

## 5. Фазовые помехи

### 5.1. Основные виды фазовых помех

К фазовым помехам относятся упоминавшиеся джиттер (jitter – дрожание) и вандер (wander – странствие) [2], причем вандер – “враг номер один”, так как он неуклонно стремится вызвать проскальзывание, в то время как джиттер легче гасится буферной памятью типа FIFO. Тот и другой имеют одинаковую сущность, которая состоит в паразитной частотной модуляции синхросигнала сигналами высокой (джиттер) или (и) низкой (вандер) частоты. (Своего рода иллюстрацией вандера может служить звучание аккордеона, особенно если пытаться играть медленно и негромко.) Частотная граница между джиттером и вандером обычно принимается равной 10 Гц. Характер искажений поясняется рис. 5.1.

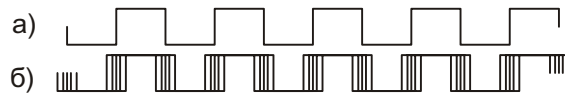


Рис. 5.1. Проявления джиттера и вандера: а – осциллограмма сигнала без помех; б – осциллограмма сигнала при воздействии джиттера или (и) вандера

Происхождение таких искажений может быть вызвано многими факторами. Некоторые из них: перекрестные помехи в линии; пульсации напряжения питания источника и приемника сигналов; неблагоприятные кодовые комбинации при формировании выходного сигнала линейным передатчиком; механическая вибрация (при которой некоторые радиоэлектронные элементы могут работать как преобразователи механической энергии в электрическую); дневные – ночные перепады температуры (сверхнизкочастотный вандер).

### 5.2. Идея построения адаптивного фильтра для подавления фазовых помех

Рассмотренная далее идея, в сущности, проста. Входной поток данных, подверженный фазовым помехам, можно сопоставить с непрерывным, но пульсирующим потоком S1 воды, который втекает в бак (буферную память типа FIFO), предварительно заполненный примерно до середины (рис. 5.2). При равенстве средних скоростей втекающего S1 и вытекающего S2 потоков воды уровень заполнения бака стабилен, но скорость вытекающего потока в меньшей степени подвержена пульсациям, чем скорость втекающего.

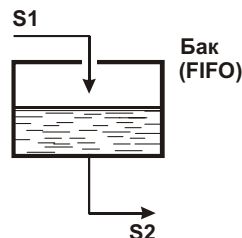


рис. 5.2. Идея подавления пульсаций скорости потока в общем виде

Теперь – то же самое, но чуть более подробно. Схема, показанная на рис. 5.3 [2], позволяет уменьшить уровень искажений входного сигнала, вносимых джиттером и вандером.

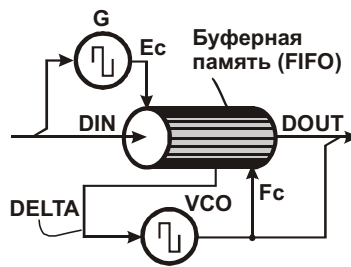


рис. 5.3. Схема фильтра для подавления паразитной частотной модуляции синхросигнала

В схеме используется буферная память типа FIFO с индикатором уровня ее заполнения. Этот индикатор формирует постоянное напряжение DELTA, которое по знаку и величине пропорционально отклонению уровня заполнения памяти от отметки “50%”.

Генератор VCO, управляемый напряжением, способен под действием сигнала DELTA изменять частоту в небольших пределах. При  $DELTA = 0$  частота выходного сигнала  $F_c$  близка номинальной. При  $DELTA > 0$  частота повышается, при  $DELTA < 0$  – снижается.

Предположим, что в исходном состоянии буферная память заполнена на 50%, генератор G с автоподстройкой частоты выделяет из входного сигнала синхросигнал  $E_c$ , сепаратор данных (на рисунке не показан) восстанавливает данные DIN и передает их на вход памяти. Считывание данных из памяти происходит под управлением сигнала  $F_c$ .

При наличии джиттера в сигнале  $E_c$  уровень заполнения памяти совершает относительно быстрые колебания, что отражается в виде соответствующих колебаний напряжения на управляющем входе генератора VCO. Благодаря достаточной инерционности генератора и слабой крутизне его характеристики напряжение – частота, сигнал  $F_c$  на его выходе “дрожит” в меньшей степени, чем сигнал  $E_c$ , причем высокочастотные компоненты джиттера подавляются лучше, чем низкочастотные.

При наличии вандера в сигнале  $E_c$  колебания уровня заполнения памяти имеют низкую частоту, поэтому инерционность генератора VCO уже не может служить средством его подавления. Из-за большого периода колебаний возрастает опасность переполнения или опустошения памяти. (Слишком сильно увеличивать объем памяти нельзя, так как при этом неоправданно увеличивается задержка передачи данных.) В данном случае генератор VCO до некоторой степени предохраняет память от переполнений и опустошений путем соответствующего слабого повышения или снижения частоты выходного сигнала  $F_c$ . Но низкочастотные компоненты вандера, к сожалению, проходят через такой фильтр.

Интересно отметить, что огромная проникающая способность низкочастотных компонентов вандера при его распространении по телекоммуникационной сети может быть обращена во благо. Для прослеживания трасс распространения синхросигнала от некоторого источника в этот синхросигнал вводится искусственный вандер с заранее заданными параметрами. Обнаружение такого вандера в некотором удаленном узле сети свидетельствует о том, что трасса распространения синхросигнала пролегает через этот узел (см. п. 6.4).

### 5.3. Вариант схемной реализации аттенюатора джиттера

Напомним содержание задачи. Передатчик и приемник соединены линией связи, которая может содержать ретрансляторы или иные устройства – мультиплексоры, коммутаторы и т. п. (рис. 5.4). В приемнике имеется сепаратор, который выделяет из ли-

нейного сигнала данные DIN и сопровождающий их синхросигнал CIN. В силу ряда причин выделенные из линии сигналы DIN и CIN отличаются от идеальных. Это проявляется прежде всего в наличии джиттера. Для его подавления применен аттенюатор, структура которого приведена на (рис. 5.5) [12].

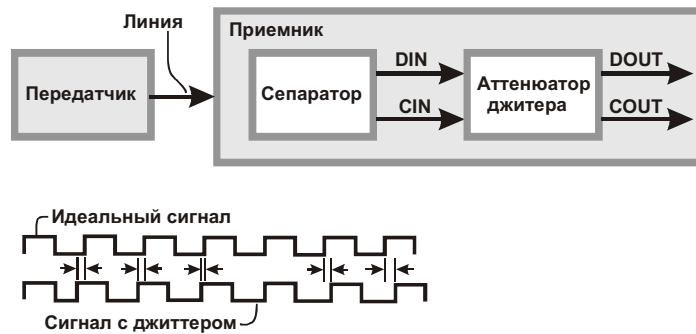


рис. 5.4. Система передачи данных, структура приемника и временные диаграммы, поясняющие проявление джиттера

В стандартах на телекоммуникационную аппаратуру введены жесткие ограничения на допустимый джиттер. Так, согласно стандарту 62411 фирмы AT&T, джиттер синхросигнала не должен превышать 2% длительности периода. Например, в стандарте T1 для скорости передачи 1,544 Мбит/с синхросигнал имеет частоту 1,544 МГц; длительность периода синхросигнала составляет примерно 648 нс, допустимый джиттер не должен превышать 12,96 нс.

Предположим, что выделенные из линии сигналы DIN и CIN не удовлетворяют указанным требованиям. Тогда задача состоит в построении аттенюатора, который должен уменьшить джиттер до допустимых пределов. Рассмотрим структуру аттенюатора.

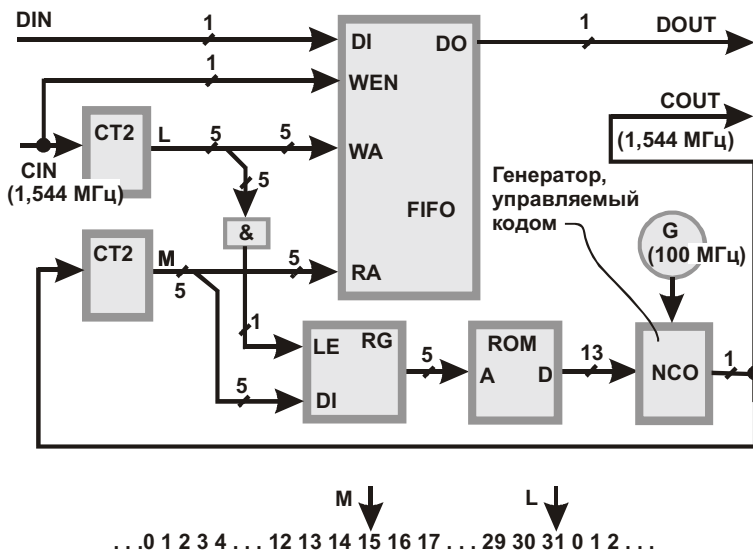


рис. 5.5. Структура аттенюатора джиттера и последовательность состояний пятиразрядных двоичных счетчиков СТ2. Цифрами на схеме обозначено число проводов в соответствующих соединительных линиях

Аттенюатор содержит буферную память типа FIFO, два пятиразрядных двоичных счетчика СТ2, пятиходовый логический элемент И, пятиразрядный регистр-защелку RG, ПЗУ (ROM), кварцевый генератор G и генератор, управляемый кодом (NCO). На входы аттенюатора поступают сигналы данных и синхронизации DIN и CIN с недопустимо высоким уровнем джиттера. На выходах аттенюатора формируются соответствующие сигналы DOUT и COUT с приемлемым уровнем джиттера.

Буферная память содержит 32 одноразрядные ячейки. Данные для записи в память поступают на вход DI. Адрес ячейки, в которую записываются данные, задается пятиразрядным кодом на входах WA памяти. Момент записи определяется фронтом сигнала на управляющем входе WEN. Адрес ячейки, из которой считываются данные, задается пятиразрядным кодом на входах RA. Считывание выполняется асинхронно, т. е.

не сопровождается каким-либо внешним управляющим сигналом на входе блока памяти.

Считанный бит данных поступает на выход DO. Операции записи и чтения выполняются независимо одна от другой, при этом не исключено, что адреса записи и чтения могут совпасть. Но такие ситуации возможны только при начальном вхождении устройства в синхронизм. В установившемся режиме адрес L записи “опережает” адрес M считывания примерно на половину адресного диапазона, как показано в нижней части рис. 5.5. При этом перебор адресов записи и чтения напоминает “гонку за лидером”, когда указатель M движется по “числовой оси”, соблюдая некоторую среднюю дистанцию по отношению к указателю L.

Двоичные пятиразрядные счетчики непрерывно подсчитывают число входных CIN и выходных COUT синхроимпульсов. Счет ведется по модулю 32, т. е. после заполнения счетчика кодом  $11111_2$  новый цикл начинается с нулевого кода. Пятиходовый логический элемент И формирует на выходе сигнал лог. 1 при  $L = 11111_2$ . Этот сигнал поступает на вход LE разрешения записи регистра-защелки RG и фиксирует в этом регистре код M. Таким образом, в регистре фиксируется пятиразрядный код, который, как отмечалось, в установившемся режиме соответствует примерно середине диапазона адресов 0 – 31.

Этот код поступает на адресные входы ПЗУ, в котором хранятся 32 13-разрядные константы управления частотой генератора NCO. Столь высокая разрядность констант выбрана для того, чтобы осуществлять очень “тонкую” подстройку частоты. Генератор NCO формирует выходной синхросигнал COUT путем деления входной частоты 100 МГц на 64 или 65, причем выбор того или иного коэффициента деления осуществляется динамически, на основе информации, содержащейся в 13-разрядной константе.

Сигнал от генератора G частотой 100 МГц задает дискретность моментов формирования фронтов выходного синхросигнала COUT, равную  $1/100 \text{ МГц} = 10 \text{ нс}$ . При “перескоке” с одного коэффициента деления частоты на другой и обратно фронты выходного сигнала будут “дрожать” с амплитудой 10 нс, но это уже допустимый джиттер. (Напомним, что норма стандарта 62411 фирмы AT&T, принятого в данном примере за основу, допускает амплитуду джиттера 12,96 нс.)

Аттенюатор функционирует следующим образом. Входные данные DIN записываются в буферную память со средней скоростью 1,544 Мбит/с. Мгновенная скорость может отличаться от средней из-за влияния джиттера, поэтому уровень заполнения (разность L – M) буферной памяти колеблется в такт с колебаниями скорости входных сигналов.

Периодически, через каждые 32 такта входного сигнала CIN, срабатывает логический элемент И, разность хода счетчиков запоминается в регистре RG. Если эта разность отклоняется от номинальной (равной 14 или 15), то константа, считываемая из ПЗУ, воздействует на генератор NCO так, чтобы, чуть увеличив или уменьшив частоту, компенсировать имеющееся отклонение.

Благодаря инерционности предлагаемой системы автоматического регулирования, выходной синхросигнал COUT отражает усредненную частоту входного сигнала CIN и подвержен джиттеру лишь в той степени, которая связана с необходимостью “тонкой” автоподстройки генератора NCO.

Схему генератора NCO и примеры построения множеств управляющих кодов можно найти в [12].

Рассмотренные решения позволяют ослабить фазовые помехи, причем со снижением их частоты степень ослабления уменьшается.

## 6. Методы синхронизации узлов сетей передачи данных

Эта глава посвящена методам и схемным решениям, обеспечивающим синхронную работу узлов сетей передачи данных. В общем виде задача заключается в передаче потока данных между источником и приемником через транспортную сеть, содержащую множество узлов (рис. 6.1). Источник данных, например мобильный телефон, передает в сеть кодированный сигнал, в котором данные (“оцифрованная” речь) смешаны с синхроимпульсами  $Sc$ . Мобильный телефон – приемник выделяет из полученного сигнала данные и синхроимпульсы  $Rc$  и восстанавливает речевой сигнал. Те же процессы протекают и при передаче потока данных в обратном направлении.

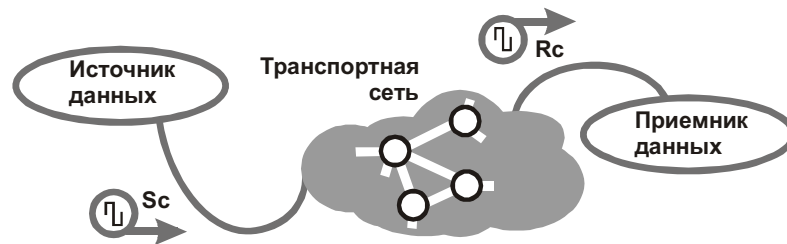


Рис. 6.1. Синхронная передача данных через транспортную сеть

Синхронизация состоит в обеспечении согласованной во времени работы источника и приемника данных. Одно из препятствий, которое нужно при этом преодолеть, связано с тем, что исходный синхросигнал  $Sc$  не может быть непосредственно передан приемнику (тогда транспортная сеть была бы просто не нужна). В общем случае этот сигнал в составе потока данных от источника вливается в более мощные потоки. В конечном счете сигнал  $Rc$  извлекается из соответствующего потока и передается в приемник. Для правильного взаимодействия узлов сети по трассе распространения потока данных необходимо выполнить некоторые условия.

1. По мере распространения сопровождающего данные синхросигнала в нем накапливаются фазовые помехи (джиттер и вандер). Поэтому в некоторых узлах сети нужно заменять этот сигнал более качественным, в котором фазовых помех нет, или, по крайней мере, их уровень незначителен. Где взять такой синхросигнал в узле сети? Его можно либо выделить из наименее искаженного входного сигнала, либо получить от автономного генератора (п. 6.1).

2. Система синхронизации сети по возможности должна использовать общий источник синхросигналов, чтобы уменьшить вероятность проскальзываний. При этом важно не допустить формирования замкнутых траекторий распространения синхросигналов между узлами сети в результате возникновения неисправностей линии или неправильных действий оператора (п. 6.2).

Системы синхронизации сетей с кольцевой структурой имеют некоторые особенности, рассмотренные в п. 6.3. Такие сети обладают повышенной надежностью, так как при отказе одной линии все узлы остаются доступными для обмена данными. Система синхронизации адаптируется к отказу линии, а после его устранения автоматически возвращается в исходное состояние.

В конце главы (п. 6.4) приведен метод зондирования сетей для выявления трасс распространения синхросигналов. В качестве зонда используется синхросигнал с искусственно введенным в него низкочастотным вандером. Этот сигнал регистрируется в узлах сети, соответствующих трассам его распространения. В результате анализа этих трасс можно проверить правильность построения системы синхронизации и, в частности, обнаружить недопустимые заикливания цепей передачи синхросигнала.

## 6.1. Обновление синхросигнала на пути его распространения по сети

Для более детального ознакомления с функционированием системы синхронизации сети, показанной на рис. 6.1, рассмотрим ее упрощенную модель (рис. 6.2) [2].

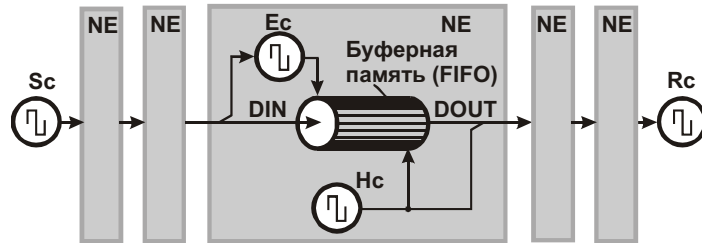


Рис. 6.2. Упрощенная модель сети, показанной на рис. 6.1

В этой модели трасса передачи данных от источника к приемнику проходит через последовательность удаленных друг от друга устройств NE (Network Equipment – оборудование сети). В каждом устройстве NE имеется буферная память типа FIFO.

Каждый узел выделяет из входного сигнала синхроимпульсы  $E_c$  и данные  $DIN$ . Синхроимпульсы  $E_c$  формируются с помощью местного генератора с фазовой автоподстройкой частоты. Данные  $DIN$  под управлением синхроимпульсов  $E_c$  заносятся в буферную память типа FIFO и последовательно продвигаются к ее выходу.

Данные  $DOUT$  считываются из буферной памяти под управлением сигнала  $H_c$ . Номинальные частоты сигналов  $H_c$  и  $E_c$  совпадают, но сигнал  $H_c$ , как предполагаем, более близок к идеальному, чем сигнал  $E_c$ . Такое предположение оправдано тем, что линейный сигнал, из которого получен сигнал  $E_c$ , возможно, недостаточно стабилен, так как он претерпевает воздействия шумов в линии связи и иных факторов. (О вариантах происхождения сигнала  $H_c$  – чуть позже.)

Считанные данные  $DOUT$  смешиваются с синхросигналом  $H_c$  в соответствии с принятым методом кодирования и поступают в линию для передачи в соседнее устройство NE, где процессы повторяются. Таким образом, достигается обновление синхросигнала по мере его распространения по сети.

Как отмечалось, частота синхронизации на разных участках сети может быть различной. Описанный принцип замены “второсортных” синхросигналов высококачественными остается применимым для каждого участка.

Чтобы предотвратить проскальзывания, на начальном этапе передачи данных их считывание из буферной памяти имеет смысл начинать только после того, как память заполнится до некоторого минимально допустимого уровня, иначе будет велик риск ее полного опустошения, например, из-за временного незначительного снижения частоты сигнала  $E_c$ . После начального заполнения буферной памяти текущий уровень регулируется так, чтобы он находился в допустимых пределах, например от 10 до 90 % ее полного объема (см. гл. 4).

В установившемся режиме цепочка из устройств NE работает как единое целое, напоминающее спортивную эстафету. Качество синхросигналов ухудшается на дистанциях между устройствами, в основном из-за помех в линиях связи, но в достаточной мере восстанавливается каждым последующим устройством. Если в каждом узле в необходимых случаях происходит описанное ранее обновление синхросигнала, то можно ожидать, что при передаче потока данных в каждом устройстве NE уровень заполнения буферной памяти колеблется в допустимых пределах, проскальзываний не возникает или, по крайней мере, они происходят достаточно редко.

В схеме на рис. 6.2 использовался источник  $H_c$  синхроимпульсов высокой точности и стабильности. Как получить такие синхроимпульсы? Есть два варианта: 1) установить

местный генератор; 2) “извлечь” синхроимпульсы из сигнала, принимаемого по одному из имеющихся каналов, выбрав сигнал с наилучшим качеством. Оба варианта представлены на рис. 6.3.

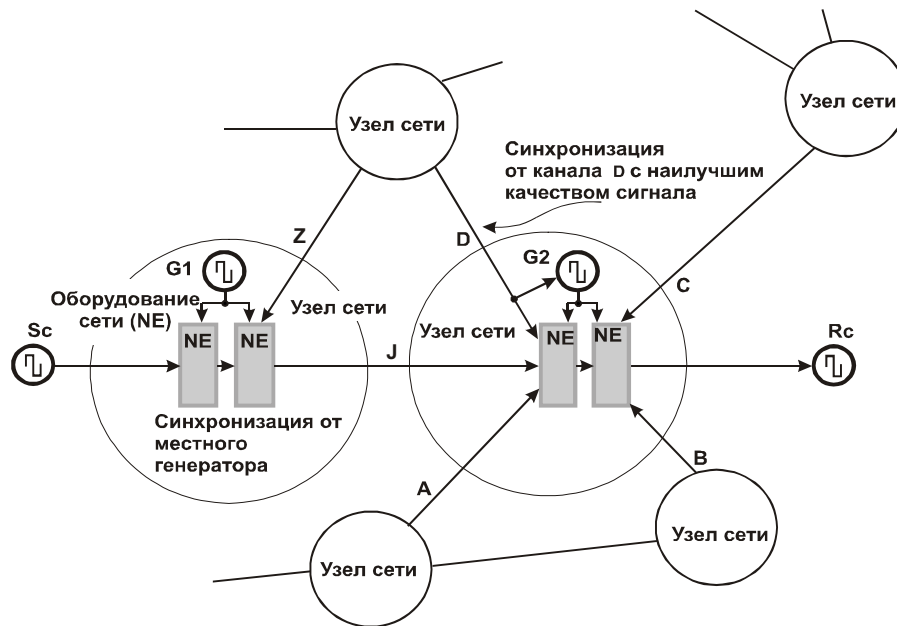


рис. 6.3. Варианты обновления синхросигнала при его распространении по сети

В данном примере на пути передачи исходного синхросигнала  $S_c$  (смешанного с данными) имеются четыре устройства NE. Первое и второе устройства размещены в первом здании и синхронизируются от местного генератора  $G_1$ , имеющего высокий уровень точности и стабильности. Качество сигнала по каналу  $Z$  невысокое, так как этот канал, так же как и канал  $J$ , сильно зашумлен. Третье и четвертое устройства размещены во втором здании, удаленном от первого. Эти устройства работают и с другими каналами (A, B, C, D). В канале  $D$ , как предполагаем, присутствует сигнал относительно высокого уровня точности и стабильности. Он и выбирается в качестве опорного синхросигнала  $S_c$  (см. рис. 6.2) для генератора  $G_2$  с фазовой автоподстройкой частоты.

Оба варианта обновления синхросигнала не лишены недостатков. Второй вариант подразумевает хорошее очищение восстановленного сигнала от паразитной частотной модуляции, проявляющейся в виде джиттера и вандера; но такое очищение достижимо далеко не всегда (см. гл. 5). Первый вариант может оказаться дорогим или громоздким, так как предполагает использование генератора высокой (по современным меркам) точности и стабильности. Далее кратко рассмотрена классификация таких генераторов и приведен пример построения самообучающегося генератора синхросигналов.

### Генераторы сигналов высокой точности и стабильности

При построении сетей передачи данных используются генераторы трех уровней точности и стабильности: Stratum 1, Stratum 2, Stratum 2E, Stratum 3, Stratum 3E (Stratum – слой) [2].

Уровень Stratum 1 – самый высокий. Гарантированная точность – не ниже  $\pm 1 \times 10^{-11}$ . Этот уровень уже надежно преодолен. Так, источник синхронизации STSC2010 на основе водородного мазера обеспечивает максимальную стабильность частоты, достижимую современной технологией, порядка  $10^{-14}$  (см. каталог фирмы Datum (США) на сайте [2]). Эта же фирма выпускает цезиевый источник синхросигна-

лов FTS4065B с кратковременной стабильностью  $10^{-12}$  и долговременной стабильностью  $10^{-14}$ .

Уровень Stratum 2 – более низкий, он гарантирует точность не ниже  $\pm 1,6 \times 10^{-8}$ . Генератор FTS1130 этого уровня выполнен на основе сверхстабильного кварцевого резонатора и обеспечивает стабильность уровня  $5 \times 10^{-11}$  в течение дня. Генераторы второго и третьего уровней выполняются также на основе рубидиевых источников синхросигналов.

Уровень Stratum 3 (Stratum 3E) гарантирует точность не ниже  $\pm 4,6 \times 10^{-6}$ .

В ряде решений применяется приемник спутниковых сигналов глобальной системы позиционирования GPS, что позволяет сравнительно просто сформировать сигнал уровня Stratum 1 и предоставляет возможность отслеживать абсолютное время. (Подробности – на сайте фирмы Datum [2].)

### Самообучающийся генератор синхросигналов

В сотовых системах передачи данных по радиоканалам имеется ряд базовых станций, распределенных таким образом, что в поле зрения движущегося объекта (автомобиля, самолета, и т. п.) постоянно присутствует как минимум одна станция. Движущийся объект по мере перемещения обслуживается разными базовыми станциями. Для гарантии качества связи базовые станции должны вести учет абсолютного времени с точностью  $\pm 3$  мкс. Такой уровень точности достигается при использовании сигналов от спутниковой глобальной системы позиционирования GPS.

При потере сигнала синхронизации от глобальной системы позиционирования станция должна переключиться на сигнал от внутреннего (автономного) высокостабильного и точного генератора. По параметрам приемлемы рубидиевые генераторы, но их стоимость высока. Можно построить наземную станцию для передачи запасных сигналов синхронизации базовым станциям, но такое решение также дорого.

В [5] предлагается использовать в качестве резервного кварцевый генератор с системой обучения (рис. 6.4).

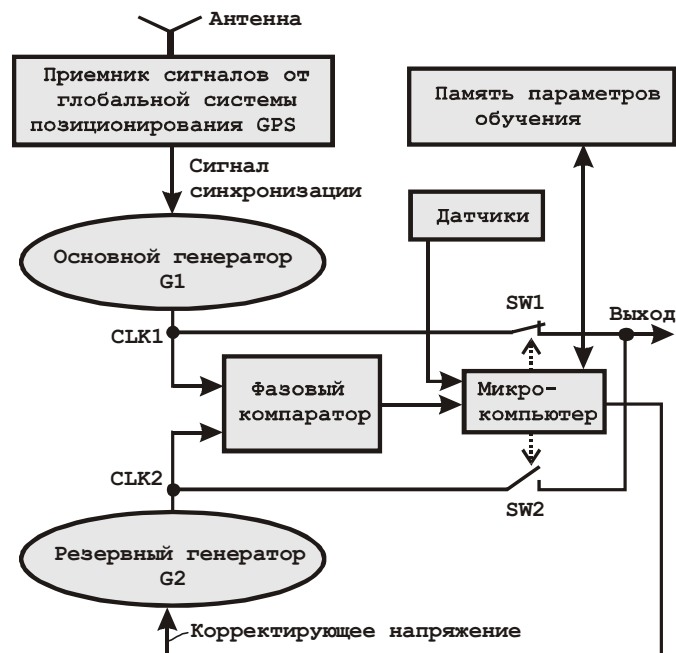


рис. 6.4. Резервированный генератор синхросигналов

В исходном состоянии приемник сигналов от глобальной системы позиционирования формирует импульсы синхронизации, которые воздействуют на основной генера-



тор G1. Электронный ключ SW1 замкнут, ключ SW2 разомкнут, на выход поступают сигналы CLK1 с выхода основного генератора.

Сигнал CLK2 с выхода резервного генератора сравнивается с сигналом CLK1. Если имеется несовпадение фаз, то микрокомпьютер стремится его скомпенсировать выдачей соответствующего корректирующего напряжения на управляющий вход резервного генератора G2 (кварцевый генератор допускает подстройку частоты в очень небольших пределах). Таким образом, сигналы CLK1 и CLK2 совпадают по частоте и имеют близкий нулю взаимный фазовый сдвиг.

Благодаря воздействию корректирующего напряжения компенсируются такие дестабилизирующие факторы, как старение кварцевого кристалла, колебания температуры, отклонение питающего напряжения от номинального и т. п.

При этом микропроцессорная система коррекции обучается вести себя так, чтобы в наилучшей степени приспособиться к изменяющимся внешним условиям в случае потери сигнала синхронизации от глобальной системы позиционирования или отказа основного канала.

Для этого в память параметров обучения записываются все существенные сведения, связанные с процессом управления генератором G2. Так, запоминаются уровни управляющих напряжений и соответствующие реакции со стороны генератора, вычисляются, проверяются и запоминаются оптимальные параметры управления и условия, при которых они достигнуты, обновляются многомерные таблицы, проводится интерполяция и т. д. Для регистрации условий проведения экспериментов микрокомпьютер опрашивает датчики температуры, влажности и проч. и сохраняет нужную информацию в памяти.

При потере сигнала синхронизации от глобальной системы позиционирования или в результате отказа основного канала (например из-за неисправности основного генератора) микропроцессор размыкает ключ SW1 и замыкает ключ SW2. В качестве выходного используется сигнал CLK2 от резервного генератора. Микропроцессор на основе накопленного опыта и получаемой с датчиков информации продолжает управлять резервным генератором так, как будто бы “ничего не произошло”.

После восстановления работоспособности основного канала устройство переходит в описанное ранее исходное состояние, а процесс обучения возобновляется.

Для повышения надежности устройства можно ввести второй, третий и т. д. резервные генераторы с индивидуальным обучением.

## 6.2. Предотвращение зацикливания синхросигналов

Как уже отмечалось, система синхронизации сети по возможности должна использовать общий источник синхросигналов, чтобы уменьшить вероятность проскальзываний. При этом важно не допустить формирования замкнутых траекторий распространения синхросигналов между узлами сети в результате возникновения неисправностей линии или неправильных действий оператора. Прежде чем привести решения, исключаящие зацикливание синхросигналов, рассмотрим типовую схему синхронизации участка транспортной сети при дуплексной передаче данных (рис. 6.5, а) [2].

В этой схеме начальный и конечный узлы участка транспортной сети синхронизируются от генераторов G наивысшего уровня точности и стабильности (STRATUM 1). Данные, смешанные с синхросигналами, передаются между устройствами NE (например мультиплексорами) одновременно в обе стороны, т. е. в дуплексном режиме.

Среда передачи данных между соседними устройствами NE – одна или две витые пары проводов, оптоволоконная линия и т. п. Скорости передачи данных в обоих направлениях (обозначенных стрелками) одинаковы. Приведенная на рис. 6.5, а схема достаточно распространена; она, например, может являться фрагментом замкнутого кольца из устройств NE в сети SONET/SDH.

Каждое промежуточное устройство NE (рис. 6.5, б) принимает линейные сигналы с обоих направлений, выделяет из них данные и синхросигналы. Для восстановления правильной синхронизации и фильтрации джиттера и вандера, как было показано ранее, используются блоки буферной памяти типа FIFO. Здесь и далее эти блоки не показаны для упрощения рисунков. Поэтому линии, проведенные на рисунках внутри устройств NE, нельзя рассматривать как прямые проводные связи между соответствующими точками. В данном случае штриховые линии отражают возможные пути передачи синхросигналов.

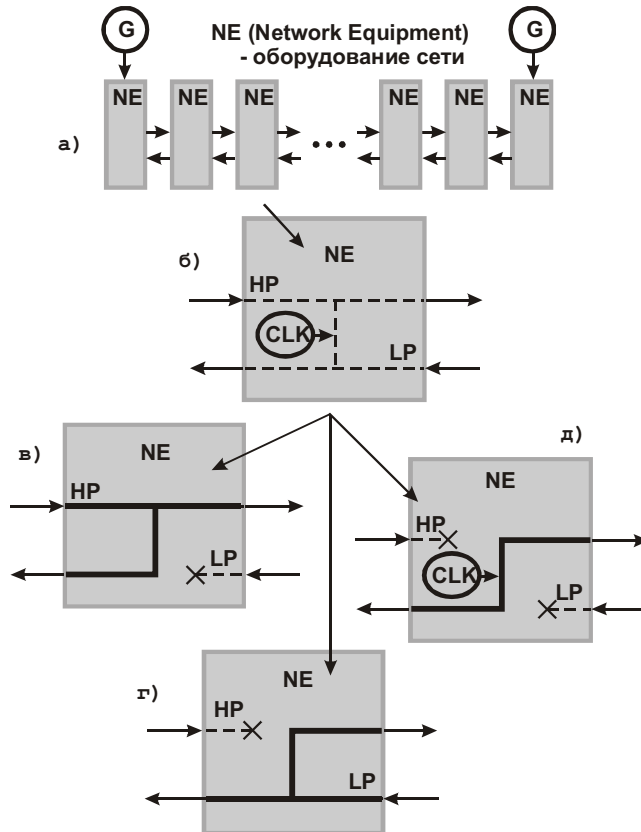


Рис. 6.5. Схема синхронизации участка транспортной сети при дуплексной передаче данных: а – общая структура цепи из устройств NE; б – структура одного из устройств NE; в, г, д – варианты настройки устройства NE

Промежуточное устройство NE содержит местный генератор CLK синхросигнала относительно невысокой точности и стабильности. (Было бы расточительным устанавливать генераторы уровня STRATUM 1 в каждом устройстве NE.) Этот генератор, как будет показано, используется кратковременно и только в критических ситуациях, в процессе оперативной автоматической замены источника синхронизации. Точность и стабильность генератора CLK, однако, должны быть достаточными для функционирования участка сети, пусть даже с повышенным уровнем ошибок. При нормальной работе этот генератор выключен, и для синхронизации выходных сигналов применяется синхросигнал, выделенный из входного, поступающего справа или слева, в соответствии с присвоенными им приоритетами.

Приоритеты отражают целесообразность использования выделенных из входного сигнала синхроимпульсов в качестве выходных. В данном примере (см. рис. 6.5, б) высокий приоритет HP присвоен левому, а низкий LP – правому входам устройства NE. Это означает, что при нормальной работе данные, выдаваемые устройством NE в обе стороны, синхронизируются сигналом, выделенным из левого (а не из правого) канала.

Промежуточное устройство NE можно настроить на работу в одном из трех режимов (рис. 6.5, *в, з, д*).

В первом режиме (рис. 6.5, *в*) для общей синхронизации используется сигнал с высокоприоритетного входа HP. Синхроимпульсы, выделенные из сигнала с низкоприоритетного входа LP, используются только для занесения соответствующих данных в буферную память и далее не распространяются, что условно отражено на рисунке “крестиком”. Утолщенными линиями показана трасса распространения основного синхросигнала.

Во втором и третьем режимах (рис. 6.5, *з, д*) для общей синхронизации используются соответственно сигналы с низкоприоритетного входа LP и от генератора CLK.

### Зацикливание синхросигналов

При построении сетей разработчики стремятся к тому, чтобы каждый узел синхронизировался сигналом уровня STRATUM 1. Но, как уже отмечалось, экономически (и, может быть, не только) нецелесообразно устанавливать автономный генератор этого уровня в каждом сетевом устройстве (например, мультиплексоре) или даже в группе устройств. Проще получить высокоточный и высокостабильный сигнал из канала связи после устранения в нем джиттера и вандера (или, по крайней мере, после их значительного подавления). Но при этом необходимо абсолютно точное знание “родословной” всех сигналов – кандидатов на использование в качестве опорных. Иначе могут появиться топологические “привидения” – циклы, не содержащие материального источника опорной частоты. Процесс возникновения такого цикла поясняется схемой, приведенной на рис. 6.6 [2].

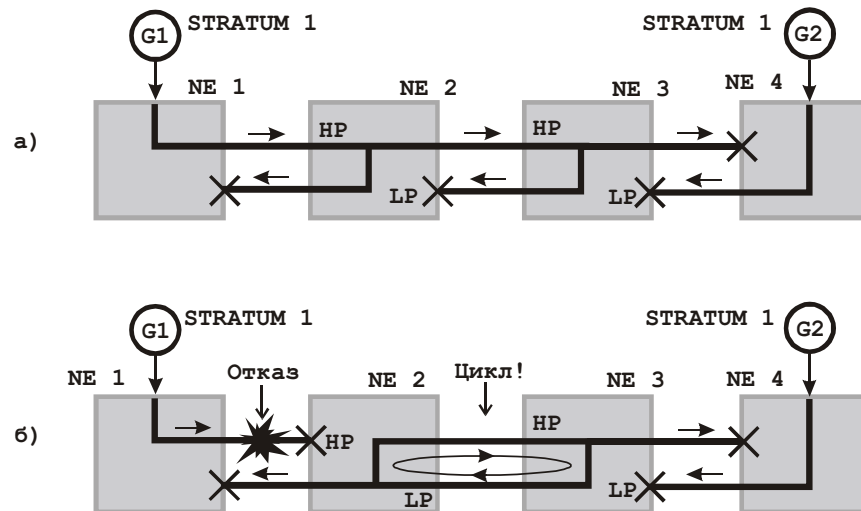


Рис. 6.6. Схема, поясняющая процесс возникновения ошибок синхронизации – циклов, лишенных опорного источника сигналов: *а* – исходное (работоспособное) состояние цепи из устройств NE; *б* – состояние цепи после отказа канала связи NE 1 → NE 2

В данном примере участок сети состоит из четырех устройств NE 1 – NE 4. Устройства NE 1 и NE 4 синхронизируются непосредственно от высоконадежных автономных генераторов G1 и G2 уровня STRATUM 1. Поэтому входные синхросигналы из каналов связи в этих устройствах используются только для ввода данных с соответствующего направления в буферную память.

В устройствах NE 2 и NE 3 (рис. 6.6, *а*) для синхронизации выходных сигналов использованы импульсы, выделенные с высокоприоритетных входов HP. Синхросиг-

налы с низкоприоритетных входов LP используются только для ввода данных в буферную память и прекращают дальнейшее распространение.

Таким образом, все устройства участка сети, показанного на рис. 6.6, а, синхронизируются сигналами уровня STRATUM 1: устройства NE 1, NE 2 и NE 3 – от генератора G1, а устройство NE 4 – от генератора G2. Как видим, всё сделано правильно.

Теперь предположим, что канал связи между устройствами NE 1 и NE 2 перестал работать в одном направлении, например в результате ухудшения изоляции в линейном кабеле (рис. 6.6, б). Этот факт прежде всего будет аппаратно зарегистрирован в устройстве NE 2 в результате полного отсутствия или поступления искаженного и ослабленного сигнала со стороны устройства NE 1. Устройство NE 3 не замечает случившегося и по-прежнему получает от устройства NE 2 сигнал синхронизации, правда, ухудшенного качества, так как генератор с автоподстройкой частоты устройства NE 2 “по инерции” продолжает работать на частоте, близкой к номинальной, но уже без коррекции со стороны генератора G1.

В условиях отсутствия сведений о происхождении сигналов на входах устройства NE 2 человек (администратор) или некий автоматический переключатель режимов синхронизации может принять простое, но непродуманное решение: в ответ на пропадание высокоприоритетного сигнала с входа HP переключиться на низкоприоритетный сигнал с входа LP. Это и делается в данном примере; но после такого переключения, как видим из схемы, образуется цикл, не содержащий связи с опорными генераторами G1 или G2.

Этот цикл формируется двумя генераторами с автоподстройкой частоты, размещенными в узлах NE2 и NE3; каждый генератор стремится подстроиться по частоте к другому, рассматривая его в качестве опорного. Поэтому создается положительная обратная связь, которая приводит к выходу обоих генераторов на граничные допустимые отклонения от центральной частоты или к колебаниям частоты в некоторых малых пределах.

Тем не менее, участок сети может оставаться в работоспособном состоянии (если не считать отказа канала NE 1 → NE 2), так как работа пары “безопорных” источников синхросигналов может быть удовлетворительной в том смысле, что данные, хотя и с повышенной вероятностью ошибки, могут передаваться по сети.

В этом кроется трудность обнаружения таких ситуаций. Поэтому лучшее средство борьбы с ними – профилактическое обследование и анализ правильности трасс распространения синхросигналов. Кроме того, нужно исключить возможность принятия ошибочных решений, подобных описанному.

Далее рассмотрены метод и схема, исключаяющие формирование циклических трасс распространения синхросигналов при отказе канала связи.

### Автоматическое предотвращение заикливания синхросигналов

Мы только что рассмотрели сравнительно простую ситуацию, когда неправильное решение, приведшее к заикливанию синхросигнала (см. рис. 6.6, б), было принято из-за недостатка информации о происхождении входных синхросигналов. Но чем сложнее сеть, тем труднее получить о ней полную информацию. Выручает то, что разработаны протоколы передачи сведений о статусе синхросигналов и алгоритмы выбора оптимальных трасс распространения синхросигналов от опорных источников. Чтобы пояснить смысл автоматической прокладки новой трассы после изменившихся условий работы сети, рассмотрим простой пример (рис. 6.7) [2].

Исходные условия работы участка сети совпадают с приведенными в предыдущем примере (сравните рис. 6.6, а и рис. 6.7, а), поэтому повторять описание не будем. И неисправность будет точно такой же, но реакция на нее на этот раз – правильная.

Сравнивая рисунки, видим, что появились новые обозначения: ST 1, DUS и др. Это мнемоды, отражающие статус передаваемого синхросигнала. Но – всё по порядку.

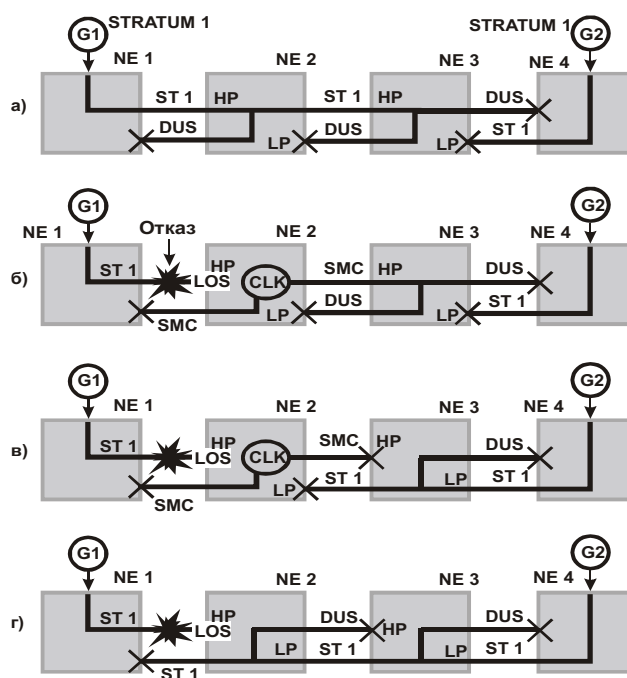


рис. 6.7. Схема, поясняющая процесс адаптации цепи из устройств NE к отказу канала связи NE 1 → NE 2: а – исходное (работоспособное) состояние цепи; б, в – состояния в процессе адаптации; г – конечное состояние

Данные между устройствами NE 1 – NE 4 передаются кадрами. Кадр содержит как полезную (с точки зрения пользователя), так и служебную информацию, о существовании которой пользователь не знает. В частности, в кадре имеется четырехбитное поле статуса синхросигнала. В нем можно закодировать до  $2^4$  различных признаков, характеризующих синхросигнал, переносящий данный кадр от одного устройства  $NE_i$  к другому, соседнему. На разных перегонах от устройства к устройству статус синхросигнала может изменяться; но он может изменяться также и в зависимости от ситуации, в чем мы далее убедимся.

В примере использованы следующие признаки, характеризующие синхросигнал:

ST 1 – признак, означающий, что синхросигнал произошел от генератора уровня STRATUM 1;

DUS – (Do not Use for Sync) – “Не использовать для синхронизации”;

LOS – (Loss – потеря) – признак, формируемый устройством, потерявшим соответствующий входной сигнал;

SMC – (SONET Minimum Clock) – признак, означающий, что синхросигнал имеет относительно низкое качество, т. е. обладает минимально допустимыми параметрами (точностью, стабильностью и др.), приемлемыми в стандартах сетей SONET.

Начальное распределение признаков (см. рис. 6.7, а) не допускает проведения в жизнь ошибочного решения, принятого в предыдущем примере (см. рис. 6.6). Действительно, устройство NE 2 теперь не имеет права рассматривать синхросигнал с низкоприоритетного входа LP в качестве эталонного – об этом предупреждает периодически поступающий на этот вход признак DUS.

При возникновении отказа (см. рис. 6.7, б) разворачивается такая последовательность событий.

Обнаружив отказ, устройство NE 2 формирует “для себя” признак LOS и переключается на синхронизацию от внутреннего генератора CLK. Чтобы оповестить со-

седние узлы о случившемся, устройство NE 2 теперь сопровождает все исходящие кадры признаком SMC. Устройство NE 1 никак не реагирует на изменение статуса синхросигнала из линии, так как оно синхронизируется непосредственно от генератора G1 уровня STRATUM 1, и вполне этим удовлетворено.

Но устройство NE 3 “не желает мириться” со снижением качества эталонного синхросигнала. Оно проверяет возможность получения эталонного сигнала с другого, низкоприоритетного входа LP. Такая возможность существует, так как сигнал на низкоприоритетном входе LP устройства NE 3 имеет статус ST 1 (STRATUM 1). Поэтому устройство NE 3 переключается на новый источник синхронизации и назначает исходящему влево синхросигналу статус ST 1, поощряя его распространение в глубь структуры (см. рис. 6.7, в).

Устройство NE 2 также не желает мириться с низким качеством своего источника синхронизации (генератора CLK) и ждет появления синхросигнала лучшего качества на единственном исправном входе LP. Ожидание оправдывается с поступлением на этот вход кадров, содержащих признак ST 1. Теперь устройство NE 2 переключается на новый источник синхросигнала и назначает статус выходных сигналов в соответствии с рис. 6.7, г. Задача решена: синхронизация восстановлена, каждое устройство получает синхросигналы уровня STRATUM 1.

Среди прочих четырехразрядных статусных признаков, характеризующих синхросигнал, следует особо выделить признак STU (STRATUM Traceability Unknown – “STRATUM-трассируемость неизвестна”). Этот признак (его код 0000<sub>2</sub>, что существенно) несет информацию о том, что происхождение синхросигнала, сопровождающего данный кадр, неизвестно.

В действительности, всегда можно найти первоисточник сигнала. Но дело в том, что протокол обмена статусными признаками разработан сравнительно недавно, и не все сетевые устройства его понимают. Иными словами, ретранслируя кадры, эти устройства вообще неспособны заполнить поле статусных признаков каким-либо кодом. Поэтому поле остается пустым (код 0000<sub>2</sub>), а нулевой код во избежание недоразумений воспринимается соседями по сети как признак STU.

Таким образом, новые устройства могут безболезненно внедряться в старые сети передачи данных. По мере увеличения числа новых устройств в сети образуются островки, а затем целые архипелаги и континенты из устройств, автоматически и коллективно решающих проблемы общей синхронизации.

### 6.3. Синхронизация кольцевых структур

Мы уже не раз говорили о том, что при построении систем синхронизации недопустимо заикливание трасс распространения синхросигналов. Но как поступить, если сама сеть передачи данных имеет кольцевую структуру?

Никакого противоречия нет – идеи построения систем синхронизации по сути те же, что и только что рассмотренные при описании схемы, показанной на рис. 6.7. Далее представлены три варианта схем с кольцевой структурой. Эти схемы различаются деталями, но имеют общий признак – они обладают устойчивостью к отказам аппаратуры, в частности, к одиночным отказам каналов связи.

#### Первый вариант

Рассмотрим схему, приведенную на рис. 6.8 [2]. В этой схеме приняты введенные ранее условные графические обозначения и термины. Для определенности уточним две детали.

1. Генератор G формирует синхросигнал уровня STRATUM 1 при наличии внешней синхронизации от спутниковой системы глобального позиционирования GPS.

Если поступление внешнего синхросигнала прекращается (например при появлении неисправности приемной антенны генератора), то генератор автоматически переключается в автономный режим и формирует синхросигнал уровня STRATUM 2.

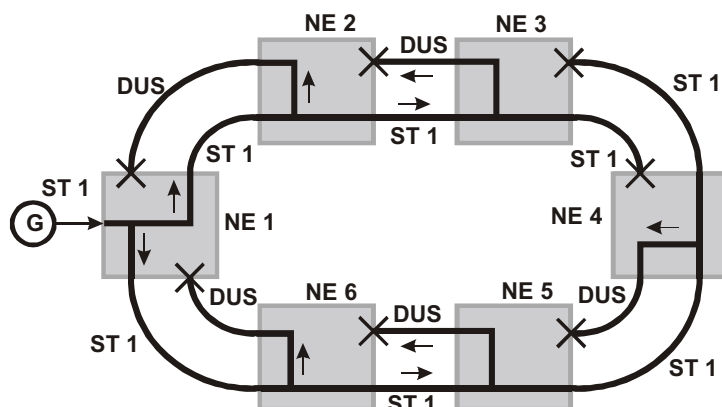


Рис. 6.8. Пример схемы распространения синхросигналов в кольцевой структуре (первый вариант)

2. Каждое устройство NE 1 – NE 6 имеет внутренний генератор синхросигнала уровня STRATUM 3.

При нормальной работе структуры каждое устройство  $NE_i$  пользуется синхросигналом уровня STRATUM 1. Устройство NE 1 получает этот сигнал непосредственно от генератора G, а остальные устройства – косвенно, выделяя его из передаваемой по линии смеси данных и синхроимпульсов. Как следует из схемы, паразитных контуров распространения синхросигналов нет, их возникновение профилактически предотвращается приданием статуса DUS (“Не использовать для синхронизации”) синхросигналам, возвращающимся в сторону генератора G.

Рассмотрим поведение системы синхронизации в трех нештатных ситуациях (A, B, C).

*Ситуация А.* Предположим, что в генераторе G отказал приемник сигналов от спутниковой глобальной системы позиционирования GPS. Генератор продолжает работать в автономном режиме и начинает формировать синхросигнал уровня STRATUM 2, о чем сообщает устройству NE 1. Это устройство, в свою очередь, уведомляет ближайших соседей о снижении качества синхросигнала заменой признака ST 1 признаком ST 2 в передаваемых кадрах (эти изменения на рисунке не отражены).

Информация о снижении качества синхросигнала распространяется к остальным устройствам. Таким образом, все устройства  $NE_i$  принимают ее к сведению, но за неимением лучшего синхросигнала работают в тех же режимах, что и ранее. Кольцевая структура остается работоспособной.

*Ситуация В.* Предположим, что отказал генератор G. Обнаружив отсутствие сигналов от генератора G, устройство NE 1 начинает использовать собственный внутренний генератор синхросигналов уровня STRATUM 3. Так же как и в предыдущей ситуации, все устройства  $NE_i$  принимают к сведению изменение статуса получаемого из линии синхросигнала (ST 1 → ST 3).

Имеет ли смысл пользоваться выделенным из линии синхросигналом уровня STRATUM 3 (в качестве опорного), если есть сигнал от собственного генератора того же уровня точности и стабильности? Ответ на этот вопрос зависит от условий работы сети. С одной стороны, желательно синхронизировать все устройства сети от общего генератора – тогда, вроде бы, автоматически решается задача точного согласования скоростей передачи данных между любыми устройствами. Но, с другой стороны, качество линии может быть настолько низким, что прибывающий на вход устройства син-

хросигнал может содержать значительные фазовые помехи – джиттер и вандер. Как уже отмечалось, полностью очистить синхросигнал от низкочастотных фазовых помех практически невозможно. Поэтому в данной ситуации целесообразно использовать в каждом устройстве сети автономный генератор синхросигналов. Тогда придется смириться с тем, что скорости передачи данных между устройствами сети будут незначительно различаться, а это может привести к проскальзываниям, если не принять мер по предотвращению переполнения буферной памяти устройств. В данном примере уровень точности и стабильности внутренних генераторов устройств весьма высок, что облегчает задачу предотвращения проскальзываний. Поэтому предполагаем, что все устройства  $NE_i$  переходят к работе от внутренних генераторов. Структура и в этой ситуации остается работоспособной.

*Ситуация С.* Предположим, что отказало устройство  $NE 1$ . Связи с соседними узлами (устройствами  $NE 2$  и  $NE 6$ ) полностью разорваны. Этим узлам не остается ничего другого, как перейти к работе от внутренних генераторов, поскольку альтернативные источники синхросигналов имеют статус DUS (“Не использовать для синхронизации”). Устройства  $NE 3 – NE 5$  также начинают синхронизироваться от внутренних генераторов, так как выделяемые из линии синхросигналы ничуть не лучше своих (а скорее – хуже, как уже отмечалось). Так что оставшаяся исправной часть структуры и в этой ситуации остается работоспособной.

## Второй вариант

В сети, показанной на рис. 6.9, *а*, [2] узел 1 содержит генератор  $G1$  синхросигналов уровня STRATUM 1. Узлы 2 – 6 содержат генераторы значительно более низких уровней точности и стабильности. При нормальной работе сети эти генераторы отключены. Чтобы обеспечить высокий уровень качества синхронизации сети, узел 1 назначен ведущим, а узлы 2 – 6 – ведомыми. Последние используют для синхронизации сигнал, выделенный из линии и порождаемый генератором  $G1$ .

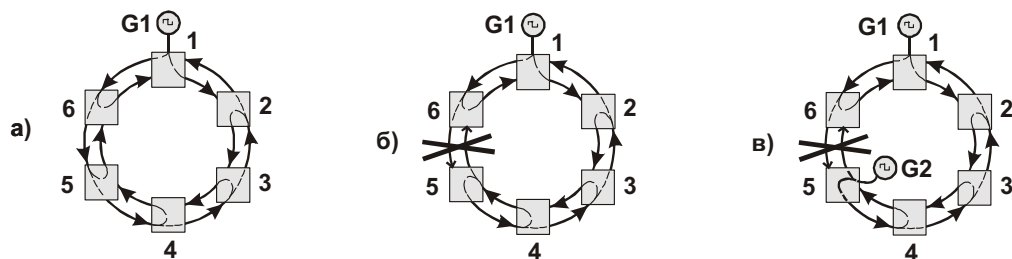


Рис. 6.9. Распространение синхросигналов в сети с кольцевой топологией (второй вариант): *а* – в отсутствие неисправностей; *б* – при неправильной реакции на неисправность; *в* – при использовании двух генераторов синхросигналов ( $G1$  и  $G2$ ) для компенсации неисправности

Предположим, что в сети произошел обрыв кабеля между узлами 5 и 6. Узел 5 обнаруживает потерю источника синхросигнала и оценивает ситуацию. Имеются два альтернативных источника: сигнал от узла 4 и от внутреннего генератора.

Если попытаться использовать в качестве опорного сигнал от узла 4, то это приведет к заикливанию синхросигнала между узлами 4 и 5, что недопустимо (рис. 6.9, *б*). Нестабильный сигнал, полученный в результате такого заикливания, будет распространяться также в узлы 3 и 2 в качестве опорного. Это приведет к резкому повышению интенсивности ошибок при передаче данных между узлами 1 – 5, и, вероятнее всего, к полной потере работоспособности фрагмента сети.

Если воспользоваться внутренним генератором  $G2$  узла 5 (рис. 6.9, *в*), то получим работоспособную сеть. Но качество синхронизации уступает первоначальному, так как



наряду с генератором G1 уровня STRATUM 1 применен генератор G2 со значительно меньшим уровнем точности и стабильности. В этой ситуации генератор G1 обслуживает узлы 1 и 6, а генератор G2 – узлы 5 – 2.

Существует более приемлемое решение. Действительно, даже с учетом неисправности кольцевая структура сети позволяет восстановить синхронизацию от единственного источника – генератора G1, в чем мы сейчас убедимся.

Рассмотрим алгоритм перехода к такому решению (рис. 6.10) [57].

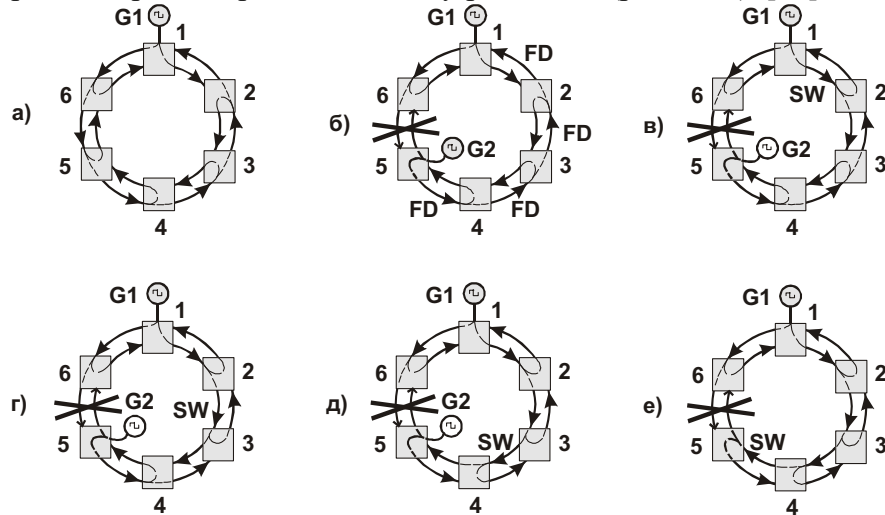


Рис. 6.10. Распространение синхросигналов в сети с кольцевой топологией (второй вариант): *а* – в отсутствие неисправностей; *б* – *д* – в процессе адаптации к неисправности с временным использованием двух генераторов синхросигналов (G1 и G2); *е* – после адаптации

В исходном состоянии неисправностей нет, сеть синхронизируется от генератора G1 (рис. 6.10, *а*). При обрыве кабеля между узлами 5 и 6 (рис. 6.10, *б*) в работу включается генератор G2, как уже было описано. Затем узел 5 посылает по кольцу в сторону от неисправности код FD (Fault Detection – обнаружение ошибки). Этот код распространяется через узлы 4, 3 и 2 и поглощается ведущим узлом 1.

Узел 1 принимает к сведению факт обрыва связи (местоположение обрыва его не интересует) и посылает в ответ по соответствующему направлению код SW (Switch – переключение), как показано на рис. 6.10, *в*. Этот код последовательно “прокладывает путь” для сигнала от генератора G1. Если часть пути уже имеется и поэтому прокладывать путь не надо, то соответствующие узлы структуры остаются в прежнем состоянии и транслируют код дальше по цепи. Но в нашем примере готового участка пути нет, и его создание начинается на первом же шаге передачи кода SW. Получив этот код, узел 2 переключается на синхронизацию от сигнала, выделяемого из линии 1 – 2, и посылает код SW в узел 3 (рис. 6.10, *г*). Узел 3 перестраивается на синхронизацию с направления 2 – 3 и т. д. После адаптации узла 5 код SW далее не распространяется и система переходит в новое устойчивое состояние, при котором все узлы сети синхронизируются от генератора G1, что и требовалось.

После устранения неисправности система синхронизации автоматически поэтапно возвращается в первоначальное состояние (рис. 6.11).

Как было показано, в результате обнаружения неисправности и обмена кодами FD и SW сеть пребывает в состоянии, приведенном на рис. 6.11, *а*. После устранения неисправности узел 5 получает сигнал по цепи 6 – 5 и переходит к синхронизации от этого сигнала. Затем узел 5 посылает в узел 4 код RR (Return Request – запрос возврата), как показано на рис. 6.11, *б*. Получив код RR, узел 4 выбирает в качестве источника синхронизации противоположный линейный вход и посылает код RR в узел 3 (рис.

6.11, в). Этот процесс продолжается, в конечном счете система синхронизации возвращается в исходное состояние, соответствующее отсутствию неисправностей.

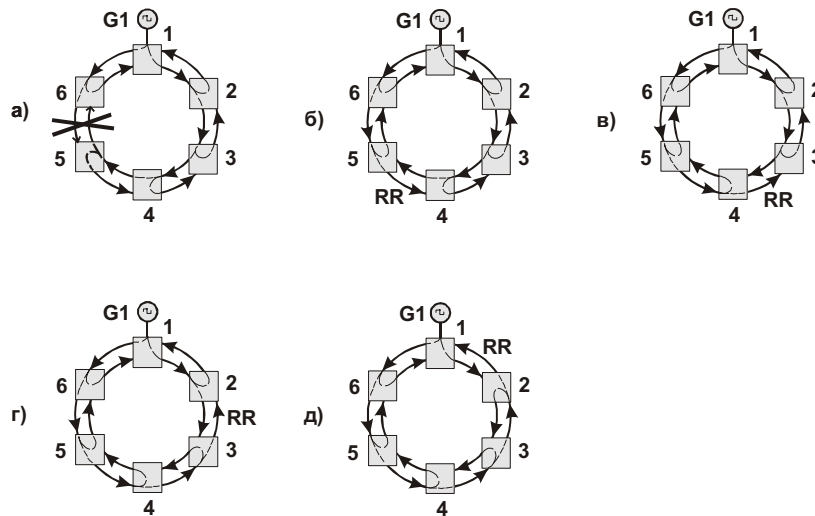


Рис. 6.11. Распространение синхросигналов в сети с кольцевой топологией (второй вариант): *а* – в результате предшествующей адаптации к неисправности; *б* – *в* – в процессе возврата к исходному состоянию после устранения неисправности; *г* – после возврата в исходное состояние

### Третий вариант

Напомним, что во втором варианте построения системы синхронизации информация о неисправности распространяется по сегменту кольцевой структуры и достигает ведущего узла. Этот узел анализирует ситуацию и принимает решение о коррекции траектории распространения основного синхросигнала, затем посылает в нужном направлении соответствующую команду и т. д. Как видим, во втором варианте особая роль при принятии решения отводится ведущему узлу сети, т. е. наблюдается некоторая централизация управления, что нежелательно, так как увеличивается время реакции на ошибку и уменьшается надежность системы. Рассмотренный далее третий вариант [49] близок ко второму, но в нем любой узел кольцевой структуры при определенных условиях способен изменить траекторию распространения основного синхросигнала (рис. 6.12).

Как и в предыдущем примере, сеть состоит из шести узлов 1 – 6 и синхронизируется от генератора G1 сигналов высокой точности и стабильности. Узел 1 – ведущий, узлы 2 – 6 – ведомые. Каждый узел содержит внутренний генератор синхросигналов сравнительно низкого качества, но эти генераторы при нормальной работе системы выключены и применяются лишь при устранении нештатных ситуаций. В кольцевой структуре циркулируют два потока информации: один распространяется по часовой стрелке, другой – против. Данные упакованы в кадры. Кадр помимо данных содержит служебную информацию, в частности, характеристику синхросигнала, несущего данный кадр. Эта характеристика представлена двухбитовым кодом ML (см. коды, показанные вблизи соответствующих стрелок на рисунке). Бит M содержит информацию о качестве сигнала: если  $M = 0$ , то сигнал произошел от генератора G1; если  $M = 1$ , то от внутреннего генератора одного из узлов сети. Бит L характеризует топологическое происхождение сигнала: при  $L = 0$  сигнал распространяется в сторону от породившего его источника (генератора), при  $L = 1$  – в обратном направлении, т. е. к своему источнику.

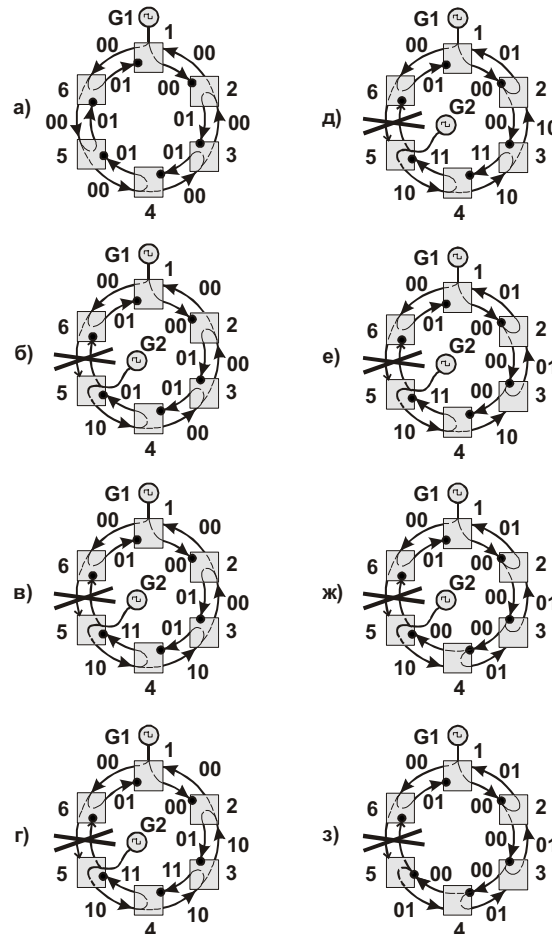


рис. 6.12. Распространение синхросигналов в сети с кольцевой топологией (третий вариант): *а* – в отсутствие неисправностей; *б* – *ж* – в процессе адаптации к неисправности; *з* – после адаптации к неисправности

В исходном состоянии (рис. 6.12, *а*) неисправностей нет, сеть синхронизируется от генератора  $G1$ . Из рисунка следует, что синхросигнал от генератора  $G1$  сопровождает передачу данных в сети как против, так и по часовой стрелке (по внешнему и внутреннему контурам). Однако топология трасс распространения синхросигнала в обоих направлениях различна. Это связано с тем, что имеется система приоритетов при выборе источника синхросигнала узлом сети. Каждый узел может синхронизироваться от одного из трех источников синхросигнала: от внутреннего генератора (в нештатных ситуациях), от сигнала с низкоприоритетного входа (эти входы помечены на рисунке точками) или от сигнала с высокоприоритетного входа (соответствующего внешнему контуру передачи данных).

В данном случае каждый ведомый узел пользуется синхросигналом с высокоприоритетного входа, поэтому синхросигнал внутреннего контура передается по разомкнутым петлям обратной связи (исключение представляет пара узлов 1 – 2). Коды  $ML$  на всех дистанциях внешнего контура одинаковы и равны  $00$ . Это означает, что, во-первых, родословная любого синхросигнала этого контура ведется от генератора  $G1$ , и, во-вторых, направление передачи прямое. Почти на всех дистанциях внутреннего контура  $ML = 01$ . Это подтверждает хорошую родословную сигнала, но предостерегает о том, что его “родителем” является сам узел – получатель.

После обнаружения неисправности (обрыва кабеля между узлами 5 и 6) узел 5 переходит в режим синхронизации от внутреннего генератора  $G2$  (рис. 6.12, *б*). Чтобы сообщить о смене режима синхронизации соседу, узел 5 сопровождает передаваемые по внешнему контуру кадры признаком  $ML = 10$ .

Реакция узла 4 на получение кода  $ML = 10$  отражена на рис. 6.12, *в*. Этот узел вынужден смириться со снижением качества получаемого синхросигнала. Действительно, сигнал от своего внутреннего генератора по качеству такой же, но его использование привело бы к проскальзываниям, так как частота своего генератора может заметно отличаться от частоты внутреннего генератора узла 5 (например, на 100 Гц или более). Сигнал на низкоприоритетном входе узла 4 не может использоваться в качестве опорного, так как он помечен признаком  $L = 1$ , т. е. получен по петле обратной связи, исходящей из своего же узла. В результате видимые изменения состояния сети выражаются в том, что узел 4 выдает во внешний контур код  $ML = 10$ , а во внутренний – код  $ML = 11$ .

Реакция узла 3 на получение кода  $ML = 10$  отражена на рис. 6.12, *г* и полностью повторяет реакцию узла 4 на этот же код. Узел 3 выдает во внешний контур код  $ML = 10$ , а во внутренний – код  $ML = 11$ .

Узел 2 реагирует на получение кода  $ML = 10$  по-иному (рис. 6.12, *д*). Этот узел имеет возможность переключиться на высококачественный синхросигнал, поступающий на его низкоприоритетный вход и помеченный кодом  $ML = 00$ . Такое переключение выполняется и сопровождается выдачей кодов 00 и 01 во внутренний и внешний контуры передачи данных. Таким образом, ключевое событие, связанное с началом изменения траектории распространения основного синхросигнала, совершилось без участия ведущего узла (1) сети.

На следующих трех шагах (рис. 6.12, *е, ж, з*) узлы 3, 4 и 5, так же как и узел 2, переключаются на синхронизацию от высококачественного сигнала, поступающего с низкоприоритетного входа. Таким образом, в результате адаптации к ошибке все узлы сети синхронизируются от генератора G1.

После устранения неисправности сеть возвращается в первоначальное состояние (рис. 6.13). Во всех рассмотренных ситуациях длительность перехода каждого узла сети из одного состояния в другое может составлять 200 мс.

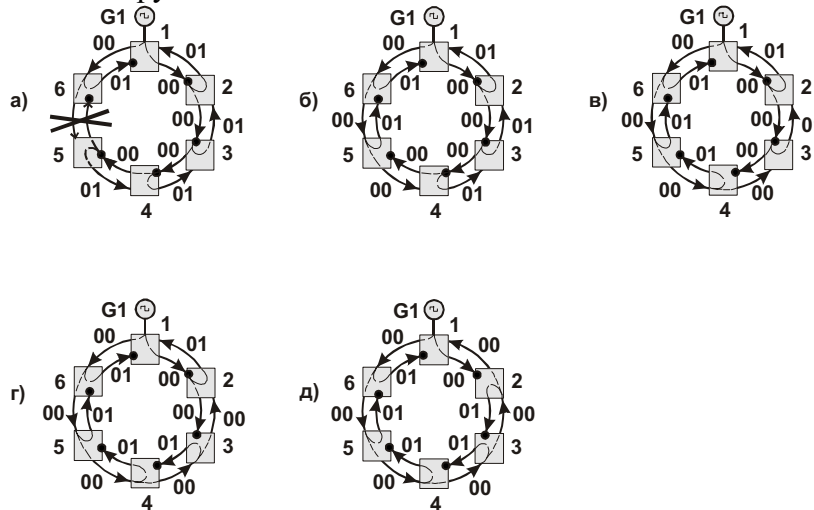


рис. 6.13. Распространение синхросигналов в сети с кольцевой топологией (третий вариант): *а* – в результате предшествующей адаптации к неисправности; *б* – *г* – в процессе возврата к исходному состоянию после устранения неисправности; *д* – после возврата в исходное состояние

## 6.4. Использование искусственного вандера для отслеживания трасс синхросигналов в сетях со сложной топологией

Как уже отмечалось, вандер практически “неистребим”, если его частота достаточно низка и составляет, например, 0,001 Гц. Это означает, что вандер проникает сквозь сколь угодно длинные цепи из узлов компьютерной сети вместе с несущим его синхросигналом. В [53] предлагается использовать практически неограниченную проникающую способность вандера для зондирования компьютерных сетей со сложной топологией с целью выявления трасс распространения синхросигналов. Воплощение этой идеи поясняется схемами распространения синхросигналов в компьютерной сети (рис. 6.14).

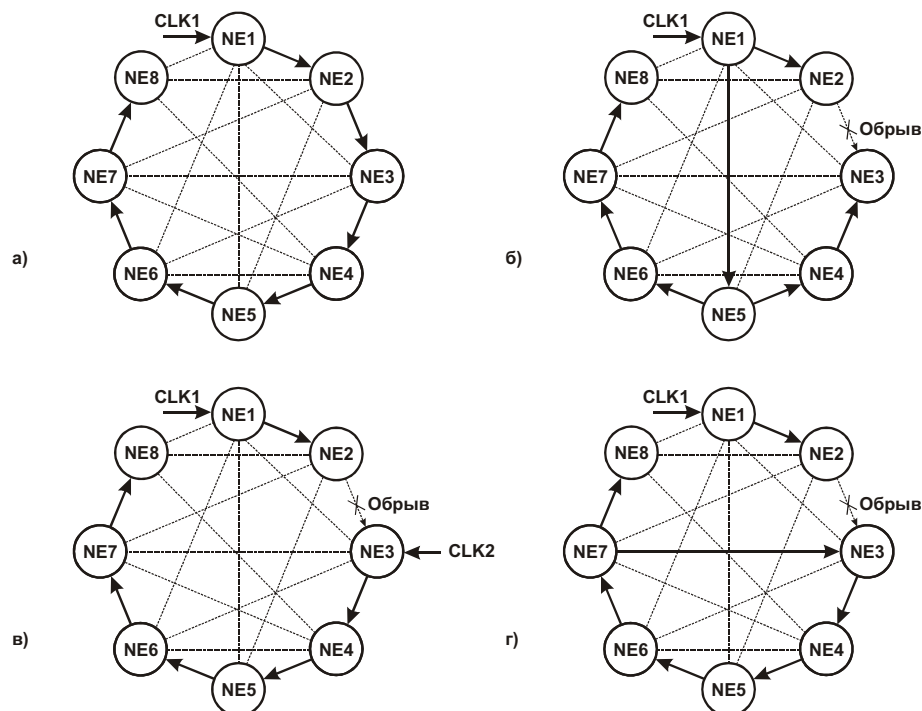


Рис. 6.14. Схемы распространения синхросигнала в сети: *а – в* – допустимые варианты; *г* – ошибочный вариант

Сеть содержит узлы NE1 – NE8 (NE – Network Element – элемент сети). Каждый узел соединен с другими узлами, как показано сплошными и штриховыми линиями. Стрелками показаны направления распространения синхросигналов между узлами.

Предположим, что в исходном состоянии (рис. 6.14, *а*) сеть синхронизируется сигналом CLK1, поступающим в узел NE1. Этот сигнал распространяется по цепи из узлов NE1 – NE8 в смеси с данными по соответствующим направлениям. Узлы NE2 – NE8 выделяют из полученной смеси данные и синхросигнал, который используют для внутренних нужд и для синхронизации исходящих данных во всех направлениях. Данная схема распространения синхросигнала выбрана в качестве примера и, конечно, может быть построена по-другому.

Как показано на рис. 6.14, *б*, при обрыве связи между узлами NE2 и NE3 синхросигнал CLK1 доставляется в узлы NE3, NE4, NE6 – NE8 через узлы NE1 и NE5. Узел NE2 получает синхросигнал из узла NE1. Это одно из возможных правильных решений задачи восстановления синхронизации сети после обнаружения неисправности. Сейчас нас не интересует, почему сеть “выбрала” именно это решение. Еще одно из возможных правильных решений приведено на рис. 6.14, *в*. Здесь сигнал CLK1 синхронизирует только узлы NE1 и NE2. Узел NE3, обнаружив потерю основного

синхросигнала от узла NE2, переключился на резервный внешний синхросигнал CLK2.

В схеме, показанной на рис. 6.14, *з*, в результате ошибочной реакции на обрыв связи между узлами NE2 и NE3 правильная синхронизация сохранилась только в узлах NE1 и NE2. В остальных узлах опорный источник синхросигнала утрачен, при этом образовался замкнутый путь распространения “безопорного” синхросигнала (что недопустимо): NE3 – NE7, NE3 ... и т. д.

Задача состоит в выявлении трасс распространения синхросигналов в сети в условиях отсутствия информации о неисправностях. Для ее решения в каждый узел вводится аппаратура модуляции и демодуляции синхросигналов. Проводится ряд экспериментов, в каждом из которых модулятор включен только в одном из узлов, а демодулятор – в одном или одновременно в нескольких или во всех узлах сети. Модулятор вносит незначительные (допустимые) фазовые искажения в синхросигнал, выдаваемый из узла сети по всем направлениям. Точнее, при модуляции синхросигнала его частота качается в допустимом для сети диапазоне, например в пределах  $\pm 7,5 \cdot 10^{-6}$  от номинальной частоты. Период качания может выбираться, например, из диапазона 1 ... 1000 с. Таким образом, в синхросигнал искусственно вводится вандер. Частота вандера (в нашем примере 1 ... 0,001 Гц) должна быть достаточно низкой для его беспрепятственного прохождения через узлы сети.

Каждый узел сети в зависимости от сложившейся ситуации использует для синхронизации один из альтернативных источников. Синхросигнал от этого источника демодулируется. Демодулятор выделяет из синхросигнала вандер и сравнивает его частоту и амплитуду с принятыми при модуляции параметрами. В качестве простейшего демодулятора может использоваться частотомер или запоминающий осциллограф, а оценку параметров вандера может проводить человек – оператор.

Вернемся к схеме, показанной на рис. 6.14, *а*. Чтобы убедиться в том, что трасса распространения синхросигнала CLK1 образована незамкнутым кольцом из узлов NE1 – NE8, необходимо провести серию экспериментов, например такую. Во всех узлах сети включаются демодуляторы. В первом эксперименте модулятор включается в узле NE8. Если схема соответствует приведенной на рисунке, то демодулированный сигнал не должен обнаруживаться ни в одном из узлов, включая узел NE8 (напомним, что модулируются выходные, а демодулируется входной сигнал, выбранный в качестве опорного синхросигнала узла). Во втором эксперименте модулятор включается в узле NE7. Демодулированный сигнал с заданными параметрами должен обнаруживаться только в узле NE8. В третьем эксперименте модулятор включается в узле NE6. Правильный демодулированный сигнал должен обнаруживаться только в узлах NE7 и NE8. В четвертом эксперименте модулятор включается в узле NE5 и т. д. Серия экспериментов завершается включением модулятора в узле NE1 и проверкой наличия правильных демодулированных сигналов в узлах NE2 – NE8.

Если в результате обрыва связи между узлами NE2 и NE3 схема распространения синхросигнала стала соответствовать приведенной на рис. 6.14, *б*, то результаты проведения описанных ранее экспериментов, начиная с четвертого, окажутся иными. Действительно, при включении модулятора в узле NE5 правильные демодулированные сигналы будут дополнительно обнаружены в узлах NE4 и NE3. Общая картина распространения синхросигналов окончательно проясняется после завершения последовательного перемещения модулятора по остальным узлам сети с проверкой ответных реакций узлов.

Аналогичная серия экспериментов позволяет выявить трассы распространения синхросигналов, показанные на рис. 6.14, *в*. После перемещения модулятора из узла NE3 в узел NE2 обнаруживается отсутствие правильных демодулированных сигналов во всех узлах. Это свидетельствует о том, что ни один из узлов не использует выходной

сигнал узла NE2 в качестве опорного. Трасса NE1 – NE2 прослеживается после перемещения модулятора в узел NE1.

Проведение аналогичной серии экспериментов в условиях, когда сеть перешла в состояние, соответствующее рис. 6.14, з, обнаруживает ошибочную ситуацию. В сети имеется “предоставленная самой себе” замкнутая петля из генераторов, каждый из которых подстраивается по частоте к соседнему. Это приводит к установлению в петле некоторой неточной и нестабильной частоты и резкому повышению вероятности появления ошибок передачи данных. Включение модулятора в узле NE7 при проведении второго эксперимента создает дополнительное (запланированное) изменение частоты синхросигнала в замкнутой петле. При этом демодулятор узла NE7 обнаруживает вернувшийся по петле искусственно введенный в выходные сигналы вандер, что свидетельствует о заикливании синхросигнала между узлами сети.

Для лучшего распознавания искусственного вандера на фоне естественных фазовых шумов целесообразно вместо аналоговой частотной модуляции применять цифровую, с выраженными скачками фазы синхросигнала. Фактически это соответствует построению широкополосного служебного канала связи с использованием исходящих из узла синхросигналов для переноса данных со сверхнизкой скоростью.

Подводя итоги сказанному в гл. 6, отметим следующее.

1. По мере распространения сигнала по каналу связи в нем накапливаются фазовые помехи. При высоком уровне помех выделенный приемником синхросигнал не обеспечивает надежного приема данных. Для поддержания высокого качества передачи данных по сети необходима их ретрансляция, сопровождаемая обновлением синхросигнала. В качестве источника обновленного синхросигнала может использоваться автономный генератор либо генератор с фазовой автоподстройкой частоты, синхронизированный от сигнала, поступающего от одного из соседних узлов сети.

2. При построении системы синхронизации сети следует исключить возможность заикливания синхросигналов. В противном случае участок сети, на котором произошло заикливание, окажется неработоспособным или, в лучшем случае, будет работать с недопустимо высоким уровнем ошибок. Для автоматического исключения заикливания синхросигналов применяют методы, основанные на присвоении синхросигналам определенных статусных кодов и выполнении ряда правил работы с такими сигналами.

3. Сети с кольцевой топологией обладают высокой устойчивостью к отказам. Синхронизацию такой сети предпочтительно осуществлять от общего генератора. Приведенные примеры построения систем синхронизации показывают, что при выполнении определенных правил работы с синхросигналами можно гарантировать правильную адаптацию сети к отказам и автоматический возврат в исходное состояние после устранения неисправностей.