

Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 004.032.322

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОТОКОЛОВ СИНХРОНИЗАЦИИ В ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСЕТЕВОЙ КОМПАНИИ

Н.Г. Губанов, А.С. Рагузин

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

Авторы продолжают исследование процесса синхронизации времени информационных систем для решения задач поддержания единого времени на энергообъектах электросетевой компании. Проведен анализ алгоритмов и принципов работы существующих протоколов синхронизации времени (NTP, SNTP, PTP), широко применяемых в сетях передачи данных с коммутацией пакетов, с целью определения их соответствия требованиям и принципам работы исследуемой комплексной системы синхронизации времени. В статье приведены сравнительные характеристики этих протоколов, сделаны выводы, учитывающие требования внутренних руководящих документов РСК по программе развития АСТУ, предъявляемые к задачам синхронизации времени информационных систем в сетевых компаниях.

Ключевые слова: система синхронизации времени, шкалы времени, алгоритмы синхронизации, протоколы синхронизации, метки времени.

В статье [1] было рассмотрено математическое моделирование средств формирования локальной шкалы времени, средств сравнения и коррекции шкал времени комплексной системы синхронизации времени (ССВ) информационных систем региональной электросетевой компании (РСК), предложенной в статье [2]. В предложенной ССВ задачу синхронизации предлагается решать с помощью методов пакетной синхронизации.

В данной статье будет проведен сравнительный анализ основных существующих протоколов синхронизации времени, использующих в своих алгоритмах метки времени. Наибольшее распространение получили протоколы NTP (Network Time Protocol), SNTP (Simple Network Time Protocol) [3] и PTP (Precision Time Protocol) [4]. Далее подробно рассмотрены их характеристики и функциональные реализации.

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

Анализ алгоритма работы протокола NTP

Протокол NTP работает на прикладном уровне сетевой модели OSI и используется для передачи меток времени от серверов времени, расположенных на высшем уровне, до серверов и клиентов, расположенных на более низком уровне, через сети передачи данных с коммутацией пакетов [3].

Каждый уровень в иерархии определяется номером слоя (stratum). Серверам на высшем уровне присваивается stratum, равный 1. У серверов на последующих уровнях stratum на один больше, чем на предыдущем уровне. С каждым новым уровнем синхронизации точность уменьшается и зависит от топологии сети и стабильности локальных часов в узлах системы синхронизации.

Работа протокола NTP основывается на определении самого короткого маршрута к первичным серверам по принципам распределенного алгоритма маршрутизации Беллмана – Форда. Алгоритм протокола NTP представлен на рис. 1.

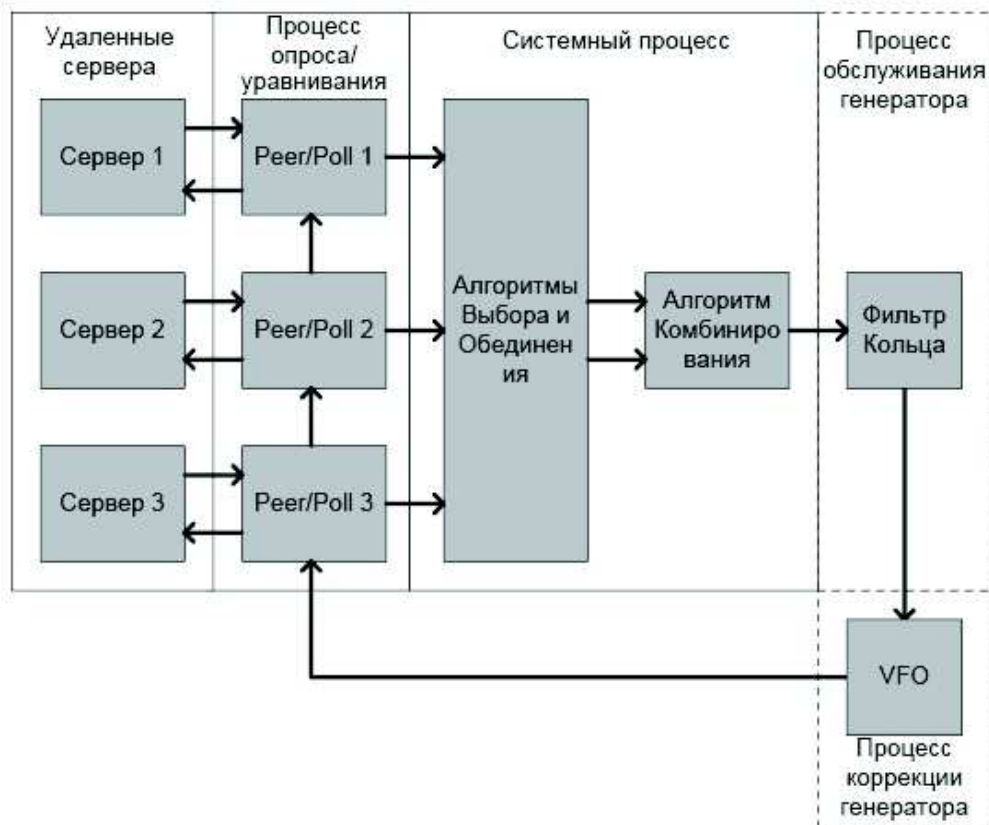


Рис. 1. Алгоритм работы протокола NTP

В случае клиент-серверного режима работы протокола клиент отправляет пакеты с метками времени одному или нескольким серверам, а потом обрабатывает полученные от них ответные пакеты. Сервер получает пакет от клиента, изменяет адрес источника и получателя, номера портов, записывает свои метки времени в пакет и отправляет клиенту. При обмене пакетами обновляются параметры:

- смещение (θ) – максимально-вероятностное смещение генератора сервера относительно генератора клиента;

- задержка (δ) – суммарная задержка сигнала синхронизации между клиентом и сервером туда и обратно;
- дисперсия (ϵ) – максимальное рассогласование при измерении смещения;
- джиттер (ζ) – номинальное рассогласование при оценке системного смещения.

В результате проведенных измерений вычисляется расстояние синхронизации (synchronization distance):

$$\lambda = \epsilon + \frac{\delta}{2}. \quad (1)$$

Значение (1) используется в алгоритмах выбора в системном процессе при определении сервера, с которым будет производиться синхронизация клиента.

Управление частотой локального генератора клиента для поддержания ее постоянной относительно частоты генератора сервера производится в системном процессе обслуживания генератора. Для определения смещения частоты генератора клиент периодически направляет сообщения серверу с интервалом 2^t с, где t выбирается из диапазона от 4 до 17, что равно 16 с и 36 ч соответственно.

Обмен метками времени между клиентами и серверами осуществляется с помощью специальных сообщений, метки времени в которых представляются в двойном формате с битами, пронумерованными в обратном порядке [5]. При этом возможная точность оценки времени для короткого формата – не менее $15 \cdot 10^{-6}$ с, формата метки – $2,32 \cdot 10^{-10}$ с, формата данных – $0,05 \cdot 10^{-18}$ с.

Временные диаграммы, поясняющие процесс синхронизации узлов базовой модели А и В, показаны на рис. 2.

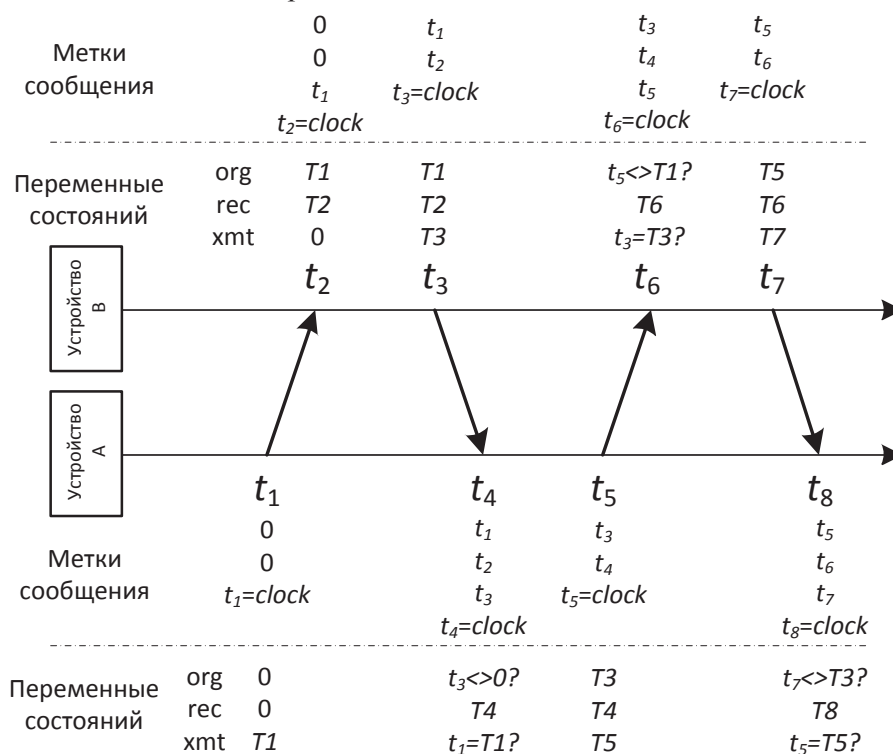


Рис. 2. Временная диаграмма синхронизации по протоколу NTP

В протоколе NTP применяются четыре метки для каждого из узлов, обозначенные на рисунке как t_1, t_2, t_3 и t_4 для узла А, t_5, t_6, t_7, t_8 для узла В. Существуют три параметра, описывающие состояние: *org* (начало метки), *ges* (получение метки) и *xmt* (отправка метки). Эти параметры копируются с меток времени при получении или отправке пакета.

После определения значений меток времени $T1-T6$ (см. рис. 2) в каждом из устройств вычисляется смещение и задержка:

$$\theta_A = \frac{(T2 - T1) + (T3 - T4)}{2}; \quad (2)$$

$$\delta_A = (T4 - T1) - (T3 - T2); \quad (3)$$

$$\theta_B = \frac{(T4 - T3) + (T5 - T6)}{2}; \quad (4)$$

$$\delta_B = (T6 - T3) - (T5 - T4). \quad (5)$$

С помощью полученных значений (2), (4) производится компенсация смещения между частотами генераторов, а с помощью значений (3), (5) – синхронизация моментов отправки и получения сообщений.

Простой протокол сетевого времени SNTP

Протокол SNTP является упрощенной реализацией протокола NTP. Он полностью совместим с протоколом NTP, но при этом отличается от него отсутствием любых объединений. SNTP клиент может обращаться к любому NTP серверу как к серверу SNTP. При получении запроса от клиента сервер SNTP отправляет ответный пакет только тому же клиенту.

Анализ алгоритма работы протокола РТР

В системах синхронизации по протоколу РТР могут применяться устройства с поддержкой РТР и без поддержки РТР. Устройства с поддержкой РТР подразделяются на обычные (Ordinary), граничные (Boundary), из конца в конец прозрачные (End-to-end transparent), равноправные прозрачные (Peer-to-peer transparent) синхрогенераторы и узлы управления (management nodes). К устройствам без поддержки РТР относятся мосты, маршрутизаторы, коммутаторы и другие элементы информационной инфраструктуры.

Все устройства образуют иерархию ведущий–ведомый (master–slave) с основным устройством, называемым гротсмейстером (grandmaster), со шкалой времени, определяющей эталонное время для всей ССВ.

Обмен метками времени между устройствами производится, как и в случае с протоколом NTP, с помощью специальных сообщений, описанных в [4].

Синхронизация по протоколу РТР происходит в две фазы:

- 1) определение иерархии ведущий–ведомый;
- 2) процедура синхронизации локальных генераторов устройств.

В первой фазе определяется одно из трех состояний (MASTER, SLAVE, PASSIVE) каждого порта обычных и граничных устройств. Во время этого процесса применяются два алгоритма: сравнения набора данных (Data set comparison algorithm) и решения состояния (State decision algorithm), которые анализируют получаемые сообщения Announce из сети.

Первый алгоритм основывается на анализе информации, содержащей параметры принадлежности к определенным первичным генераторам, точность, чис-

ло слоев и т. д. Второй алгоритм определяет, может ли заявленное состояние, полученное на выходе первого алгоритма, являться текущим состоянием.

Работа второй фазы синхронизации приведена на временной диаграмме (рис. 3).

В начальный момент шкала времени ведомого генератора отстает на величину начального сдвига ΔT_H :

$$t_{1m} = t_{1s} + \Delta T_H.$$

Ведущее устройство проводит коррекцию сдвига шкалы времени с помощью специальных сообщений Sync и Follow-up. Sync содержит метку времени отправления сообщения t_{1m} , Follow-up – метку времени отправления сообщения Sync. Таким образом достигается минимизации ошибки при оценке момента t_{1m} . После получения сообщения Sync устройство с ведомым генератором фиксирует время t_2 . Затем оно отправляет сообщение Delay_request в момент t_3 . Устройство с ведущим генератором фиксирует момент времени получения этого сообщения t_4 и передает его в ответном сообщении Delay_response.

Приняв нестабильность между двумя генераторами за время Δt в виде $\Delta T_f(\Delta t)$, метки времени отправления и получения сообщений можем записать в виде уравнений:

$$t_2 - t_{1m} = t_{ms} + \Delta T_H;$$

$$t_4 - t_3 = t_{sm} - \Delta T_H + \Delta T_f(t_3 - t_2).$$

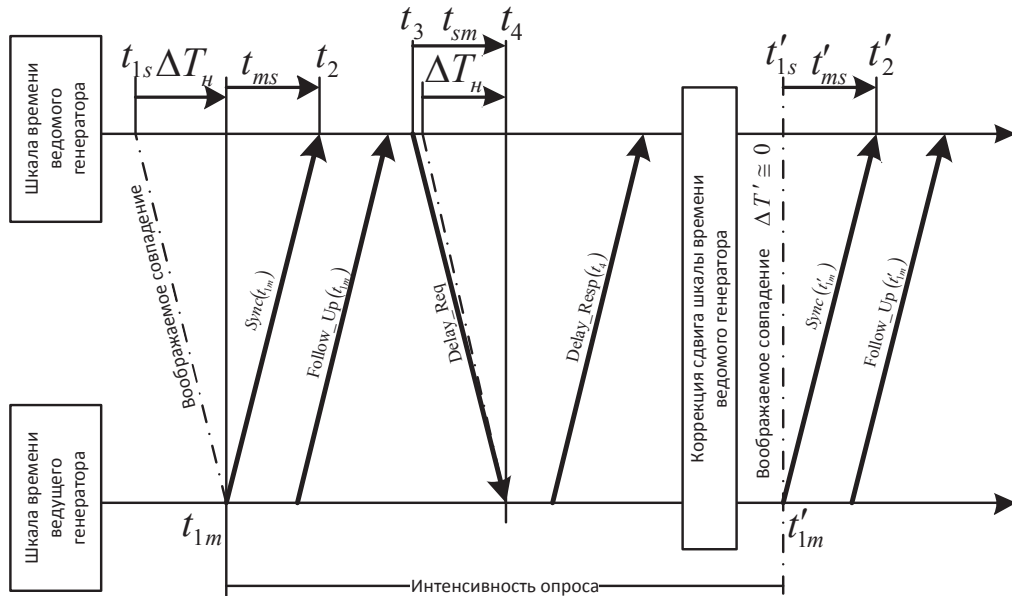


Рис. 3. Временная диаграмма синхронизации по протоколу RTP

Временной сдвиг ΔT_H оценивается ведомым устройством при известных значениях моментов $t_2 - t_4$, по формуле

$$\Delta \hat{T}_H = \frac{(t_2 - t_{1m}) - (t_4 - t_3)}{2} = \Delta T_H + \frac{(t_{ms} - t_{sm})}{2} - \frac{\Delta T_f(t_3 - t_2)}{2}. \quad (6)$$

Если задержки между генераторами равны в обоих направлениях ($t_{ms} = t_{sm}$) и значение нестабильности $\Delta T_f(\Delta t)$ мало относительно величин $(t_2 - t_{1m})$ и $(t_4 - t_3)$, уравнение (6) можно упростить:

$$\Delta \hat{T}_H \cong \Delta T_H. \quad (7)$$

Величина (7) используется для первоначальной коррекции неточности генератора ведомого устройства. Процесс коррекции описывается следующим выражением:

$$t'_{1m} = t'_{1s} + \Delta T_H - \Delta \hat{T}_H \cong t'_{1s}. \quad (8)$$

В результате коррекции (8) шкалы времени ведущего и ведомого генераторов приводятся к единой шкале времени с точностью до суммарного значения разности $(t_{ms} - t_{sm})$ и нестабильности $\Delta T_f(\Delta t)$. Окончательно процесс завершается вторым опросом через интервал времени, длительность которого случайна и находится в диапазоне от 4 до 60 с. По результатам измерения второго опроса рассчитывается оценка пространственной задержки между двумя генераторами:

$$D = \frac{(t'_2 - t'_1) + (t'_4 - t'_3)}{2}.$$

Поскольку генераторы в устройствах нестабильны, а задержки в канале могут изменяться, коррекцию генератора ведомого устройства необходимо периодически повторять.

Из приведенного выше анализа можно сказать, что на точность синхронизации по протоколу RTP влияет несколько факторов: взаимная нестабильность частот генераторов (ΔT_f), частота генератора ведущего устройства (чем выше частота, тем точнее измерения), топология сети передачи данных и ее неравномерная нагрузка.

Применение протокола RTP позволяет добиться наибольшего эффекта в случае его реализации на граничных или транспортных коммутаторах, применяемых в сетях связи.

Сравнительные характеристики протоколов синхронизации

В таблице приведены сравнительные результаты анализа некоторых характеристик описанных выше протоколов синхронизации.

Как видно из таблицы, все три протокола могут использоваться для задач синхронизации времени системных часов информационных систем. При этом точность синхронизации протоколов NTP и SNTP не всегда может быть достаточна. Более высокая точность синхронизации может быть достигнута при использовании протокола RTP, применение которого может быть и аппаратным, и программным. При этом следует учитывать, что точность синхронизации тем ниже, чем дальше от аппаратного уровня к уровню приложений реализованы синхрогенераторы.

Проведенный анализ методов синхронизации времени, применяемых в сетевых протоколах синхронизации, которые работают в сетях с коммутацией пакетов, показывает, что задержки при передаче сообщения от ведущего устройства к ведомому и в обратном направлении будут равными только в случае соедине-

ния устройств прямой линией связи, что подтверждает положения, описанные в [1] при моделировании метода сравнения временных шкал узлов базовой модели методом двунаправленной передачи. В случае наличия в сети коммутаторов или маршрутизаторов задержки при передаче сообщений не будут равными в силу особенностей работы этого сетевого оборудования. При незначительной загрузке сети передачи данных влияние на точность синхронизации будет мало, но при высокой загрузке точность синхронизации времени может значительно уменьшиться.

Сравнительные результаты

Параметры	Протокол синхронизации		
	NTP	SNTP	PTP
Применение	Синхронизация времени на прикладном уровне от нескольких серверов. Работает в сетях TCP/IP v4, v6	Синхронизация времени на прикладном уровне от одного сервера. Работает в сетях TCP/IP v4, v6	Синхронизация времени на прикладном и физическом уровнях. Работает в сетях TCP/IP v4
Параметры измерения	Смещение между генераторами θ Задержка времени δ Джиттер смещения ξ	Смещение системных часов Круговая задержка	Смещение системных часов Круговая задержка
Потенциальная точность	$15 \cdot 10^{-6}$ (Short) $2,32 \cdot 10^{-10}$ (Timestamp)	$2,32 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-8}$
Реальная точность	$10^{-1} - 10^{-3}$	$10^{-1} - 10^{-3}$	$10^{-7} - 10^{-8}$
Реализация	Сервер: аппаратная или программная Клиент: программная	Сервер: аппаратная или программная Клиент: программная	Ведомые: аппаратная Ведущие: аппаратная и программная
Источник	Несколько серверов	Один сервер	GPS, PRC
Документация	RFC 5905	RFC 5905	IEC 61588

Для исключения погрешностей, связанных с загрузкой сети, протокол PTP предлагает метод граничных часов, который реализуется на коммутаторах сети передачи данных. При этом необходимо учитывать, что для реализации такого метода коммутатор должен обладать специальными функциональными возможностями для поддержки протокола PTP. Синхронизация граничных часов на коммутаторе производится с часами ведущего устройства, а затем он сам становится ведущим устройством для всех ведомых устройств, подключенных к его портам. Использование такого метода позволяет осуществлять синхронизацию времени по схеме точка–точка и сохранять задержку одинаковой при передаче сообщения в прямом и обратном направлении.

Выводы

С целью определения соответствия принципам и алгоритмам работы ССВ, предложенной в [2], был проведен анализ широко известных протоколов синхронизации времени, применяемых в сетях передачи данных с коммутацией пакетов.

Проведенный сравнительный анализ показывает, что хотя применение протокола РТР и обеспечивает значительно более высокую точность в процессе синхронизации, оба протокола РТР и NTP удовлетворяют требованиям концепции развития АСТУ РСК, предъявляемым к точности синхронизации времени. А учитывая то, что использование протокола РТР предъявляет повышенные требования к оборудованию в канале передачи данных, а также то, что предложенная в [2] ССВ будет работать в пределах локальной сети РСК, можно сделать предварительный вывод, что применение протокола NTP в качестве основного для организации ССВ в РСК позволит организовать комплексную ССВ с высокими показателями точности, доступности и информационной безопасности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рагузин А.С., Губанов Н.Г. Моделирование системы синхронизации времени информационных систем региональной электросетевой компании // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 1. – С. 21–28.
2. Рагузин А.С., Шишков М.А., Носенко А.Ф. Синхронизация времени гетерогенных информационных систем технологических объектов региональной электросетевой компании // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. междунар. науч.-техн. конф.: сб. статей. – Самара: СамГТУ, 2011. – Т. 2. – С. 7-12.
3. Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification. Request for Comments: 5905. June 2010 [Электронный ресурс] // URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc5905> (дата обращения: 14.03.2016).
4. IEC 61588-2009: International standards. Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems.
5. Internet Protocol. Darpa Internet Program. Protocol Specification. Request for Comments: 791. 1981. [Электронный ресурс] // URL: <http://www.rfc-base.org/txt/rfc-791.txt>. (дата обращения: 14.03.2016).

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2016 г.

ANALYSIS AND MODELING OF THE EXISTING PROTOCOLS USED IN TIME SYNCHRONIZATION OF THE REGIONAL POWER-GRID INFORMATION SYSTEMS

N.G. Gubanov, A.S. Raguzin

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

The author continues to research the information-systems time-scale synchronization to solve the problem of maintaining a single time at the power facilities of the regional grid company. The analysis of the algorithms and principles of the existing time protocols (NTP, SNTP, PTP) widely used in packet-switching data-communication networks is done to determine their satisfying the requirements and operation principles of the examined complex time-synchronization system. The paper presents the comparative characteristics of these protocols; conclusions are drawn taking into account the requirements of internal guidelines concerning the development of ICS to be met by the tasks of information-systems time-synchronization in power grid companies

Keywords: system of time synchronization, model timeline, algorithms of synchronization, protocols of synchronization, the time stamp.

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