

# Анализ параметров качества сигналов синхронизации для моделирования системы тактовой сетевой синхронизации

**The analysis of the quality parameters of timing signals for the simulation of the system of clock network synchronization**

**Ключевые слова:** сигнал синхронизации — synchronization signal; стабильность частоты — frequency stability; структура системы тактовой сетевой синхронизации — the structure of the system of clock network synchronization.

В работе рассмотрен один из подходов к синтезу структуры системы тактовой сетевой синхронизации транспортной составляющей и сетей доступа телекоммуникационной сети, который первоначально сводится к общей концептуальной постановке соответствующей задачи с последующим переходом к формализованному прототипу. Этот прототип является основой математической модели структуры системы тактовой сетевой синхронизации, которая уточняется путём использования ряда дополнительных математических выражений, полученных в результате анализа параметров качества сигналов синхронизации.

In the work, considered one of the approaches to the synthesis of the structure of the system of clock network synchronization of transportation and access networks of the telecommunication network, which originally comes down to a General conceptual formulation of the corresponding problem with the further transition to the formal prototype. This prototype is the basis of the mathematical model of the structure of the system of clock network synchronization, which is refined through the use of a number of additional mathematical expressions, received as the result of the analysis of parameters of quality of synchronization signals.

Основными параметрами источников сигналов синхронизации (СС) системы тактовой сетевой синхронизации (СТСС) являются: точность гене-

**МОРОЗОВ / MOROZOV G.**

**Геннадий Григорьевич**

(morozov@loniis.org)

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

**ОСАДЧИЙ / OSADCHY S.**

**Сергей Александрович**

(spb.sos@hotmail.com)

ведущий инженер, 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

рируемой частоты (ГЧ) и стабильность частоты, которые зависят от старения элементной базы, влияния окружающей среды и ряда других влияющих факторов.

В наиболее общем виде СТСС транспортной составляющей и сетей доступа телекоммуникационной сети, в плане математического моделирования ее структуры, включает [1,2]:

– генераторное оборудование, реализуемое на сетевых узлах в виде первичных эталонных генераторов и вторичных задающих генераторов, а также генераторное оборудование систем передачи;

– совокупность (множество) путей между сетевыми узлами, образуемых последовательностями дуг, по которым передаются СС.

Сигнал синхронизации – сигнал, создаваемый генератором и используемый для тактирования операций, разделенных во времени в цифровом оборудовании связи и в цифровых сетях в целом.

Для синхронизации оборудования транспортной составляющей транспортной составляющей и сетей доступа телекоммуникационной сети наиболее целесообразно использовать следующие СС:

- сигнал синхронизации с частотой 2048 кГц, форма которого соответствует рекомендации G703 (пункт 13), а частота сигнала на выходе генератора сетевого элемента системы передачи синхронной цифровой иерархии – 2048 кГц ± 9,2 Гц;

- специально сформированный для синхронизации сигнал 2048 кбит/с, форма которого соответствует рекомендации G703 (пункт 9);

- информационный сигнал 2048 кбит/с, по форме соответствующий рекомендации G703 (пункт 9), структура которого определяется видом передаваемой цифровой информации, например, на стыке систем передачи плезиохронной цифровой иерархии используется цифровой сигнал в биполярном коде с высокой плотностью единиц 3-го порядка (код HDB-3).

Точность ГЧ оценивается относительным отклонением генерируемой частоты  $f_a$  генератора от номинальной частоты  $f_0$ , так что:

$$T_{ГЧ} = |f_0 - f_a| / f_0. \quad (1)$$

С учетом воспроизводимой ГЧ соотношение (1) может быть представлено в следующем виде:

$$T_{ГЧ_B} = \left| \frac{f_0 - f_a}{f_0} \right| \cdot (1 \pm \xi_{\max}),$$

где  $\xi_{\max}$  – максимальное отклонение точности ГЧ при многократных включениях генератора.

Точность ГЧ может измениться после воздействия ряда факторов, таких, как радиоактивное облучение, удары, тряска. Для СТСС требуется специальное исполнение генераторов, устраняющее или уменьшающее изменение точности ГЧ после воздействия внешних факторов.

Стабильность частоты характеризует изменение ГЧ в течение времени наблюдения  $\tau$  и может быть представлена в виде разности между точностью частоты в момент  $t$  и точностью частоты в момент  $t + \tau$ :

$$\Delta T_{ГЧ}(\tau) = T_{ГЧ}(t + \tau) - T_{ГЧ}(t).$$

Стабильность частоты оценивается следующими параметрами:

- кратковременной нестабильностью за время наблюдения 1с и 100 с;

- долговременной нестабильностью за время наблюдения 1 сутки и 1 год.

Нестабильность частоты ГЧ может определяться следующими выражениями [1,3]:

- девиация Аллана (ADEV)

$$ADEV(n\tau_0) \cong \sqrt{\frac{1}{2n^2\tau_0^2(N-2n)} \sum_{i=1}^{N-2n} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i)^2},$$

$$n = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{(N-1)}{2} \right\rfloor; \quad (2)$$

- модифицированная девиация Аллана

$$MDEV(n\tau_0) \cong \sqrt{\frac{1}{2n^4\tau_0^2(N-3n+1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[ \sum_{i=j}^{n+j-1} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2},$$

$$n = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{N}{3} \right\rfloor; \quad (3)$$

- девиация временного интервала (TDEV)

$$TDEV(n\tau_0) = \sqrt{\frac{1}{6n^2(N-3n+1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[ \sum_{i=j}^{n+j-1} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2},$$

$$n = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{N}{3} \right\rfloor; \quad (4)$$

- среднеквадратичное отклонение временного интервала (TIErms)

$$TIErms(n\tau_0) = \sqrt{\frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^{N-n} (x_{i+n} - x_i)^2},$$

$$n = 1, 2, \dots, (N-1); \quad (5)$$

- максимальное отклонение временного интервала (MTIE)

$$MTIE(n\tau_0) = \max_{1 \leq i \leq N-n} \left( \max_{k \leq i \leq k+n} (x_i) - \min_{k \leq i \leq k+n} (x_i) \right),$$

$$n = 1, 2, \dots, (N-1). \quad (6)$$

В соотношениях (2),..., (6) время наблюдения представлено дискретной величиной

$$\tau = n\tau_0, \quad (7)$$

где  $\tau_0$  – период дискретизации, величина может принимать значения от единицы до величины,

указанной в соответствующих соотношениях,  $N$  – количество результатов измерения.

Нестабильность ГЧ в значительной степени зависит от воздействия внешних дестабилизирующих факторов.

Наибольшее влияние на стабильность ГЧ оказывают:

- изменения температуры окружающей среды;
- изменения напряжения электропитания;
- изменение атмосферного давления;
- ускорение (при установке генераторов в движущихся объектах);
- вибрация (при установке генераторов в движущихся объектах).

Для повышения устойчивости цепей синхронизации СТСС необходимо соблюдать условие абсолютного отклонения частот сигналов синхронизации от двух независимых (не синхронизированных между собой) генераторов. Если для каждого из генераторов определены абсолютные отклонения частоты сигнала синхронизации от номинального значения  $\Delta f_1(t)$  и  $\Delta f_2(t)$ , как разность между реальным  $f(t)$  и номинальным  $f_n$  значениями частоты, то есть  $\Delta f(t) = f(t) - f_n$ . В этом случае абсолютное отклонение частот сигналов синхронизации от двух независимых генераторов  $\Delta f_{1,2}(t)$  определяется как разность между абсолютными отклонениями частоты сигнала синхронизации от номинального значения обоих генераторов, то есть  $\Delta f_{1,2}(t) = \Delta f_1(t) - \Delta f_2(t) = f_1(t) - f_2(t)$ .

Однако в теоретических исследованиях больше внимания уделяется определению точности генерируемой частоты не через абсолютное отклонение частот СС, а через относительное отклонение частоты

$$\delta_n(t) = \frac{\Delta f(t)}{f_n} = \frac{f(t) - f_n}{f_n}.$$

Так как на практике идеальной номинальной частоты не существует, то вместо нее используют частоту эталонного генератора (ЭГ)  $f_{ЭГ}$  (или специального измерительного прибора):

$$\delta_{ЭГ}(t) = \frac{f(t) - f_{ЭГ}}{f_{ЭГ}}.$$

Относительное отклонение частоты в общем случае изменяется в течение времени и состоит из следующих составляющих:

$$\delta(t) = \delta_0 + \delta_{cr}(t) + \delta_T(t) + \delta_{ш}(t),$$

где:  $\delta_0$  – постоянная величина начального относительного отклонения частоты, значение которой в зависимости от решаемой задачи определяется погрешностью частоты при изготовлении или при

калибровке генератора в процессе эксплуатации, точностью запоминания для режима удержания, старением генератора до момента времени, начиная с которого задаются функции  $f(t)$  и  $\Delta f(t)$ ;

$\delta_{cr}(t)$  – функция относительного отклонения частоты во время эксплуатации (за сутки, год, несколько лет) в результате старения;

$\delta_T(t)$  – относительные отклонения частоты, вызванные изменениями температуры;

$\delta_{ш}(t)$  – относительные отклонения частоты, вызванные случайными дестабилизирующими факторами (шумами).

Для оценки стабильности частоты СС во временной области с заданным временем дискретизации  $T_0$ , как функции интервала наблюдения (7) с числом отсчетов  $N$ , предложено очень большое число показателей, из которых для этапа системного проектирования СТСС можно выделить наиболее значимые [1,3]:

– отклонение (ошибка) временного интервала, то есть Time Interval Error (ТИЕ)

$$TIE(\tau) = x(t + \tau) - x(t),$$

где  $x(t)$  – функция отклонения отсчетов текущего времени, то есть

$$x(t) = T(t) - T_{ЭГ}(t),$$

представляющая собой разность функций изменения фазы двух сигналов – сигнала на выходе исследуемого генератора  $T(t)$  и сигнала эталонного генератора  $T_{ЭГ}(t)$ , не имеющего частотных и фазовых отклонений;

максимальное отклонение (ошибка) временного интервала, то есть Maximum Time Interval Error (МТИЕ), с помощью приведенного выше выражения (6) для  $N$ -отсчетов погрешности времени (ТЕ);

– девиация временного интервала (ТДЕВ), как корень квадратный от среднеквадратичного отклонения ТИЕ [1], то есть формула (4).

Однако анализ работ [1,2,3] показал, что одним из основных требований к СТСС, влияющих на ее устойчивость функционирования, является отсутствие циклов в ее структуре. В случае их наличия возможна подстройка генератора по своему сигналу, что приведет к его самовозбуждению, а затем к резкому снижению качества СС и нарушению устойчивости функционирования СТСС. Следовательно, в процессе синтеза СТСС необходимо решать задачу недопущения и исключения образовавшихся циклов.

Кроме недопущения циклов в структуре СТСС очень важное место в исследованиях занимает анализ режимов работы и переходов из режима синхронной работы в режим удержания.

## ИНФОКОММУНИКАЦИИ

Таким образом, наряду с необходимостью проведения исследований по недопущению циклов в путях передачи СС и анализа режимов работы СТСС, приведенные выше результаты анализа параметров качества сигналов синхронизации позволяют в дальнейших исследованиях определить перечень требований к ограничениям к целевой функции стоимости транспортной составляющей и сетей доступа телекоммуникационной сети в процессе разработки ее математической модели и методики системного проектирования. При нормировании и практических измерениях качества генераторов целесообразно использовать функции TDEV и MTIE. В процессе эксплуатации СТСС для оценки качества работы генераторов необходимо использовать коэффициент вариации (дисперсию) Аллана, численно равную среднеквадратичному приведенному отклонению частоты, а на этапе проектирования СТСС этот показатель качества можно не учитывать, допустив, что все генераторное оборудование заведомо удовлетворяет соответствующим требованиям и нормам по качеству работы.

### Литература

1. Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи. – М.: Мир, 2003. – 456 с.
2. Ясинский С.А. Унифицированные математические модели для анализа и синтеза элементов телекоммуникационных сетей. – СПб.: Военный университет связи, 2003. – 184 с.
3. Бакланов И.Г. SDH-NGSDH: практический взгляд на развитие транспортных сетей. – М.: Метротек, 2006. – 736 с.

## ИНСТИТУТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ



- **Производство:**
  - Беспилотные летательные аппараты
  - Рельефные карты
  - Ортофотопланы
  - Комплексы картографирования и навигации
  - Телекоммуникационные видеосистемы повышенной защищенности
- **Проектирование систем:**
  - Геоинформационные технологии
  - Системы поддержки принятия решений
  - Мини-аэроботехника
- **Оказание услуг:**
  - Аэрофотосъемка
  - Кадастр
  - Аренда тахеометров
  - Территориальное планирование
  - Сертификация и испытания



**ЗАО «Институт телекоммуникаций»**  
**194100, Санкт-Петербург,**  
**Кантемировская ул., д. 5/5,**  
**тел.: 740-77-07, факс: 740-77-08**