

УДК 006.924.4

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СИСТЕМЫ ОДНО- И ДВУХСТОРОННИХ СРАВНЕНИЙ ШКАЛ ВРЕМЕНИ

**Донченко С.С., Колмогоров О.В., Прохоров Д.В., Буев С.Г.**  
ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево Московская обл.,  
nio8@vniiftri.ru

*Представлены результаты исследования системы одно- и двухсторонних сравнений шкал времени, предназначенной для определения расхождения и синхронизации шкал времени стандартов частоты и времени, размещенных в двух удаленных пунктах, соединенных волоконно-оптической линией связи. Показано, что границы абсолютной погрешности синхронизации при доверительной вероятности 0,95 составляют не более  $\pm 100$  пс при длине волоконно-оптической линии связи до 30 км. Предложены пути уменьшения погрешности и повышения дальности действия системы.*

*Results of one- and two way system comparisons of time scales research, intended for the definition of a divergence between frequency and time standards time scales placed in two remote objects connected via the optical fiber communication line are presented in the report. It is shown that system uncertainty is less than 100 ps with a length of optical fiber communication line up to 30 km. Ways of error reduction and increase of system working range are offered.*

*Ключевые слова: шкалы времени, синхронизация, погрешность*

В работах [1, 2] предложена система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени (СОДС ШВ) для сравнения и синхронизации шкал времени стандартов частоты и времени, размещенных на двух удаленных объектах, соединенных волоконно-оптической линией связи (ВОЛС). Система СОДС ШВ состоит из двух частей, которые располагаются на двух удаленных объектах – пунктах размещения стандартов частоты, формирующих шкалы времени первого и второго объектов. Определение расхождения шкал времени системой в каждый  $i$ -й момент времени основано на излучении в ВОЛС зондирующего лазерного импульса, регистрации момента излучения импульса в шкале времени первого объекта, регистрации момента приема импульса на второй объект в шкале времени второго объекта, регистрации момента приема импульса, прошедшего по ВОЛС и отраженного обратно на первый объект, в шкале времени первого объекта, и расчета расхождения шкал времени по формуле (1) [2]:

$$\Delta T_i = T_i^{II} - \frac{T_i^{I1} + T_i^{I2}}{2} + \tau_3, \quad (1)$$

где  $T_i^{I1}$  – момент излучения импульса в шкале времени первого объекта;

$T_i^{II}$  – момент приема импульса в шкале времени второго объекта;

$T_i^{I2}$  – момент приема отраженного импульса в шкале времени первого объекта;

$\tau_3$  – поправка для учета задержек в аппаратуре.

Аппаратурная поправка определяется экспериментально при калибровке системы. Для определения аппаратурной поправки  $\tau_3$  обе части СОДС ШВ располагались на одном объекте и подключались к одному и тому же стандарту частоты и времени (СЧВ). Секундные метки времени с выхода «1 PPS» СЧВ одновременно подавались на обе части СОДС ШВ (см. рис. 1), при этом результат измерений СОДС ШВ принимался в качестве значения аппаратурной поправки.

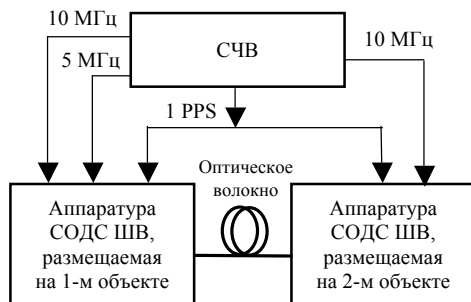


Рис. 1. Схема подключения СОДС ШВ при определении аппаратурной поправки

После калибровки аппаратура системы СОДС ШВ была размещена на двух объектах, соединенных ВОЛС длиной 1,3 км. В ходе экспериментов сравнивались шкалы времени, формируемые на этих объектах как независимо, так и с коррекцией ведомой шкалы времени к опорной.

На рис. 2 показаны результаты измерений расхождения шкал времени, формируемых двумя стандартами частоты, один из которых является опорным, а частота второго корректируется с целью подстройки к частоте опорного стандарта.

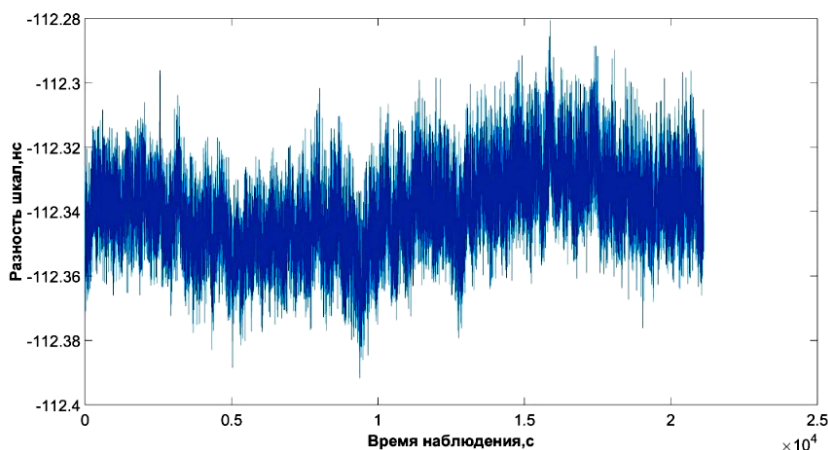


Рис. 2. Результаты измерений расхождения опорной и корректируемой шкал времени

Полученные результаты подтверждают возможность СОДС ШВ определять расхождения шкал времени двух СЧВ функционирующих как независимо друг от друга, так и в режиме коррекции.

Оценка дальности действия системы, проведенная путем имитации ослабления в оптической линии с помощью перестраиваемого оптоволоконного аттенуатора, показала, что применяемые в системе элементы обеспечивают ее работу при протяженности ВОЛС до 30 км. Выбор энергетических и спектральных характеристик волоконно-оптических устройств из состава СОДС ШВ с учетом параметров оптического волокна используемой ВОЛС может позволить увеличить расстояние между объектами в несколько раз.

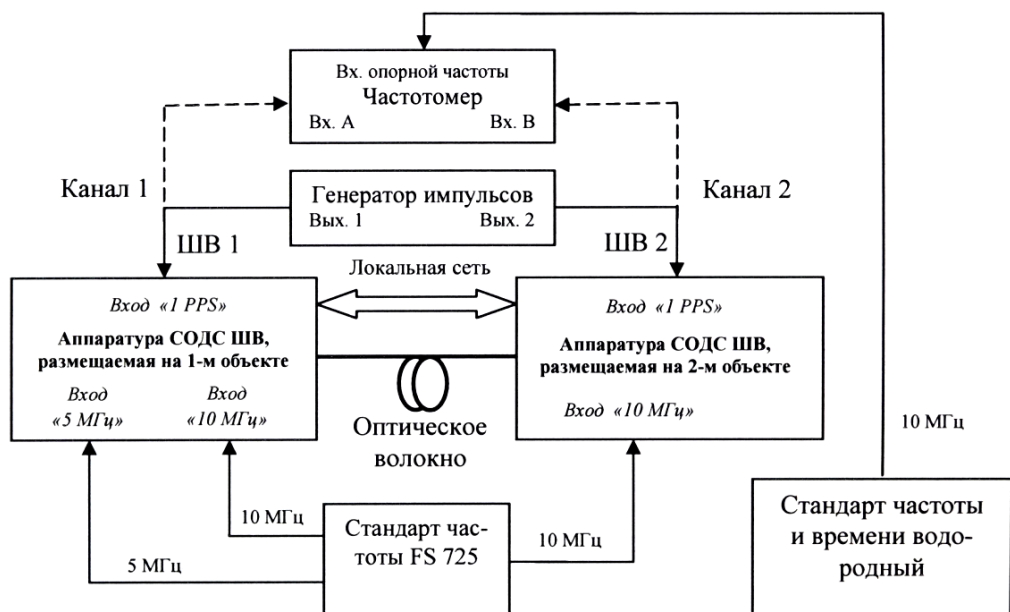


Рис. 3. Схема подключения СОДС ШВ при определении погрешности измерений расхождения шкал времени

Для экспериментального определения погрешности СОДС ШВ использовалась установка, схема которой приведена на рис. 3. В данной схеме в качестве источника секундных меток шкал времени ШВ 1 и ШВ 2 используется двухканальный генератор импульсов, позволяющий регулировать сдвиг фаз между сигналами в каналах 1 и 2 для установки различных значений измеряемых расхождений шкал времени. Действительные значения интервала времени между секундными метками измеряются частотомером, на который для обеспечения высокой точности измерений (погрешность около 50 пс) подается сигнал опорной частоты от водородного стандарта частоты и времени.

Сигналы с выходов генератора импульсов последовательно подаются на частотомер и исследуемую СОДС ШВ. Измерения повторяются не менее пяти раз ( $N \geq 5$ ) при неизменных настройках генератора. Далее цикл измерений повторяется при установке других значений сдвига фаз между сигналами на выходах генератора, соответствующих выбранному проверяемому точкам диапазона измерений расхождения шкал времени.

Определение значений погрешности СОДС ШВ по полученным данным для каждой точки диапазона измерений проводится в следующем порядке.

Рассчитываются средние значения интервалов времени, измеренных частотомером  $\bar{T}_{ЭСЧ}$  и СОДС ШВ  $\bar{T}_{СОДС ШВ}$  по формулам:

$$\bar{T}_{ЭСЧ} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{T}_{ЭСЧ i} \quad \text{и} \quad \bar{T}_{СОДС ШВ} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{T}_{СОДС ШВ i}, \quad (2)$$

и соответствующие значения среднего квадратического отклонения по формулам:

$$\sigma_{T_{ЭСЧ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{ЭСЧ i} - \bar{T}_{ЭСЧ})^2}{n(n-1)}},$$

$$\sigma_{T_{СОДС ШВ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{СОДС ШВ i} - \bar{T}_{СОДС ШВ})^2}{n(n-1)}}. \quad (3)$$

Далее определяется значение систематической составляющей погрешности измерений расхождения шкал времени аппаратурой СОДС ШВ  $\theta_{T_{СОДС ШВ}}$ :

$$\theta_{T_{СОДС ШВ}} = \bar{T}_{СОДС ШВ} - \bar{T}_{ЭСЧ}. \quad (4)$$

Значение погрешности измерений расхождения шкал времени  $\Delta_T$  аппаратурой СОДС ШВ при доверительной вероятности 0,95 определяется по формуле:

$$\Delta_T = \pm 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{3} \cdot (\theta_{ЭСЧ}^2 + \theta_{T_{СОДС ШВ}}^2) + \sigma_{T_{ЭСЧ}}^2 + \sigma_{T_{СОДС ШВ}}^2}, \quad (5)$$

где  $\theta_{ЭСЧ}$  – погрешность измерений интервалов времени частотомером.

При определении погрешности СОДС ШВ по результатам экспериментальных исследований было установлено, что для всего диапазона измерений случайная погрешность системы, выраженная в виде среднего квадратического отклонения, не превышает 15 пс, а доверительные границы погрешности СОДС ШВ при вероятности 0,95 не превышают  $\pm 100$  пс.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что значительный вклад (около 50 %) в неисключенную систематическую погрешность (НСП) СОДС ШВ вносит погрешность эталонного измерителя интервалов времени. Теоретические расчеты показали, что НСП системы можно уменьшить до 10-20 пс за счет применения в качестве эталонных измерителей интервалов времени широкополосных цифровых запоминающих осциллографов, использующих высокостабильный сигнал опорной частоты от водородного стандарта частоты.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований установлено, что разработанная система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени позволяет проводить измерения расхождения шкал времени пространственно удаленных эталонов при протяженности оптоволоконной линии связи между пунктами их расположения до 30 км, при этом погрешность измерений расхождения шкал времени системой составляет не более 100 пс.

### **Литература**

1. Донченко С.С., Колмогоров О.В., Прохоров Д.В. Система одно- и двухсторонних сравнений шкал времени// Измерительная техника, 2015, № 1.
2. Пат. 2 547 662 РФ. Способ сличения шкал времени и устройство для его осуществления / О.В. Колмогоров, Д.В. Прохоров; заявитель и патентообладатель ФГУП "ВНИИФТРИ". Оpubл. 10.04.2015, бюл. № 10.