

УДК 004.032.322

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОЙ КОМПАНИИ

А.С. Рагузин, Н.Г. Губанов

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассмотрена задача построения функциональной модели системы синхронизации времени информационных систем, основанной на протоколе NTP, оптимальной для решения задачи поддержания единого времени на энергообъектах региональной электросетевой компании. Введено понятие базовой модели системы синхронизации времени. Проведено математическое моделирование формирователя локальной шкалы времени на узле системы, средств сравнения шкал времени узлов базовой модели и их коррекции. Полученные результаты позволяют подбирать соответствующие средства в зависимости от предъявляемых требований по точности и стабильности работы.

Ключевые слова: система синхронизации времени, модель шкалы времени, метод сравнения шкал времени, метод коррекции шкалы времени, метки времени.

В статье [1] был рассмотрен вопрос организации типовой комплексной системы синхронизации времени (ССВ) различного рода информационных систем распределительной сетевой компании (РСК). Уточненная схема организации такой системы представлена на рис. 1.

Также в [1] было определено, что оптимально будет организовать ССВ с помощью протокола синхронизации времени NTP, используемого в пакетных сетях передачи данных. В данной статье рассмотрены вопросы моделирования такой ССВ.

Описание ССВ и выбор объектов моделирования

Определим ССВ как набор временных шкал (ВШ), распределенный на значительной территории, и средств, обеспечивающих синхронизацию их показаний и использующих стандартные протоколы обмена данными для сетей с коммутацией пакетов.

При этом ССВ может быть реализована разными методами, применяемыми для получения исходной ВШ, для передачи меток времени (МВ) (каналы передачи данных, протоколы), для сравнения и корректировки ВШ (фазовая либо частотная подстройка).

С целью наиболее рационального применения имеющихся в РСК технических ресурсов в качестве структурной основы, моделируемой ССВ, в [1] была взята структура сетей передачи данных РСК с включенными в нее информационными системами, организованная по технологии пакетной передачи данных Ethernet. В связи с этим структура ССВ в большинстве случаев определяется то-

Николай Геннадьевич Губанов (к.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Автоматизация и управление технологическими процессами».
Алексей Сергеевич Рагузин, аспирант.

пологией, построенной в РСК, сети передачи данных, и в общем виде представляет собой схему дерева, а на различных участках – линейную цепь, либо схему «звезда».

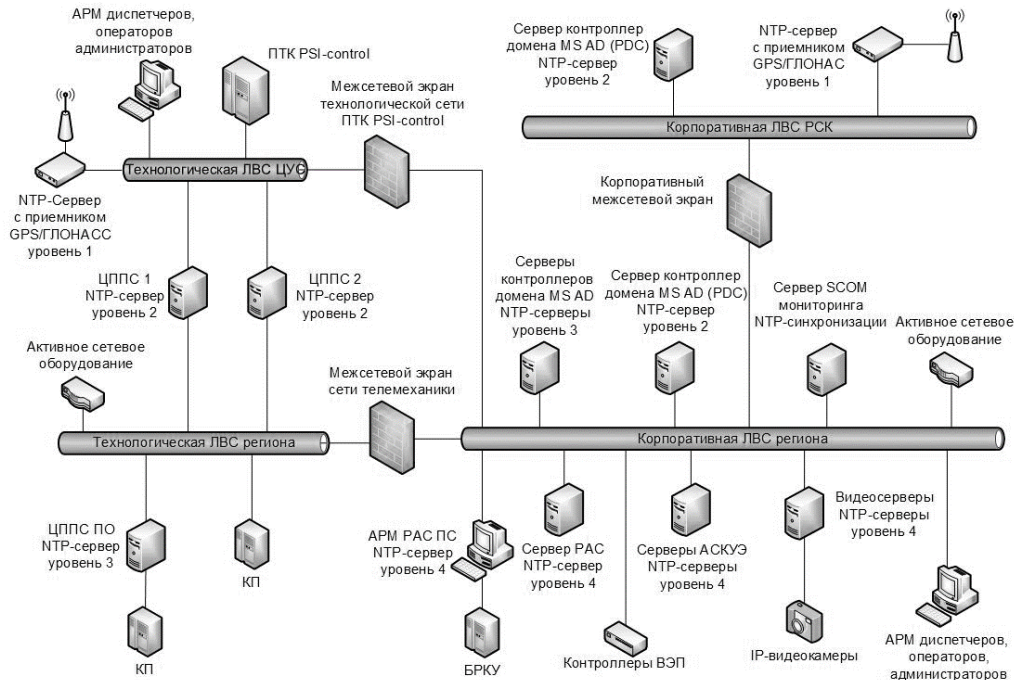


Рис. 1. Схема организации ССВ типовых устройств информационных систем РСК

В случае организации функционирования ССВ на каком-либо участке по схеме «звезда» появляется возможность производить синхронизацию всех локальных ВШ на узлах, расположенных в лучах «звезды», напрямую с эталонной ВШ на узле, расположенном в центре. Во втором случае, при функционировании ССВ по линейной схеме, каждый ее узел синхронизирует свою локальную ВШ с ВШ предыдущего узла. Таким образом, функциональная схема ССВ, описывающая процесс синхронизации от узла с эталонной ВШ до последнего узла, расположенного в одной из ветвей дерева, можно представить в виде линейной схемы, состоящей из N узлов, которые последовательно объединяются каналами передачи данных (рис. 2). При этом процесс синхронизации ВШ последнего узла с первым осуществляется через некоторое количество промежуточных узлов. Из-за появления в процессе синхронизации ошибки на каждом участке схемы и их суммирования по всем участкам точность синхронизации времени падает.

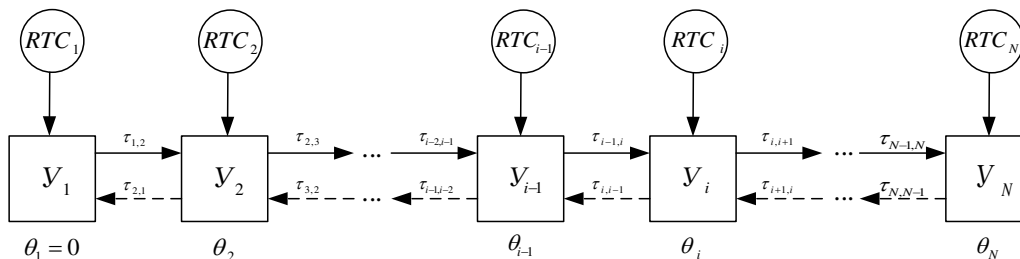


Рис. 2. Функциональная схема одной из ветвей ССВ

На рис. 2: U_i – i -й узел моделируемой ССВ; RTC_i – аппаратные часы реального времени узла U_i ; $\tau_{i-1,i}$, $\tau_{i,i-1}$ – задержки в канале передачи от узла U_{i-1} к узлу U_i и от узла U_i к узлу U_{i-1} соответственно; θ_i – ошибка времени ВШ узла U_i относительно ВШ узла U_1 , где $i = 1...N$. U_1 – узел, ВШ которого считается эталонной; U_{i-1} – ведущий узел, U_i – ведомый узел ($i = 2...N$).

Задача установления единого времени для всех узлов системы сводится к некому набору последовательных задач синхронизации ВШ двух соседних узлов схемы, при этом ВШ узла U_i сравнивается с ВШ узла U_{i-1} , а затем корректируется на значение разницы, полученной при сравнения их шкал.

Из-за большого количества узлов, входящих в типовую ССВ, провести полное качественное описание и анализ функциональной схемы, приведенной на рис. 2, становится довольно сложной задачей. Для упрощения этой задачи введем понятие базовой модели, которая будет включает в себя два соседних узла. Для каждой базовой модели системы, объединяющей U_{i-1} и U_i ($i = 2...N$), определяется θ_i – ошибка ВШ узла i относительно ВШ узла $i-1$. Таким образом, ошибку любого узла ССВ относительно исходного, ВШ которого принята эталонной, можно определить как $\theta_i = \sum_{j=2}^i \theta_j$ для $i = 2, 3, \dots, N$.

На всех узлах моделируемой ССВ для получения первоначальной локальной ВШ используются аппаратные часы реального времени (англ. Real Time Clock, RTC). Следует разделить ВШ на аппаратные (кварцевые часы, используемые в аппаратном оборудовании) и системные (программные часы, используемые в операционных системах). После включения устройства в течение начальной загрузки операционная система синхронизирует системные часы, т. е. системную ВШ, с аппаратными часами, аппаратной ВШ. После этого те и другие ВШ определяют время независимо.

Узлы ССВ включены в общую сеть каналом передачи данных. Каждый узел включает программные средства синхронизации своей системной ВШ с системной ВШ другого узла. Синхронизация ВШ одного узла с ВШ другого узла достигается путем обмена МВ между этими узлами с помощью сетевых протоколов синхронизации. При этом один из узлов является ведущим, его ВШ считается точной, а другой – ведомым.

Исходя из вышесказанного определяются следующие объекты для моделирования ССВ:

- аппаратные часы;
- средства синхронизации ВШ;
- средства коррекции ВШ.

В качестве способа моделирования целесообразно выбрать математическое макро моделирование, которое, определяя основные параметры моделируемых объектов, позволяет получить их простое математическое описание, сохранив при этом принципы их функционирования [2].

Модель локальной временной шкалы

Как уже было сказано, в моделируемой ССВ ВШ на узле формируется от сигналов аппаратных часов реального времени. Большинство RTC использует кварцевый генератор с резонатором на частоте 32768 Гц, но некоторые используют частоту питающей сети.

Представим абсолютное время с помощью некоторого процесса, который может быть описан следующим колебанием:

$$s(t) = A \sin P(t),$$

где t – абсолютное время; A – амплитуда колебаний; $P(t)$ – фаза колебаний.

Для идеального колебания идеального генератора фаза описывается следующим выражением:

$$P(t) = 2\pi v_{const}t + \varphi_{0const},$$

где $v_{const} = 1/T_{const}$ – постоянная частота колебаний; T_{const} – постоянный период колебаний; φ_{0const} – начальная фаза колебаний в t_0 .

Тогда абсолютное время может быть описано выражением

$$t = \frac{P(t) - \varphi_{0const}}{2\pi v_{const}}.$$

Но на практике для реального генератора, применяемого в RTC, значения частоты v и фазы φ_0 зачастую отличаются от идеального генератора и изменяются с течением времени под воздействием различных факторов. Поэтому для локальной ВШ справедливо

$$T(t) = \frac{2\pi vt + \varphi_0 - \varphi_{0const}}{2\pi v_{const}} = \frac{v}{v_{const}}t + \frac{\varphi_0 - \varphi_{0const}}{2\pi v_{const}},$$

где первый член v/v_{const} описывает масштаб локальной ВШ, а второй – сдвиг начала отсчета локальной ВШ от t_0 .

Для приведения локальной ВШ к абсолютной требуется совместить начало отсчета этих шкал t_0 и уравнивать частоты колебаний, так как при увеличении v локальная ВШ будет ускоренной, а при уменьшении – замедленной.

Точность показаний ВШ характеризуется ошибкой времени, которая может быть представлена как [3]

$$\theta(t) = T(t) - t. \quad (1)$$

Для задач синхронизации времени вместо абсолютной применяют так называемую эталонную ВШ $T_{ref}(t)$, полученную от «надежного источника времени». Тогда (1) можно представить в виде [3]

$$\theta(t) = T(t) - T_{ref}(t).$$

Метод сравнения временных шкал узлов базовой модели

В моделируемой ССВ принят клиент-серверный режим работы протокола NTP. Для обмена синхронизационной информацией между клиентами и серверами используются специальные сообщения. Все значения времени представляются в двойном формате с битами, пронумерованными в обратном порядке. В качестве математического описания процесса сравнения ВШ двух узлов базовой модели ССВ ниже рассматривается процесс сравнения по широко используемому в телекоммуникациях *методу двунаправленной передачи*.

На рис. 3 представлена временная диаграмма, поясняющая процесс сравнения ВШ двух узлов базовой модели.

В момент t_1 ведомый узел B фиксирует показание своей ВШ T_1^b и отправляет его в виде МВ ведущему узлу A . Узел A принимает его и фиксирует этот момент по своей ВШ показателем времени T_2^a .

В момент t_3 узел A фиксирует показание своей ВШ T_3^a и отправляет его, а также T_2^a в виде МВ узлу B . Узел B принимает МВ T_2^a , T_3^a и фиксирует показание T_4^b своей ВШ.

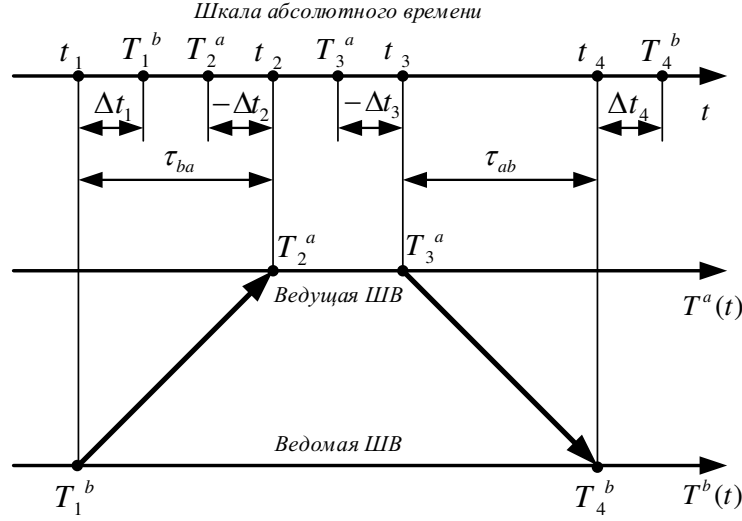


Рис. 3. Временная диаграмма сравнения ВШ двух узлов

По окончании цикла обмена сообщениями узел B имеет четыре МВ – T_1^b , T_2^a , T_3^a и T_4^b . Они позволяют вычислить ошибку ведомой ВШ относительно ведущей.

Согласно представленной на рис. 3 временной диаграмме получается система уравнений:

$$\tau_{ba} = (T_2^a - \Delta t_2^a) - (T_1^b - \Delta t_1^b), \tau_{ab} = (T_4^b - \Delta t_4^b) - (T_3^a - \Delta t_3^a), \quad (2)$$

где $\tau_{ab} = t_2 - t_1$, $\tau_{ab} = t_4 - t_3$ – задержки распространения МВ в канале передачи от узла B к узлу A и от узла A к узлу B соответственно; $\Delta t_1^b = T_1^b - t_1$, $\Delta t_2^a = T_2^a - t_2$, $\Delta t_3^a = T_3^a - t_3$, $\Delta t_4^b = T_4^b - t_4$ – ошибки показаний ВШ. При этом в случае эталонной ведущей ВШ принимается $\Delta t_2^a = \Delta t_3^a = 0$.

Имея в системе двух уравнений шесть неизвестных величин τ_{ab} , τ_{ba} , Δt_1^b , Δt_2^a , Δt_3^a , Δt_4^b , можно говорить о недостаточности априорных данных. Для устранения неизвестных можно ввести новые параметры и условия либо определить их некоторым другим способом.

Например, приняв величины $\Delta t_{12} = \Delta t_1^b - \Delta t_2^a$ и $\Delta t_{43} = \Delta t_4^b - \Delta t_3^a$, которые отражают разницу между ведущей и ведомой ВШ узлов A и B в начале и в конце цикла сравнения, можно из (2) получить систему уравнений с четырьмя неизвестными:

$$\tau_{ba} - \Delta t_{12} = T_2^a - T_1^b, \tau_{ab} + \Delta t_{43} = T_4^b - T_3^a. \quad (3)$$

Складывая первое уравнение со вторым и вычитая первое уравнения из второго, получим из (3) систему вида [5]

$$\begin{cases} \tau_{\Sigma} + \Delta\theta = (T_4^b - T_1^b) - (T_3^a - T_2^a), \\ \theta_{\Sigma} - \Delta\tau = (T_4^b + T_1^b) - (T_3^a + T_2^a), \end{cases} \quad (4)$$

где $\tau_{\Sigma} = \tau_{ab} + \tau_{ba}$; $\Delta\tau = \tau_{ba} - \tau_{ab}$; $\Delta\theta = \Delta t_{43} - \Delta t_{12}$; $\theta_{\Sigma} = \Delta t_{12} + \Delta t_{43}$.

Как предлагалось выше, для уменьшения числа неизвестных в уравнении введем ограничительные условия. Пусть:

– шкалы узлов A и B идентичны $\Delta\theta = 0$ или $\Delta t_{43} = \Delta t_{12} = \theta$, но при этом имеют неизменный временной сдвиг θ ;

– задержки в канале передачи данных равны $\Delta\tau = 0$, $\tau_{ab} = \tau_{ba} = \tau$.

Тогда из системы (4) можно легко определить время распространения МВ в канале τ и временной сдвиг θ [6, 7]:

$$\tau = 0,5[(T_4^b - T_1^b) - (T_3^a - T_2^a)], \theta = 0,5[(T_4^b + T_1^b) - (T_3^a + T_2^a)].$$

В другом случае, введя одно ограничительное условие, можно получить систему из трех уравнений. Пусть при условии $\Delta\theta = 0$ или $\Delta t_{43} = \Delta t_{12} = \theta$ система уравнений (4) имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \tau_\Sigma = (T_4^b - T_1^b) - (T_3^a - T_2^a), \\ \theta_\Sigma - \Delta\tau = (T_4^b + T_1^b) - (T_3^a + T_2^a). \end{cases}$$

Тогда при известных задержках в канале $\Delta\tau$ можно определить временной сдвиг ВШ узлов базовой модели.

Методы коррекции шкалы времени

Как описано в [6], процедура коррекции времени протокола NTP использует две принципиально различные системы управления с обратной связью (СУОС). В СУОС с фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ) периодически с интервалом μ секунд происходит обновление значения фазы, которое напрямую используется для минимизации ошибки времени, а косвенно – ошибки частоты. В СУОС с частотной автоподстройкой частоты (ЧАПЧ) периодически с интервалом μ секунд происходит обновление значения частоты, которое напрямую используется для минимизации ошибки частоты, а косвенно – ошибки времени.

В качестве математического описания процесса коррекции ВШ ниже описан довольно известный комбинированный метод подстройки [8], который основывается на одношаговой подстройке, но при этом управляет частотой. Определим, что значение погрешности между истинным и измеренным расхождением ВШ $\xi = \theta - \theta'$ после сравнения ВШ не выше заданного предела ошибки времени локальной ВШ $\pm\xi_M$.

Для начала рассмотрим *метод одношаговой подстройки*. Здесь значение времени ВШ изменяется скачкообразно на величину накопившейся ошибки за интервал времени μ (рис. 4). Так, согласно [8], из-за расхождения частот $\Delta\nu$ на n -м временном интервале ВШ накапливается ошибка $X_n(t)$, которая растет с течением времени согласно выражению

$$X_n(t) = \xi_{n-1} + \delta(t - t_{n-1}), t_{n-1} \leq t < t_n,$$

где $\delta = \frac{\Delta\nu}{\nu_{\text{под}}}$ – величина частотного сдвига корректируемой ВШ.

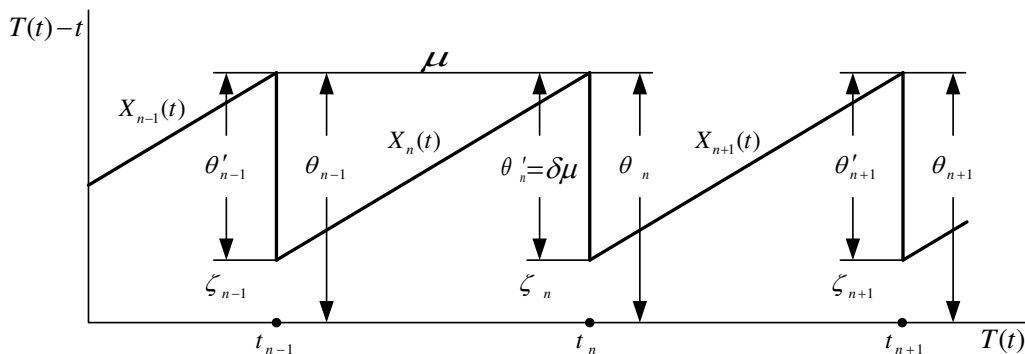


Рис. 4. Метод одношаговой подстройки временной шкалы

Тогда в момент времени очередной коррекции t_n ошибка времени будет определяться как

$$\theta_n = X_n(t_n) = \xi_{n-1} + \delta(t_n - t_{n-1}) = \xi_{n-1} + \delta\mu.$$

Т. е. за интервал времени $\mu = t_n - t_{n-1}$ значение ВШ изменяется на

$$\theta'_n = \theta_n - \xi_{n-1} = \delta\mu.$$

Таким образом, при проведении коррекции методом одношаговой подстройки значение ведомой ВШ изменяется скачкообразно на θ'_n .

Особенностью *комбинированного метода подстройки* является то, что после выполнения коррекции по методу одношаговой подстройки вычисляется отклонение частотного сдвига, которое приводит к появлению ошибки ВШ за интервал времени μ , от номинального значения:

$$\frac{\Delta v}{v_{\text{н о т}}} = \frac{\theta'_n}{\mu} = \frac{\delta\mu}{\mu} = \delta. \quad (5)$$

Опираясь на (5), вносим поправку Δv в частоту генератора RTC, который формирует ВШ ведомого узла (рис. 5).

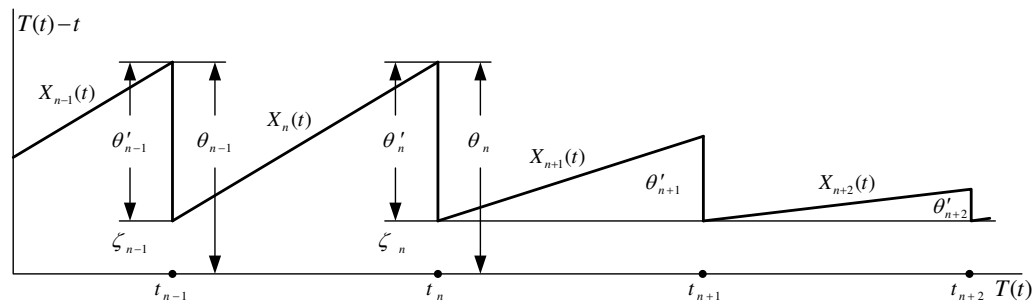


Рис. 5. Метод комбинированной подстройки временной шкалы

Таким образом, в случае метода комбинированной подстройки корректировка ВШ происходит периодически и предусматривает прибавление к значению текущей частоты корректирующего значения, т. е. фильтром с СУОС при каждом обновлении данных синхронизации обеспечивается экспоненциальное затухание значения $X_n(t)$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рагузин А.С., Шишков М.А., Носенко А.Ф. Синхронизация времени гетерогенных информационных систем технологических объектов региональной электросетевой компании // Электроэнергетика глазами молодежи: Науч. труды междунар. науч.-техн. конф.: сборник статей. – Самара: СамГТУ, 2011. – Т. 2. – С. 7-12.
2. Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
3. Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи / Пер. с англ. Н.Л. Бирюкова, С.Я. Несвитской, Н.Р. Триски; под ред. А.В. Рыжкова. – М.: Мир, 2003. – 456 с.
4. ГОСТ 8.567-99 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения времени и частоты. Термины и определения. – Введ. 01.01.2001.
5. Коновалов Г.В., Новожилов Е.О. Моделирование способов передачи сигналов времени при частотно-временном обеспечении телекоммуникаций // Молодые ученые – науке, технологиям и профессиональному образованию: Мат.-лы междунар. науч.-техн. конф. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – Ч. 4. – С. 205-208.
6. Mills D.L. Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification. RFC 5905 // University of Delaware. – 2010. – June.
7. Савчук А.В., Шапошников В.Н., Черняк И.П. Теоретические основы синхронизации текущего времени в телекоммуникациях // Зв'язок. – 2007. – № 3. – С. 5-9.

8. Новожиллов Е.О. Моделирование передачи сигналов времени в цифровых сетях электросвязи // Современные проблемы частотно-временного обеспечения сетей электросвязи: Сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – М.: ФГУП ЦНИИС, 2010. – С. 191–199.

Статья поступила в редакцию 24 января 2015 г.

MODELING OF SYSTEM TIME SYNCHRONIZATION OF INFORMATION SYSTEMS OF ELECTRIC GRID COMPANY

A.S. Raguzin, N.G. Gubanov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The paper describes the construction of a functional model of an information-system time-synchronization system which is based on the NTP protocol. This system is optimal for time synchronization at the power utilities of a regional power network company. The notion of a basic model for a time-synchronization system is introduced. In the paper the mathematical modeling of the local time scale former at a system node, means of comparison for the time and their correction is carried out. The results obtained allow to choose the appropriate means which depend on the imposed requirements of accuracy and stability.

Keywords: *system time synchronization, model timeline, time comparison method, the method of correction of the time, the time stamp.*

*Aleksey S. Raguzin, Postgraduate Student.
Nikolay G. Gubanov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*