

Рис. 4. Графіки залежності значень показателя МТІЕ від інтервалу спостереження для трас 1 і 2 (соответственно линии 1 и 2) на фоне шаблона 3, соответствующего техническим требованиям TS 125 402

Поскольку средняя нагрузка в 20% характерна для сети с коммутацией каналов, но свидетельствует о низкой эффективности использования сети с коммутацией пакетов, то для оценки зависимости качества синхронизации от загрузки элементов сети Ethernet была разработана специальная схема измерений (рис. 5). Основой этого эксперимента служит тестовый сигнал анализатора сетей передачи данных N2X, моделирующего односторонний трафик с заданными параметрами через последовательно соединенные элементы сети Cisco Catalyst 3750. Образованный таким образом тракт передачи данных с изменяемыми параметрами служил для передачи сообщений РТР от сервера к клиенту с оценкой качества восстановления тактовой частоты UTC. В соответствии с требованиями нормативных документов для измерения стабильности частоты был использован внешний опорный сигнал 5 МГц от цезиевого стандарта частоты в составе PRC.

Были предусмотрены такие варианты (режимы) измерений (см. рис. 5):

1-й вариант — в положении 1 переключателя порт выделенного клиента подсоединен кабелем прямо к порту сервера РТР («короткое замыкание»);

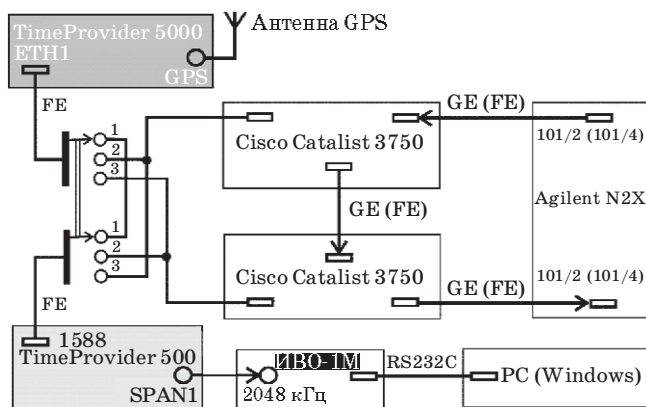


Рис. 5. Схема оценки качества синхронизации от загрузки тракта передачи

2-й вариант — в положении 2 переключателя через загруженный на 98% канал GE между элементами сети передавали непрерывный поток циклов Ethernet со скоростью передачи 125512 циклов в секунду (~960 Мбит/с) и скоростью приема 125500 циклов в секунду, т. е. частота пропадания циклов GE достигала  $9 \cdot 10^{-5}$  — другими словами, выбранный режим моделирования оказался близким к пределу технических возможностей элементов сети;

3-й вариант — в положении 2 переключателя через канал GE между элементами сети передавали прерывистый поток циклов Ethernet со средней загрузкой 80% и плотностью передачи пакетов 98,8% в активной фазе, состоящей из 10000 циклов, и продолжительностью цикла около 8000 нс;

4-й вариант — в положении 2 переключателя через загруженный на 99% канал FE между элементами сети передавали непрерывный поток циклов Ethernet со скоростью передачи 147320 циклов в секунду (~75,43 Мбит/с) и скоростью приема 141800 циклов в секунду (~72,65 Мбит/с), т. е. частота пропадания циклов GE достигала  $4 \cdot 10^{-2}$ ;

5-й вариант — в положении 3 переключателя при тех же условиях в канале FE между элементами сети направление передачи сообщений РТР было изменено на обратное для того, чтобы оценить влияние одностороннего трафика.

Семейство характеристик восстановления тактовой частоты в перечисленных вариантах (режимах) измерений приведено на рис. 6. Следует отметить заметное улучшение качества восстановления частоты в условиях прерывистого трафика (кривая 3) по сравнению с непрерывным (кривая 2), что объясняется уменьшением средней загрузки тракта передачи. Предсказуемым также можно считать некоторое улучшение характеристики при изменении направления потока сообщений РТР от совпадающего (кривая 4) с направлением тестового потока к противоположному (кривая 5), так как интенсивность передачи сообщений от сервера РТР

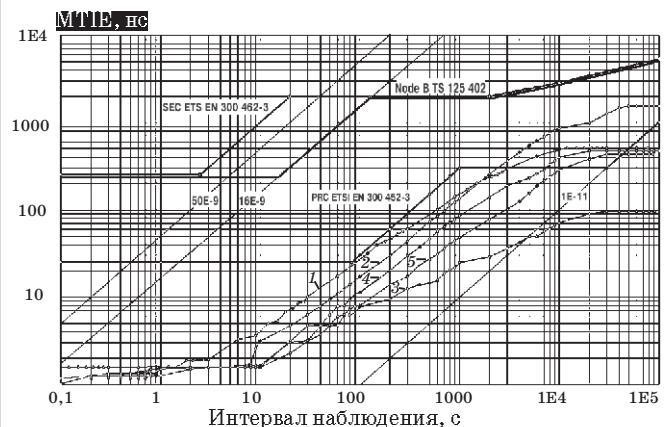


Рис. 6. Графики, характеризующие качество восстановления частоты в пяти режимах измерения, предусмотренных рис. 5, — соответственно кривые 1–5

к клиенту приблизительно в три раза больше интенсивности обратной передачи.

Тем не менее нельзя сказать, что и в этом случае имеет место явно выраженная зависимость результатов измерений от выбранных вариантов. Так, характеристика «короткого замыкания» оказалась практически хуже всех. Это означает, что разброс характеристик на рис. 6 обусловлен в большей степени случайными шумами измерений, чем детерминированными условиями выбранных вариантов. При этом по-прежнему все характеристики с большим запасом удовлетворяют техническим требованиям TS 125 402. Можно заключить, что наблюдается пороговый эффект: качество восстановления тактовой частоты не зависит от изменения загрузки реальной сети в широких пределах, и отказ возникает при некоторой предельной нагрузке, когда остаток производительности тракта оказывается меньше интенсивности обмена сообщениями между сервером и клиентом РТР.

С целью определения этого порога для выработки практических рекомендаций относительно развертывания сети тактовой синхронизации на основе РТР на сети одного из операторов мобильной связи был выбран специфический тракт передачи (рис. 7), по которому передают служебную информацию от системы управления РРЛ в центр технического обслуживания, расположенный в том же станционном помещении, где установлен сервер. Тракт состоит из последовательно соединенных четырех элементов сети NE Ethernet, преобразователя FMX потока Ethernet в сигнал E1, девяти элементов сети SDH, а также обратного преобразователя QMX7 сигнала E1 в поток Ethernet (ему в данном случае отводится 64 кбит/с), который через канал служебной связи радиорелейной линии РРЛ STM1 доступен порту клиента. «Узкое место» с максимальной производительностью 64 кбит/с, да еще загруженное служебной информацией, вызвало напряженный режим работы системы восстановления частоты. После вхождения в синхронизм система частотной автоподстройки (ЧАП) клиента работала в граничном режиме: поочередно переходила из состояния слежения (на интервале от 22 до 31 мин) в состояние аварии (на период около

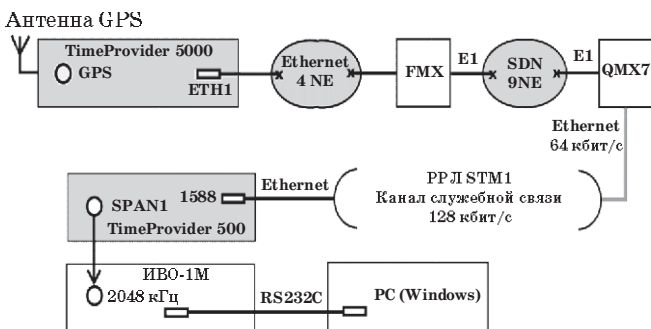


Рис. 7. Схема измерений для определения пороговой нагрузки тракта передачи

5 мин) и обратно по критерию высокой частоты пропадания пакетов РТР.

Результаты, полученные в схеме измерений, изображенной на рис. 7, приведены на рис. 8 (характеристика 1). Эта характеристика представляет интерес при ее сопоставлении с характеристикой режима свободных колебаний 2 собственного кварцевого генератора клиента с характеристикой режима удержания частоты, в котором по техническим условиям [10] уход фазы составляет 20 мкс в сутки (линия  $2,3 \cdot 10^{-10}$ ) при условии, что клиент до этого отработал в режиме слежения не менее 24 ч, а его питание не выключалось в течение 5 сут. Здесь же приведена реальная характеристика 3 удержания частоты, измеренная при указанных условиях. Очевидно, что хотя характеристика 1 существенно хуже характеристик, представленных ранее, и пересекает шаблон допустимых блужданий фазы для SEC на интервале наблюдения около 700 с, она все же удовлетворяет требованию к допустимой неопределенности тактовой частоты на входе базовой станции  $16 \cdot 10^{-9}$ . Другими словами, она не имеет ничего общего с характеристикой 2 и является результатом подстройки частоты, когда ЧАП балансирует между состоянием слежения и состоянием аварии. Интересно отметить, что ее поведение в таком напряженном режиме не удовлетворяет техническим условиям на удержание частоты, так как при измерениях не были выполнены условия предварительной работы в режиме слежения не менее 24 ч при не выключенном питании в течение 5 сут. Однако уже в суточном сеансе измерений очевидна тенденция изменения долговременной стабильности характеристики 1 в лучшую сторону, причем следует ожидать, что на интервале наблюдения в несколько суток она будет отслеживать частоту UTC (т. е. пересечет линию  $1 \cdot 10^{-11}$ ).

На основании анализа журналов событий системы управления клиента можно заключить, что переход системы ЧАП из состояния слежения в состояние аварии происходит тогда, когда частота пропадания пакетов приближается к 50% в резуль-

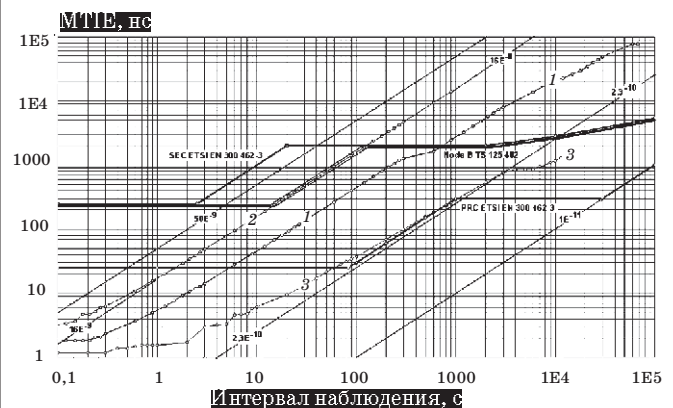


Рис. 8. Семейство характеристик для сравнительной оценки качества восстановления тактовой частоты

рате того, що доступна системі клієнт — сервер середня продуктивність мережі Ethernet становить менше допустимого пределу, значення якого залежить від заданої інтенсивності обміну повідомленнями РТР між сервером і клієнтом — (табл. 2.)

Таблиця 2

Мінімальне значення продуктивності мережі Ethernet, доступної системі клієнт-сервер, кбіт/с

Швидкість передачі, пакетів	Від сервера до клієнта	Від клієнта до сервера
32	25,6	11,3
64	56,2	22,6
128	112,4	46,2

Важко відзначити, що в ході досліджень не зафіксовано суттєвого покращення якості відновлення тактової частоти при збільшенні інтенсивності обміну повідомленнями РТР між сервером і клієнтом.

Представлені результати в значительній ступені збігаються з даними, які відомі з інших публікацій. Так, при моделюванні інтенсивності навантаження в межах до 70% і різких її змін в експериментах на мережі Vodafone отримані результати [14], близькі до отриманих з рис. 4.

\* \* \*

При дослідженні відновлення тактової частоти в мережах з комутацією пакетів приходимо до наступних висновків:

1. Спосіб відновлення тактової частоти на основі РТР стандарту IEEE 1588v2 в даний час переважає два інших відомих способи (NTP і «синхронний Ethernet») за готовності до впровадження в сучасних і перспективних мережах з комутацією пакетів при мінімальних змінах в наявному обладданні.

2. Результати відновлення тактової частоти за протоколом РТР стандарту IEEE 1588v2 показали, що стабільність відновленої частоти з великим запасом відповідає технічним вимогам TS 125 402.

3. В ході досліджень відзначено відсутність прямої залежності якості відновлення частоти від інтенсивності обміну повідомленнями РТР між сервером і відокремленим клієнтом. Більше того, характеристики в широких межах слабо залежать від кількості переприємів і помітно погіршуються тоді, коли доступна системі РТР продуктивність мережі становить менше порогової. Тоді система ЧАП клієнта починає балансувати між станом стеження і станом аварії. Але навіть в цьому випадку довготривала (на інтервалі сутки і більше) стабільність відновленої частоти задовольняє вимогам TS 125 402.

4. Значення порогової залежить від інтенсивності обміну повідомленнями РТР між сервером і клієнтом і становить близько 25 кбіт/с при мінімальній інтенсивності 32 пакетів/с обміну повідомленнями Sync, Delay\_Resp і Delay\_Req.

5. Слід очікувати широкого застосування РТР в перевалочних мережах мобільного зв'язку (Mobile Backhaul) з комутацією пакетів, так як при величезній різноманітності обладнання (2G/GSM, 2G/CDMA, 3G/UMTS, 3G/EVDO, HSDPA, WiMAX і LTE), що працює в одночасній експлуатації, РТР дозволяє успішно збільшувати продуктивність мережі з мінімальними витратами без сильної залежності від постачальників. Оскільки за результатами досліджень не виявлено залежності якості відновлення частоти від інтенсивності обміну повідомленнями між сервером і клієнтом, слід працювати зі швидкістю передачі 32 пакетів/с. Застосовувати більш високі швидкості передачі, передбачені стандартом, в умовах дефіциту продуктивності мережі нецелесообразно.

#### Література

1. Wells J. *Wireless Backhaul Trends: the Future Role of Wireless Fiber Optics and Copper Wire* / Wells J. // *AJIS LLC Wireless Technology Consulting*.— 2008.
2. Ruffini S. *WCDMA and LTE Synchronization Aspects* / Ruffini S. // *The 6th International Telecom Sync Forum, Munich, ITSF*.— 2008.
3. *ITU-T Recommendation G.8261/Y.1361. Timing and Synchronization aspects in packet networks (05/2006)*.
4. *Technical Specification MEF 22: Mobile Backhaul Implementation Agreement. Phase 1 (01/2009)*.
5. Mills D. L. *Computer Network Time Synchronization: the Network Time Protocol* / Mills D. L.— CRC Press.— 2006.— 304 p.
6. Eidson J. C. *Measurement, Control and Communication Using IEEE 1588* / Eidson J. C.— Springer-Verlag New York, Inc.— 2006.— 283 p.
7. Одуан К. *Измерение времени. Основы GPS* / К. Одуан, Б. Гино.— М.: Техносфера.— 2002.
8. Савчук А. *Исследование систем синхронизации времени по протоколу NTP* / А. Савчук, В. Шапошников // *Зв'язок*.— 2010.— № 1.— С. 1–5.
9. *TimeProvider 5000. IEEE 1588-2008 (PTP) Grandmaster Clock: User's Guide Revision C.— October 2009 Part Number 098-00028-000*.
10. *TimeProvider 500. IEEE 1588-2008 (PTP) Translator: User's Guide Revision B — March 2009 Part Number 098-00078-000*.
11. Леготин Н. Н. *Измерения фазовых блужданий* / Н. Н. Леготин // *Техника связи*.— 2006.— № 1.— С. 56–63.
12. M. Gasparroni. *IEEE 1588v2 based solutions for VF Backhaul Networks* / M. Gasparroni, P. Correa // *The 6th International Telecom Sync Forum, Munich, ITSF*.— 2008.