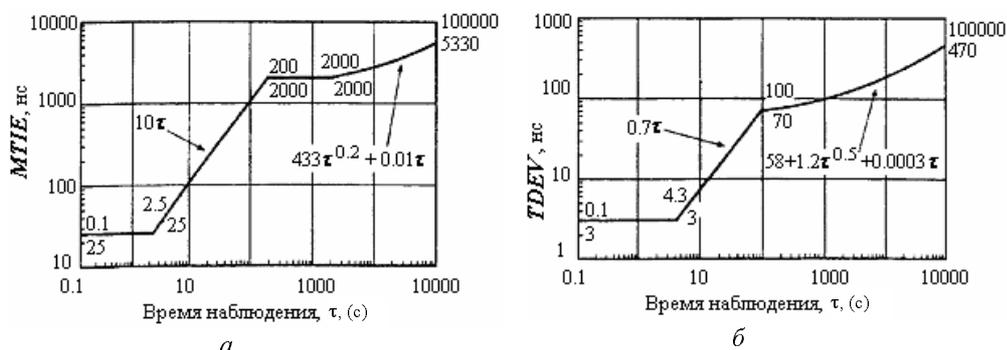


Рис. Н.6. Параметры *MTIE* (а) и *TDEV* (б) для SSU

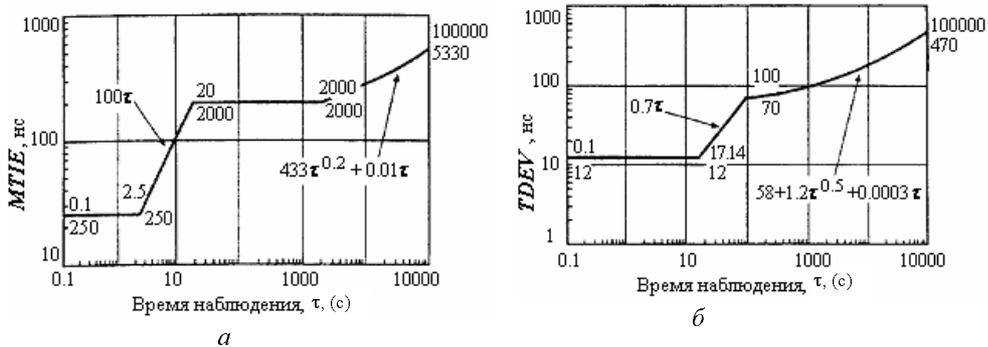


Рис. Н.7. Параметры $MTIE$ (а) и $TDEV$ (б) для SEC



Рис. Н.8. Параметры $MTIE$ для цепи источников в сети PDH

Параметры генераторов американской иерархии описываются стандартами ANSI T. 1.101, BELLCORE TA-001244 и TA-000436 и приведены в табл. Н.2.

Таблица Н.2

Параметр	Точность	Стабильность в поддерживающем режиме	Параметр восстановления	Время до первого проскальзывания
Stratum 1 (PRS)	1×10^{-11}	Нет режима	Нет требований	72 суток
Stratum 2	$1,6 \times 10^{-8}$	1×10^{-10} / сутки	$1,6 \times 10^{-8}$	7 суток
Stratum 3E	1×10^{-6}	1×10^{-8} / сутки	1×10^{-6}	3,5 часа
Stratum 3	$4,6 \times 10^{-6}$	$3,7 \times 10^{-7}$ / сутки	$4,6 \times 10^{-6}$	6 мин
Stratum 4E	$3,2 \times 10^{-5}$	Равна точности	$3,2 \times 10^{-5}$	Не специфицировано
Stratum 4 (CPE)	$3,2 \times 10^{-5}$	Равна точности	$3,2 \times 10^{-5}$	Не специфицировано

XIV. Вопросы приоритета и топологии

При построении плана синхронизации приоритеты включения оборудования расставляются исходя из общих приоритетов структуры системы связи [4]. С точки зрения синхросети, все цифровые устройства включаются в сеть совершенно равноправно, т.е. не делается различия между коммутационными устройствами и аппаратурой цифровых систем передачи. Технически приоритеты могут расставляться исходя из параметров генераторов, входящих в состав оборудования, например, если внутренний генератор АМТС имеет стабильность выше генератора системы передачи, то АМТС должна иметь более высокий приоритет синхросигнала. В мировой и отечественной практике совершенно естественно получил развитие метод первостепенного проектирования синхросети для первичной сети, и затем синхронизации аппаратуры вторичных сетей от первичной сети.

Системно такая тенденция оправдана и приводит к корректным результатам. В этой связи хотелось бы указать на некоторые заблуждения, имеющие место в случае, когда узлы сети синхронизации привязываются к узлам телефонной сети [21, 22], а не к узлам первичной сети, и тем более, когда связывают использование тех или иных генераторов с особенностями трафика.

Важной особенностью сетей синхронизации является отличие их топологии от топологии системы связи. Целью проектирования системы передачи цифровых сигналов является достижения как можно более высокой полносвязности трафиковых каналов. Поэтому топология современных сетей связи описывается обычно совокупностью замкнутых графов [63], рис. Н.9. Система синхронизации же должна строиться в виде незамкнутого графа. Любое замыкание графа синхросети приводит к появлению так называемой «петли синхронизации», когда синхросигнал проходит по замкнутому пути. Как следствие, возникает положительная обратная связь, усиливающая отклонения в нестабильности синхросигнала, что в конечном итоге приводит к деградации всего участка [49].

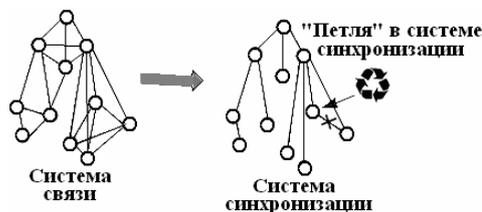


Рис. Н.9. Различие топологии системы связи и системы синхронизации

Таким образом, топологии трафиковой цифровой сети и синхросети принципиально различные, и поэтому синхросеть должна проектироваться отдельно от системы связи. В последнее время, как было показано выше, первичная сеть на основе SDH строится на основе кольцевой топологии, недопустимой для синхронизации. С этим связаны определенные проблемы, в том числе по вопросу резервирования, характерные для проектирования сетей синхросигнала в последнее время.

XV. Порядок проектирования системы межузловой синхронизации

Согласно работам ряда авторов [64...67] и др., при проектировании СМС в общем случае следуют схеме, представленной на рис. Н.10. Проектирование начинается с анализа требований к синхросети для каждого участка. По этим требованиям

осуществляется выбор как первичного эталонного (PRS), так и вторичных генераторов.

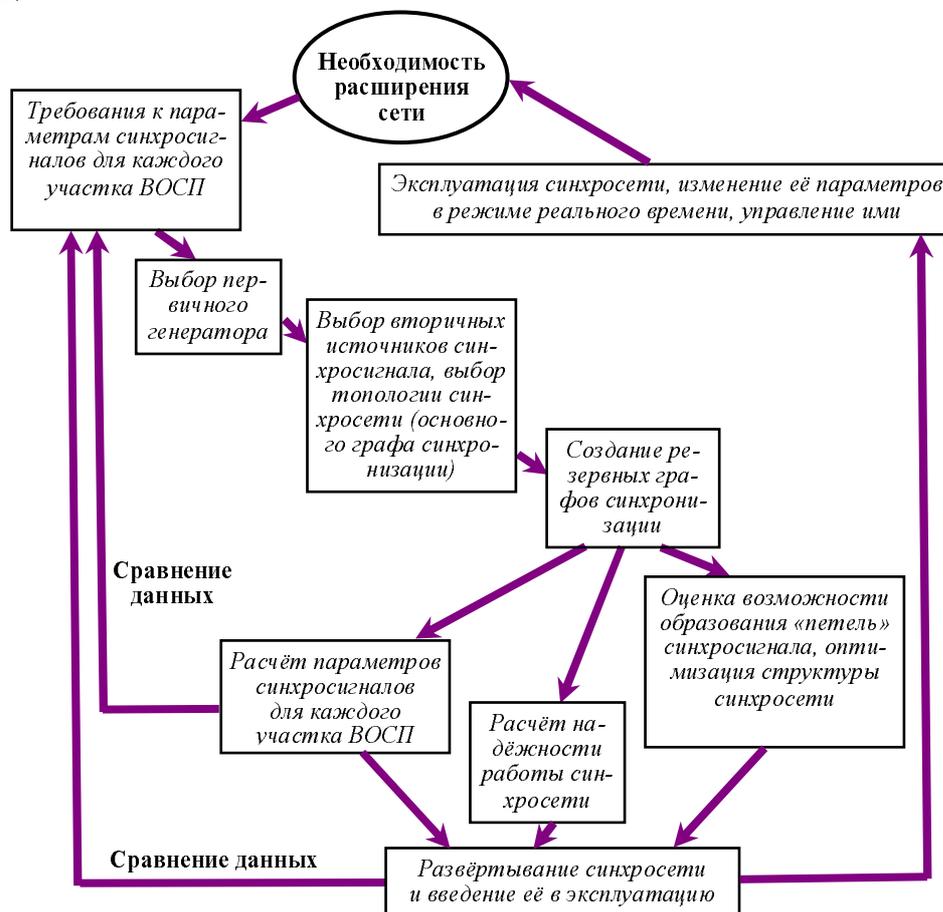


Рис. Н.10. Порядок проектирования системы межзвеновой синхронизации

Параллельно определяется общая топология сети синхронизации - основной граф синхронизации. На этом этапе осуществляется многовариантное проектирование, поскольку проектирующий специалист должен сделать выбор технического решения в многопараметрической задаче: важными параметрами оказываются параметры генераторов и каналов передачи и распределения синхросигналов. В результате создается основа синхросети. Затем, исходя из требований надежности в системе синхронизации, определяется общий уровень резервирования, т.е. количество дополнительных графов или участков графа синхронизации. В результате проектируется полная синхросеть. Эта система подвергается всестороннему анализу по параметрам синхросигналов на каждом участке, параметрам надежности и возможности появления «петель» в процессе резервного переключения с одного источника на другой. При необходимости (например, для устранения вероятности появления «петель» в системе) может измениться как резервная, так и основная топология синхросети. Таким

образом, процесс проектирования этого этапа является многопараметрическим и итерационным. Результаты расчета проектируемой синхросети в виде параметров синхросигналов каждого участка сравниваются затем с исходными требованиями к параметрам синхросигналов, в результате делается вывод о возможности развертывания этой системы синхронизации.

Сделать вывод о возможности развертывания можно путём измерений параметров синхросигнала на каждом участке. Результаты таких измерений сравниваются с результатами расчета этих параметров. В конце этого итерационного многопараметрического процесса развертывается синхросеть, которая и сдается в эксплуатацию.

В случае модернизации цифровой системы и сеть синхронизации, как правило, меняет свою топологию и параметры на участках. В результате весь описанный выше процесс необходимо повторить в полной мере с новыми требованиями к параметрам синхросети - из-за возможного взаимовлияния параметров различных участков: изменение параметров синхросигналов на одном из участков с неизбежностью скажется на всех остальных. Уменьшить затраты на прохождение пути, рис. Н.10, можно посредством использования методов линеаризации [4, 63], который следует применить к графу синхронизации.

XVI. Особенности построения СМС современных систем SDH

Поскольку концепция SDH в настоящее время является доминирующей технологией построения первичной сети в России, остановимся на особенностях построения СМС систем SDH. Таких особенностей несколько:

- использование в системах SDH иерархической топологии [4, 17];
- наличие механизма компенсации несоответствия частот (рассинхронизации) путём активности указателей в АСГ;
- широкое использование системы управления, в частности, сигналов SSM.

О первой особенности говорилось выше, и здесь не будем повторять полученных выводов.

Наличие в системах SDH механизма компенсации рассинхронизации методом смещения указателей приводит к важной особенности: *поток, передаваемый в контейнерах системы SDH, не может быть использован в качестве канала для передачи синхросигналов*. Поясним этот тезис. Любая рассинхронизация в аппаратуре передачи в системе SDH приводит к смещению указателей, в результате чего в составе передаваемого цифрового потока появляется джиттер. Для синхросетей джиттер недопустим в потоке передачи синхросигналов, поэтому трафиковые каналы SDH не могут использоваться для построения сети синхронизации и передачи синхросигналов. Выше говорилось, что синхроиформация является аналоговой в отличие от оцифрованных данных. Действительно, представим, что для передачи синхросигнала используется поток E1, передаваемый по сети SDH. Тогда любой сбой в синхросети приведет к появлению джиттера и в этом потоке. Поскольку поток используется для синхронизации, в том числе и аппаратуры передачи, наличие в нем джиттера приведет к усилению сбоя в системе синхронизации, в результате джиттер увеличится и т.д. вплоть до полной деградации синхросигнала. Налицо положительная обратная связь. Выход из этой ситуации достаточно прост: для синхронизации SDH-систем использовать линейный оптический сигнал (например, STM-1) или специальные сигналы, передаваемые не в синхронных контейнерах SDH. В первом случае само обо-

рудование SDH обычно позволяет выделять синхросигнал (в том числе по синхровходу T4 на мультиплексорах, [17]). Для этой цели оно оснащается интерфейсами приема и генерации синхросигналов.

Еще одной особенностью синхронизации систем SDH является широкое использование специальных сигналов - SSM, передающих информацию о параметрах синхросигнала. Эти сигналы передаются в системах SDH через байт S1 заголовка SOH и используются при реконфигурации системой управления [17]. Ниже отдельно рассмотрим технологию использования SSM в разделе, посвященном системе QoS.

XVII. Структура системы внутриузловой синхронизации (CBC)

Система CBC имеет локальное значение в системе связи. Её целью является достижение синхронной работы цифровых устройств в составе узла сети. При этом узел синхросети, как было описано выше, рассматривается в концепции СМС как один компонент. Ниже будем рассматривать внутреннее строение системы синхронизации каждого узла. Движущей силой развития концепции CBC, как и всей синхросети, является увеличение количества цифровых устройств. На этапе, когда количество цифровых устройств, входящих в состав узла невелико, возникла концепция «по цепи» (рис. Н.11).

В такой схеме синхросигнал от СМС приходит на оборудование системы передачи в виде двух сигналов с различным приоритетом (синхросигнал второго приоритета используется в случае реконфигурации СМС, когда синхросигнал первого приоритета значительно деградирует). Синхросигнал принимается аппаратурой передачи и затем от него по цепи синхронизируется все остальное оборудование узла. Для повышения стабильности синхросигналов и увеличения надежности CBC предусматриваются как прямые, так и резервные каналы передачи синхросигналов "по цепи".

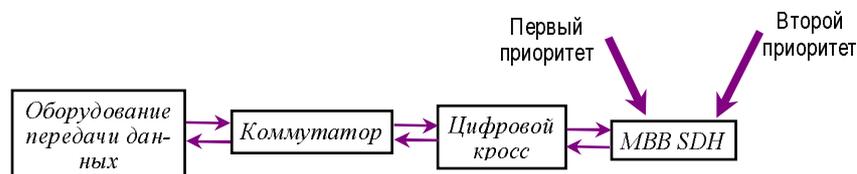


Рис. Н.11. Внутриузловая синхронизация "по цепи"

Такая концепция оказывается эффективной, когда на узле размещается небольшое количество цифровых устройств. В случае увеличения количества последних удлиняются соответственно цепочки распределения синхросигналов, в результате конечное устройство в цепочке получает синхросигнал низкого качества. Усиление требований к параметрам синхронизации (и, в первую очередь, на частоту проскальзываний) во вторичных сетях, привело к тому, что концепция синхронизации "по цепи" оказалась практически неприменимой для систем связи в последнее время. Ей на смену приходит концепция BITS СМС (само понятие BITS как концепция появилось именно в результате локальной революции в СМС). Смысл концепции BITS в СМС состоит в изменении топологии: от синхронизации "по цепи" к радиальной топологии синхросети [4] (рис. Н.12).

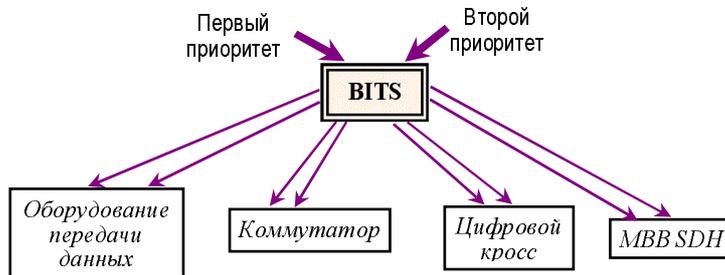


Рис. Н.12. Внутриузловая синхронизация BITS

В этом случае в составе узла размещается специализированный источник синхросигнала - источник BITS, от которого синхронизируется все остальное оборудование узла прямыми каналами передачи. В качестве источника BITS может использоваться как специализированный генератор (TSG - Timing Signal Generator), так и встроенный генератор одного из цифровых устройств. В последнем случае рекомендовано выбирать в качестве генератора BITS наилучший по параметрам генератор, входящий в состав узла.

Концепция BITS позволяет значительно улучшить параметры синхронизации вторичных сетей, по этой причине она стала повсеместно внедряться в системах синхронизации. Однако такое внедрение требует изменения топологии СВС. В ряде случаев оно оказывается невозможным, поскольку оборудование не обеспечивает режима работы с внешним опорным сигналом. Дело в том, что синхронизация "по цепи", представленная на рис. Н.13, дает возможность использовать для передачи синхросигнала трафиковые каналы. В этом случае оборудование работает в режиме синхронизации по входам цифрового потока. В случае BITS принцип работы оборудования меняется: оно должно работать в режиме принудительной синхронизации от внешнего источника. Основным отличием BITS от концепции "по цепи" является то, что в первом случае каналы передачи синхросигналов и трафиковые каналы являются принципиально независимыми и, более того, концепция BITS предусматривает построение наложенной независимой сети синхронизации внутри узла. Ряд моделей оборудования передачи и коммутации не были подготовлены к внедрению такой концепции. В результате нашли применение различные комбинированные схемы СВС, когда часть оборудования синхронизируется старыми методом по цепи, а часть - новым, через TSG. В этом случае TSG становится одним из элементов цепи (рис. Н.13).

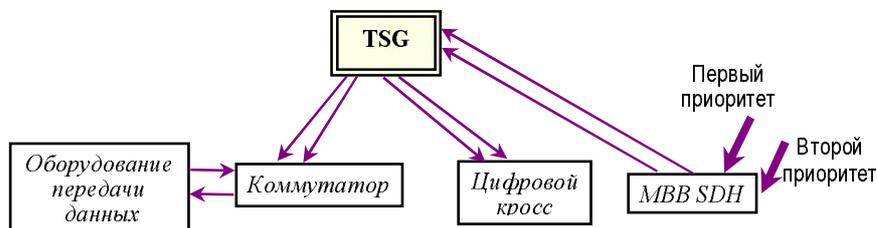


Рис. Н.13. Комбинированная схема внутриузловой синхронизации

Следует отметить, что комбинированные схемы СВС часто применяются при внедрении концепции BITS на конкретном узле, когда для данного узла закупается

TSG-оборудование и начинается последовательное преобразование топологии синхронизации от линейной к радиальной. Этот вариант, хотя не полностью, позволяет применить новую концепцию, тем не менее уменьшает количество транзитных узлов для синхросигнала. С этим связана важная особенность BITS - она может внедряться последовательно, в результате чего качество системы СВС улучшается.

XVIII. Принципы работы генератора BITS

Рассмотрим здесь кратко принципы работы генератора BITS (рис. Н.14), так как именно этот элемент является основой СВС. Генератор BITS представляет собой отдельное устройство [60], выполняющее функции приема и распределения синхросигналов, поэтому его функции можно разделить на четыре группы:

- выделение синхросигнала из входящего цифрового потока;
- восстановление, если необходимо, параметров синхросигнала (функция *get-timing*);
- взаимодействие с СМС в том смысле, что генератор BITS должен принимать решение о переходе на резервный канал синхронизации при неисправности основного канала;
- распределение синхросигналов для синхронизации цифрового оборудования узла.

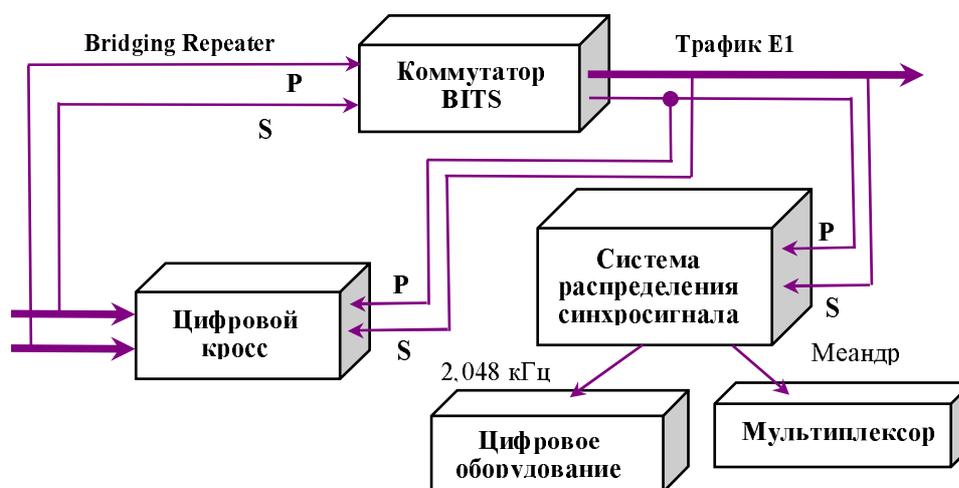


Рис. Н.14. Принципы работы генератора BITS

Для выполнения всех перечисленных функций генератор BITS должен иметь в своем составе несколько функциональных модулей. Первым модулем является модуль приема синхросигналов. Обычно генератор подключается к входящему цифровому потоку в режиме пассивного мониторинга (на рисунке показано высокоомное включение - Bridged Repeater) и без нарушений передачи трафиковой информации выделяет синхросигнал.

Затем синхросигнал поступает на коммутатор синхросигналов BITS, который выполняет функции перехода на резерв в случае сбоя основного канала синхронизации. В состав коммутатора входит обычно собственный источник синхрочастоты, который находится в режиме принудительной синхронизации от принимаемого сигнала. Сравнение параметров принимаемого синхросигнала и сигнала, генерируемого источником, дает возможность принимать решение о деградации первого и необходимости перехода на резерв. Кроме того, внутренний источник может использоваться для "вычищения" принимаемого синхросигнала от джиттера и вандера. Такая процедура называется процедурой восстановления качества синхросигнала (retiming) [17].

Наконец, выходной сигнал коммутатора поступает на блок распределения синхросигналов, основная задача которого - преобразование синхросигнала на выходе коммутатора в сигналы, необходимые для синхронизации оборудования.

В настоящее время для синхронизации используется большое количество форматов сигналов, самыми распространенными как упоминалось в разделах 2.1 и 2.2, являются [17]:

- цифровой сигнал 2048 кбит/с с кодированием HDB3;
- гармонический одночастотный сигнал с частотой 2048 кГц;
- гармонический одночастотный сигнал с частотой 10 кГц;
- гармонический одночастотный сигнал с частотой 5 кГц;
- сигнал TTL в виде прямоугольного импульса (меандра);
- сигналы синхронизации формата IRIG [4].

Все приведенные выше форматы синхросигналов могут встретиться в современных телекоммуникационных системах, поэтому блок распределения синхросигналов имеет весьма важное значение для реализации концепции BITS.

Возвращаясь к рис. Н.12 и Н.13, следует отметить, что представленные там схемы синхронизации внешне выглядят противоречивыми. Действительно, оборудование передачи, непосредственно принимающее синхросигнал от другого узла, синхронизируется через транзит BITS, что является довольно спорным решением в том числе в смысле количества транзитных узлов. Но необходимо отметить, что спорность решения является только внешней, поскольку генератор BITS выполняет функции не только приема и распределения синхросигналов, но и восстановления его параметров. Следовательно, *транзит через BITS не ухудшает, а обычно улучшает параметры синхросигнала.*

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Принципы построения асинхронных систем передачи

Приведено краткое описание основ построения цифровых асинхронных систем передачи.

I. Принцип работы асинхронных систем передач

Существуют два основных вида передачи цифровых сигналов, приводящих к фундаментально отличающимся способам установления *временной базы* (тактовой частоты для определения моментов принятия решения) в приемном устройстве на цифровой линии. Одним из них является асинхронная передача, которая состоит в независимости какого-либо одного процесса передачи групп битов от остальных аналогичных процессов, происходящих в сети. Так, внутри отдельной группы битов для каждого отдельного сигнала используется свой специальный, определенный заранее временной интервал, в общем случае зависящий от содержания этого приложения. И, что важно, моменты передачи групп таких битов по разным направлениям в сети *не связаны* друг с другом. Поэтому в каждом приемном устройстве тактовая частота устанавливается *заново* – под эту конкретную группу.

При втором способе, называемом *синхронной передачей*, цифровые сигналы посылаются непрерывно с постоянной битовой скоростью. В этом случае все приемные устройства должны формировать и поддерживать колебание с тактовой частотой, равной частоте всех передатчиков, каждый из которых *синхронизируется* с входящим цифровым сигналом в течение *неограниченного периода* времени.

Ниже кратко представлены базовые основы построения асинхронных систем передач. Между периодами передачи асинхронная линия находится в неактивном, или незагруженном состоянии. Начало каждой группы передачи обозначается *стартовым* битом(ми). Ширина стартового импульса на приеме измеряется и определяется его середина*. Отсчеты импульсов последующих информационных битов берутся с номинальной частотой, начиная от середины* интервала второго бита в этой группе. По завершении передачи информационных битов передается один или большее число стоповых битов, что позволяет линии вернуться в неактивное состояние.

Обнаружение каждого бита информации в группе выполняется путем добавления *идеальной длительности отсчета* в принимаемом сигнале к середине каждого вычисляемого таким способом предыдущего тактового интервала. На практике моменты взятия отсчетов отклоняются от идеального положения на величину, зависящую от степени изменения формы стартового импульса – из-за шумов и искажений при его передаче. Поскольку моменты взятия отсчетов для каждого информационного бита определяются на базе малого количества стартовых битов, асинхронные системы плохо работают при высоких уровнях шумов и искажений.

* Имеется в виду в случае приёмного устройства, принимающего решение по моменту стробирования, т.е. типа в), раздел I настоящей монографии.

Действительно, увеличение количества стартовых битов приводит к снижению скорости доведения информации до абонента и усложнению приёмника, уменьшение их количества – к снижению качества передаваемой информации.

В асинхронных системах также имеют место ошибки хронирования, если номинальное значение тактовой частоты в приемнике численно отличается от номинального значения скорости передачи в передающем устройстве. Даже если стартовый бит дает возможность определить правильную начальную фазу колебания тактовой частоты, смещение тактовой частоты приемника вызывает сдвиг каждого последовательно идущего момента. Использование самого термина «асинхронный» подразумевает наличие *автономного генератора* в приемнике, следовательно, определенный сдвиг неизбежен во всех асинхронных системах. Максимальная длительность определения первоначальной фазы и максимальной ожидаемой разности частот генераторов передатчика и приемника.

Основной привлекательной чертой асинхронного способа передачи является простота определения моментов взятия отсчетов сигнала в приемнике. В дополнение к этому асинхронная передача является по своему существу гибкой с точки зрения работоспособности системы в диапазоне средней степени её загруженности. При высокой загруженности биты передаются один за другим и асинхронная система, возможно, будет менее оптимальна, чем синхронная. При пониженной плотности загрузки асинхронная система автоматически приспособливается путем увеличения пауз между знаками. В противоположность этому синхронный приемник должен отследить изменение скорости в передатчике, прежде чем он сможет правильно взять отсчеты входного сигнала. Обычно тактовый генератор синхронной системы перестраивается очень медленно и в узком диапазоне. Следовательно, асинхронная система более подходит для тех применений, когда битовая скорость передачи *меняется*.

Синхронные системы также могут выдержать передачу информации с переменной скоростью, но при этом задача подстройки под требуемую скорость передачи будет решаться за счет процессов более высокого уровня (протокола канального уровня), при которых в цифровой поток необходимо вводить кодовые комбинации, соответствующие *нулевой информации* [25]. Эти комбинации используются для заполнения цифрового потока, когда источнику *нечего передавать*. Такую форму передачи иногда называют *изохронной* [25]. Изохронный вид работы необходим, когда синхронная линия используется для передачи данных от асинхронного источника.

Еще одной привлекательной чертой асинхронной передачи является то, что этот вид работы автоматически обеспечивает *синхронизацию по битам (знакам, циклам, и т.д.)*. Следовательно, если речевой сигнал, преобразованный посредством ИКМ, передается асинхронно, то стартовый и стоповый биты автоматически определяют границы кодовой комбинации. При синхронной передаче для синхронизации по кодовым комбинациям необходимо принимать дополнительные меры – организовывать систему тактовой сетевой синхронизации.

К основным недостаткам асинхронной передачи относятся ее большая чувствительность к ошибкам на линиях с высоким уровнем шумов и относительно большая избыточность, необходимая для хронирования – подстройки под задаваемую битовую скорость. Поэтому асинхронная передача наиболее подходит для тех применений, где стоимость реализации системы имеет большее значение, чем отношение сигнал-шум и отведенная полоса пропускания [25]. Асинхронная передача

используется в модемах на скоростях передачи до 1200 бит/с. В ряде случаев находит применение некоторая смешанная система, называемая также «пинг-понг» [25] – когда заранее нет определённости в битовой скорости, но момент передачи определён. Здесь может достигаться оптимизация по количеству стартовых и стоповых битов.

II. *Современные системы передачи, использующие асинхронный режим*

В настоящее время со стороны как сетевых операторов, так и пользователей, выбирающих для своих нужд ту или иную систему коммуникаций, всё больший интерес проявляется к сетям с *асинхронным режимом передачи* или ATM-сетям. ATM – это новейшая технология, которая специально разработана, чтобы осуществлять передачу смешанного широкополосного трафика (например, тональных сигналов, видеосигналов, сигналов изображения и данных) между устройствами местной и/или региональной вычислительных сетей. В ATM используются пакеты фиксированной величины, называемые *ячейками* [4], для передачи информации по устанавливаемым соединениям. ATM может поддерживать все виды трафика, в том числе и на чрезвычайно высоких скоростях передачи [4].

При разработке концепции ATM специалисты исходили из необходимости объединить различные типы трафика и различные требования к его передаче. При этом решалось несколько стратегических вопросов.

Первым был выбор типа доступа к среде передачи, или, как любят говорить, – мультиплексирования: синхронное или асинхронное. Напомним, что *синхронное мультиплексирование* предусматривает выделение определенной полосы передачи для каждого источника сообщений. Примером такого мультиплексирования является TDM, применяемое в системах ИКМ [4]. *Асинхронное мультиплексирование* обеспечивает более гибкое использование полосы передачи, поскольку предусматривает загрузку канала по мере поступления данных от источника. Наиболее часто этот метод мультиплексирования используется в сетях передачи данных с пакетной коммутацией (с протоколами X.25, Frame Relay и т.д.). В результате стандартизации было предложено ориентироваться при разработке новой концепции цифровых систем передач на принцип асинхронного мультиплексирования.

Согласно [4], технология ATM оказалась в плане передачи данных менее экономной и эффективной, чем классические технологии, например, Frame Relay. Эффективность технологии ATM в настоящее время лишь приближается к эффективности сети Frame Relay при передаче больших массивов данных. Тем не менее явные преимущества технологии ATM, заключающиеся в возможности интегрирования сетей передачи данных, ISDN и широкополосных мультимедийных и видео-сетей, стимулируют ее бурное развитие в последние годы.

Основной отличительной особенностью ATM как технологии является интеграция в одной сети трафика *различной структуры*. Это удобное качество сети ATM сильно повлияло на внутреннюю структуру последней, поскольку для передачи разных типов трафика к сети предъявляются различные требования. Поэтому внутри сети ATM необходима реализация алгоритмов разделения трафика на классы и осуществление процедур контроля качества (Quality of Service - QoS) для каждого класса трафика. Объединение разнородного трафика привело к высокой сложности таких алгоритмов. Более подробно их описание можно найти в [4].

В целом все параметры качества ATM разделяются на следующие группы по определённым признакам:

- по скорости передачи;
- неравномерности трафика (частоте всплесков, их уровню, и т.д.);
- временным характеристикам передаваемых ячеек.

Для каждой из этих групп назначается своя подсистема контроля QoS, определяется перечень параметров, характеризующих ту или иную особенность передачи трафика ATM по сети. В результате для каждого класса трафика устанавливается свой набор параметров, учитывающий его особенности. Значения этих параметров QoS определяют так называемый *графиковый контракт* или *критерий качественной и некачественной услуги* [4].

В большинстве случаев так же, как и в ИКМ-системах, основные параметры являются производными от величины BER (или что то же – от вероятности ошибки *PE*). Обычно они разделяются на две подгруппы: непосредственно связанные с регистрацией ошибок в системе передачи и связанные с готовностью канала. Основное отличие в ATM заключается в том, что трафик передается в виде ячеек. В случае ошибки в ячейке, она уничтожается на стороне приемника (дискартируется). Поэтому отдельные измерения BER не характеризуют работоспособность системы передачи. Для технологии ATM имеет смысл рассматривать в качестве основного не параметр битовых ошибок (BER), а параметр *блоковых ошибок* (BLER), считая в качестве блока всю ячейку. Здесь лишь отметим, что с учетом замены BER на BLER параметры системы передачи ATM аналогичны параметрам каналов PDH или SDH.

Для повышения надежности и управляемости сети ATM используются специальные сигналы о неисправностях, которые передаются в виде потоков *служебных ячеек*, получивших название ячеек OAM (Operating and Maintenance - обслуживание и управление). Сегодня в нормативных документах предусмотрено пять потоков передачи ячеек OAM (поток служебных ячеек эквивалентен создаваемому в ИКМ-сетях каналу передачи сообщений о неисправностях), которые также оповещают систему о неисправностях на физическом уровне, регенераторной секции, мультиплексорной секции и маршруте высокого уровня.

Отличительной особенностью технологии ATM относительно других технологий первичной сети является то, что в сети ATM имеется всего два типа устройств - коммутаторы ATM и устройства доступа ATM. Таким образом, в отличие от технологии SDH, структура сети ATM выглядит проще. Устройства пользователя имеют доступ в сеть через специальное устройство доступа DSU (Data Service Unit), которое обеспечивает пакетизацию данных, т.е. формирование потока ячеек, передачу служебной информации, а также поддержку протоколов установления и разрушения ячеек различного уровня в сети ATM.

Вместе с тем за кажущейся простотой структуры ATM-сети скрывается определенная сложность, связанная с тем, что сама технология ATM родилась как *интегрирующая* технология, обеспечивающая взаимодействие различных протоколов и подсистем сигнализации, а также различных технологий телефонии и передачи данных.

Для обеспечения взаимодействия различных систем в составе сети ATM имеются несколько типов различных интерфейсов, основные типы которых перечислены ниже:

- интерфейс пользователя UNI для подключения DSU к сети. Может также использоваться для межсетевых соединений;
- межсетевой интерфейс NNI, который может быть обычным (NNI) или ведомст-

венным PNNI (Private NNI), в последнем случае логическая структура интерфейса достаточно сложна [4];

- для взаимодействия между широкополосными сетями используется широкополосный интерфейс взаимодействия операторов (B-ICI - Broadband Inter-Carrier Interface);
- для взаимодействия с сетью передачи данных в ATM используются шлюзы IWF (InterWorking Function), которые представляют собой логические интерфейсы конвертации протоколов передачи данных, такие как FUNI и LANE;
- для взаимодействия между DSU и DTE используется интерфейс обмена данными DXI (Digital Exchange Interface).

III. *Взаимодействие технологий ATM и SDH*

В последнее время вопрос о взаимодействии технологий ATM и SDH усиленно обсуждается в отечественной технической прессе, давая возможность формироваться различным мнениям. Следует отметить, что сама технология ATM позволяет строить сети двух типов: сети чисто ATM, использующие в качестве транспортной среды волоконно-оптический кабель или радиорелейные средства связи, и сети ATM/SDH, в которых технология SDH используется как технология первичной сети, поверх которой развертывается сеть ATM. Вообще говоря согласно [4], SDH в определённой степени служит стандартом физического уровня протокола ATM.

Не исключено, что второе решение является более предпочтительным, поскольку объединяет в себе преимущества обеих технологий, а именно высокую надёжность и управляемость SDH с гибкостью статистического мультиплексирования, используемого в ATM.

Вместе с тем ориентация решений на чистую технологию ATM также имеет свой резон – в упрощении структуры сети.

Вероятно, наиболее правильным подходом является ориентация на технологию чисто ATM при построении корпоративных сетей небольшого размера и ATM/SDH - при построении больших магистральных сетей. Неявно именно такой подход присутствует в настоящее время в решениях отечественных и зарубежных системных интеграторов [4]. Открытым в этом случае остается вопрос о размерах сети, в которых наиболее эффективным становится решение ATM/SDH. Безусловно, реальный практический опыт по внедрению технологии ATM позволит найти оптимальное решение этого вопроса.