УДК 621.391:006
© Н. Бирюков[1], А. Семенко[1], Н. Триска[1], 2012

ЗАДАЧИ ЧАСТОТНО–ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Анализируются подходы к решению задач частотно–временного обеспечения сетей связи в их историческом развитии и в контексте смены и сосуществования основных транспортных технологий. Рассмотрены средства и методы, предлагаемые для передачи тактовой частоты и меток времени в современных пакетных сетях.

The evolution of problems of the frequency and time support of telecommunication networks in compliance with the change and coexistence of basic transport technologies are analyzed. The means and techniques proposed for the transmission of clock frequency and time stamps in up–to–date packet networks are considered.

1. ВВЕДЕНИЕ

История развития цифровых сетей связи тесно связана с решением задач синхронизации, то есть установления и поддержания необходимых временных соотношений протекания процессов во времени. При этом как сами задачи синхронизации, так и подходы к их решению изменяются и корректируются в зависимости от актуальных телекоммуникационных технологий [1,2,3]. Так, в последние годы с распространением новых стандартов мобильной связи и, в целом, переходом к услугам сетей следующего поколения NGN, а также с внедрением новейших промышленных технологий существенно вырос спрос на сигналы точного времени. Поэтому сегодня в литературе, посвященной синхронизации, все чаще можно встретить термин “временное и частотное обеспечение (ВЧО)”, под которым понимают комплекс средств и методов, направленных на решение задач формирования и переноса по сети точной частоты сигналов тактовой синхронизации (ТС) и сообщений точного времени (СТВ).

Изменения транспортных технологий и всей сетевой инфраструктуры в соответствии с концептуальными положениями NGN привели к тому, что задачи ЧВО все чаще возлагаются на транспортные технологии с пакетным режимом передачи [1,2,3,4]. При этом важно сохранить преемственность, используя в новых условиях богатый опыт создания и эксплуатации “классических” сетей тактовой синхронизации. Данная статья посвящена анализу основных задач ВЧО сетей связи в

[1] Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ

их историческом развитии. После краткого обзора основных этапов развития сетей синхронизации рассмотрены средства и методы, предлагаемые для передачи тактовой частоты и меток времени в современных пакетных сетях. На основании проведенного анализа сформулированы направления дальнейших исследований по созданию эффективной системы ЧВО современных сетей связи.

2. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ СЕТЕВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Развитие систем и сетей синхронизации тесно связано с развитием технологий передачи и коммутации. В осознании того значения, которое занимают процессы синхронизации в сетях связи и передаче информации, можно выделить несколько этапов.

Скрытый, латентный период, ограниченный использованием отдельных устройств. Для этого периода характерны задачи стабилизации частоты мощных радиостанций, генераторного оборудования аналоговых систем передачи с частотным разделением каналов (АСП с ЧРК), а также обеспечения условий когерентного приема радиостанций и принципов асинхронного, стартстопного приема в системах телеграфирования и низкоскоростной передачи данных. Точность несущих частот ограничивалась величинами порядка 10–5 ÷ 10–8, продиктованными требованиями к качеству передачи речи, допускающими сдвиг частот на концах передающего тракта до 2 Гц. Для сетевых структур этого периода характерна простая линейная схема с соединениями типа “точка–точка”. В то же время следует отметить, что именно в этот период проводились серьезные исследования синхронизации как “фундаментального явления природы” (см., например, [5, 6]).

Первый период становления сетевой синхронизации связан с этапом становления цифровых телекоммуникационных сетей (1976) и, в частности, систем передачи плезиохронной цифровой иерархии PDH (Рекомендации МККТТ[1] серии G.741÷G.752), и формирования цифровых сетей G.811[2]. Для этого периода характерно осознание необходимости системного, сетевого подхода. Завершением данного этапа можно считать 1984 – 1988 годы, когда окончательно сформировались требования к качественным показателям плезиохронных сетей (Реко-

---

[1] МККТТ (Международный консультативный комитет по телефонии и телеграфии) – старое название Международного союза электросвязи МСЭ-Т, использовавшееся до 1993 г.

[2] G.811(Женева, 1976) Плезиохронный режим работы международных цифровых сетей

мендации МККТТ G.822[1] и G.823[2], а также новая редакция G.811, появление новых Рекомендаций G.812, G.810) и появились первые требования к оборудованию синхронной цифровой иерархии – SDH (Рекомендации G.707 ÷ G.709).

Второй период, между 1988 и 1996 годами, можно охарактеризовать как время углубленного осознания роли сетей тактовой синхронизации (СТС) и исправления ошибок, допущенных при создании оборудования и сетей SDH. Сети от линейной топологии переходят к кольцевым структурам со свободной циркуляцией трафика, гибким резервированием на разных уровнях трактов. Появляются спутниковые радионавигационные системы (СРНС) GPS и ГЛОНАСС. Формируется концепция транспортных сетей и транспортных функций сетей доступа. Все эти факторы в той или иной мере оказали влияние на развитие СТС [2, 3].

Третий этап (1996 ÷ 2004) – самый плодотворный этап в развитии сетей поддержки телекоммуникационных сетей и, в частности, СТС. Международный союз электросвязи ITU–T создает исследовательский вопрос Q.18/13 (с 2000 – Q.13/15), в рамках которого ведутся интенсивные исследования вопросов синхронизации и разработка соответствующей нормативной базы. Внедряются глобальные системы сотовой связи GSM и SDH/SONET, конкурирующая транспортная технология ATM по своим показателям, в том числе в части синхронизации, находится в единой концепции с SDH. Появляются концепции полностью оптических сетей (All optical network) и оптической транспортной сети (OTN[3]). Широкое распространение получают СРНС GPS и ГЛОНАСС. В этих условиях к 2004 году был пересмотрен и упорядочен уже ставший “классическим” пакет рекомендаций G.810 ÷ G.812, G.823, а также ряд рекомендаций по оборудованию, сетям и слою синхронизации, включая OTN (например, G.813, G.803, G.781, G.783, I.732 и т.д.). Результаты данного этапа широко освещены в нормативных документах, научных и учебных изданиях.

Четвертый, настоящий этап развития СТС, продиктован широким внедрением в телекоммуникационные сети информационных технологий и методов, что требует поиска компромиссов между решениями “уходящих” технологий, обеспечивающих высокое качество пере-

---

[1] G.822 (11.1980, 10.1984) Частота контролируемых проскальзыванием в международных соединениях

[2] G.823 (10.1984) и CCITT Blue Book, Volume III - Fascicle III.5 (11,1988) Контроль джиттера и вандера в цифровых сетях, основанных на 2048 кбит/с

[3] OTN – Optical Transport Network

дачи, и “гибкими” недорогими принципами новых технологий NGN с качеством “как есть”. Для данного этапа характерно появление множества новых технологий как на транспортной сети (T–Ethernet, MPLS–TP, IP/MPLS), так и на участках оптического (FTTx, PON– A/E/G) и радио (RAN) доступа (4G, UMTS, WB DWDM LTE, WiMax), а также новых систем модуляции (например, OFDM) и цифровой обработки, широкополосных систем многоволновой оптической связи (H)DWDM или радиосвязи UWB – IR (импульсное радио). Естественно, столь серьезные изменения сетевой инфраструктуры не могли не повлиять на подходы к решению основных задач синхронизации; при этом сами задачи (как и уровень требований к синхронизации) во многом остались теми же [3, 4]. Кроме того, к традиционным функциям СТС добавились новые задачи определения местоположения и дальности, распределения времени и создания “общегосударственных шкал единого времени”. Ниже рассмотрены основные задачи ВЧО, возникшие при переходе к сетям NGN, и подходы к их решению.

3. ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ВЧО ПРИ ПЕРЕХОДЕ К NGN

Переходный период эволюции сетей в направлении NGN охарактеризовался бурным развитием пакетных технологий с асинхронным режимом передачи АРП (ATM, Frame Relay, Ethernet, IP/MPLS и т.д.), которые все больше вытесняют традиционные сети с синхронным режимом передачи СРП (PDH, SDH) [1, 2]. Пакетные сети изначально предназначались для передачи асинхронных данных. Современные концепции развития телекоммуникаций делают пакетные методы передачи и обработки информации основными, а в перспективе – единственными. Но это требует от пакетной сети обеспечения качества передачи (QoS) на уровне сетей предыдущего поколения с СРП, а именно, на уровне показателей SDH, справедливо признанной эталоном надёжности среди транспортных технологий. В частности, должны обеспечиваться высокая готовность соединений (так называемые “5 девяток” – 0,99999), низкая задержка, высокое качество тактовой и цикловой синхронизации, уровень ошибок по битам порядка 10–11 – 10–12, оперативность обнаружения неисправностей, удобство администрирования, резервирование с обеспечением перерыва связи менее 50 мс, что в совокупности формирует популярное сегодня понятие “уровня сетей операторского класса” [4]. Среди современных пакетных технологий наилучшие перспективы достижения уровня сетей операторского класса имеет технология IP/MPLS (и ее разновидность MPLS–TP (T–MPLS) в сочетании с Ethernet (на канальном уровне) и оптическими технологиями D(C)WDM (на физическом уровне).

Независимо от используемого сценария перехода к сетям NGN, определяющим фактором процесса замены технологий остается доведение основных качественных показателей транспортной сети нового поколения до уровня, способного обеспечить требуемое качество обслуживания. Это относится ко всем качественным показателям сети, многие из которых прямо или косвенно связаны с качеством ВЧО.

4. РЕЖИМ ЭМУЛЯЦИИ КАНАЛА (СЦЕНАРИЙ “СРП ЧЕРЕЗ АРП”)

Необходимость серьезной всесторонней проработки вопросов синхронизации пакетных сетей стала очевидной с распространением сценария взаимодействия “СРП через АРП”, предусматривающего режим эмуляции канала (CES[1)], т.е. имитации традиционных услуг с коммутацией каналов при прохождении нагрузки от систем с СРП через сеть с АРП [1, 2].

Первый опыт реализации таких сценариев показал, что при отсутствии четких требований к качеству синхронизации сетей с АРП обеспечить необходимое качество обслуживания очень сложно. Из–за отсутствия единой нормативной базы, стабильность сигнала в режиме “СРП через АРП” существенно отличалась при использовании оборудования АРП различных производителей [7]. Эту ситуацию иллюстрирует рис. 1. Черными линиями на нем показаны результаты измерения максимального отклонения временного интервала МОВИ на выходных рабочих интерфейсах E12 (2 Мбит/с) оборудования Ethernet двух различных производителей. Для сравнения цветными линиями показаны нормы на параметр МОВИ для интерфейсов различного класса: внизу располагается шаблон (или “маска”), соответствующая наивысшему качеству сигнала синхронизации QL1 – допустимый вандер на выходе PRC в соответствии с G.811 (Wander PRC out/G.811). Затем следует шаблон для интерфейсов синхронизации систем ПЦИ – допустимый вандер на выходе интерфейса синхронизации ПЦИ в соответствии с G.823 (Wander PDH Synch/G.823), а над ним – шаблон для рабочего интерфейса 2 Мбит/с – допустимый вандер на выходе рабочего интерфейса E1 (Wander E1 out/G.823).

[1] CES – Circuit Emulation Service

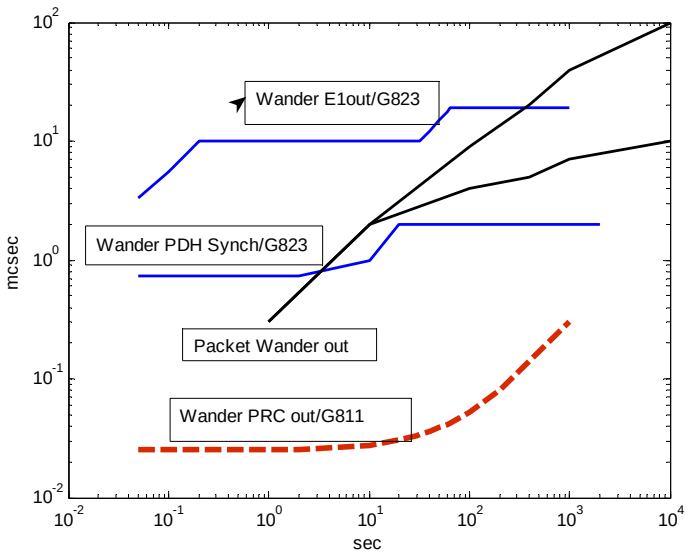

Рис. 1. Параметр МОВИ на выходном интерфейсе E12 для оборудования Ethernet двух моделей

Из рисунка видно, что для одной из двух рассматриваемых моделей оборудования Ethernet стабильность сигнала 2 Мбит/с не удовлетворяет даже наименее жестким требованиям Рекомендации МСЭ–Т G.823 к рабочим интерфейсам E12. Вторая аппаратура демонстрирует несколько лучшую стабильность, однако и в этом случае трудно говорить об использовании сигнала с такими параметрами в качестве источника синхронизации.

Ситуация осложнялась еще и тем, что нагрузка пакетных сетей носит нестабильный, “взрывной” характер. Поэтому рабочие характеристики (в частности, параметры фазовых искажений) при передаче нагрузки от систем с СРП в режиме эмуляции канала в значительной мере определяются интенсивностью “собственной” нагрузки пакетной сети.

Чтобы решить данные проблемы, в 2004 г. эксперты Исследовательской Комиссии 15 МСЭ–Т начали работу над новой рекомендацией, которая впоследствии вышла в свет под названием G.8261 “Аспекты синхронизации пакетных сетей” [8]. Сейчас G.8261 является базовым документом в данной области, и из нее уже вышли несколько специализированных рекомендаций, посвященных различным аспектам синхронизации пакетных сетей.

На первом этапе работы над рекомендацией G.8261 основной акцент делался именно на обеспечении синхронизации в режиме эмуляции канала. Осознание того, что при выходе пакетных технологий на магистральный уровень могут понадобиться более жесткие требования в части синхронизации, обусловило общую тенденцию к упорядочению норм на фазовые искажения (джиттер и вандер) на границах сетей с СРП и АРП. Однако практическая реализация этих требований вызвала ряд затруднений. Очевидно, что оптимальным вариантом является синхронизация элементов пакетной сети от специального оборудования, установленного на данном узле (например, от устройства синхронизации с приемником GPS). При отсутствии возможности прямого подключения к источнику синхронизации (что довольно часто встречается на практике) был рекомендован адаптивный метод восстановления тактовой частоты, который не всегда мог обеспечить требуемое качество восстановленного сигнала [9].

5. СИНХРОННЫЙ ETHERNET

Столкнувшись с перечисленными выше проблемами, представители крупных европейских телекоммуникационных операторов (в частности, British Telecom) инициировали разработку более надежного метода передачи тактовых сигналов в пакетной сети. Усилия экспертов МСЭ–Т были направлены на разработку простого и эффективного механизма транспортировки сигналов синхронизации в пакетных сетях, который обеспечил бы стабильность тактовых сигналов на уровне традиционных сетей с СРП (SDH) для тех приложений, где это необходимо. По показателям экономической эффективности (1:5, 1:10) в качестве транспортной среды для нового способа распределения синхросигналов был выбран Ethernet как наиболее распространенная на сегодняшний день пакетная транспортная технология физического и канального уровней. Так появилась технология синхронного Ethernet (сокращенно – SyncE).

В результате проведенной работы, подкрепленной экспериментальными исследованиями и разработкой необходимой элементной базы, на сегодняшний день SyncE) представляет достаточно хорошо отработанную и стандартизованную технологию. Описание принципов работы технологии синхронного Ethernet и технические требования к соответствующему оборудованию содержатся в рекомендациях МСЭ–Т G.8261 [8], G.8262 [10] и G.8264 [11]. Технология синхронного Ethernet унаследовала основные принципы сетевой синхронизации, успешно зарекомендовавшие себя в “классических” сетях SDH, что обеспечило преемственность в решении задач тактовой сетевой синхронизации, позволяя операторам максимально использовать существующие ре-

сурсы и многолетний опыт планирования сетей синхронизации в условиях перехода транспортной сети на пакетные технологии.

Параллельно с разработкой нормативной базы синхронного Ethernet многократно проверялось качество передачи ТС с применением данной технологии. Результаты исследований можно найти в приложениях к рекомендациям G.8261 и G.8262, а также в рабочих документах ИК–15 МСЭ–Т. Долговременная нестабильность (интервал наблюдения более 100 сек) при эмуляции тракта передачи сигнала синхронизации в потоке E12 не превышает 15 ppb и удовлетворяет Рекомендации МСЭ–Т G.823. Тракт передачи в различных экспериментах содержал от 10 до 18 коммутаторов, а степень загрузки тракта изменялась от 10 до 105 % (перегрузка). Учитывая, что скорость передачи пакетов в SyncE может достигать сотни и тысячи пакетов в секунду, имеется достаточный ресурс для сглаживания джиттера пакетов [4].

6. ДВУХСТОРОННИЕ ПРОТОКОЛЫ КАК СРЕДСТВО ПЕРЕДАЧИ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

В современных телекоммуникационных сетях, наряду с передачей тактовой частоты, все большую актуальность приобретают задачи доставки сигналов времени к потребителю с необходимой точностью. В связи с этим возник целый комплекс задач согласования шкал времени по специальным меткам – сообщениям точного времени (СТВ), передаваемым в пакетной транспортной среде. Особый интерес представляет исследование возможностей подстройки тактовой частоты генераторного оборудования по сигналам времени. Технология синхронного Ethernet, при всех своих достоинствах, не предусматривает передачу времени, ограничиваясь лишь “классической” передачей тактовой частоты. Поэтому под задачи временной (или, как ее еще называют, фазовой) синхронизации необходимо было разработать другие методы. С учетом специфики работы пакетных сетей, в качестве такого метода было решено использовать двухсторонние сетевые протоколы – NTP[1] и PTP[2]. В последние годы особую популярность приобрел обеспечивающий более высокую точность протокол PTP (стандарт IEEE 1588), вторая версия которого (IEEE 1588v2, 2008 г.) в большей мере адаптирована под задачи телекоммуникационных сетей.

МСЭ–Т уже несколько лет проводит активную исследовательскую работу по стандартизации протокола PTP в качестве метода передачи времени и частоты в пакетных сетях. В дискуссиях принимают участие

[1] NTP – Network Time Protocol
[2] PTP – Precision Time Protocol

как представители операторов, так и разработчики оборудования и элементной базы.

В настоящее время в разработке находится сценарий “частотной синхронизации пакетным методом”, который предусматривает подстройку тактовых сигналов по меткам времени, передаваемым в пакетной сети с помощью двухстороннего сетевого протокола (в общем случае это может быть NTP или PTP, но на практике чаще всего речь идет о PTP). Архитектура такой сети синхронизации в общем виде описана в Рекомендации МСЭ–Т G.8265/Y.1364 [12]. Первая версия данного документа, принятая в 2010 г., пока определяет один вариант работы, когда по протоколу взаимодействуют только конечные пункты сети – ведущее и ведомое устройства. Более сложные варианты взаимодействия с участием промежуточных элементов пока находятся в стадии изучения.

Что касается непосредственно протокола PTP, то стандарт IEEE 1588 v2 содержит перечень возможных вариантов применения данного протокола для решения тех или иных задач (работа поверх Ethernet или IP/UDP[1], рассылка сообщений по конкретным узлам сети или в режиме трансляции и т.п.). Под каждое конкретное приложение составляется свой перечень установок – так называемый “профиль” [9]. Поэтому МСЭ–Т необходимо было разработать специальный “телеком–профиль” протокола PTP, максимально адаптированный для частотной синхронизации пакетных сетей. В общем случае таких профилей может быть несколько (так же, как и вариантов сетевой архитектуры). На данный момент разработан один “телеком–профиль” протокола PTP (Рекомендация G.8265.1/Y.1364.1 [13], соответствующий простейшему варианту архитектуры сети, описанному в G.8265/Y.1364. В перспективе предполагается разработка других профилей, соответствующих различным вариантам структуры сети.

7. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАБОТЫ

При практическом внедрении новых методов синхронизации в сетях NGN возникает проблема обеспечения необходимых качественных показателей (точности, стабильности, задержек пакетов и т.д.). Количественные оценки некоторых из этих показателей можно найти, например, в [4]. Чтобы объективно оценить качественные показатели современных систем ВЧО, необходимо точно понимать связь между показателями синхронизации сетей различного уровня, например, фи-

[1] UDP – User Data Protocol

зического, канального или более высоких уровней (в терминологии модели взаимодействия открытых систем ВОС).

На данном этапе актуальной задачей является исследование взаимосвязи между точностью подстройки шкал времени и точностью генераторов тактовой частоты, в частности, для упомянутого выше случая подстройки частоты ТС по СТВ. При этом исследуемая модель должна учитывать условия (качественные показатели) передачи синхроинформации (ТС и СТВ) в обоих направлениях и принципы регулирования на узлах.

Подход МСЭ–Т основан на том, что с точки зрения качественных показателей сети сценарий подстройки ТС по СТВ с помощью двухстороннего протокола (например, PTP) аналогичен сценарию эмуляции канала с адаптивным восстановлением тактовой частоты [9]. Исследования ведутся в следующих направлениях:

– разработка модели генераторного оборудования пакетной сети PEC[1] (по аналогии с генераторным оборудованием SDH и синхронного Ethernet) и определение требований к параметрам такого оборудования;

– определение сетевых требований к величине задержки пакетов через параметр PDV[2] и отработка методов измерения этого параметра.

Особое внимание следует уделить качеству работы двухсторонних протоколов. Экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что качество работы схемы подстройки частоты ТС по СТВ с применением протокола PTP сильно зависит от состояния передающего тракта и, в частности, от его загрузки [14]. Положительные результаты подстройки по протоколу PTP достигались, как правило, если тракт поддерживал хорошие показатели ТС на физическом уровне. Следует учитывать также тот факт, что двухсторонние протоколы сильно зависят от асимметрии тракта передачи. В основу протоколов PTP и NTP положено предположение о равенстве времени распространения СТВ в прямом и обратном направлениях. Однако на практике (особенно в сложных сетях большой протяженности) это условие не выполняется. Поэтому особое внимание следует уделять выбору оптимальных алгоритмов оценивания и компенсации задержек, возникающих при передаче СТВ по реальным трактам телекоммуникационных сетей.

Учитывая возрастающую актуальность вопросов распределения сигналов точного времени, в будущем планируется разработать отдельную серию Рекомендаций МСЭ–Т (G.827x), посвященную различным аспектам передачи точного времени в пакетных сетях, по анало-

---

[1] PEC – Packet-based Equipment Clock

[2] PDV – Packet Delay Variation

гии с серией G.826x, ориентированной на передачу частоты. На рис. 2 приведена структура нормативной базы МСЭ–Т по синхронизации пакетных сетей, где показаны как действующие, так и планируемые документы.

В последнее время все чаще высказывается мнение о том, что ни один из существующих методов не в состоянии обеспечить одновременную передачу частоты и времени с приемлемыми качественными показателями, и, следовательно, нужно искать оптимальную комбинацию различных методов [9]. Поэтому в настоящее время активно отрабатывается комбинированный сценарий, предусматривающий совместное использование синхронного Ethernet для передачи тактовой частоты и какого–либо протокола более высокого уровня для передачи точного времени. Одним из возможных вариантов такого протокола, используемого совместно с синхронным Ethernet, является PTP, хотя качество его работы в реальных телекоммуникационных сетях еще не нашло достаточного экспериментального подтверждения.

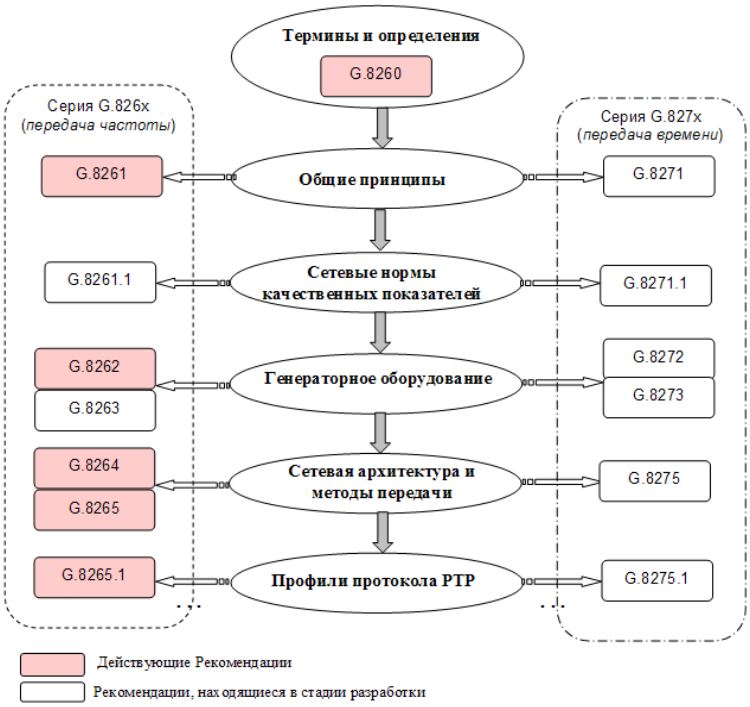

Рис. 2. Структура нормативной базы МСЭ–Т по синхронизации пакетных сетей

7. ВЫВОДЫ

Изменения транспортных технологий в соответствии с концептуальными положениями NGN приводят к появлению новых требований и принципов временного и частотного обеспечения (ВЧО) телекоммуникационных сетей и приложений.

На сегодняшний день можно с уверенностью сказать, что сети синхронизации успешно адаптируются к новым условиям работы в пакетном окружении. Среди основных результатов и перспективных направлений развития систем ВЧО можно выделить следующее.

На данный момент полностью отработана и стандартизирована технология синхронного Ethernet, обеспечивающая простое и эффективное взаимодействие новых пакетных сетей с традиционными сетями синхронизации, опирающимися на инфраструктуру SDH.

Достигнут значительный прогресс в адаптации протокола PTP (IEEE1588v2) для работы в телекоммуникационных сетях. Соответствующие наработки стандартизированы в форме “телеком–профиля” протокола PTP, ориентированного на передачу частоты. С другой стороны, актуальными остаются вопросы обеспечения необходимых качественных показателей пакетных методов передачи частоты и времени.

Учитывая возрастающую актуальность вопросов распределения сигналов точного времени, планируется разработать серию Рекомендаций МСЭ–Т (G.827x), посвященную различным аспектам передачи точного времени в пакетных сетях, по аналогии с серией G.826x, ориентированной на передачу частоты.

На современном этапе требуется поиск оптимальных или рациональных решений по частотно–временному обеспечению телекоммуникационных и информационных сетей, многочисленных промышленных, научных, военных приложений в условиях многокритериального оценивания. Для эффективного решения этих задач необходимо точное понимание связи между показателями синхронизации сетей различного уровня (например, физического, канального или более высоких уровней модели ВОС). Следует искать оптимальные сочетания методов передачи тактовой частоты и сигналов времени, способные к эффективной работе в условиях реальной эксплуатации.

1. Синхронізація стиків асинхронних мереж / Бірюков М.Л., Тан К.В., Тріска Н.Р. // “Зв’язок” – 2005, № 3 – С. 13–17. 2. Бирюков Н.Л., Триска Н.Р. Синхронизация сетей связи с синхронным и асинхронным режимами передачи: опыт и проблемы // Электросвязь. – 2007, № 10. – С. 34–37. 3. Актуальные задачи синхронизации в сетях операторского класса / Бирюков Н.Л., Макурин Н.А., Триска Н.Р. // “Наукові записки

УНДІЗ", 2009, № 2 (10) – С. 53–59. 4. Синхронизация транспортных технологий при переходе к NGN / Бирюков Н.Л. // Электросвязь. – 2009, № 9. – С. 30–35. 5. Пиковский А., Розенблюм., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. – М.:Техносфера, 2003. – 496 с. 6. Блехман И.И. Синхронизация в науке и технике. – М.: Наука, 1981.–352 с. 7. COM 15–D280–E (WP3/15) Typical Noise Transfer CES Type Services / Mike Gilson. – May 2005. 8. ITUT Recommendation G.8261/Y.1361(04/2008) Timing and synchronization aspects in packet networks. 9. J.–L. Ferrant, S. Ruffini Evolution of the standards for Packet Network Synchronization. – IEEE Communication Magazine, February 2011, pp. 10. ITU–T Recommendation G.8262/Y.1362 (08/07) Timing characteristics of synchronous Ethernet equipment slave clock (EEC). 11. ITU–T Recommendation G.8264/Y.1364 (10/08) Distribution of timing through packet networks. 12. ITU–T Recommendation G.8265/Y.1364 (10/2010) Architecture and requirements for packet based frequency delivery. 13. ITU–T Recommendation G.8265.1/Y.1364.1 (10/2010) Precision time protocol telecom profile for frequency synchronization. 14. Анализ использования двухстороннего протокола для подстройки сигналов тактовой синхронизации по сигналам времени // Бирюков Н.Л., Макурин Н.А., Триска Н.Р. – "Наукові записки УНДІЗ", № 4(16), 2010 – с. 5 – 11.