

# АЛГОРИТМ ТАКТОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ СЕТЕВОГО УЗЛА РЕГИОНАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ СВЯЗИ

## ALGORITHM OF CLOCK SYNCHRONIZATION OF ELEMENTS OF NETWORK POINT OF THE REGIONAL TRANSPORT NETWORK OF COMMUNICATION

**S. Kovalsky  
N. Fokin  
V. Kovalev**

*Summary.* The article offers solution of the task for organization of synchronization management conducted nodes of a regional transport communication network, equipped by high-stable quartz oscillators whose long-term instability of frequency has an order proposed 10–9–10–10.

*Keywords:* regional transport communication network, system of clock network synchronization, atomic standards of frequency, approximation, function minimization.

**Ковальский Сергей Петрович**

*К.т.н, сотрудник Академии ФСО России, г. Орел  
metal\_forever@inbox.ru*

**Фокин Николай Иванович**

*К.т.н, сотрудник Академии ФСО России  
sky79@mail.ru*

**Ковалев Владимир Олегович**

*Сотрудник Академии ФСО России  
9534718993@mail.ru*

*Аннотация.* В статье предложено решение задачи организации управления синхронизацией ведомых узлов региональной транспортной сети связи, оснащенных высокостабильными кварцевыми генераторами, долговременная нестабильность частоты которых имеет порядок 10–9–10–10.

*Ключевые слова:* региональная транспортная сеть связи, система тактовой сетевой синхронизации, атомные стандарты частоты, аппроксимация, минимизация функции.

**П**рактическое функционирование региональной транспортной сети связи (РТСС) с обеспечением для сетей доступа (СД) необходимого числа каналов заданного качества возможно только при наличии в ее составе системы тактовой сетевой синхронизации (СТСС). СТСС представляет собой совокупность ведущих и ведомых генераторов и каналов синхронизации, образуя сеть тактовой сетевой синхронизации. При расхождении частот генераторов сетевых узлов (СУ), на которых осуществляется транзит каналов, появляются проскальзывания [1].

Для достижения синхронизации в сети необходимо передавать информацию о тактовой частоте всем устройствам сети. Для этой цели используются сигналы синхронизации. Такие сигналы могут передаваться в линейных сигналах или отдельно в виде специальных сигналов.

В случае потери всех внешних источников синхронизации возникает задача организации работы узлов РТСС, оснащенных высокостабильными атомными стандартами частоты (АСЧ) не только в ведомом, но и ведущем режимах. Для организации работы узлов в ведомом режиме необходимо разработать алгоритм тактовой синхронизации элементов сетевого узла (алгоритм управления частотой и фазой регионального узла).

Исходя из специфики этой задачи и учитывая результаты разработки устройств синхронизации (ведомых таймеров) за рубежом и в России, можно определить следующие повышенные требования, которым должен удовлетворять алгоритм управления частотой и фазой регионального узла в ведомом режиме [2]:

- ♦ подавление флуктуаций фазы входного сигнала должно осуществляться, начиная с частот порядка 10–6–10–5 Гц;
- ♦ режим захвата должен обеспечиваться лишь от тех сигналов, средняя частота которых отличается от средней частоты местного задающего генератора на величину, не превышающую нескольких единиц одиннадцатого знака;
- ♦ при пропадании входного сигнала или выходе его средней частоты за границы полосы захвата узел должен перейти в ведущий (автономный) режим с запоминанием последнего значения частоты входного сигнала;
- ♦ в процессе вхождения в синхронизм и при управлении фазой выходного сигнала в синхронном режиме должно достигаться по возможности меньшее значение ошибки временно-го интервала.

Перечисленные требования с большим запасом укладываются в нормы рекомендации G.812 Международного

союза электросвязи, относящиеся к синхронизации ведомых узлов сети.

К поставленной задаче примыкает вопрос организации управления синхронизацией ведомых узлов РТСС, оснащенных высокостабильными кварцевыми генераторами, номинальное значение частоты которых обычно составляет 5 МГц, как и у АСЧ. Долговременная нестабильность частоты таких генераторов имеет порядок 10<sup>-9</sup>–10<sup>-10</sup>, поэтому ведущий режим для данных узлов является аварийным и работа в нем может продолжаться не более нескольких суток.

### Пути решения задачи

В качестве аппаратной основы следует использовать устройство синхронизации, которое представляет собой астатический синтезатор частоты 2048 кГц из сигнала частотой 5 мГц, получаемого от АСЧ (или кварцевого генератора), в котором имеется возможность регулирования фазы выходного сигнала от внешнего источника с шагом Δ<1 нс. При этом генераторное оборудование ведомого СУ с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ) должно иметь входное устройство (ВУ), к которому подводится несколько тактовых частот первичных цифровых групповых потоков. К ВУ, которое целесообразно реализовывать на микропроцессоре, кроме того, от подсистемы управления должны подводиться данные по значению  $k_{\text{ош}}$  первичных цифровых трактов, тактовые частоты которых подведены к ВУ.

В любой момент времени синхронизацию целесообразно осуществлять от одного синхросигнала. С этой целью необходимо выбирать первичный цифровой тракт  $k_{\text{ош}}$  в котором меньше, чем в других. В этом случае в тракте фазовые дрожания будут невелики и практически будут исключаться случаи необоснованного перехода в режим вхождения в синхронизм.

В настоящее время адаптивная синхронизация генераторного оборудования узлов осуществляется следующим образом. Когда система синхронизации функционирует нормально, на некотором интервале времени (участке локальной аппроксимации) строится кривая разности фаз —  $f(t)$  между ведущим  $\varphi_1$  и подстраиваемым  $\varphi_2$  генератором. При нарушении синхронизации ведомый генератор работает в автономном режиме, однако его частота подстраивается в соответствии с кривой  $f(t)$ , что обеспечивает меньшую погрешность фаз между генератором данного узла и ведущего. В [3]  $f(t)$  выбирается в виде некоторой прямой. Учитывая математическую модель генератора (1)

$$\Phi(t) = \Phi(0) + \omega_0 t + \sum_{k=1}^M \frac{L(k-1)}{k!} t^k + [\xi(t) - \xi(0)] \quad (1)$$

можно утверждать, что аппроксимация значений отсчетов разности фаз генераторов на выходе фазового детектора ФАПЧ  $\varphi(kT)$  некоторой прямой является мало-пригодной. Функции вида (1) наиболее точно могут быть аппроксимированы экспоненциальными полиномами вида (2)

$$f(t, a) = \sum_{k=1}^n A_k e^{p_k t},$$

$$a = [A_1, p_1, \dots, A_{n-1}, p_{n-1}, A_n, p_n]^T \quad (2)$$

На интервале аппроксимации  $[t_1, t_2]$  с использованием предложенного в [3] метода интерполяции экспоненциальными полиномами, выражение (2) определять не целесообразно, поскольку на  $[t_1, t_2]$  число возможных точек интерполяции, как правило, будет превосходить порядок вектора  $a$ . Поэтому метод, предложенный в [3], целесообразно использовать в качестве первого приближения для нахождения (2) и считать параметры этой функции за вектор  $\vec{a}^{(0)}$ . Далее, с учетом всех возможных точек интерполяции ( $m$ ), на интервале  $[t_1, t_2]$  осуществлять минимизацию функции (3)

$$f_1(t, a) = \sum_{k=1}^m (\varphi(kt) - \sum_{k=1}^n A_k e^{p_k kt})^2 \quad (3)$$

Блок-схема алгоритма минимизации функции (3) показана на рисунках 1 и 2.

Первое приближение  $\vec{a}^{(0)}$  целесообразно находить в соответствии с [3]. Далее для минимизации функции (3), в соответствии с ее характером, целесообразно использовать метод градиентного спуска с постоянным шагом [4].

Для решения задачи (3) (нахождение локального экстремума  $f(t, a)$ ), функция  $f(t, a)$  должна удовлетворять следующим требованиям:

- ◆ быть ограниченной на  $R^n$ ;
- ◆ иметь непрерывные частные производные.

Стратегия поиска локального экстремума функции  $f(t, a)$ , заключается в построении последовательности таких точек

$$\{(t, a)^k\}, k = 0, 1, \dots, \text{ что}$$

$$f((t, a)^{k+1}) < f((t, a)^k), k = 0, 1, \dots$$

Точки  $\{(t, a)^k\}$  вычисляются по следующему правилу:

$$(t, a)^{k+1} = (t, a)^k - t_k \nabla f(t, a)^k \quad k = 0, 1, \dots \quad (4)$$

где точка  $(t, a)^0$  задается пользователем;

$\nabla f((t, a)^k)$  — градиент функции  $f((t, a))$ , вычисленный в точке  $(t, a)^k$ ;  $t_k$  — величина шага, задаваемая пользователем (остается постоянной до тех пор, пока функция убывает в точках последовательности

$\{(t, a)^k\}$ , что контролируется путем проверки выполнения условия

$$f((t, a)^{k+1}) - f((t, a)^k) < 0 \text{ или}$$

$$f((t, a)^{k+1}) - f((t, a)^k) < -\xi \|\nabla f((t, a)^k)\|^2, \quad (0 < \xi < 1).$$

Построение последовательности  $\{(t, a)^k\}$  заканчивается в точке  $(t, a)^k$ , в которой выполняется условие

$$\|\nabla f((t, a)^k)\| < \xi_1, \quad \xi_1 —$$

заданное малое положительное число, или  $k \geq M$ , где  $M$  — предельное число интеграций, или при двукратном одновременном выполнении двух неравенств

$$\|(t, a)^{k+1} - (t, a)^k\| < \xi_2, \quad |f((t, a)^{k+1}) - f((t, a)^k)| < \xi_2,$$

$\xi_2$  — малое положительное число.

## ВЫВОДЫ

1. Если ограниченная снизу на  $R^n$  функция  $f(t, a)$  дифференцируема, а ее градиент удовлетворяет условию Липшица

$$\|\nabla f(x) - \nabla f(y)\| \leq L \|x - y\|, \quad \forall x, y \in R^n, \text{ где } L > 0,$$

то при любой начальной точке  $x^0 \in R^n$  для метода градиентного спуска с постоянным шагом имеем

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|\nabla f((t, a)^k)\| = 0. \quad (5)$$

2. В соответствии с приведенным обоснованием адаптацию синхронизации можно выполнять для одного из региональных узлов. Тогда, при нарушении синхронизации узлов региона от ведущего генератора, их синхронизация может осуществляться от узла с адаптивной синхронизацией.

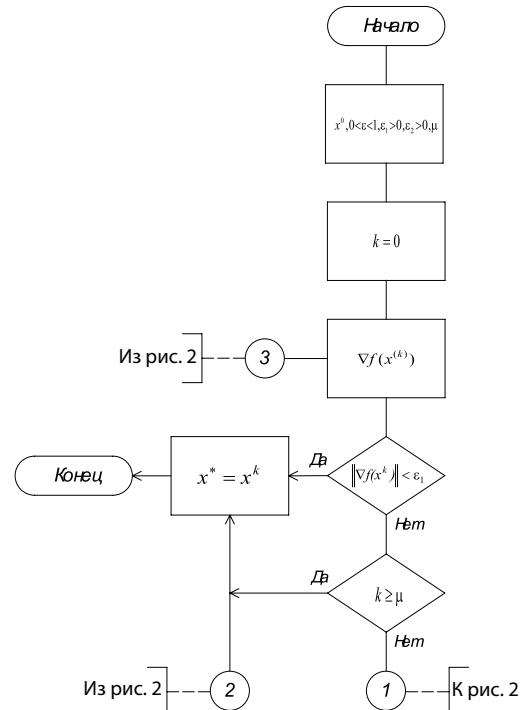


Рис. 1

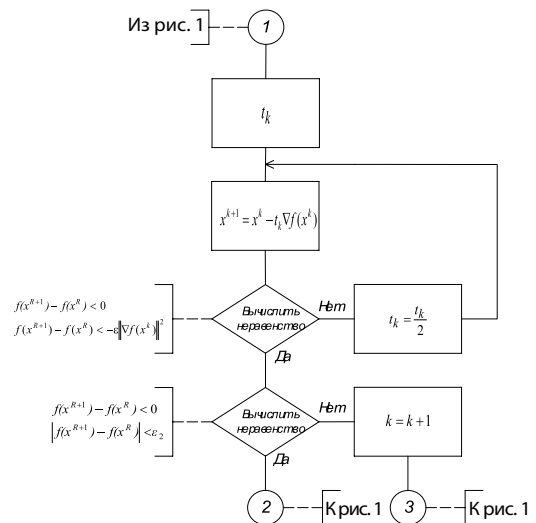


Рис. 2

## ЛИТЕРАТУРА

1. Крухмалев В. В., Моченов А. Д. Синхронные телекоммуникационные системы и транспортные сети: учебное пособие. — М.: УМЦ ЖДТ (Маршрут), 2012. — 288 с.
2. Сухман С. М., Бернов А. В., Шевкопляс Б. В. Синхронизация в телекоммуникационных системах. Анализ инженерных решений. — М.: Эко-Трендз, 2003. — 272 с.
3. Зильберг Е. В., Колтунов М. Н. Адаптивный алгоритм управления синхронизацией регионального узла цифровой сети. //Электросвязь, 1990, № 8.
4. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учеб. пособие/ А. В. Пантелеев, Т. А. Летова. — 3 — е изд., стер. — М.: Высш. шк., 2008. — 544 с.: ил.