

Анализ режимов работы системы тактовой сетевой синхронизации для ее математического моделирования при разработке методики синтеза

Analysis of operation modes of the system of clock network synchronization for its mathematical simulation in the development of the synthesis methods

Ключевые слова: сигнал синхронизации — synchronization signal; структура системы тактовой сетевой синхронизации — the structure of the system of clock network synchronization; режимы работы — operation modes.

В работе рассмотрена возможность учёта в математической модели системы тактовой сетевой синхронизации транспортной составляющей и сетей доступа телекоммуникационной сети на этапе системного проектирования (синтеза) ряда ограничений к целевой функции минимизации стоимости. Эти ограничения увязываются с анализом режимов работы системы тактовой сетевой синхронизации, где особая роль отводится учёту ограничений, связанных с функцией отклонения отсчетов текущего времени в режиме удержания синхронизации.

The paper considers the possibility to take into account in the mathematical model of the system of clock network synchronization of transportation and access networks of the telecommunication network at the stage of system design (synthesis) of a number of restrictions to the target function of minimizing the cost. These restrictions are linked to the analysis of the operation modes of the system of clock network synchronization, which is a specific role within the constraints associated with the function of the deviation of the current sampling time in holdover mode.

В качестве основных устройств обеспечения устойчивой тактовой синхронизации цифровых систем передачи и коммутации транспортной составляющей и сетей доступа телекоммуникационной сети в составе генераторного оборудования используются многовходовые устрой-

МОРОЗОВ / MOROZOV G.

Геннадий Григорьевич

(morozov@loniis.org)

заместитель начальника центра,
Филиал ФГУП «Ленинградское отделение центрального научно-исследовательского института связи»,
Санкт-Петербург

ПЕТРИЧЕНКО / PETRICHENKO A.

Анатолий Константинович

(synchro@loniis.org)

начальник центра,
заместитель начальника центра,
Филиал ФГУП «Ленинградское отделение центрального научно-исследовательского института связи»,
Санкт-Петербург

ЯСИНСКИЙ / JASINSKI S.

Сергей Александрович

(yasinsky777@mail.ru)

доктор технических наук, доцент,
главный научный сотрудник,
Филиал ФГУП «Ленинградское отделение центрального научно-исследовательского института связи»,
Санкт-Петербург

ства фазовой автоподстройки частоты (УФАПЧ), которые могут переходить из режима синхронной работы в режим удержания в случае аварии всех сигналов внешней синхронизации на входах. В качестве основного сигнала синхронизации (СС) примем сигнал с частотой 2048 кГц, так как он может быть получен путем преобразований из других видов СС [1]. Решение о непригодности основного СС и перехода на резервный СС может приниматься по следующим критериям:

– отсутствие основного СС с реальным отсчетом времени ($T_{cc}(t)$) на входах УФАПЧ в течение заданного или требуемого времени ($T_{cc_{mp}}(t)$), то есть когда не выполняется условие

$$T_{cc}(t) \leq T_{cc_{mp}}(t);$$

– отклонение частоты сигнала синхронизации $f_{cc}(t)$ не находится в рамках допустимого нижнего (н) и верхнего (в) значений, т. е. когда не выполняется условие

$$f_{cc_n}(t) \leq f_{cc}(t) \leq f_{cc_v}(t). \quad (1)$$

– превышение допустимых значений фазовых дрожаний и блужданий сигнала синхронизации, выраженных в максимальной ошибке временного интервала и девиации временного интервала, которые учитываются в процессе системного проектирования системы тактовой сетевой синхронизации (СТСС) путем выполнения соответствующих требований международных стандартов для джиттера и вандера [2].

Для СС со скоростью передачи 2048 кбит/с в процессе функционирования транспортной составляющей и сетей доступа телекоммуникационной сети дополнительным критерием оценки их качества может быть:

- прием сообщения о низком качестве источника СС (SSM);
- прием сигнала извещения об аварии (AIS);
- превышающий допустимую норму коэффициент ошибок в СС.

Не смотря на наличия некоторого числа входов в УФАПЧ принцип принудительной синхронизации предполагает в течение любого интервала времени использование только одного СС, то есть одного входа из известного их множества. Условия и критерии переключения СС, перехода из режима синхронной работы в режим удержания, восстановления СС и последующего возвращения в режим синхронной работы не достаточно определены в отечественных и международных нормативных документах. Решение этих вопросов перекладывается на разработчика и изготовителя.

По условиям перехода из режима синхронной работы в режим удержания УФАПЧ можно разделить на устройства, в которых переход в режим удержания происходит без каких-либо дополнительных ограничений, и устройства, в которых переход в режим удержания происходит при условии, что в режиме синхронной работы накоплено достаточно количество данных.

Последовательность изменения режимов синхронизации в СТСС приведена на рис. 1. Между моментами появления аварии в сигналах синхронизации t_1 и началом режима удержания t_2 имеется интервал времени Δt_{2-1} , в течение которого определяется факт отсутствия СС требуемого качества.

В некоторых устройствах в течение этого времени выполняется проверка, не явилось ли отсутствие сигнала результатом воздействия помех или результатом реконфигурации в цепях синхронизации. Интервал времени от момента появления аварии до момента перехода в режим удержания в разных блоках может быть от одной микросекунды до нескольких десятков секунд. В качестве примера отметим, что время на принятие решения о переходе в режим удержания в генераторе сетевого элемента системы передачи синхронной цифровой иерархии может быть до 2 с. Следовательно, время перехода в режим удержания может быть нормировано и не должно превышать допустимого значения (ДЗ), то есть

$$\Delta t_{2-1} \leq \Delta t_{2-1_{ДЗ}}.$$

Чем выше стабильность и точность генератора, тем больше времени можно допустить для принятия решения о необходимости перехода в режим удержания, и чем выше достоверность принятого решения, тем выше помехоустойчивость блока синхронизации. Отметим, что при использовании для передачи сигналов синхро-

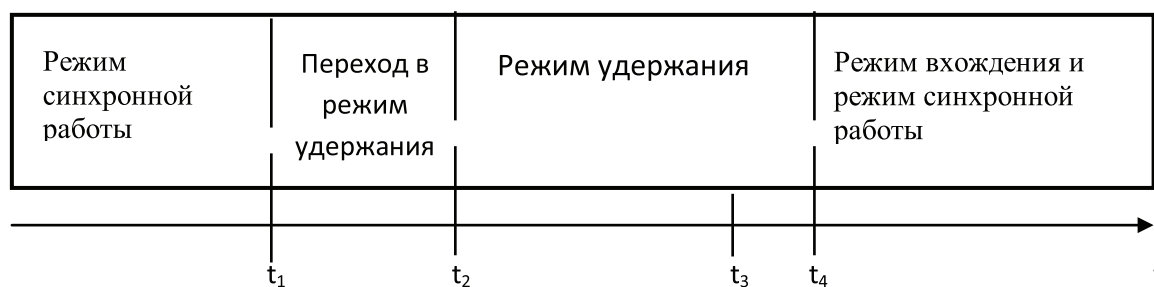


Рис. 1. Последовательность изменения режимов синхронизации в СТСС

низации линий передачи (например, радиорелейных) с повышенным коэффициентом ошибок и высокой частотой прерываний по сравнению с кабельными линиями передачи требуется более высокая стабильность и точность синхронизируемого генератора и более высокая достоверность принятого решения о необходимости перехода в режим удержания.

После выполнения ремонтно-восстановительных работ (t_3) переход в режим вхождения (t_4) в общем случае происходит с задержкой на время Δt_{4-3} , которое не должно превышать допустимого значения, то есть

$$\Delta t_{4-3} \leq \Delta t_{4-3 \text{ дз}}.$$

В течение Δt_{4-3} определяется достоверность восстановления сигнала на входе устройства и проверка его качества. В устройствах синхронизации высокого качества, например во вторичных задающих генераторах первого типа, это время может достигать от 10 до 20 минут. В таких устройствах за Δt_{4-3} в восстановившемся СС на входе проверяется отсутствие прерываний и скачков фазы, измеряется отклонение частоты, ошибки временных интервалов, максимальные ошибки временного интервала и девиация временного интервала, и только в случае положительной оценки качества СС устройство переходит в режим вхождения в синхронизацию (t_4). В сетевых элементах систем передачи СЦИ в блоках синхронизации время проверки восстановления сигнала синхронизации не превышает двух секунд. В коммутационном оборудовании встречаются блоки синхронизации, в которых режим вхождения начинается сразу после появления СС на входе. В течение времени проверки СС в устройстве синхронизации сохраняется режим удержания.

Режим вхождения в синхронную работу начинается после подключения СС к входу устройства. В начале режима вхождения на УФАПЧ одновременно воздействуют скачки фазы и частоты. Скачок частоты зависит от отклонения частоты в конце режима удержания относительно частоты сигнала на входе. Скачок фазы, выраженный в единицах времени, определяется отклонением фазы сигнала на выходе блока, накопившимся за время удержания.

Граница между окончанием режима вхождения и началом синхронной работы зависит от выбранных критериев. Теоретически, переходные процессы могут закончиться за бесконечно большое время. На практике, задаются допустимые значения частоты и фазы, при дости-

жении которых принимается решение о появлении режима синхронной работы.

Анализ режимов работы СТСС позволяет сделать умозаключение о необходимости уделять больше внимания в исследованиях наиболее важному из режимов – режиму удержания синхронизации, так как увеличение длительности этого режима равноценно повышению устойчивости функционирования СТСС.

Во время принятия решения о переходе в режим удержания и непосредственно в режиме удержания значение частоты на выходе устройства синхронизации может быть равной:

- среднему значению частоты в диапазоне управления частотой генератора;
- последнему мгновенному значению сигнала управления;
- вычисленному среднему значению сигналов управления за определенный интервал времени накопления.

В любом из перечисленных выше вариантов удержания значения частоты должно соответствовать выполнению условия (1), так как большое разнообразие вариантов применения устройств синхронизации и большое разнообразие технических решений не позволяют однозначно задать требования на длительность времени перехода в режим удержания и значение частоты СС на выходе устройства синхронизации за конкретно заданное время. В российских и международных нормативных документах задаются ограничения на допустимые отклонения временного интервала в СС на выходе устройств синхронизации [1,3,4], появляющиеся к началу режима удержания, что не всегда оправдывает практическое применение этих ограничений в процессе синтеза СТСС. Следовательно, остановимся более подробно на исследовании изменения частоты и фазы непосредственно в режиме удержания синхронизации.

В момент начала режима удержания t_2 в блоке синхронизации устанавливается начальное относительное отклонение частоты $\delta_{0,уд}$. В течение времени устранения неисправностей генератор блока синхронизации работает автономно в большинстве случаев при постоянном сигнале управления. Отклонение частоты в это время определяется старением генератора, воздействием внешних дестабилизирующих факторов и собственной неустойчивостью. Наибольшее влияние на изменение частоты генератора в режиме удержания оказывают старение и изменения температуры. Отклонение частоты в результате старения представляет собой нелинейную функцию от времени. Причём эти функции различны для разных типов генераторов.

Учитывая, что длительность работы в режиме удержания представляет собой относительно короткий интервал времени по сравнению с полным временем эксплуатации оборудования, можно выразить закономерность, что функция изменения во времени относительного отклонения частоты в результате старения $\delta_{cr}(t)$ пропорциональна времени и имеет следующий вид:

$$\delta_{cm}(t) = Dt = \frac{\delta_{cym}}{86400},$$

где величина D характеризует скорость изменения относительного отклонения частоты в течение времени ремонта. Для определения величины D используется значение отклонения частоты за сутки в результате старения δ_{cym} . Следовательно, изменение относительного отклонения частоты в режиме удержания, когда не учитывается влияние внешних дестабилизирующих факторов, может быть представлено в виде:

$$\delta_{y\partial}(t) = \delta_{0y\partial} \pm \delta_{cr}(t).$$

К внешним дестабилизирующим факторам относятся изменения напряжения электропитания, температуры, влажности, атмосферного давления, радиационного излучения, напряжения фиксированного управляющего сигнала и др. Влияние внешних дестабилизирующих факторов на изменение относительного отклонения частоты блока синхронизации во время работы в режиме удержания в общем случае не может быть представлено однозначной математической функцией. Важно отметить, что воздействие этих факторов на частоту может быть представлено в виде колебательных функций с ограничением максимальных отклонений относительно средних значений. Суммарное ожидаемое значение отклонения частоты в результате воздействия внешних дестабилизирующих факторов может быть определено из соотношения:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2},$$

где δ_i – относительное отклонение частоты в результате воздействия i -го дестабилизирующего фактора. Следовательно, суммарное ожидаемое значение отклонения частоты должно удовлетворять допустимому значению

$$\delta_{\Sigma} \leq \delta_{\Sigma \text{ дз}}.$$

Из всех перечисленных выше дестабилизирующих факторов наибольшее влияние на отклонение частоты оказывает изменение температуры $\delta_{t^{\circ}}$, поэтому во многих расчетах принимается

$$\delta_{\Sigma} \approx \delta_{t^{\circ}} \leq \delta_{\Sigma \text{ дз}}.$$

Функция отклонения отсчетов текущего времени

$$x(t) = T(t) - T_{\text{эт}}(t)$$

является разностью функций изменения фазы, выраженных в единицах времени для двух сигналов – сигнала на выходе исследуемого генератора $T(t)$ и сигнала эталонного генератора $T_{\text{эт}}(t)$, не имеющего частотных и фазовых отклонений.

В теории и практике синтеза СТСС доказано, что функцию отклонения отсчетов времени для режима удержания можно представить в следующем виде:

$$x(t) = T_0 + (\delta_{0y\partial} + \delta_{t^{\circ}})t + 0,5Dt^2. \quad (2)$$

Если в выражении (2) обозначить $\delta_{0y\partial} = b_1$, $\delta_{t^{\circ}} = b_2$, $D = a$ и $T_0 = c$, то получим подобие квадратного уравнения:

$$x(t) = 0,5at^2 + (b_1 + b_2)t + c = 0,5at^2 + bt + c, \quad (3)$$

где T_0 – начальное отклонение фазы.

Выражение (3) по форме совпадает с аналогичными выражениями для режима удержания, приведенными в рекомендациях ITU-T G.812, G.813 и в европейских стандартах [3,4,5].

Еще одной важной характеристикой режима удержания является скорость изменения частоты, которая определяется как вторая производная от функции отклонения отсчетов времени:

$$d = \left| \frac{d^2x(t)}{dt^2} \right|.$$

При отсутствии воздействия внешних дестабилизирующих факторов $d = D = a$, а в реальных условиях эксплуатации должно выполняться условие

$$d_{\text{дз}} > D_{\text{дз}} \geq d > D = a$$

Максимальные (допустимые) значения параметров режима удержания для вторичных задающих генераторов (ВЗГ), местных задающих генераторов (МЗГ) и генераторов сетевых элементов (ГСЭ) систем передачи синхронной цифровой иерархии приведены в табл. 1 [1,3,4,5].

Таблица 1

Допустимые значения параметров режима удержания

Стандарт	Тип генератора	$b_{1_{ДЗ}}$	$b_{2_{ДЗ}}$	$a_{ДЗ}$	$c_{ДЗ}$
EN 300 462-4-1	ВЗГ	0,5 нс/с	2 нс/с	$2,3 \cdot 10^{-6}$ нс/с ²	60 нс
EN 300 462-7-1	МЗГ	1 нс/с	10 нс/с	$1,16 \cdot 10^{-5}$ нс/с ²	60 нс
EN 300 462-5-1	ГСЭ	50 нс/с	2000 нс/с	$1,16 \cdot 10^{-4}$ нс/с ²	120 нс

Проверку параметров устройств синхронизации в режиме удержания на соответствие требованиям стандартов EN 300 462-4-1 и EN 300 462-7-1 [3,5] рекомендуется проводить в соответствии с выражением (3), но исключительно с положительными значениями коэффициентов и свободного члена квадратного уравнения, то есть когда

$$x(t) = 0,5 \left| a \left| t^2 + (b_1 + b_2) \right| t + c \right|. \quad (4)$$

Таким образом, из приведенных выше результатов исследования следует вывод, что специалистам эксплуатационных и проектных организаций важно знать условия и критерии использования СС, образования путей их передачи и перехода из режима синхронной работы в режим удержания для рационального выбора и распределения оборудования и построения схем (цепей) синхронизации. Еще на этапе системного проектирования (синтеза) СТСС транспортной составляющей и сетей доступа телекоммуникационной сети при обосновании условий физической реализуемости ее структуры исходя из выражения (4) можно определить дополнительный ряд ограничений к целевой функции минимизации стоимости, который выглядит следующим образом:

$$b_1 \leq b_{1_{ДЗ}}; \quad b_2 \leq b_{2_{ДЗ}};$$

$$a \leq a_{ДЗ}; \quad c \leq c_{ДЗ}.$$

Литература

1. Правила применения оборудования тактовой сетевой синхронизации. Утверждены приказом Министерства информационных технологий и связи Российской Федерации № 161 от 07.12.2006 г.
2. Требования к построению сети связи общего пользования в части системы обеспечения тактовой сетевой синхронизации. Утверждены при-

казом Министерства связи и массовых коммуникаций Российской Федерации № 31 от 02.03.2009 г.

3. Стандарт ETSI EN 300 462-4-1 v.1.1.1 (1998-05) – Временные характеристики ведомых генераторов для обеспечения синхронизацией оборудования синхронной цифровой иерархии и плезихронной цифровой иерархии.

4. Стандарт ETSI EN 300 462-5-1 v.1.1.2 (1998-05) – Временные характеристики ведомых генераторов для работы оборудования синхронной цифровой иерархии.

5. Стандарт ETSI EN 300 462-7-1 v.1.1.1 (2000-05) – Передача и мультиплексирование. Общие требования для сетей синхронизации. Часть 7.1. Временные характеристики ведомых задающих генераторов, пригодных для обеспечения синхронизацией аппаратуры на местных узлах.