

тор», «МАСШТАБ», НПП «Радар-ММС» и др. Координатором работы выступает Санкт-Петербургская ассоциация радиоэлектроники. Соглашения о привлечении к работам подписаны с ведущими вузами города: СПбПУ, СПбГУТ. Главная задача участников проекта — объединить технологии, создать единый центр управления.

Проект, стартовавший в 2014 г., получил предварительное одобрение Правительства Санкт-Петербурга. Для его реализации была создана определенная структура по инвестициям

в Санкт-Петербурге, которая будет осуществлять финансирование и контроль исполнения задач.

«СУПЕРТЕЛ» участвует в работе в нескольких ипостасях: как разработчик и поставщик программных приложений для мобильных сетей и оборудования для транспортной сети. Оно станет основой, в том числе, наземного информационного поля, служащего объединяющим началом. Причем наше оборудование может работать на уже имеющейся физической среде.

УДК 621.391.23

## МЕТОДИКА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ НАХОЖДЕНИЯ СТРУКТУРЫ СИСТЕМЫ ТАКТОВОЙ СЕТЕВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

**А. Н. Горбач**, заместитель начальника НТЦ «Разработка комплексов связи и автоматизированных систем управления специального назначения» филиала ФГУП ЦНИИС — ЛО ЦНИИС; ang@loniis.ru

**В. В. Ефимов**, и.о. генерального директора филиала ФГУП ЦНИИС — ЛО ЦНИИС; vve@loniis.ru

**А. К. Петриченко**, начальник НТЦ «Синхронизация сетей электросвязи» филиала ФГУП ЦНИИС — ЛО ЦНИИС; synchro@loniis.org

Рассматриваются основные аспекты построения системы ТСС с учетом опыта работы сотрудников ЛО ЦНИИС по аудиту сетей связи общего пользования. Предлагаются методика нахождения структуры ТСС с учетом приоритетности использования разнородных линий связи, а также решения по построению системы ТСС на базе оборудования ЛО ЦНИИС, имеющего статус оборудования отечественного производства.

**Ключевые слова:** тактовая сетевая синхронизация, весовые коэффициенты, неориентированный граф, остовное дерево.

**Введение.** Эффективная и устойчивая работа цифровых сетей связи напрямую связана с функционированием системы тактовой сетевой синхронизации (ТСС). Синхронизация нужна на любых транспортных цифровых сетях связи, мультисервисных сетях, сетях мобильной и транкинговой связи. В качестве примера можно привести технологии CDMA, W-CDMA, GSM, UMTS, TETRA и др. Не остались в стороне и технологии, изначально ориентированные на коммутацию пакетов и передачу асинхронного трафика, например, традиционная Ethernet-сеть. Благодаря синхронизации на основе стандарта Synchronous Ethernet здесь появилась возможность повысить экономичность, надежность и перейти в разряд сетей операторского класса.

Опыт проведения аудита сетей связи, накопленный сотрудниками ЛО ЦНИИС, позволяет выделить несколько наиболее частых причин сбоев в работе ТСС: образование замкнутых петель при задании путей распространения сигналов синхронизации; превышение количества сетевых элементов в цепи синхронизации. Существует также множество особенностей при передаче сигнала синхронизации на гетерогенных сетях, в которых используются линии разных видов связи, различные сетевые технологии. Неправильный учет этих особенностей приводит к значительному ухудшению качества синхросигнала.

В статье рассматривается методика, позволяющая находить оптимальные основные и резервные пути доставки сигналов синхронизации с учетом гетерогенного характера построения сетей, реального качества каналов связи и других параметров, которые можно выразить в виде весовых

коэффициентов элементов матрицы, описывающей исследуемую сеть, и ограничений на длины эталонных цепей.

**Нахождение структуры ТСС на однородной ТС.** Решение задач обеспечения ТСС связано, в первую очередь, с доставкой на сетевые узлы сигналов частоты основной ступени синхронизации  $f_T = 2048$  кГц, которая переносится первичными транспортными потоками от ведущего узла.

Общие вопросы синхронизации описаны в Рек. МСЭ-Т G.703, G.802, G.803, G.810, G.811, G.812, G.813, в стандартах ETSI 300-462-3 и ETSI 300-462-6, а также в документах [1, 2], актуальных как для плезиохронных, так и для синхронных сетей.

Для обеспечения высокого качества сигнала синхронизации доставка синхросигнала от задающих генераторов должна осуществляться по кратчайшим путям с учетом рода линии связи и выполнения требований по надежности. Общая постановка задачи по обеспечению требований ТСС на ТС может быть сформулирована следующим образом. На ТС, структура которой описана графом  $G(A, B)$ , найти  $G_{\text{ТСС}}(A_{\text{ТСС}}, B_{\text{ТСС}})$ , удовлетворяющую требованиям по  $H_{\text{ТСС}}^{\text{треб.}}$ :

$$\begin{cases} G_{\text{ТСС}}(A_{\text{ТСС}}, B_{\text{ТСС}}); \\ H_{\text{ТСС}} \geq H_{\text{ТСС}}^{\text{треб.}}; \\ r_{\text{ТСС}}^{\pi} \rightarrow \min. \end{cases}$$

В качестве основы научно-методического аппарата описания функционирования системы ТСС используем теорию графов. Система ТСС является обеспечивающей подсистемой для ТС и представляет собой наложенную систему, функционирующую на базе каналов ТС, частично повторяя ее структуру. В качестве исходных данных в рассматриваемой методике могут использоваться: структура ТС; род линии связи; значение опорной точки ( $T_0$  —  $T_4$ ); измеренное качество сигнала синхронизации (может быть дистанционно измерено с помощью аппаратуры M100); тип генераторного оборудования; класс присоединения; ограничения на эталонные цепи синхронизации (в соответствии с классом присоединения).

Структуру ТС можно представить в виде неориентированного графа  $G(A, B)$  (рис. 1), где  $A = \{a_i\}$ ,  $i = 1, N$  —

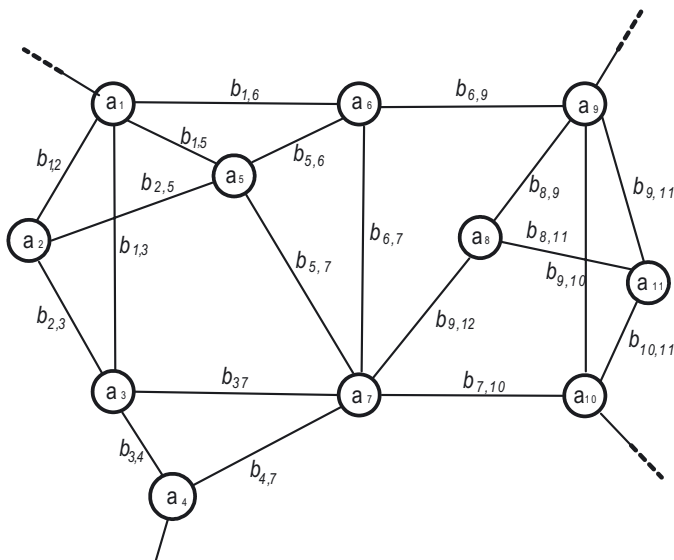


Рис. 1. Графовая модель ТС

множество вершин графа, соответствующее сетевым узлам и станциям, или узловая основа сети.

Ребра сети задаются матрицей  $||\mathbf{B}|| = \{b_{ij}\}$ ,  $i \neq j, i, j = \overline{1, N}$ , элементами которой являются весовые коэффициенты. Поскольку сеть описывается неориентированным графом, очевидно, что матрица (1) будет симметричной относительно главной диагонали:

$$||\mathbf{B}|| = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1j} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{i1} & b_{i2} & \dots & b_{ij} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Как правило, с помощью этой матрицы описывают именно физическую связность узлов ТС, однако в зависимости от того, какой физический смысл будут иметь весовые коэффициенты (род связи, качество каналов и др.), а также от целевых функций решаемых задач можно достаточно глубоко и всесторонне описать исследуемый объект.

Простейшее описание ТС с помощью матрицы связности (1), в которой элементам матрицы присваиваются следующие значения:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i \text{ и } j \text{ узлы соединены ребром;} \\ -, & \text{если } i = j \text{ (при отсутствии циклов);} \\ 0 & \text{- в остальных случаях,} \end{cases} \quad (2)$$

позволяет на основе операции комбинации матриц (символического умножения) находить кратчайшие по рангу пути от одного (заданного) узла, т.е. минимальное остовное дерево.

**Матричный алгоритм.** Пусть задана сеть, которая описывается графом  $G(A, B)$ , где  $A = \{a_i\}$  — множество узлов;  $B = \{b_{ij}\}$  — множество ребер;  $i, j = 1, \dots, N$ . Ребра данного графа взвешены расстояниями между узлами. Примем ряд допущений и ограничений.

1. Допустим, что граф неориентированный, поэтому  $b_{ij} = b_{ji}$ .
2.  $b_{ij} > 0$ .
3. Так как для нахождения оптимальной структуры ТСС играют роль не расстояния между узлами, а ранги путей, зададим вес элементов графа, используя выражение (2).

4. За критерий оптимизации примем минимум веса пути.

5. В качестве ограничения примем максимальный ранг пути  $r = r_{\text{дон}}$ .

Далее выбирается произвольная пара узлов  $i, j$  и задается промежуточный узел  $k$ , который последовательно принимает все значения от 1 до  $N$  при условии, что  $k \neq i, j$  (выполнение этого условия необходимо для уменьшения объема вычислений, но на конечный результат оно не влияет). В этом случае вес оптимального пути при условии, что он будет состоять не более чем из двух ребер, можно найти с помощью тернарной операции, которую в общем виде можно записать как

$$b_{ij} = \text{opt}\{b_{ij}, \Phi(b_{ik}, b_{kj})\}.$$

Вес такого пути может быть переписан в виде

$$b_{ij}^{(2)} = \text{opt}\{\Phi(b_{i1}, b_{k1}), \Phi(b_{i2}, b_{k2}), \dots, \Phi(b_{in}, b_{kn})\} = \text{opt}_k\{\Phi(b_{ik}, b_{kj})\}, \quad (3)$$

где операции  $\text{opt}$  и  $\Phi$  определяются принятым критерием оптимальности.

Процедура вычисления элемента  $b_{ij}^{(2)}$  матрицы-произведения подробно описана в [3], при этом используется выражение

$$b_{ij}^{(2)} = \sum_k b_{ik} b_{kj}. \quad (4)$$

Если в (4) заменить операции суммирования и умножения на  $\text{opt}$  и  $\Phi$  соответственно, то приходим к выражению (3), которое использовалось для нахождения веса оптимального пути между произвольной парой вершин  $i, j$ . Следовательно, если матрицу весов  $||\mathbf{B}||$  возвести в квадрат по правилу (3), т.е.  $||\mathbf{B}||^{(2)} = ||\mathbf{B}|| * ||\mathbf{B}||$ , то получим матрицу, содержащую в качестве элементов веса оптимальных путей, ранг которых не превышает 2. Здесь операция  $*$  называется обобщенной операцией композиции двух матриц [3]. Соответственно, для получения матрицы, элементы которой будут содержать веса путей, ранг которых не превышает 3, необходимо матрицу  $||\mathbf{B}||^{(2)}$  «умножить» по правилу (3) на исходную. В результате получим  $||\mathbf{B}||^{(3)} = ||\mathbf{B}||^{(2)} * ||\mathbf{B}||$  и так далее:

$$||\mathbf{B}||^{(r)} = ||\mathbf{B}||^{(r-1)} * ||\mathbf{B}||.$$

В нашем случае в качестве операций  $\text{opt}$  и  $\Phi$  примем соответственно операцию  $\min$  — выбор минимального веса пути и «+» — суммирование весов (т.к. имеем дело с расстояниями). С учетом принятых обозначений правило (3) перепишем в виде:

$$b_{ij}^{(2)} = \min\{(b_{i1} + b_{k1}), (b_{i2} + b_{k2}), \dots, (b_{in} + b_{kn})\} = \min_k\{(b_{ik} + b_{kj})\}.$$

Состав оптимальных путей задается матрицей  $||\mathbf{P}||$ . Элемент данной матрицы  $p_{ij}$  после завершения алгоритма будет указывать номер вершины, непосредственно следующей за вершиной  $a_i$  в оптимальном пути к вершине  $a_j$ . Формируется данная матрица следующим образом:

$$p_{ij}^{(0)} = \begin{cases} j, & \text{если существует ребро } b_{ij}; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Корректировка матрицы  $||\mathbf{P}||$  производится в том случае, если корректируется матрица весов  $||\mathbf{B}||$  по правилу:

$$p_{ij}^{(k)} = p_{ik}^{(k)}.$$

Чтобы определить состав оптимального пути от  $a_i$  к  $a_j$ , необходимо выбрать элемент  $p_{ij}$  матрицы  $\|\mathbf{P}\|$ . Данный элемент укажет номер вершины, смежной с  $a_i$ , т.е. вторую вершину оптимального пути. Например, такой вершиной оказалась  $a_k$ . Далее проверяется условие  $a_k \neq a_j$  достижения конечной вершины. Если найденная вершина не является последней, то на следующем шаге ищется элемент  $p_{kj}$ , и так далее, пока не будет достигнута последняя вершина, т.е. очередной элемент матрицы  $\|\mathbf{P}\|$  не совпадет с номером последней вершины.

**Нахождение структуры ТСС на гетерогенной ТС.** Описанный выше подход не лишен недостатков: невозможно учесть приоритет выбора линий связи в зависимости от рода связи, реального (измеренного) качества синхросигнала, получаемого с различных линий и ряда других, не менее важных факторов. Кроме того, зачастую между отдельными узлами ТС могут одновременно функционировать несколько линий связи, образованных различными системами передачи — волоконно-оптической, электропроводной, радиорелейной. При этом в соответствии с [1] линии связи, организуемые ВОСП, будут иметь самый высокий приоритет, а радиорелейными системами передачи — наименьший.

Здесь целесообразно ввести понятие, характеризующее различные (разнородные) линии связи, образованные между какой-либо парой узлов. В качестве такого понятия предлагается использовать термин «комбинированная линия». На рис. 2 сплошными и пунктирными линиями показаны различные компоненты комбинированных линий. Матрицей (1) с элементами (2) модель (рис. 2) описать невозможно.

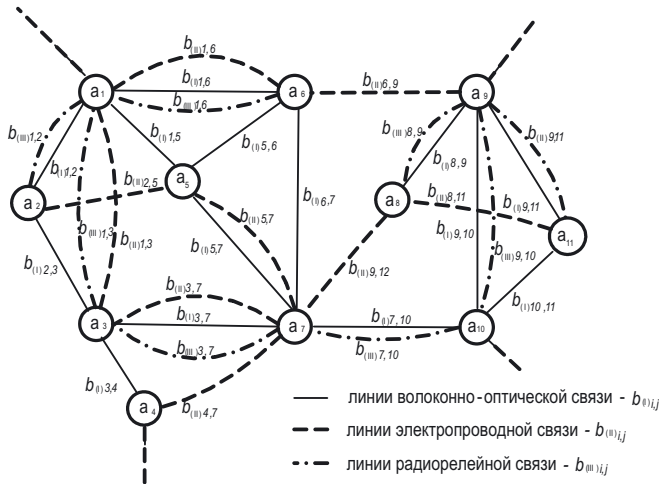


Рис. 2. Графовая модель ТС с ребрами, образованными системами передачи различных родов связи (комбинированная модель)

Для описания разнородных линий введем трехмерную (многослойную) матрицу связности (3), каждый слой которой будет описывать связность сети на базе одного из родов связи. Количество слоев  $b_{(s)}$ , определяется количеством родов связи, используемых на сети. В ячейках матрицы находятся значения элементов  $\{b_{(s)i,j}\}$ , определяющих связность сети на каждом слое.

$$\|\mathbf{B}\| = \{b_{(s)i,j}\}; \|\mathbf{B}\| = \begin{matrix} & & & & b_{(s)rj} \\ & & & & \vdots \\ & & & & b_{(s)2j} \\ & & & & \vdots \\ & & & & b_{(s)ij} \\ & & & & \vdots \\ & & & & b_{(s)1j} \\ & & & & \vdots \\ & & & & b_{(s)1r} \\ & & & & \vdots \\ & & & & b_{(s)11} \\ & & & & \vdots \\ & & & & b_{(s)1i} \end{matrix} \quad (5)$$

где  $s = \overline{1, E}$ ,  $E$  — количество слоев;  $s$  — рода связи.

Таким образом, появляется возможность дифференциального учета линий различной физической природы при поиске маршрутов доставки сигналов ТСС. Расположение слоев в порядке убывания приоритета использования позволит находить маршруты, в первую очередь, на линиях наивысшего приоритета.

Для обеспечения корректной работы методики необходимо трехмерную матрицу преобразовать к виду (1). Для этого ячейки  $b_{(1)i,j}$  первого «слоя» матрицы, имеющие значение «0», дополняются элементами последующих слоев. Происходит переход к плоской матрице, описывающей структуру сети, основанную на линиях первого приоритета (ВОЛС) и дополненную линиями второго приоритета и т.д. Однако для начала с помощью первого «слоя» необходимо проверить, где находятся пути допустимого ранга для заданного фрагмента сети. При невозможности достижения всех узлов задействуются элементы второго «слоя». Задача решается повторно и т.д.

В случае выхода из строя одной из линий или ввода в эксплуатацию новой, необходимо произвести корректировку массива (3) и решить задачу заново. С помощью системы сетевого мониторинга на базе программного комплекса «Монитор» (разработки ЛО ЦНИИС), а также системы технологического управления современным телекоммуникационным оборудованием на базе протокола SNMP возможен непрерывный контроль состояния линий и аппаратуры. При этом массив (3) может заполняться автоматически.

Очевидно, что при возникновении аварий переход на резервные схемы ТСС должен происходить автоматически, а при вводе в эксплуатацию новых линий — автоматизированно (по решению оператора).

**Многофункциональное устройство синхронизации М100 (Сертификат соответствия ОС-2-СП-0930).** Уникальное устройство, которое может использоваться на сетях связи, заменяя набор различных устройств синхронизации путем перепрограммирования, включает:

- вторичный задающий генератор (ВЗГ);
- распределитель сигналов синхронизации (РСС);
- преобразователь сигналов синхронизации (ПСС).

По мере появления необходимости в других функциях при развитии сетей связи функциональность М100 может быть расширена даже в процессе эксплуатации.

**Основные преимущества М100.**

1. Более высокая стабильность. Уход частоты за сутки —  $1 \times 10^{-11}$  (норма —  $2 \times 10^{-10}$ ). Уход частоты за год в зависимости от заказа —  $1 \times 10^{-8}$ ,  $5 \times 10^{-9}$ ,  $2 \times 10^{-10}$ .
2. Минимальная генерация фазового шума. МОВИ на интервале в 1 сутки не превышает 10 нс (норма — 160 нс).
3. Повышенная устойчивость к дрожаниям и блужданиям фазы. Обеспечивается устойчивая синхронизация при блужданиях более 10 мкс за сутки (норма — 5 мкс, а по американским стандартам Stratum — 1,86 мкс).
4. Отсутствие скачков фазы при переключении входов (по нормам допустимо — 240 нс).
5. Возможность выбора сигнала для синхронизации по реальному качеству сигналов, т.е. по измеряемым значениям МОВИ, ДВИ и отклонению частоты в сигналах на входе.
6. Наличие в составе М100 технических средств для локального и удаленного управления и мониторинга без использования внешних компьютеров.

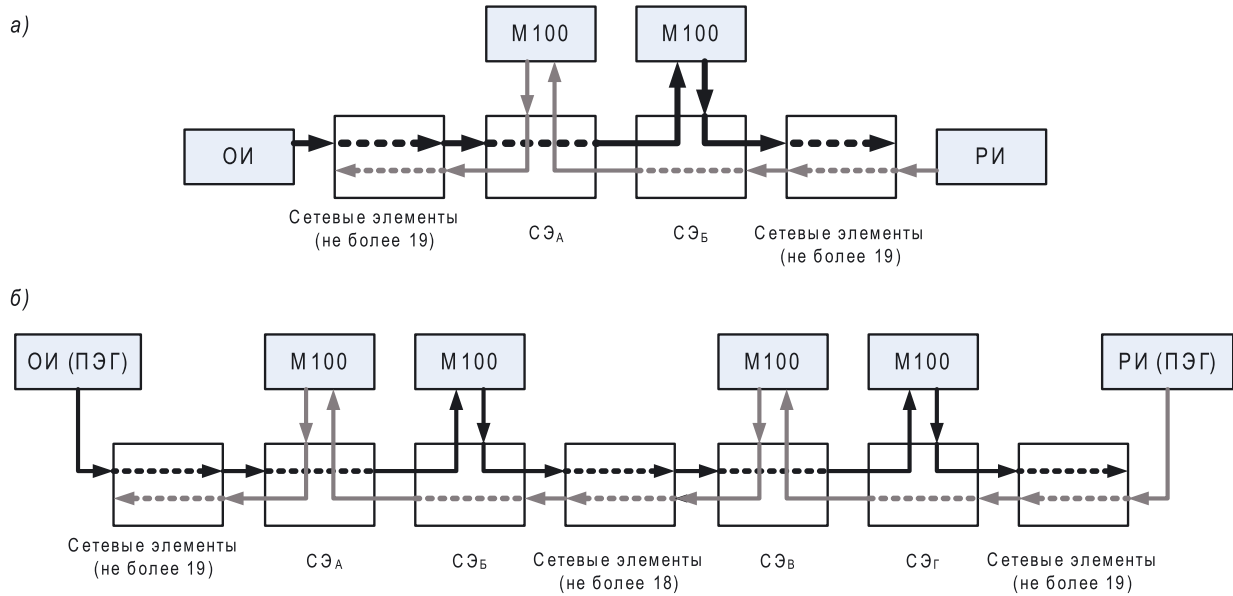


Рис. 3. Способ синхронизации линейной транспортной сети

7. Уникальная возможность управления сигналами на выходе, что создает условия оптимального построения сетей синхронизации.

8. Малый вес — 3,5 кг (без дублирования) или 7 кг (с дублированием).

9. Малое потребление энергии — 15 Вт (без дублирования) или 30 Вт (с дублированием).

10. Изменение структуры и расширение функций без замены плат или установки дополнительных плат.

11. Техническая поддержка квалифицированным персоналом с участием разработчиков.

12. Техническое описание и Руководство оператора, соответствующие текущей версии ПО, находятся в памяти и доступно персоналу.

13. Бесплатная передача заказчикам новых версий программного обеспечения.

14. Минимальная стоимость оборудования.

**Использование М100 в различных вариантах синхронизации.** Варианты включения оборудования разработаны с учетом требований приказа [4].

*Способ синхронизации линейной транспортной сети.* Включение М100 в последовательную цепь обеспечивает

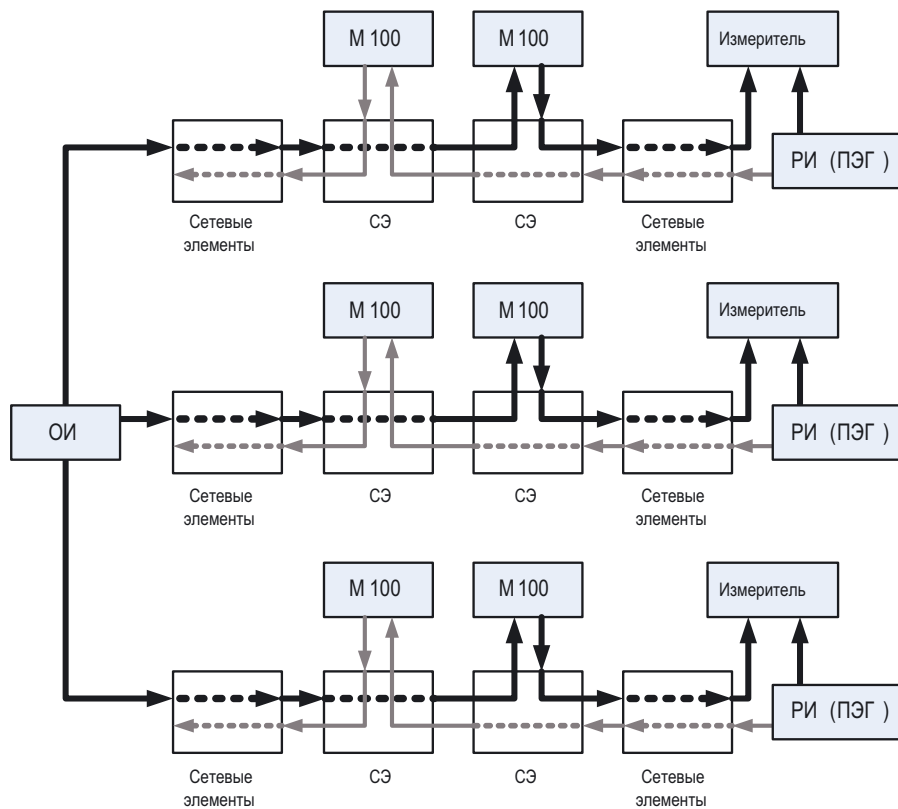


Рис. 4. Способ синхронизации магистральной сети



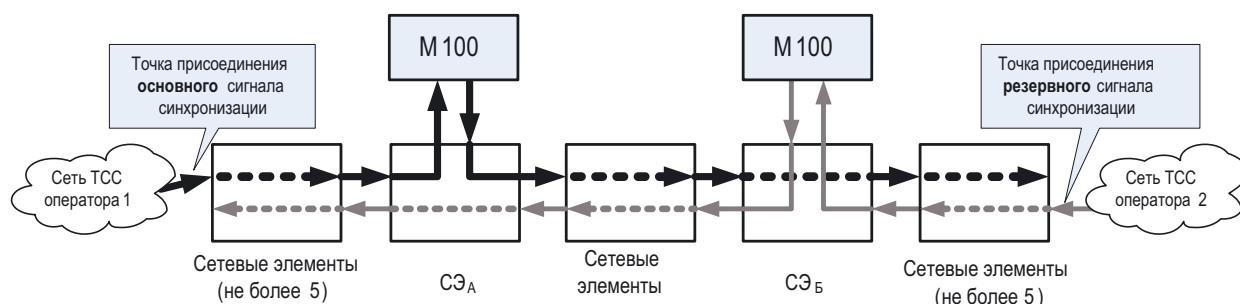


Рис. 5. Способ сличения частот региональных ПЭГ с использованием М100

допустимое качество синхронизации при одновременных неисправностях основного источника (ОИ) и резервного (РИ). В этом случае вся сеть синхронизируется от сигналов, создаваемых одним М100. Неисправность любого генератора М100 эквивалентна неисправности в линии связи между сетевыми элементами.

Способ синхронизации (рис. 3, а и б) линейной транспортной сети, построенной на базе системы передачи синхронной цифровой иерархии (патент № 2405262), отмечен золотой медалью VIII Международного салона изобретений и новых технологий «Новое время» (Севастополь, 27–29 сентября 2012 г.).

Пример построения системы ТСС магистральной сети на базе оборудования М100 приведен на рис. 4.

**Контроль качества синхронизации.** Построение схемы синхронизации с использованием М100 дает возможность организовать непрерывный контроль качества синхронизации и сличение частот каждого регионального ПЭГ с частотой ПЭГ Центрального региона (рис. 5).

**Статус отечественного производителя.** На основании приказа Министерства промышленности и торговли Российской Федерации «О присвоении и подтверждении телекоммуникационному оборудованию, произведенному на территории Российской Федерации, статуса телекоммуникационного оборудования российского происхождения» от 27 октября 2014 года № 2153 многофункциональному устройству синхронизации М100 присвоен статус телекоммуникационного оборудования российского происхождения.

**Выводы.** 1. ТСС должна соответствовать Рекомендациям МСЭ-Т и быть единой для всех сетей, нуждающихся в ней.

2. ТСС должна обеспечивать синхронную передачу по цифровой сети сигналов первичных групп 2048 кбит/с и, следовательно, всех компонентных сигналов с более низкими скоростями передачи.

3. В качестве переносчиков синхросигнала в системах SDH должны применяться линейные сигналы STM-N, не подверженные согласованию указателей, а в системах PDH — сигналы первичных групп 2048 кбит/с.

4. В оборудовании, расположенном на узлах и станциях, для синхронизации должна предусматриваться возможность использования сигналов эталонного синусоидального колебания с частотой 2048 кГц либо информационного цифрового сигнала 2048 кбит/с.

5. Схема синхронизации должна иметь радиально-узловую топологию без замкнутых колец. Синхронизирующие сигналы к каждому ВЗГ должны поступать минимум по двум пространственно разнесенным направлениям. Переключение на резервное направление приема синхросигнала не должно создавать на сети синхронизации замкнутых пе-

тель. Кроме того, каждый ВЗГ должен иметь возможность переходить в режим удержания частоты.

6. Для обеспечения живучести ТСС необходимо предусмотреть резервный первичный эталонный генератор (ПЭГ) и резервные пути передачи сигналов синхронизации.

7. Для синхронизации всего оборудования, установленного на узле или станции, должен использоваться один источник сигналов синхронизации. Последовательный прием сигналов синхронизации недопустим. Схема соединений должна иметь топологию «звезда», что обеспечивается разветвителем сигналов синхронизации производства ЛО ЦНИИС — РС ТСС.

8. Основной тракт синхронизации от данного узла или станции до ведущего узла должен проходить по кратчайшему пути через минимальное число промежуточных пунктов с возможно более высоким иерархическим уровнем систем передачи, отдавая предпочтение ВОЛС перед радиорелейными линиями и линиями на симметричных кабелях.

9. Переход на прием синхросигнала с резервных устройств не должен изменять структуры построения внутристанционной синхронизации. Все направления передачи синхросигнала за границы станции должны синхронизироваться от генератора данного сетевого узла.

**Системы ТСС сетей связи общего пользования и ведомственных сетей должны строиться на оборудовании отечественного производства. Рассмотренное оборудование по многим параметрам превосходит зарубежные образцы, а кроме того, в условиях санкций со стороны зарубежных партнеров, а также возможных информационных деструктивных воздействий только отечественное оборудование, функционирующее на основе отечественного программного обеспечения, способно обеспечить устойчивое функционирование транспортных сетей.**

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Руководящий технический материал по построению тактовой сетевой синхронизации на цифровой сети связи Российской Федерации. Принято решением ГКЭС России от 01.11.95. — М.: ЦНИИС, 1995. — 55 с.
2. Рекомендация отрасли. Р45.09–2001. Присоединение сетей операторов связи к базовой сети тактовой сетевой синхронизации. — Минсвязи России, 2001. — 24 с.
3. Коршун В. Г. Выбор и оценка эффективности способов маршрутизации в СОД. — Л.: ВАС, 1986. — 116 с.
4. Приказ Министерства информационных технологий и связи Российской Федерации от 7 декабря 2006 г. № 161. В редакции Приказа Минкомсвязи России от 23.04.2013 № 93 «Об утверждении правил применения оборудования тактовой сетевой синхронизации».

Получено 17.07.15