

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ЕДИНОГО И ТОЧНОГО ВРЕМЕНИ В СЕТЯХ СВЯЗИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-12-27-33

Шварц Михаил Львович,
МТУСИ, Москва, Россия, mschwartz@srd-mtuci.ru

Manuscript received 30 October 2024;
Accepted 23 November 2024

Богданов Евгений Александрович,
АСУиТМ АО "ОЭК", Москва, Россия,
Bogdanovea@uneco.ru

Рыжков Анатолий Васильевич,
МТУСИ, Москва, Россия, ryzhkov.anatoly@yandex.ru

Аладин Владимир Михайлович,
МТУСИ, Москва, Россия, Valadin@smsync.ru

Ключевые слова: система единого точного времени, частотно-временная синхронизация, РТР, НТР, ГНСС, цифровая подстанция, прозрачные часы

Электроэнергетика использует большое количество различных автоматизированных технологических систем – контроллеры релейной защиты, системы управления, системы контроля качества и учёта электроэнергии и т.п. По мере развития вычислительной техники возрастает и сложность задач, которые решаются с помощью средств автоматизации технологических процессов. Анализ большого количества данных о параметрах и режимах работы оборудования невозможен без корректной информации о моментах времени, когда эти события были зафиксированы. Таким образом, основой для работы автоматизированных технологических систем является система единого и точного времени (СЕТВ), устанавливающая единство шкал времени во всех контроллерах и системах сбора информации. В зависимости от целей и назначения автоматизированных систем они выдвигают различные требования к дискретности и, соответственно, точности отсчёта шкалы времени в ведомых часах – от 1 с до 1 мкс, что определяет технологии построения СЕТВ. Это приводит к необходимости создания универсальной системы единого времени, которая может обеспечить требования различных потребителей. Помимо технологической универсальности СЕТВ должна также обеспечить высокие показатели надёжности, в том числе в условиях помех или нарушения канала получения информации о точном времени. Таким образом, возникает необходимость создания резервированного комплекса ведущих часов предприятия, которые помимо внутреннего резервирования высокостабильных источников частоты имеют несколько независимых каналов получения данных о единой и точной шкале времени. Кроме того система распределения сигналов времени в СЕТВ также должна предусматривать возможность резервирования станционных часов энергообъектов, а также направлений связи между ведущими и станционными часами. Рассмотрены особенности построения СЕТВ для сетей электроэнергетики с учётом требований потребителей различных поколений, а также необходимости обеспечения высокой надёжности и отказоустойчивости системы временной синхронизации.

Информация об авторах:

Шварц Михаил Львович, МТУСИ, начальник отдела, к.т.н., Москва, Россия

Богданов Евгений Александрович, начальник управления АСУиТМ АО "ОЭК", Москва, Россия

Рыжков Анатолий Васильевич, МТУСИ, г.н.с., д.т.н., профессор, Москва, Россия

Аладин Владимир Михайлович, МТУСИ, инженер I кат., Москва, Россия

Для цитирования:

Шварц М.Л., Богданов Е.А., Рыжков А.В., Аладин В.М. Особенности построения систем единого и точного времени в сетях связи электроэнергетики // Т-Сотм: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №12. С. 27-33.

For citation:

Schwartz M.L., Bogdanov E.A., Ryzhkov A.V., Aladin V.M. (2024). Features of constructing single and accurate time systems in electric power communication networks. T-Comm, vol. 18, no.12, pp. 27-33. (in Russian)

Введение

В оборудовании электрической подстанции имеется множество подсистем, фиксирующих различные события. Записи об этих событиях сохраняются в журналах событий контроллеров, систем управления, серверов самих подсистем и т.д. При возникновении инцидента или аварии для расследования их причин и дальнейшей последовательности событий необходимо совместить журналы аварий, сохраненные различными технологическими подсистемами. При этом, если шкалы времени контроллеров имели различия, то совместный анализ в лучшем случае будет сильно затруднён, а в пределе просто невозможен [16].

Так как электросетевые компании взаимодействуют между собой, а также с системным оператором, то регистрация событий должна производиться в общей для всех предприятий шкале времени. Такой шкалой является всемирная универсальная координированная шкала времени – UTC.

Таким образом, на предприятии электроэнергетики должна применяться не только единая для всех энергообъектов шкала времени, но и точная шкала, т.е. соответствующая шкале времени UTC.

Следовательно, единство шкал времени – это основа для корректного заполнения журналов событий, а система единого времени – арбитр, который должен установить не только одинаковые, но и точные шкалы времени во всех технологических устройствах, фиксирующих события [20].

Подсистемами, требующими единого и точного времени, являются системы АСУ ТП, телемеханики, релейной защитной автоматики (РЗА), всевозможные измерительные комплексы, интеллектуальные системы учёта количества потреблённой электроэнергии (ИСУ или ранее – АСКУЭ), системы безопасности, инженерные системы, системы контроля качества электроэнергии, сервера систем управления и т.п.

При этом необходимо учитывать, что различные подсистемы требуют разную точность временной синхронизации. Системы управления (SCADA), системы учёта количества и измерения качества электроэнергии, инженерные системы, как правило, используют дискретность меток времени 1с. В то же время системы автоматики и телемеханики, РЗА стандарта МЭК 60870, системы АСУ ТП работают с дискретностью 1 мс. Если же говорить об автоматике современных цифровых подстанций, созданных по требованиям стандарта МЭК 61850 [21] и использующих системы векторных измерений, то там требования к точности шкалы времени составляют величину лучше 1 мкс.

Для обеспечения таких различных требований к точности синхронизации шкал времени применяются различные методы. Для установки шкал времени в оконечных устройствах с точностями 1с – 1 мс может применяться протокол сетевого времени – NTP. Этот протокол в сочетании с сетью связи по технологии IP MPLS TP обеспечивает точность синхронизации шкалы времени ведомых часов до 1мс.

Для систем автоматики цифровых подстанций с векторными измерениями применяется прецизионный протокол времени – PTP, обеспечивающий точность синхронизации шкал времени лучше 1 мкс.

Также для синхронизации часов контроллеров могут использоваться сигналы 1 PPS и протокол IRIG, но в данной статье они не рассматриваются.

Для синхронизации шкалы времени с помощью протокола NTP достаточно наличие только традиционной пакетной сети MPLS TP. В то же время для работы протокола PTP необходимо наличие транспортных элементов пакетной сети с встроенными аппаратными функциями поддержки PTP с профилем настроек по стандарту МЭК 61850-9.3 или IEEE C37.238-2017 [21]. Кроме того, оконечные устройства также должны быть оборудованы встроенными программно-аппаратными часами протокола PTP с указанным профилем настроек.

Ниже будут рассмотрены некоторые аспекты организации систем временной синхронизации на базе протоколов NTP и PTP энергосетевой компании на сетевом уровне. Не вдаваясь в подробности в работу собственно протокола PTP, отметим лишь несколько основных особенностей профиля протокола PTP для сетей электроэнергетики [1-5].

1. Профиль IEE C37.238-2017 более универсальный, включает в себя все возможности профиля МЭК 61850-9.3 и даёт некоторые дополнительные возможности: использование VLAN (не рекомендовано), дополнение протокола выбора наилучшего мастера (ведущих часов) – BMCA в виде использования параметров TLV (type-length-value);

2. Обмен данными происходит на втором уровне модели OSI, т.е. в Ethernet протоколе в режиме Multicast;

3. Использование механизма peer-to-peer, т.е. прозрачные часы измеряют задержки между двумя соседними часами, для расчёта задержек в каждом направлении передачи. Такой режим работы прозрачных часов существенно уменьшает время переходных процессов при изменении маршрутов передачи пакетов PTP от ведущих часов к ведомым часам потребителя.

4. Реализация часов с возможностями ведущих часов (Grandmaster-capable clock). Эти часы в нормальных условиях выполняют функции ведомых часов, а в случае отказа основного источника шкалы времени переключаются в режим GrandMaster и становятся ведущими часами. При этом часы работают от внутреннего высокостабильного генератора в режиме хранения шкалы времени или в режиме синхронизации от резервного источника, например, встроенного приёмника сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

В стандарте МЭК 61850-9.3 установлены требования к точности формирования и синхронизации шкал времени для различных типов часов протокола PTP:

1. Ведущие часы – GrandMaster (GM): ± 250 нс по отношению к шкале времени UTC;

2. Пограничные часы – Boundary Clock (BC): ± 200 нс – погрешность синхронизации с вышестоящими ведущими часами;

3. Прозрачные часы – Transparent Clock (TC): ± 50 нс – погрешность измерения задержки PTP пакета в транспортном элементе пакетной сети.

С учётом требований к точности шкалы времени на входе оконечного устройства (не более ± 1 мкс) эти нормы определяют предельное количество промежуточных элементов между ведущими часами GM и оконечным устройством:

- не более 15 TC;
- не более 3-х BC.

Также возможна комбинация пограничных или прозрачных часов с соответствующим пересчётом их количества. Например, 1 BC + 11 TC ($200 \text{ нс} + 11 \times 50 \text{ нс} = 750 \text{ нс}$ и $+250 \text{ нс}$ (GM) = $1000 \text{ нс} = 1 \text{ мкс}$).

Иллюстрация расчёта бюджета ошибки представлена на рисунке 1 [5].

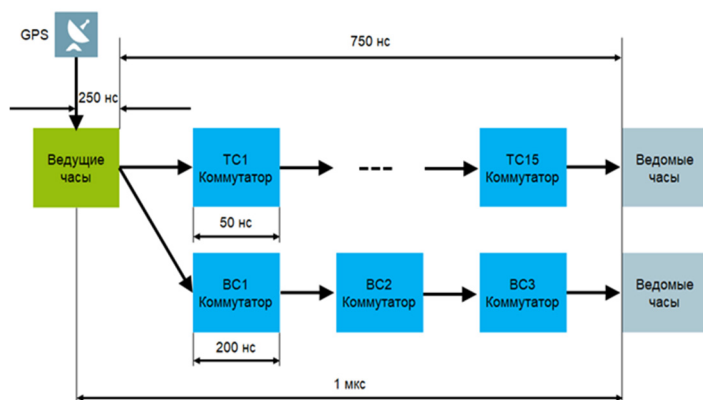


Рис. 1. Схема для определения бюджета ошибки синхронизации ведомых часов в протоколе PTP для систем энергетики

Для протокола NTP количество промежуточных сетевых устройств не оговаривается, но должно проверяться экспериментально, особенно для большой сети связи.

1 Особенности системы единого и точного времени

Система единого и точного времени (СЕТВ) может быть построена по принципу распределенной системы, при этом на каждой подстанции устанавливаются собственные стационарные ведущие часы, синхронизированные по сигналам ГНСС. Это может приводить к ситуации, когда на одной подстанции для разных технологических подсистем устанавливаются несколько устройств NTP-серверов или PTP-GrandMaster (рис. 2).

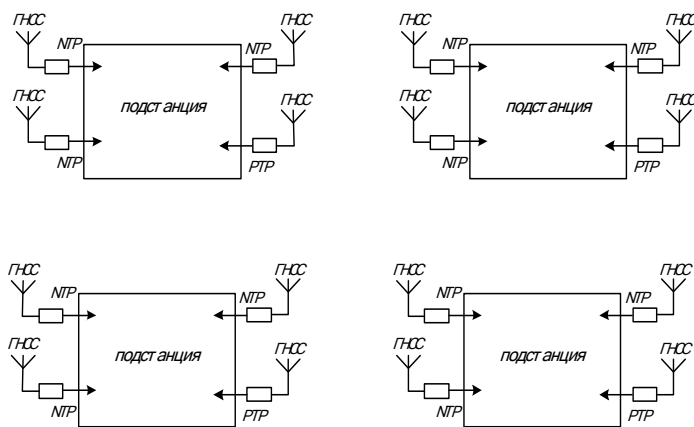


Рис. 2. распределённая (децентрализованная) структура СЕТВ

Такое решение довольно просто в реализации, не требует затрат на организацию единой системы временного обеспечения, но приводит к снижению надёжности СЕТВ в целом из-за незащищённости приёма сигналов ГНСС в виду всевозможных помех и проблем с электромагнитной совместимостью с внешними радиопередающими устройствами. В связи с тем, что электроэнергетика относится к критической инфраструктуре необходимо предусматривать резервирование приёма сигналов ГНСС по наземным линиям связи.

Таким образом, для энергосетевых компаний представляется более перспективным решением построение централизованно-распределенной системы единого и точного времени, когда на подстанции устанавливаются стационарные часы, синхронизированные с ведущими часами предприятия, а в качестве резерва используется встроенный приёмник ГНСС. Эти часы должны поддерживать как протокол NTP, так и протокол PTP для синхронизации различного рода потребителей. При этом необходимо, чтобы оборудование станционных часов имело достаточно большое количество физических портов. Это вызвано потребностью передавать шкалу времени большому количеству различных технологических подсистем, которые в целях сетевой безопасности разделены либо физически, либо виртуально на разные подсети [6-13].

Такой подход предусматривает создание многоуровневой архитектуры СЕТВ, включающей в себя уровень ведущих часов, уровень станционных часов и уровень потребителей на подстанции (рис. 3).

Кроме того, для повышения надёжности комплекса ведущих часов, в их составе должны быть предусмотрены хранители шкалы времени на основе атомных стандартов частоты и времени. Ведущие часы также должны получать информацию о единой и точной шкале из нескольких независимых источников – сигналы ГНСС, наземный канал связи с государственным эталоном частоты и времени и т.п.

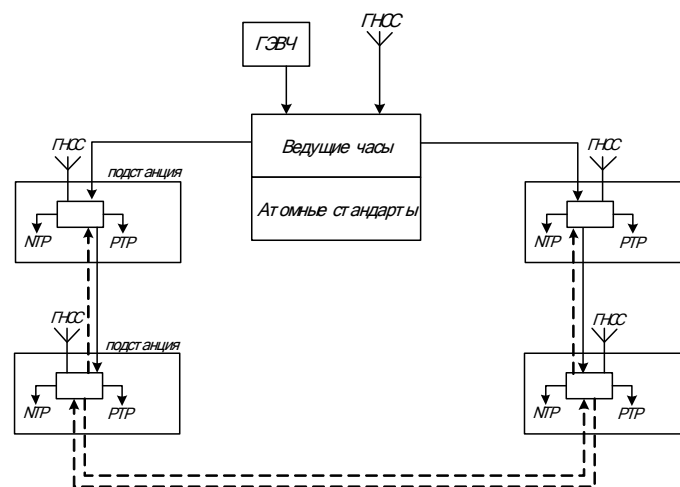


Рис. 3. централизованно-распределённая структура СЕТВ

2 Ведущие сетевые часы

Возможная структура ведущих сетевых часов предприятия представлена на рисунке 4. Подробно она рассмотрена в [14, 15]. Эти часы построены по технологии APNT (Assistance Position, Navigation and Time). Они включают в себя резервированные источники частоты и времени на базе атомных стандартов частоты с привязкой к шкале UTC по приёмникам ГНСС, наземный канал связи для получения данных о шкале времени от национального эталона частоты и времени, встроенный источник шкалы времени по сигналам ГНСС и выходной GM, который предоставляет пользователю шкалу времени в протоколах NTP и PTP. Это комплекс устройств, по сути представляющий из себя первичный источник частоты и времени (ПЭИВЧ – Primary Reference Time and Clock – PRTC) [22] повышенной надёжности и с несколькими источниками

шкалы UTC. Для обеспечения надёжного функционирования ведущие часы должны устанавливаться на объекте с надёжным приёмом сигналов ГНСС.

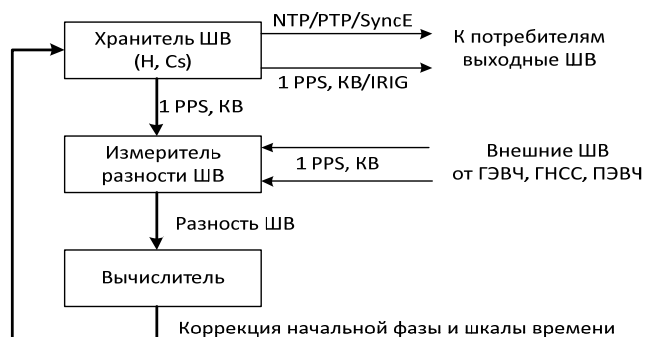


Рис. 4. Структура ведущих часов предприятия

В этой структуре предполагается, что основным источником шкалы времени для ведущих часов предприятия будут являться хранители на основе атомных стандартов частоты и времени на основе водорода или цезия. При этом в целях повышения надёжности лучше применять источники разных типов или производителей, чтобы избежать ситуации одновременного отказа из-за идентичности ресурса устройств из одной партии.

Хранители шкалы времени в процессе первоначальной настройки должны быть синхронизированы со шкалой UTC (2-4 недели). Затем в течение длительного времени (до 2-3 месяцев) измеритель сравнивает их шкалу с шкалами внешних источников. В случае, если шкалы внешних источников соответствуют шкале хранителей с заданной погрешностью (не более 200 нс), то вычислитель определяет поправку к шкале хранителей и по команде оператора или автоматически вводит эту поправку в хранители.

Такой подход позволит исключить ситуацию использования недостоверной шкалы времени от внешних источников, например, при приёме недостоверных сигналов ГНСС или при нарушении работы наземной системы связи с государственным эталоном частоты и времени.

Возможная структура таких ведущих часов на базе отечественного оборудования приведена на рисунке 5 [14].

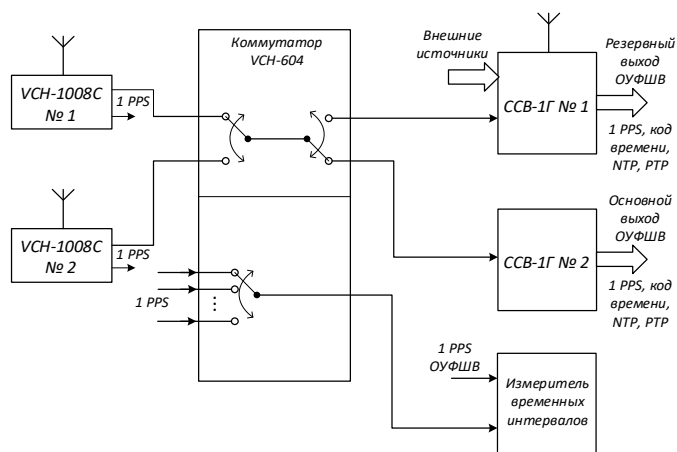


Рис. 5. Упрощенная схема предлагаемого решения для ведущих часов предприятия на базе отечественного оборудования

Ведущие часы предлагается реализовать на основе двух водородных стандартов частоты типа VCH-1008 и двух

серверов точного времени типа CCB-1Г, серийно выпускаемых АО «Время-Ч» и ООО «КОМСЕТ-сервис» соответственно. Таким образом, резервируются как хранители шкалы времени (стандарты типа VCH-1008), так и формователи сигналов шкалы времени (NTP/PTP серверы типа CCB-1Г). Предполагается, что один сервер времени CCB-1Г (№2) будет синхронизирован частотой хранителей, а второй (CCB-1Г №1) – внешними опорными сигналами (PTP, ГНСС, 1 PPS или IRIG-B) государственного эталона.

3 Передача шкалы времени между ведущими и станционными часами

В зависимости от технических возможностей сети связи электросетевой компании на верхнем уровне могут быть использованы различные схемы для передачи шкалы времени от ведущих часов к станционным.

Наиболее перспективным является вариант применения сетевых устройств с поддержкой PTP-протокола (рис. 6). При этом на верхнем уровне это могут быть как устройства с поддержкой профиля настроек телекоммуникационного стандарта по рекомендации МСЭ-T G.8275.1 (но также может быть и по рекомендации МСЭ-T G.8275.2) [18, 23]. Также может применяться и профиль для электроэнергетики по стандарту МЭК 61850-9.3. В случае использования телекоммуникационных профилей также необходимо применение системы синхронного Ethernet (SyncE), частота которого может быть задана ведущими часами.

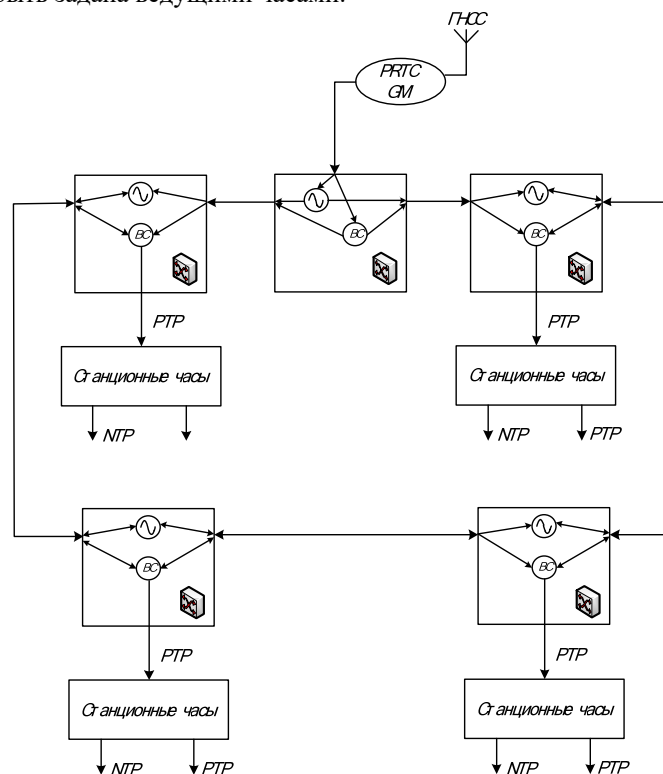


Рис. 6. Передача шкалы времени на верхнем уровне сети связи компании

При использовании PTP, станционные часы должны обеспечить переход на энергетический профиль протокола PTP по МЭК 61850 или IEEE C37.238-2017. При отсутствии на верхнем уровне сети связи поддержки протокола PTP может быть

использовано прямое соединение между ведущими и станционными часами по свободным волокнам оптического кабеля связи. Этот метод сохраняет технические характеристики системы, однако при этом, как правило, теряется возможность резервирования направлений передачи протокола РТР, как это возможно в случае кольцевой топологии сети связи на базе маршрутизаторов или коммутаторов с поддержкой протокола РТР.

В качестве альтернативы можно добавить второй канал передачи шкалы времени от ведущих часов к станционным на базе оборудования с передачей метки времени по системам связи СЦИ или ПЦИ на базе специализированной аппаратуры распределения сигналов времени – оборудование АРСВ производства ООО «АЛТО» [17, 19, 20] (рис. 7). Применение аппаратуры АРСВ позволяет организовать резервное направление синхронизации шкалы времени для станционных часов по независимой системе передачи. Кроме того, в общем случае, функции такого канала могут быть встроены в оборудование самих станционных часов. Это позволит снизить количество оборудования и повысить надёжность и управляемость СЕТВ в целом.

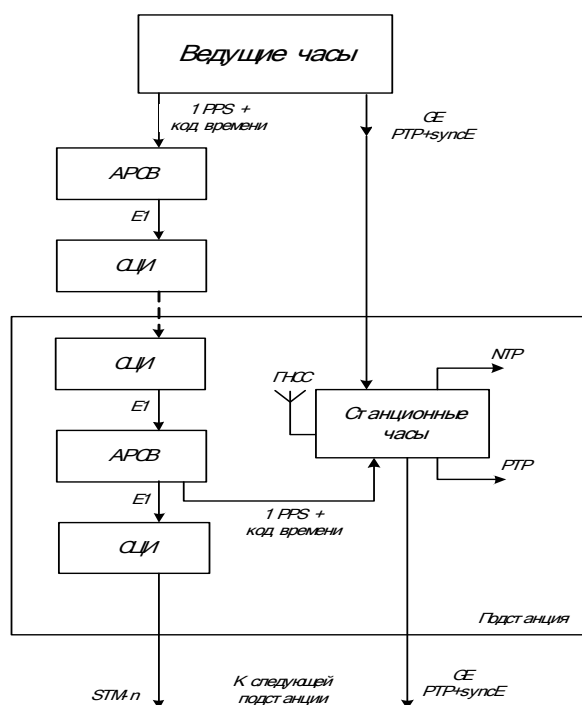


Рис. 7. Применение аппаратуры АРСВ для синхронизации станционных часов через сеть СЦИ

4 Синхронизация шкалы времени станционных устройств на подстанции

С учётом того что станционные часы синхронизируют шкалу времени от ведущих часов предприятия по протоколу РТР, их точность на три порядка выше, чем требуется для протокола NTP. Таким образом, они могут выступать в качестве первичных NTP-серверов для станционных потребителей.

Кроме того, сами станционные часы должны иметь возможность синхронизироваться от встроенных приёмников ГНСС на случай аварии наземного канала связи с ведущими часами предприятия. В качестве дополнительного резерва

станционные часы должны иметь возможность поддержания (хранения) шкалы времени по сигналам системы тактовой сетевой синхронизации 2,048 или 10 МГц, принятым от оборудования транспортной системы СЦИ или SyncE.

Для синхронизации часов оконечных устройств на подстанции используются протоколы РТР и NTP (в зависимости от типа потребителей). При этом для повышения надёжности, как правило, используются два комплекта станционных часов, которые подключаются к сети передачи данных с использованием резервирования интерфейсов по протоколу PRP [24-26]. То есть станционные часы должны поддерживать функционал PRP, либо между часами и сетевым оборудованием потребуется включение устройств Red Box. Но портов РТР, они должны быть также оборудованы прозрачными часами РТР.

В отличие от телекоммуникационных сетей, где оконечным устройствам требуется как частотная, так и временная синхронизация, технологические устройства электроэнергетики используют только синхронизацию часов. Поэтому особенностью энергетических профилей протокола РТР является преимущественное использование прозрачных часов (ТС), которые могут работать при отсутствии системы синхронного Ethernet. Поэтому, как правило, сетевые устройства шины процесса не имеют поддержки SyncE. Это связано с тем, что прозрачные часы РТР измеряют задержку передачи пакетов РТР в каждом из направлений между станционными и оконечными часами, а для работы прозрачных часов не требуется внешняя высокостабильная опорная частота.

Для подключения различных технологических систем к станционным часам минимально требуется две пары портов РТР (шина процесса) и NTP (шина станции) протоколов с резервированием PRP. Однако, с учетом вопросов сетевой безопасности эти подсистемы могут быть разделены на физическом уровне (раздельные подсети), либо на уровне виртуальных сетей. В связи с этим, станционные часы, как уже было отмечено выше, должны иметь большое количество портов с возможностью образования виртуальных сетей (VLAN) для портов с протоколом NTP. При этом в оборудовании станционных часов должна отсутствовать возможность связи между портами Ethernet, т.е. с сетевой точки зрения эти порты должны быть изолированными.

Примером такого оборудования может являться сервер синхронизации времени типа ССВ-1Г (рис. 8), в котором имеются до 8 пар изолированных портов с PRP резервированием.



Рис. 8. Внешний вид сервера синхронизации времени типа ССВ-1Г

Каждая пара может работать как с протоколом NTP, так и с протоколом PTP. Это устройство может поддерживать шкалу по внешним сигналам синхронизации 2,048/10 МГц, а также в качестве резерва использовать встроенный приёмник ГНСС [17]. Для возможности транзитного включения это устройство имеет режим пограничных часов, что позволяет использовать его в качестве промежуточного элемента в цепи синхронизации между ведущими часами предприятия и станционными часами удалённых подстанций.

Таким образом, перспективная система единого и точного времени энергосетевой компании будет представлять собой сочетание комплекса ведущих часов предприятия с привязкой к государственному эталону частоты и времени, комбинации систем передачи шкалы времени к станционным часам (рис. 6, 7), комплекты станционных часов и локальные сети подстанции, включая сети ЛВС и шину процесса, для передачи шкалы времени от станционных часов к оборудованию потребителей.

Выводы

В статье рассмотрены некоторые особенности организации системы единого и точного времени для предприятий электроэнергетики. Предложены различные методы реализации СЕТВ в зависимости от технических особенностей имеющихся сетей связи на основе ранее описанных отдельных составных частей систем временной синхронизации.

Также сформулированы требования к функциональным возможностям станционных часов для организации централизованно-распределённой системы единого времени в пределах подстанции.

Для полноценной реализации СЕТВ с учётом требований к повышенной надёжности, как объекта критической инфраструктуры необходимо внедрение транспортной сети связи предприятий электроэнергетики верхнего уровня на базе оборудования с поддержкой PTP протокола и системы синхронного Ethernet.

Литература

1. Precision Time Protocol (PTP): Synchronization in IEC 61850 environments <https://calnexsol.com/ptp-sync-in-iec-61850-environments>.
2. Freire I., Novaes C., Almeida I., Medeiros E., Berg M., Klautau A. Clock Synchronization Algorithms Over PTP-Unaware Networks: Reproducible Comparison Using an FPGA Testbed // IEEE Access, vol. 9, pp. 20575-20601, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3054164
3. Bernhard Baumgartner, Christian Riesch, Wolfgang Schenk. <https://www.omicron-lab.com/applications/detail/news/iec-61850-9-3-will-simplicity-supersede-complexity#>
4. Han M., Guo H., Crossley P. IEEE 1588 Time Synchronisation Performance for IEC 61850 // Transmission Substations. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 12018. № 107, pp. 264-272. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.11.036>
5. Подробности реализации протокола синхронизации времени PTPv2, блог ООО «НПО «АвалонЭлектроТех» https://habr.com/ru/companies/phoenix_contact/articles/495920/
6. Ченакин А.В., Кочемасов В.Н., Пестряков А.В. Состояние и перспективы развития синтезаторов частот СВЧ-диапазона // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т. 9. № 4. С. 132-139.
7. Коцыняк М.А., Лаута О.С., Иванов Д.А. Математическая модель таргетированной компьютерной атаки // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 2. С. 73-81.
8. Захарченко Р.И., Королев И.Д. Методика оценки устойчивости

функционирования объектов критической информационной инфраструктуры функционирующей в киберпространстве // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 2. С. 52-61.

9. Чертова О.Г., Чиров Д.С. Построение опорной сети связи на базе малоразмерных беспилотных летательных аппаратов с отсутствием наземной инфраструктуры // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 3. С. 60-71.

10. Chirov D.S., Lobova E.O. Wideband HF signals dispersion distortion compensator based on digital filter banks. Theory and approbation // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 4. С. 57-65.

11. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В., Скворцова Ю.И. Численное моделирование распространения пространственно-временных частотно-модулированных радиоволн в анизотропной среде // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. № 9. С. 40-47.

12. Lerner I.M. Influence of the shape of the amplitude-frequency response on the capacity of communication channel with memory using apsk-n signals, which implements the theory of resolution time // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. № 10. С. 45-59.

13. Dokuchaev V.A., Maklachkova V.V., Statev V.Yu. Classification of personal data security threats in information systems // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 1. С. 56-60.

14. Медведев С.Ю., Мишагин К.Г., Рыжков А.В., Сахаров Б.А., Шварц М.Л. Формирование шкалы времени в когерентной сети связи общего пользования // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №12. С. 29-35. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-12-29-35

15. Рыжков А.В., Шварц М.Л., Аладин В.М. Поддержание достоверности шкалы времени в ведущих сетевых часах в условиях преднамеренных помех // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. №11. С. 4-9. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-11-4-9

16. Богданов Е.А., Шварц М.Н., Иванов А.Н., Кольцов П.А. Система единого точного времени (СЕТВ) для энергообъектов и диспетчерских центров электросетевых компаний // Экономические стратегии. 2023. № 2(188). С. 90-93. DOI: <https://doi.org/10.33917/es-2.188.2023.90-93>

17. Рыжков А.В., Шварц М.Л., Аладин В.М., Исупов А.В. Опыт внедрения систем частотно-временного обеспечения сетей связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №7. С. 21-28. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-7-21-28

18. Шварц М.Л., Рыжков А.В. Современные тенденции развития систем сетевой синхронизации в сетях электросвязи. От плезихронных до когерентных сетей // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. Том 4, 2021, С. 27-38

19. Рыжков А.В., Донченко С.И., Иванов А.В., Колтунов М.Н., Савчук А.В., Шварц М.Л. Передача сигналов времени по сети связи общего пользования. // Электросвязь. 2010. № 12. С. 42-47.

20. Рыжков А.В., Шварц М.Л. Пути формирования прецизионной шкалы времени национальной сети связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. № 2. С. 17-24.

21. Стандарт МЭК 61850 часть 9.3 «Профиль протокола точного времени для автоматизации энергетических систем общего пользования».

22. Стандарт IEEE C37.238-2017 Standard Profile for Use of IEEE 1588 Precision Time Protocol in Power System Applications

23. Рекомендация МСЭ-T G.8272/Y.1367. Timing characteristics of primary reference time clocks. 2018 Amendment 2 (11/22).

24. Лопухов И. Концепция параллельного и кольцевого резервирования // Современные технологии автоматизации. 2012. №12. С. 18-25.

25. Рыжков А.В., Шварц М.Л. Современные тенденции развития систем сетевой синхронизации в сетях электросвязи. От плезихронных до когерентных сетей // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2021. Т. 12. № 4. С. 27-38.

26. Колтунов М.Н., Шварц М.Л. Актуальные вопросы применения оборудования частотно-временного обеспечения на ЕСЭ России // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2018. Т. 9. № 2. С. 113-120.

FEATURES OF CONSTRUCTING SINGLE AND ACCURATE TIME SYSTEMS IN ELECTRIC POWER COMMUNICATION NETWORKS

Mikhail L. Schwartz, Moscow Technical University of communications and Informatics, Moscow, Russia, mschwartz@smsync.ru

Eugeny A. Bogdanov, JSC "United Energy Company", Moscow, Russia, BogdanovEA@uneco.ru

Anatoliy V. Ryzhkov, Moscow Technical University of communications and Informatics, Moscow, Russia, ryzhkov.anatoly@yandex.ru

Vladimir M. Aladin, Moscow Technical University of communications and Informatics, Moscow, Russia, Valadin@smsync.ru

Abstract

The electric power industry uses a large number of different automated technological systems – relay protection controllers, control systems, quality control systems and electricity metering, etc. As computing technology develops, the complexity of the problems that are solved using automation tools for technological processes also increases. Analysis of a large amount of data on the parameters and operating modes of equipment is impossible without correct information on the points in time when these events were recorded. Thus, the basis for the operation of automated technological systems is a single and accurate time system that establishes the unity of time scales in all controllers and data collection systems. Depending on the goals and purposes of automated systems, they put forward various requirements for discreteness and, accordingly, the accuracy of the time scale reading in slave clocks – from 1 s to 1 μ s, which determines the technologies for constructing a network of time systems. This leads to the need to create a universal single time system that can meet the requirements of various consumers. In addition to technological versatility, the single time system must also ensure high reliability, including in conditions of interference or disruption of the channel for receiving information on the exact time. Thus, there is a need to create a redundant complex of master clocks of the enterprise, which, in addition to the internal redundancy of highly stable frequency sources, have several independent channels for receiving data on a single and accurate time scale. In addition, the system for distributing time signals in the power enterprise network must also provide for the possibility of reserving station clocks of power substations, as well as communication directions between master and station clocks. This article examines the features of constructing a single and accurate time system for power industry networks, taking into account the requirements of consumers of different generations, as well as the need to ensure high reliability and fault tolerance of the time synchronization system.

Keywords: accurate time systems, GNSS, PTP, NTP, time scale, time-frequency synchronization, digital substation.

References

- [1] Precision Time Protocol (PTP): Synchronization in IEC 61850 environments. <https://calnexsol.com/ptp-sync-in-iec-61850-environments/>
- [2] I. Freire, C. Novaes, I. Almeida, E. Medeiros, M. Berg and A. Klautau, "Clock Synchronization Algorithms Over PTP-Unaware Networks: Reproducible Comparison Using an FPGA Testbed," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 20575-20601, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3054164.
- [3] B. Baumgartner, C. Riesch, W. Schenk, "IEC 61850-9-3. Will simplicity supersede complexity?" <https://www.omicron-lab.com/applications/detail/news/iec-61850-9-3-will-simplicity-supersede-complexity#>
- [4] M. Han, H. Guo, P. Crossley, "IEEE 1588 time synchronisation performance for IEC 61850 transmission substations", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Vol. 107, 2019, pp. 264-272. doi: 10.1016/j.ijepes.2018.11.036
- [5] Details of the implementation of the PTPv2 time synchronization protocol, blog of NPO AvalonElectroTech LLC. https://habr.com/ru/companies/phoenix_contact/articles/495920/
- [6] A. V. Chenakin, V. N. Kochemasov, A. V. Pestryakov, "Status and development prospects of microwave frequency synthesizers," *Systems of signal synchronization, generating and processing*. 2018. Vol. 9. No. 4, pp. 132-139.
- [7] M. A. Kotsyniyak, O. S. Lauta, D. A. Ivanov, "Mathematical model of a targeted computer attack," *H-ES Research*. 2019. Vol. 11. No. 2, pp. 73-81.
- [8] R. I. Zakharchenko, I. D. Korolev, "Methodology for assessing the sustainability of critical information infrastructure facilities operating in cyberspace," *H-ES Research*. 2018. Vol. 10. No. 2, pp. 52-61.
- [9] O. G. Chertova, D. S. Chirov, "Construction of a backbone communication network based on small-sized unmanned aerial vehicles in the absence of ground infrastructure," *H-ES Research*. 2019. Vol. 11. No. 3, pp. 60-71.
- [10] D. S. Chirov, E. O. Lobova, "Wideband HF signals dispersion distortion compensator based on digital filter banks. Theory and approbation," *T-Comm*. 2020. Vol. 14. No. 4, pp. 57-65.
- [11] A. S. Kryukovsky, D. S. Lukin, D. V. Rastyagaev, Yu. I. Skvortsova, "The numerical modeling of propagation of space-time frequency-modulated radio waves in ionospheric to medium," *T-Comm*. 2015. Vol. 9. No. 9, pp. 40-47.
- [12] I. M. Lerner, "Influence of the shape of the amplitude-frequency response on the capacity of communication channel with memory using apsk-n signals, which implements the theory of resolution time," *T-Comm*. 2019. Vol. 13. No. 10, pp. 45-59.
- [13] V. A. Dokuchaev, V. V. Maklachkova, V. Yu. Statev, "Classification of personal data security threats in information systems," *T-Comm*. 2020. Vol. 14. No. 1, pp. 56-60.
- [14] S. Yu. Medvedev, K. G. Mishagin, A. V. Ryzhkov, B. A. Sakharov, M. L. Schwartz, "Time scale formation in a coherent public communication network," *T-Comm*. 2023. Vol. 17. No. 12, pp. 29-35. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-12-29-35
- [15] A. V. Ryzhkov, M. L. Schwartz, V. M. Aladin, "Maintaining time scale accuracy in master network clocks in intentional interference event," *T-Comm*. 2023. Vol. 17. No. 11, pp. 4-9. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-11-4-9
- [16] E. A. Bogdanov, M. N. Schwartz, A. N. Ivanov, P. A. Koltsov, "Unified Precise Time System (UPTS) for Power Facilities and Dispatch Centers of Electric Grid Companies," *Economic Strategies*. 2023. No. 2(188), pp. 90-93. DOI: <https://doi.org/10.33917/es-2.188.2023.90-93>
- [17] A. V. Ryzhkov, M. L. Schwartz, V. M. Aladin, A. V. Isupov, "Experience of introducing time-frequency supply systems for communication networks," *T-Comm*. 2022. Vol. 16. No. 7, pp. 21-28. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-7-21-28
- [18] M. L. Schwartz, A. V. Ryzhkov, "Modern trends in the development of network synchronization systems in telecommunication networks. From plesiochronous to coherent networks," *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing*. No. 4, 2021, pp. 27-38.
- [19] A. V. Ryzhkov, S. I. Donchenko, A. V. Ivanov, M. N. Koltunov, A. V. Savchuk, M. L. Schwartz, "Transmission of time signals over a public communications network," *Electrosvyaz*. 2010. No. 12, pp. 42-47.
- [20] A. V. Ryzhkov, M. L. Schwartz, "Ways of forming a precision time scale of the national communication network," *T-Comm*. 2020. Vol. 14. no. 2, pp. 17-24.
- [21] IEC/IEEE 61850-9-3:2016 - Precision Time Protocol profile for power utility automation.
- [22] IEEE C37.238-2017 Standard Profile for Use of IEEE 1588 Precision Time Protocol in Power System Applications.
- [23] ITU-T G.8272/Y.1367. Timing characteristics of primary reference time clocks. 2018 Amendment 2 (11/22).
- [24] I. Lopukhov, "The concept of parallel and ring redundancy," *Modern automation technologies*. 2012. No. 12, pp. 18-25.
- [25] A. V. Ryzhkov, M. L. Schwartz, "Modern trends in the development of network synchronization systems in telecommunication networks. From plesiochronous to coherent networks," *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing*. 2021. Vol. 12. No. 4, pp. 27-38.
- [26] M. N. Koltunov, M. L. Schwartz, "Actual issues of application of frequency-time support equipment on the Unified State Network of Russia," *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing*. 2018. Vol. 9. No. 2, pp. 113-120.