Измерения, выполняемые при обеспечении целостности и устойчивости функционирования сети связи общего пользования

Сергей Семёнов, Екатерина Семёнова

Аннотация

В настоящей статье рассмотрены вопросы измерения параметров сетей тактовой сетевой синхронизации, измерения параметров временной синхронизации и измерения параметров сетей передачи данных. Рассказано, какое оборудование используется в качестве источников эталонных сигналов частоты и времени и какие характеристики нормированы. Рассказано об источниках точного времени в сети Интернет. Приведены результаты измерений синхронизации шкалы времени по протоколам NTP системного времени ПЭВМ с операционной системой Windows программным и инструментальным методами и результаты измерений синхронизации шкалы времени по NTP- и PTP-протоколу. Дополнительно приведены сведения об эталоне количества информации (данных).

.

Ключевые слова:

сетевая синхронизация, погрешность по частоте, ОВИ, МОВИ, ДВИ, шкала времени, UTC(SU), NTP, PTP, количество информации (данных)

Введение

Интернет – это сложная структура, затрагивающая четыре уровня модели OSI: прикладной, транспортный, межсетевой и канальный. Для обычного потребителя Интернет – это социальные сети, развлекательный контент, электронная почта, банковские приложения, магазины и т.п. Но как только эта информация поступает к провайдеру (поставщику услуг связи), Интернет превращается в сетевое оборудование, которое должно взаимодействовать друг с другом и, главное, с другими сетями связи (операторами связи). Для успешного взаимодействия операторы связи руководствуются стандартами, определяемыми международными организациями. Так, архитектурные принципы и сетевые протоколы Интернета разрабатываются Инженерным советом Интернета (IETF, Internet Engineering Task Force). В свою очередь, международные рекомендации по физическому и канальному уровням, а также требования к сетевой и временной синхронизации формируются Международным союзом электросвязи (МСЭ, ITU), в который входят 193 страны. Рекомендации МСЭ хотя и носят рекомендательный характер, но облегчают развитие и взаимодействие как производителей сетевого оборудования и средств передачи данных, так и операторов связи.

Помимо технической части вопроса есть и законодательная сторона. В соответствии с частью 5 статьи 5 федерального закона от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений», пунктом 2 статьи 12 федерального закона от 07.07.2003 № 126-ФЗ «О связи» и пунктом 1 положения о Министерстве цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, утверждённого постановлением правительства РФ от 02.06.2008 № 418 утверждён приказ Минцифры от 19.12.2019 № 870 «Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений и выполняемых при обеспечении целостности и устойчивости функционирования сети связи общего пользования, и обязательных метрологических требований к ним, в том числе показателей точности измерений».

По указанному выше приказу выполняются следующие измерения: измерения параметров сетей передачи данных, измерения параметров сетей тактовой сетевой синхронизации, измерения параметров временной синхронизации, измерения параметров цифровых стыков и синхронной цифровой иерархии [1].

Тактовая сетевая синхронизация в сетях связи

Основой успешного взаимодействия операторов связи является система тактовой сетевой синхронизации. Все сигналы передаются по каналам связи, будь то оптоволоконные линии, кабельные линии (витая пара), коаксиальные кабели (соединения высокочастотного оборудования) или беспроводные каналы (радиоканалы) – такие как радиорелейные линии, спутниковые каналы связи, сотовые сети, беспроводные локальные сети (Wi-Fi, Blutooth, Zigbee) и оптические

каналы. Сами сигналы преимущественно цифровые, так как несут закодированную информацию в бинарном виде «0» или «1». Аналоговые сигналы практически не используются в силу малого объёма передаваемой информации, в то время как цифровые сигналы устойчивы к помехам и шумам, легко поддаются шифрованию и сжатию, а также передаются на большие расстояния без потери качества.

Наилучшим режимом функционирования цифровой сети является синхронный режим, при котором есть один задающий генератор – и все сетевые устройства по нему подстраиваются. Псевдосинхронный режим подразумевает несколько операторов связи, задающие генераторы которых по относительной погрешности по частоте отличаются не более чем на ±1,0·10-11. Плезиохронный режим работы подразумевает в своём составе задающий генератор, работающий в режиме запоминания частоты, относительная погрешность по частоте которого не должна превышать ±1,0·10-9. Самый худший вариант, когда задающий генератор не способен запомнить частоту. В этом случае отличие его частоты от эталонной может достигать значений от ±1,0·10-8 до ±4,6·10-6. Такой режим называется асинхронный, при котором качество голосовой связи приемлемо, а вот передача данных практически невозможна [2].

Для формирования эталонной частоты на сетях связи используют синхронную цифровую иерархию со следующими источниками синхросигналов: первичный эталонный генератор (ПЭГ), вторичный задающий генератор (ВЗГ), местные задающие генераторы, блоки сетевой синхронизации, мультиплексоры, аппаратура распределения сигналов синхронизации и преобразователи сигнала синхронизации.

ПЭГ – это комплекс аппаратуры, содержащий три первичных эталонных источника (ПЭИ) и одного ВЗГ. В качестве ПЭИ могут использоваться цезиевые, водородные и рубидиевые стандарты частоты и времени, в том числе с возможностью синхронизации по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС/GPS.

ВЗГ представляют собой рубидиевые генераторы. Остальные источники синхросигналов в качестве опорного генератора используют кварцевые генераторы.

Основные параметры синхросигналов, которые подлежат нормированию и измерениям в процессе эксплуатации:

- относительная погрешность по частоте;
- долговременная нестабильность частоты (дрейф частоты или систематическое изменение частоты за сутки/за год);
- параметры блуждания фазы:
  - ошибка временного интервала (ОВИ);
  - максимальная ошибка временного интервала (МОВИ);
  - девиация временного интервала (ДВИ).

Из всех определяемых величин (единиц измерений) частота может быть определена с наивысшей точностью. При этом, если мы имеем дело не с цезиевым стандартом частоты, измерение частоты имеет квазистационарный характер: на малых интервалах времени наблюдений измерения стабильны, на больших интервалах – систематическое изменение частоты становится очевидным. Именно поэтому генераторам, представляющим из себя ПЭИ и ВЗГ, требуется корректировка действительного значения частоты в процессе эксплуатации с периодичностью около года.

Синхронизация времени в сетях связи

Синхронизация времени в сетях связи подразумевает распространение точного времени и календарной даты по сети связи. Источником точного времени на территории Российской Федерации является Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2022. Эталонные сигналы частоты и времени от ГЭТ 1-2022 передаются через разветвлённую сеть средств передачи: ДВ специализированные радиостанции РБУ и РТЗ; КВ специализированную радиостанцию РВМ; радиостанции связи СДВ-диапазона и радионавигационные станции ДВ-диапазона; ГНСС ГЛОНАСС; средства передачи точного времени через глобальную сеть Интернет. Основными источниками точного времени могут быть устройства синхронизации времени, например, NTP (PTP) серверы, получающие сигналы точного времени по сигналам ГНСС ГЛОНАСС, либо NTP-серверы ФГУП «ВНИИФТРИ», IP-адреса которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. IP-адреса NTP-серверов ФГУП «ВНИИФТРИ»

Адрес	Место нахождения
ntp1.vniiftri.ru (89.109.251.21)	Московская область, г. Солнечногорск, пгт. Менделеево
ntp2.vniiftri.ru (89.109.251.22)	
ntp3.vniiftri.ru (89.109.251.23)	
ntp4.vniiftri.ru (89.109.251.24)	
ntp1.niiftri.irkutsk.ru (46.254.241.74)	г. Иркутск
ntp2.niiftri.irkutsk.ru (46.254.241.75)	
vniiftri.khv.ru (212.19.6.218)	г. Хабаровск
vniiftri2.khv.ru (212.19.17.26)	
ntp.sstf.nsk.ru (80.242.83.227)	г. Новосибирск
timesstf.sstf.nsk.ru (80.242.83.228)	

Требования приказа Минцифры от 19.12.2019 № 870 регламентируют погрешность измерения разности (расхождения) шкал времени в сетях связи операторов связи относительно национальной шкалы времени Российской Федерации UTC(SU) 0,3 с. Такое значение необходимо при учёте оказания услуг связи, биллинг которого ведётся в секундах.

Требования синхронизации в сетях связи регламентируется стандартами МСЭ-Т серии G.827x и ГОСТ Р 71148-2023, где точностные характеристики строго зависят от технологий.

Таблица 2. Допустимые смещения шкал времени

№ п/п	Технология связи	Допустимое смещение шкал времени
1	5G NR	от ±130 нс до ±1,5 мкс
2	4G LTE	не более ±1,5 мкс
3	3G	от ±2,5 мкс до ±10 мкс
4	Проводной доступ Ethernet	от ±1 мкс до ±50 мкс
5	Биллинг, логирование данных или мониторинг сети связи (Alarms)	до ±500 мс

Синхронизация времени может быть обеспечена по следующим технологиям, приведённым в таблице 3.

Таблица 3. Допустимые смещения шкал времени

№ п/п	Синхронизация времени	Допустимое смещение шкал времени
1	ГНСС	не более ±1 мкс
2	1PPS (1 Гц)	не более ±1 мкс
3	IRIG	от ±10 мкс до ±1 мс
4	NTP(SNTP)	от ±0,5 мс до ±100 мс
5	PTP	не более ±1 мкс

Для синхронизации времени по сигналам ГЛОНАСС или ГЛОНАСС/GPS устройство оснащается приёмным модулем, кабелем и антенной ГНСС. Для работы необходимы максимальный обзор небесной полусферы, отсутствие помех, в том числе таких, как демпинг или спуфинг.

Сигнал 1PPS (1 Гц) – импульсный сигнал, передний фронт которого синхронизирован с национальной шкалой времени UTC(SU). Источником обычно являются высокостабильные стандарты частоты и времени. Предназначены для автономного хранения формируемой шкалы времени.

IRIG – протокол, который содержит информацию о текущем значении времени и календарной дате.
NTP и SNTP – сетевые протоколы времени.
PTP – сетевой протокол времени, более точный по сравнению с NTP.

Измерение времени в Интернете

Самым распространённым инструментом синхронизации времени в сетях связи является NTP-протокол. В качестве источника точного времени используются NTP-серверы. Системное время ПЭВМ при синхронизации времени по NTP-серверу можно представить в виде формулы (1) [3]:

$$T(t) = T(to) + R(t-to) + D(t-to)2 + x(t), \quad (1)$$

где: t – текущее время;
to – время в момент последней синхронизации;
T – смещение времени;
R – относительная погрешность по частоте;
D – дрейф частоты;
x(t) – стохастическая составляющая погрешности.

Первая составляющая погрешности T(to) включает в себя погрешность формирования шкалы времени NTP-сервером и погрешность, обусловленную работой протокола NTP.

В качестве примера NTP-сервера рассмотрим сервер точного времени ССВ-1Г производства ООО «Комсет-сервис» (средство измерений утверждённого типа, регистрационный номер в Федеральном информационном фонде обеспечения единства измерений 58301-14). На выходе ССВ-1Г формирует сигнал 1 Гц, синхронизированный по сигналам ГЛОНАСС/GPS с национальной шкалой времени UTC(SU) с погрешностью ±110 нс. При этом привязка шкалы времени относительно национальной шкалы времени UTC(SU) по протоколу NTP через интерфейс Ethernet составляет уже ±10 мкс. Если рассматривать аналогичные средства измерений, то у других значение погрешности будет порядка ±100 мкс.

Погрешность, обусловленная работой протокола NTP, зависит от загруженности сети связи и удалённости от NTP-сервера. Как известно, протокол NTP содержит информацию, представленную на рисунке 1.

Из всего перечня значимой информацией является уровень сервера в иерархии (stratum), значение смещения шкалы времени (offset), задержка прохождения NTP-пакета до сервера и обратно (delay) и джиттер, или стандартное отклонение результатов измерений смещения шкалы времени (jitter).

Уровень сервера Stratum I подразумевает, что NTP-сервер получает информацию о точном значении времени от атомных часов, по сигналам ГЛОНАСС/GPS или радиосигналу. В этом случае можно полагать, что погрешность формирования шкалы времени составляет ±(10-100) мкс.

Значения offset, delay и jitter дают представление о вкладе протокола NTP в общую погрешность. Как известно, основным источником ошибки является асимметрия канала связи, при которой смещение времени определяется по формуле (2) [3]:

$$offset = [(T2-T1) - (T4-T3)]/2 = D/2, \quad (2)$$

NTP Status:

	Remote	Refid	Stratum	Type	When	Poll	Reach	Delay	Offset	Jitter
*	129.6.15.28	NIST	1	Unicast server	27	128	357	138.902	-0.2	3.353
#	129.6.15.29	NIST	1	Unicast server	67	128	377	135.248	1.402	2.538
*	129.6.15.30	NIST	1	Unicast server	81	128	377	134.39	1.058	2.157
#	129.6.15.26	NIST	1	Unicast server	79	128	377	137.543	2.266	4.287

Рис. 1. Информация, передаваемая NTP-протоколом.

где T1, T2, T3, T4 – значения времени, проставляемые в NTP-пакетах, при отправке запроса клиентом, времени получения и отправки пакета NTP-сервером и времени получения пакета клиентом соответственно.

Поэтому максимальная погрешность определяется временем прохождения NTP-пакета в обе стороны.

Если сервер находится в Москве и подстраивает свой ПЭВМ по NTP-серверам ФГУП «ВНИИФТРИ», то значения задержек будут такими:

≈ 8 мс по NTP-серверам пгт. Менделеево;
≈ 60 мс по NTP-серверам г. Новосибирск;
≈ 75 мс по NTP-серверам г. Иркутск;
≈ 110 мс по NTP-серверам г. Хабаровск.

Но несмотря на столь большие значения задержек, каналы имеют квазисимметричный канал связи, поэтому смещения шкал времени составляют не более 4 мс [4, 5].

Для оценки погрешности формирования текущего времени ПЭВМ с операционной системой Windows проведён ряд экспериментов [4, 5]. Схема измерений приведена на рисунке 2.

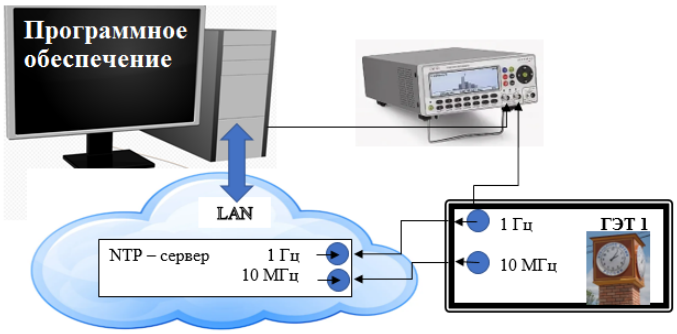

Рис. 2. Схема для определения погрешности формирования системной шкалы времени ПЭВМ.

На ПЭВМ установлено специальное программное обеспечение AccurateClock, разработанное ФГУП «ВНИИФТРИ» (существует в двух исполнениях – для Windows и для Linux), которое формирует импульсный сигнал частотой 1 Гц при смене номера секунды системного времени. Полученный сигнал сравнивался с национальной шкалой времени UTC(SU). Параллельно на ПЭВМ была запущена программа NTPD, которая позволяет оценить параметры протокола NTP согласно данным, представленным на рисунке 1.

Результаты измерений системной шкалы времени приведены на рисунках 3 и 4.

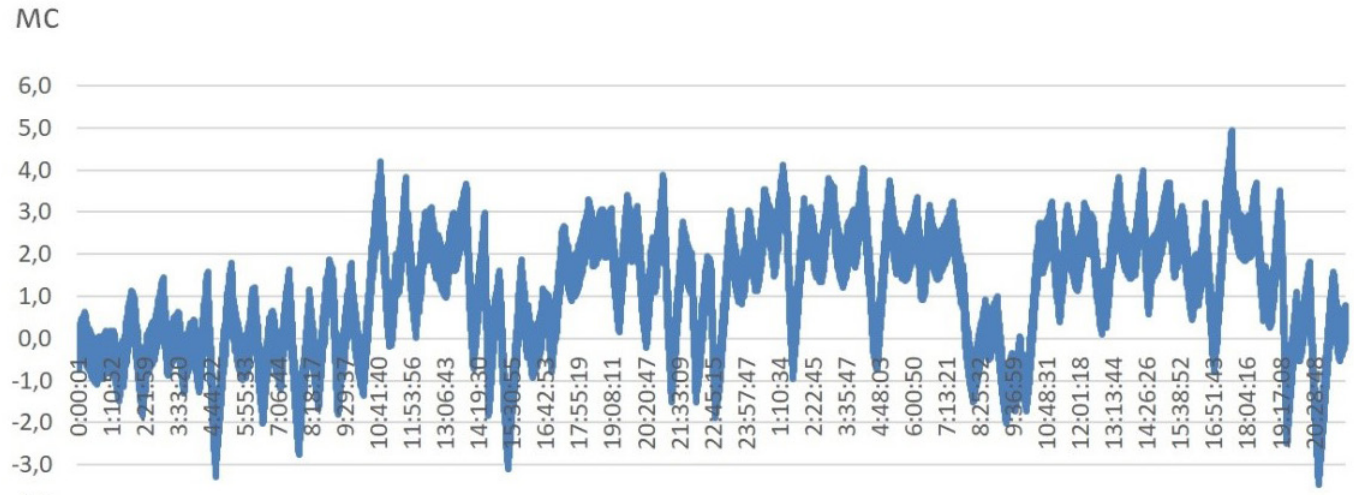

Рис. 3. Смещение шкалы системного времени ПЭВМ относительно национальной шкалы времени UTC(SU) при измерении с помощью частотомера универсального CNT-90.

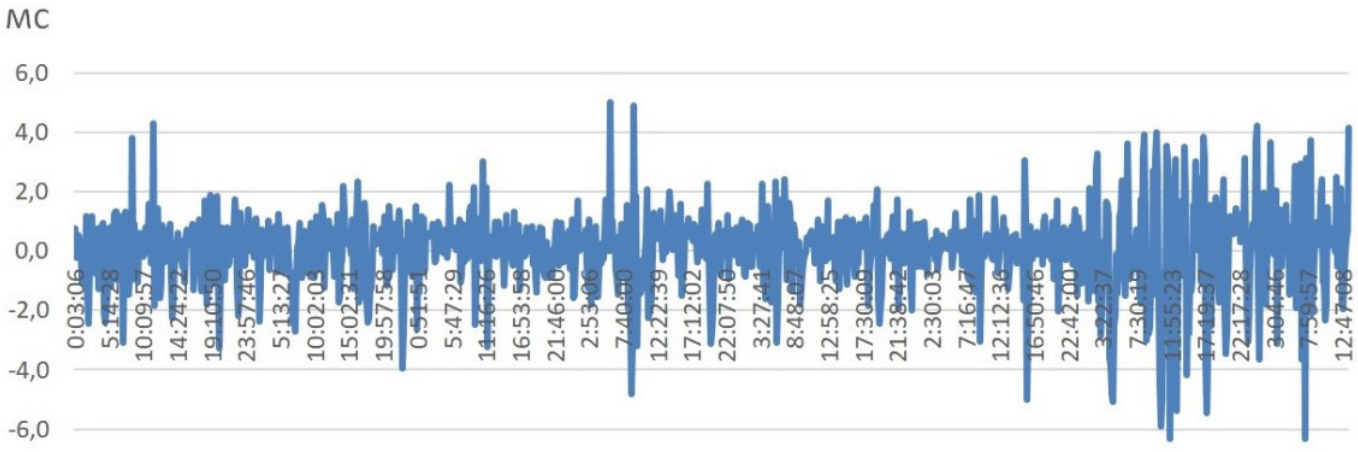

Рис. 4. Смещение шкалы системного времени ПЭВМ относительно национальной шкалы времени UTC(SU) при измерении с помощью утилиты NTPD (NTP Time Server Monitor by Meinberg 1.05).

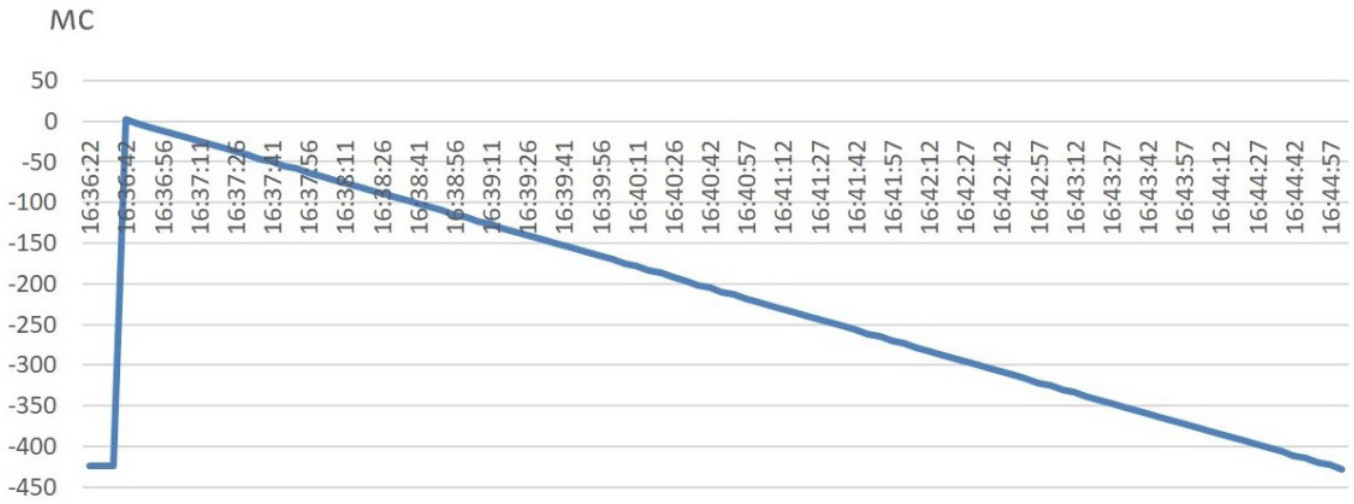

Рис. 5. Смещение шкалы системного времени ПЭВМ после единовременной синхронизации по NTP-серверу.

Исследование системной шкалы времени ПЭВМ методом измерения физического сигнала 1 Гц и программными средствами показало сходимость результатов измерений в пределах ±10 мс.

Далее проведён эксперимент по хранению формируемой шкалы времени ПЭВМ. Системная шкала времени ПЭВМ, работая по тактовой частоте процессора, изменилась на 0,5 секунды за менее чем 10 минут. Результаты измерений приведены на рисунке 5.

На практике приемлема точность времени порядка нескольких миллисекунд, и для этого ПЭВМ должен синхронизировать время с NTP-сервером не режем чем раз в 15 минут.

Для измерения времени в сетях связи стоит упомянуть отечественное средство измерений – тестер-анализатор пакетных сетей «МАКС-ЕМК», производства АО «НПП «Кометех» (средство измерений утверждённого типа, регистрационный номер в Федеральном информационном фонде обеспечения единства измерений 63631-17). «МАКС-ЕМК» имеет встроенный приёмник сигналов ГЛОНАСС/GPS, по этим сигналам формирует собственную шкалу времени и может измерять разность шкал времени удалённых NTP(PTP) серверов или смещение шкалы времени по внешнему сигналу 1 Гц. Прибор содержит набор измерительных функций для реализации основных задач тестирования и паспортизации пакетных сетей и услуг.

Результаты измерений синхронизации шкалы времени по NTP- и PTP-протоколу

NTP- и PTP-серверы широко используют в том числе в локальных вычислительных сетях LAN (далее – ЛВС). Как известно, ЛВС имеют простую структуру построения, и загрузка в них практически отсутствует. Какую же в таких ЛВС можно ожидать погрешность синхронизации времени? Чтобы это выяснить, проведено два эксперимента на примере устройства синхронизации времени «TOPAZ Метроном PTS» (регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений 72378-18). Устройство работает под управлением операционной системы TOPAZ Linux. Используется в качестве NTP- или PTP-сервера в режиме дисциплинирования по сигналам ГНСС. В различных модификациях имеет коммутационные порты для подключения одномодового или многомодового оптического волокна, а также витой пары со скоростями передачи данных 100 Мбит/с или 1000 Мбит/с. На устройстве реализован выход сигнала 1 PPS (1 Гц) – формируемая устройством шкала времени.

Эксперимент 1.

В качестве NTP-сервера уровня Stratum I (синхронизированного по сигналам ГЛОНАСС/GPS) использовалось устройство синхронизации времени «TOPAZ Метроном PTS». В качестве NTP-сервера уровня Stratum II использовалось устройство синхронизации частоты и времени «Метроном» версии 1000 (аналог Meinberg IMS-M1000). Оба устройства подключены к одной ЛВС.

«Метроном» версии 1000 синхронизировался по NTP-протоколу и на основе встроенного опорного генератора формировал собственную шкалу времени (сигнал 1 PPS (1 Гц)). Следует уточнить, что в таком режиме практически все устройства подстраивают частоту собственного опорного генератора и в случае перехода в автономный режим работы могут в течение продолжительного времени хранить шкалу времени с установленными параметрами, обычно от десятков мкс до сотен мс за сутки. Выходной сигнал 1 PPS (1 Гц) сравнивался с эталонным сигналом 1 Гц с помощью измерителя интервалов времени (частотомера универсального CNT-90, регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений 41567-09). Суммарная погрешность средств измерений и метода измерений не превысила ±0,1 мкс.

Результаты формирования шкалы времени NTP-сервера уровня Stratum II приведены на рисунке 6.

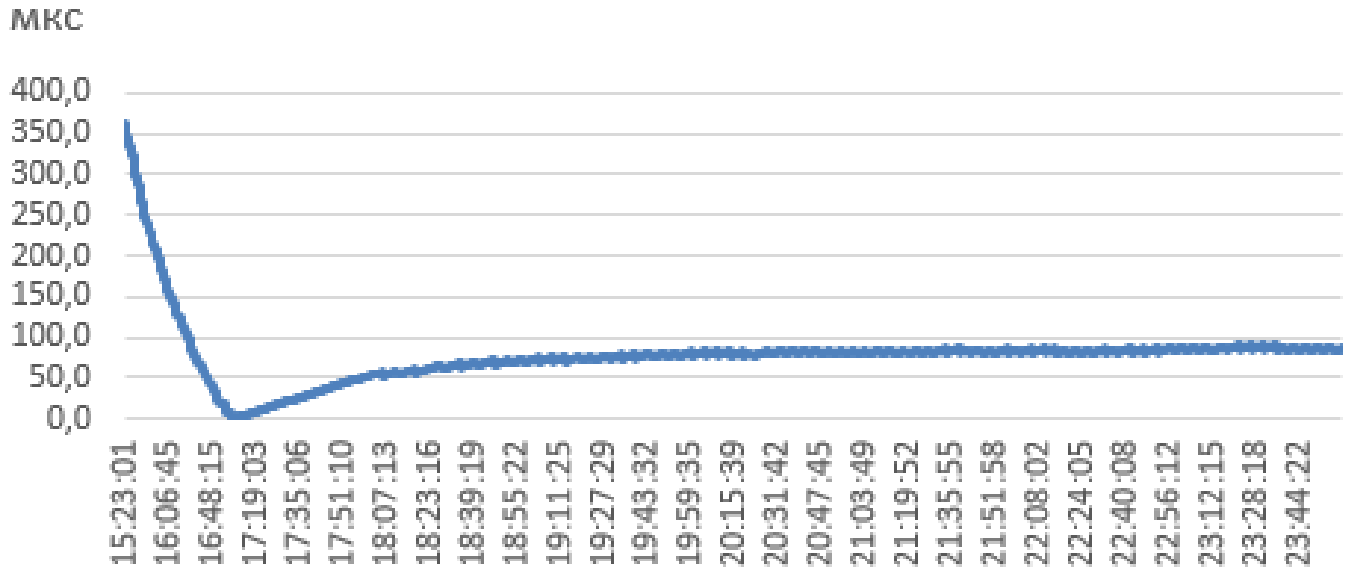

Рис. 6. Результаты формирования шкалы времени NTP-сервера уровня Stratum II.

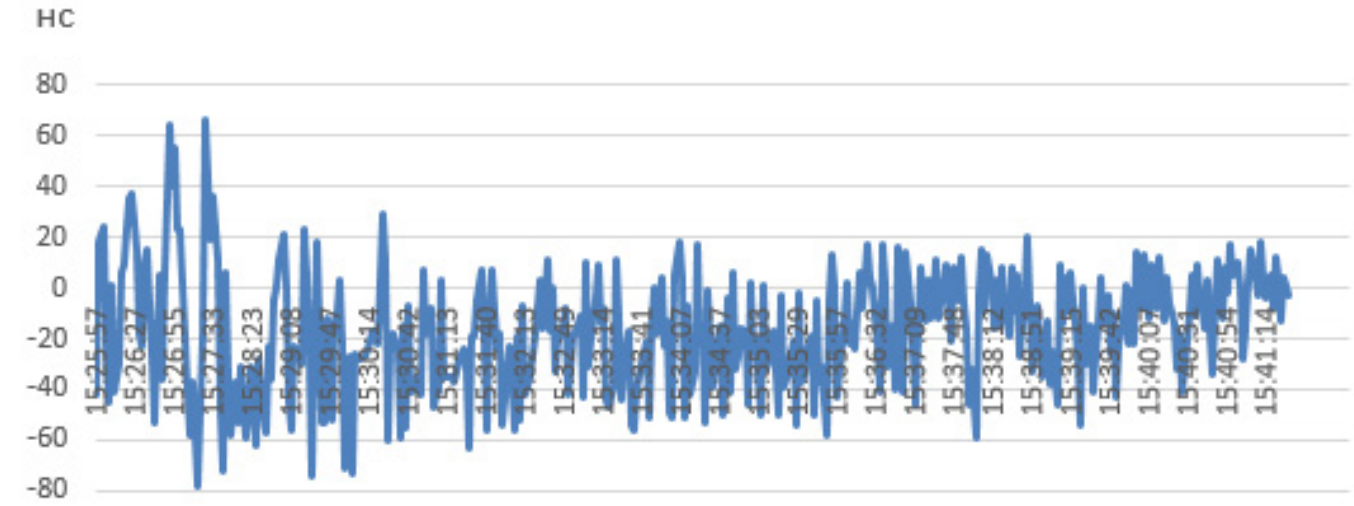

Рис. 7. Результаты формирования шкалы времени PTP-клиента относительно PTP-мастера.

При подключении серверов непосредственно друг к другу патчкордом результаты измерений получались идентичными.

Эксперимент 2.

В качестве PTP-мастера и PTP-клиента использовались два устройства синхронизации времени «TOPAZ Метроном PTS». Устройства подключены к ЛВС через один коммутатор.

С помощью измерителя интервалов времени (частотомера универсального CNT-90) сравнивались два сигнала 1 PPS (1 Гц). Результаты измерений приведены на рисунке 7.

В данном эксперименте учтены задержки в подключаемых к измерителю времени кабелях. Погрешность измерений не превысила ±5 нс.

При увеличении трафика через коммутатор (без поддержки PTP-протокола), к которому подключены PTP-мастер и PTP-клиент, смещение формируемой шкалы времени измерялось в мкс.

По результатам измерений можно сделать следующие выводы:

- погрешность синхронизации шкалы времени по протоколу NTP в локальной сети может достигать точностей в десятки мкс;
- погрешность синхронизации шкалы времени по протоколу PTP в локальной сети может достигать точностей в десятки нс.

Эталон объёма информации

При оказании услуг связи (в первую очередь это касается операторов сотовой связи) случается так, что возникают ошибки в пакетах передаваемой информации, что ведёт к перезапросу и повторной передаче данных. Данный трафик тарифицируется. Также следует упомянуть, что в пакетах

помимо полезной информации передаётся и служебная, за которую платит конечный потребитель. В целях обеспечения единства измерений разработан и утверждён приказ Росстандарта от 18.08.2023 г. № 1707 «Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений количества передаваемой (принятой) информации (данных) и величин параметров пакетных сетей передачи данных». Государственная поверочная схема для средств измерений количества переданной (принятой) информации (данных) и величин параметров пакетных сетей передачи данных устанавливает порядок передачи единицы количества переданной (принятой) информации (данных) и единиц величин параметров пакетных сетей передачи данных от государственного первичного эталона (ГПЭ) рабочим эталонам и средствам измерений с указанием показателей точности эталонов, средств измерений и основных методов передачи единиц [6].

ГПЭ состоит из комплекса следующих технических средств и вспомогательных устройств: файл-сервер эталонных объёмов цифровой информации; IP-формирователь соединений «Амулет-М»; измеритель количества информации «Вектор-ИКИ»; имитатор параметров сетей «ВИМАН»; эталонный измеритель параметров пакетных сетей со скоростью передачи до 10 Гбит/с «ВИМАН-И»; сервер точного времени «Метроном-PTP-1U»; формирователь-измеритель соединений «СИГМА-2»; модуль синхронизации для цифровых осциллографов; осциллограф MSOS804A; частотомер 53220A; стандарт частоты и времени рубидиевый Ч1-1020; набор устройств фиксированной задержки.

ГПЭ предназначен для измерения количества передаваемой (принятой) информации (данных); задержки передачи пакетных данных; вариации задержки передачи пакетов; пропускной способности канала передачи данных; коэффициента потерь пакетов данных.

Вывод

Строгое соблюдение требований нормативно-правовой базы в сочетании с комплексным контролем параметров тактовой сетевой синхронизации (ОВИ, МОВИ, ДВИ) и точности синхронизации времени является ключевым условием для обеспечения целостности и устойчивой работы сетей связи общего пользования. Соблюдение допустимых смещений шкал времени напрямую предотвращает сбои и гарантирует качество передаваемых данных. Интеграция всех этих параметров в единую систему мониторинга обеспечивает высокую надёжность сети.

Для обеспечения надёжного функционирования современных высокоскоростных сетей связи (LTE, 5G) и корректности тарификации услуг связи протокол NTP недостаточно точен, в связи с чем необходимо применение протокола PTP (обеспечивающего наносекундную точность) и государственное регулирование с опорой на государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени.

Список литературы:

[1] Приказ Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации от 19.12.2019 № 870 «Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений и выполняемых при обеспечении целостности и устойчивости функционирования сети связи общего пользования, и обязательных метрологических требований к ним, в том числе показателей точности измерений».

[2] Колтунов М.Н., Леготин Н.Н., Шварц М.Л., «Сетевая синхронизация в системах связи», 2007.

[3] Mills David L. Computer network time synchronization – 2nd edition. – CRC Press, 2010.

[4] Семёнов С.А., «Методика оценки корректности формирования текущего значения времени устройствами синхронизации времени с использованием NTP серверов ФГУП «ВНИФИТРИ» при проведении поверки» Метрология в XXI веке. Материалы X научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов, 2023, с. 243-253.

[5] Каган С.Н., Пестерев С.В., «Результаты экспериментальных исследований реальной неопределённости шкал времени потребителей NTP серверов уровня Stratum 1». Альманах современной метрологии № 8, 2016, с. 75-86.

[6] Приказ Росстандарта от 18.08.2023 № 1707 «Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений количества передаваемой (принятой) информации (данных) и величин параметров пакетных сетей передачи данных».

Об авторах:

Семёнов Сергей Александрович, AuthorID: 1201354, SPIN-код: 3149-1337, ФГУП «ВНИИФТРИ», Россия, пгт. Менделеево.

Семёнова Екатерина Игоревна, ФГУП «ВНИИФТРИ», Россия, пгт. Менделеево.