

Если выполняется условие непрерывности или хотя бы конечного числа точек разрыва априорной плотности  $w(\Delta\tau_m)$  ошибка  $\varepsilon$  при неограниченном увеличении числа членов ряда (17) стремится к нулю.

**Выводы.** В данной работе получены выражения для асимптотических оценок статистических характеристик процессов обработки запросов в системах хранения данных. Эти выражения проще аналогичных выражений, полученных ранее в [6, 7]. Рассмотрен один из видов опроса – циклический. При практическом применении полученных результатов для других видов поллинга (случайный, приоритетный, табличный опрос) необходимо уточнять параметры априорных распределений: среднее время ожидания в очереди, время обработки запросов, время перехода от одного элемента хранения к следующему.

### **Литература**

1. Вишневецкий В.М. Системы поллинга: теория и применение в широкополосных беспроводных сетях / В.М. Вишневецкий, О.В. Семенова. – М.: Техносфера, 2007. – 312 с.
2. Borovkov A., Schassberger R. Ergodicity of a polling network // Stoch. Proc. Appl., 1994. – V.50. – PP. 253-262.
3. Фосс С. Г. Теоремы сравнения и эргодические свойства систем поллинга / С.Г. Фосс, Н.И. Чернова // Проблемы передачи информации. – 1996. – Т.32, Вып. 4. – С. 46-71.
4. Гнеденко Б.В. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
5. Evans M., Hastings N., Peacock B. Statistical distributions / – [2-nd ed.]. – John Wiley & Sons, Inc., 1993. – 170 PP.
6. Winands E.M.M., Adan I.J.B.F., van Houtum G.J. Mean value analysis for polling systems // Queueing Systems. – 2006. – V.54. – PP. 45-54.
7. Boon M.A.A., van der Mei R.D., Winands E.M.M. Applications of polling systems // Surveys in Operations Research and Management Science. Amsterdam: – Elsevier Science Publishers B. V., The Netherlands. – July 2011. – Vol. 16, Nr. 2. – PP. 67-82.

УДК 621.373-187.4; 621.39.072.9

**Вакась В. И.,** к.т.н.; (АО "Киевстар")

**Федорова Н. В.,** к.т.н. (Гос. университет информационно-коммуникационных технологий)

### **МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ ОТ РАЗНЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ СЕТИ С КОММУТАЦИЕЙ ПАКЕТОВ**

**Вакась В.И., Федорова Н.В. Методи забезпечення синхронізацією базових станцій від різних ієрархічних рівнів мережі з комутацією пакетів.** Представлено комбіноване використання декількох методів синхронізації на різних ієрархічних рівнях мережі з комутацією пакетів: основної мережі (ядра), агрегації та доступу. Наведено результати експериментальних досліджень.

**Ключові слова:** МОБІЛЬНИЙ ЗВ'ЯЗОК, СИНХРОНІЗАЦІЯ, БАЗОВА СТАНЦІЯ, NTP, RTP

**Вакась В.И., Федорова Н.В. Методы обеспечения синхронизацией базовых станций от разных иерархических уровней сети с коммутацией пакетов.** Представлено комбинированное использование нескольких методов обеспечения синхронизации на разных иерархических уровнях сети с коммутацией пакетов: основной сети (ядра), агрегации и доступа. Приведены результаты экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** МОБИЛЬНАЯ СВЯЗЬ, СИНХРОНИЗАЦИЯ, БАЗОВАЯ СТАНЦИЯ, NTP, RTP

**Vakas V.I., Fedorova N.V. Methods providing synchronization the base stations at the different hierarchical levels of a network with packet communication.** Shows the combined use of methods for providing the synchronization at the different hierarchical levels of a network with packet commutation: basic network (core), aggregating and access. The results of experimental research are shown.

**Keywords:** MOBILE COMMUNICATION, SYNCHRONIZATION, BASE STATION, NTP, RTP

**Введение.** По прогнозам число абонентов в мировой мобильной связи увеличится до 5,2 миллиардов в 2012 году. В результате персоналу эксплуатации придется увеличить суммарную производительность одной соты в 2012 году до 2...16 потоков E1 плюс Ethernet 20...30 Мбит/с, в то время как, например, в 2006 году было достаточно 2...8 потоков E1. Другими словами, операторам мобильной связи придется увеличить производительность сети в 2...10 раз, когда при почти не увеличивающемся среднем доходе на абонента (ARPU) нагрузка будет увеличиваться экспоненциально. Кроме того, необходимо будет поддерживать большое разнообразие действующей техники: 2G/GSM, 2G/CDMA, 3G/UMTS, 3G/EVDO, HSDPA, WiMAX и LTE. Мало кто сомневается в том, что в конце концов на сети будет внедрена исключительно транспортная среда с коммутацией пакетов на основе Ethernet и IP, в которой невозможно передавать тактовую синхронизацию на физическом уровне. Вопросы синхронизации транспортных IP-сетей и подключенных по ним базовых станций (БС) мобильной связи становятся необходимым условием обеспечения покрытия и качества предоставляемых услуг.

На сегодняшний день на рынке телекоммуникаций достаточно новых эффективных методов для обеспечения синхронизации в сетях IP/MPLS: протоколы сличения времени NTP (Network Time Protocol) [1] и PTP (Precision Time Protocol) [2], а также технология Sync-E (Synchronous Ethernet) [3]. Каждый из вариантов синхронизации пакетной сети имеет как достоинства, так и недостатки. Поэтому целесообразным является рассмотрение комбинированного использования данных вариантов синхронизации сети с коммутацией пакетов на разных иерархических уровнях: основной сети (ядра), агрегации и доступа.

**Методы синхронизации.** При выборе того или иного метода обеспечения синхронизации важно понимать их возможности и ограничения, а именно:

- функционирующий на физическом уровне механизм Sync-E не зависит от загрузки сети и позволяет передавать сигнал синхронизации через транзитные устройства, но обеспечивает только частотную синхронизацию. Кроме того, переход на технологию Sync-E предусматривает полную замену оборудования IP/MPLS-сети или его существенное обновление (заметим также, что не завершен процесс стандартизации данной технологии);
- работающий на уровне канала передачи данных протокол PTP обеспечивает как частотную, так и временную синхронизацию, но стабильность распространяемого сигнала зависит от загрузки сети, а также от расстояния между узлами и количества переприемов;
- работающий на прикладном уровне протокол NTP широко используется, как правило, для временной синхронизации в пакетных сетях. Но в ряде решений различных производителей оборудования, протокол NTP может быть использован также и для частотной синхронизации. Например, для синхронизации БС мобильной связи.

Детально принципы синхронизации в пакетных сетях и отличия в работе протоколов сличения времени были представлены в публикациях [4...6]. Сейчас мы сравним наиболее интересные аспекты развития протоколов NTP и PTP.

В соответствии с локальной природой сличения времени, измерить можно только «собственное время данных часов» в непосредственной близости от экспериментатора. Однако постановка задачи дистанционного сличения времени часов, встроенных в узлы коммутации, которые подключены по IP-сети, связана именно с плохо контролируруемыми источниками возмущений – вариациями задержки передачи и сетевым джиттером, очередями в маршрутизаторах, перегрузки трактов и непредсказуемого числа переприемов. Для преодоления трудностей, вызванных этими «издержками производства» IP-сети создан набор «смягчающих» алгоритмов NTP [1]. В результате почти 30-летней эволюции удалось достичь точности дистанционного сличения времени до 10...100 миллисекунд в глобальной сети и до 1...20 миллисекунд в корпоративных сетях. Достаточно дорогой ценой можно достичь точности сличения времени по протоколу NTP до 1...25 микросекунд, но только в локальной сети производственного предприятия.

С другой стороны для таких сетей разработан новый способ сличения времени с точностью 20...100 нс под названием «протокол прецизионного времени» – PTP. Он

появился в виде стандарта IEEE 1588 на этапе внедрения техники Ethernet в контрольно-измерительные системы с возможностью обобщения и на другие сети с многоадресной (multicast) рассылкой сообщений. NTP и RTP становятся в каком-то смысле конкурентными способами сличения времени в IP-сетях [2, 4]. В общем виде это показано на рис. 1.

В IP-сети по алгоритмам маршрутизации могут быть выбраны разнообразные тракты передачи. В результате из-за значительных вариаций задержек передачи качество обслуживания синхронизации по традиционному, протоколу NTP не гарантированное, а “по возможности наилучшее” (“best effort”). В традиционных сетях электросвязи в отличие от “best effort” принято обеспечивать “магистральное” качество обслуживания, при котором эксплуатационная готовность всех основных составных частей инфраструктуры оператора составляет не менее 99,999%. С другой стороны, высокое качество сличения времени на основе RTP в локальных сетях существенно ухудшается при попытках применения его, например, в городской сети общего пользования (чего можно избежать при использовании внешней опорной частоты от спутниковых радионавигационных систем – GPS/ГЛОНАСС). Это послужило стимулом для разработки RTP в виде IEEE 1588 v.2. На основе сопоставления двух наиболее развитых протоколов сличения времени – NTP и RTP – рассмотрим проблемы сличения времени и подстройки частоты в сетях с коммутацией пакетов.

В отличие от NTP, когда серверы часто работают как клиенты, а клиенты могут работать как серверы в режиме равноправного обмена, сеть RTP строго иерархична [2, 4]. На вершине иерархии синхронизации располагают грессмейстерские часы (grandmaster clock). Обычно их подключают к внешнему источнику UTC (Universal Time Coordinated), как правило, к приемнику GPS (ГЛОНАСС).

RTP служит альтернативой NTP в существующих сетях Ethernet как средство достижения повышенной точности благодаря аппаратным средствам проставления меток времени, встроенным в маршрутизаторы и коммутаторы. Маршрутизатор (router) – это источник флуктуаций задержки передачи между ведущими и ведомыми часами, которые достигают  $N \times 10^{-3}$  с. Ясно, что при таких флуктуациях достичь точности сличения времени менее  $10^{-6}$  с невозможно. Коммутатор (switch) – это элемент сети, который вносит флуктуации задержки передачи между ведущими и ведомыми часами порядка  $N \times 10^{-6}$  с, что также не позволяет преодолеть “барьер” точности сличения времени в  $10^{-6}$  с. Для того, чтобы избавить сообщения RTP от задержек, свойственных коммутатору, предусмотрен прозрачный переход (transparency). Он не подпадает под определение ведущих или ведомых часов и служит альтернативой граничным часам в пределах подсети как функция коммутатора, особенно в случае большого числа последовательно соединенных коммутаторов. Граничные часы (boundary clock) предназначены для того, чтобы исключить большие флуктуации задержек передачи, свойственные маршрутизаторам, и работают как “передаточный стандарт времени” на границе между подсетями. Конструктивно они встроены в маршрутизатор как многопортовое устройство, причем один порт ведомый грессмейстерскими часами, а все остальные – ведущие для ординарных часов. Как свидетельствуют результаты экспериментов, граничные часы способны обеспечить сквозное сличение времени с точностью, эквивалентной точности, достижимой в пределах подсети. Ординарные часы, как правило, ведомые и встроены в прикладные функции, которые представлены либо датчиками, либо исполнительными механизмами.

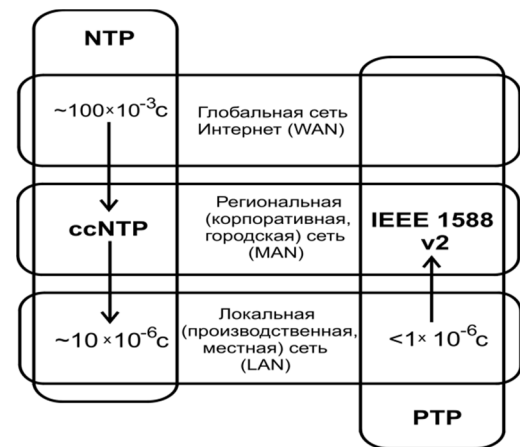


Рис. 1. Эволюция протоколов временной синхронизации в параметрах точности

В настоящее время сети операторов связи национального уровня находятся в стадии внедрения синхронизации на пакетных сетях. Особенно важным моментом в этом процессе является вопрос синхронизации базовых станций мобильной связи [5, 6].

**Результаты измерений для различных методов синхронизации.** На сети оператора связи АО «Киевстар» были реализованы пилотные проекты с применением различных вариантов синхронизации БС от пакетной сети. Рассмотрим возможность комбинированного применения методов обеспечения синхронизацией БС по Sync-E, а также с привлечением протоколов NTP и RTP на структуре сети с коммутацией пакетов: основной сети (ядра), агрегации и доступа. На уровне основной сети наиболее оптимальной является реализация синхронизации на технологии Sync-E. Это обусловлено сравнительно небольшими затратами на замену/обновление оборудования только на магистральном уровне и обеспечением гарантированно качественной передачи сигнала синхронизации на большие расстояния.

Результаты линейных испытаний фрагмента сети синхронизации БС по Sync-E на основной сети (на базе оборудования Cisco) представлены на рис. 2.

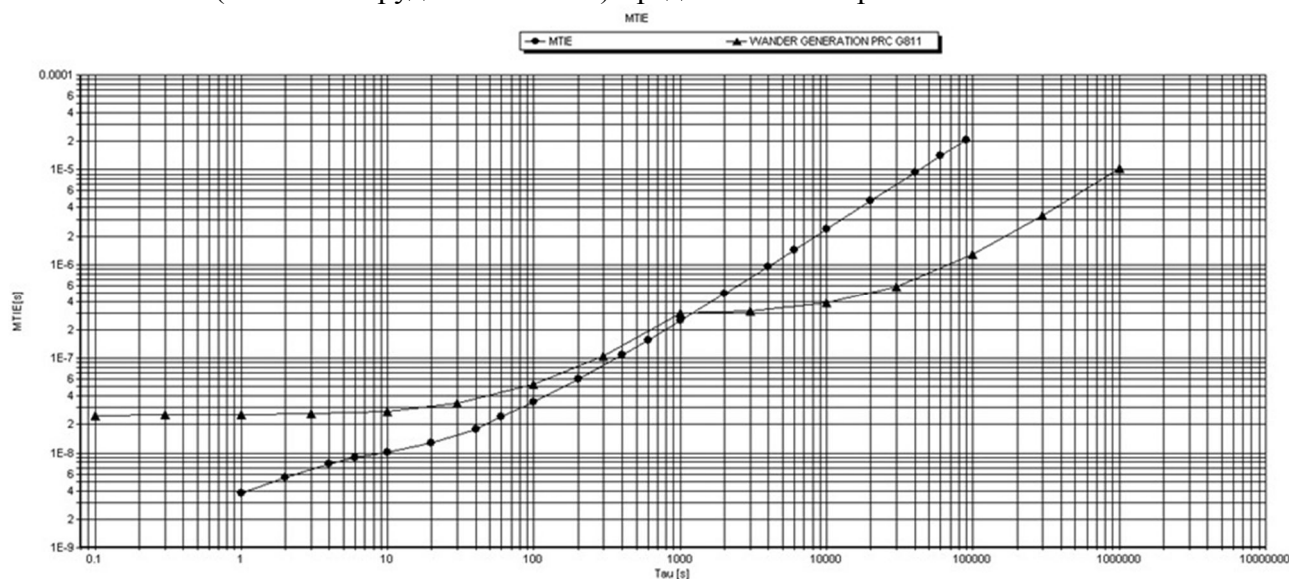


Рис. 2. Измерение параметров стабильности на участке Sync-E

На рис. 2 показана маска G.811 (уровень первичного источника сети синхронизации) и результаты измерений, которые не вполне удовлетворяют верхнему уровню иерархии, но сигнал пригоден для БС, так как его стабильность выше, чем  $5 \cdot 10^{-8}$  за сутки.

В данном случае в качестве опорной частоты для сети IP/MPLS использовался сигнал сети синхронизации АО «Киевстар», транслируемый по сети SDH. Источниками сигнала синхронизации являются распределенные по сети цезиевые генераторы и GPS-приемники. Измерения параметров стабильности частоты произведены на уровне PE маршрутизатора с тремя переприемами. С уровня PE сигнал может распределяться, как на нижние уровни, например на уровень Р и соответственно может быть использован для синхронизации БС.

На рис. 3 показаны результаты линейных испытаний RTP для уровня агрегации. Результаты измерений также не удовлетворяют самому верхнему уровню иерархии, однако сигнал также пригоден для БС, так как его стабильность выше, чем  $5 \cdot 10^{-8}$  за сутки. Следовательно, протокол RTP также может быть использован на уровне доступа для синхронизации БС.

Результаты линейных испытаний на NTP для уровня доступа сети (то есть на самом уровне БС) представлены на рис. 4. Это только уровень доступа в силу прикладной природы протокола NTP. В целом, требование по синхронизации БС также выполняется.

**Выводы.** Проведенный анализ можно использовать для оценки пригодности протоколов в их современном состоянии для того, чтобы подстраивать тактовую частоту элементов сети на основе дистанционного сличения шкал времени.

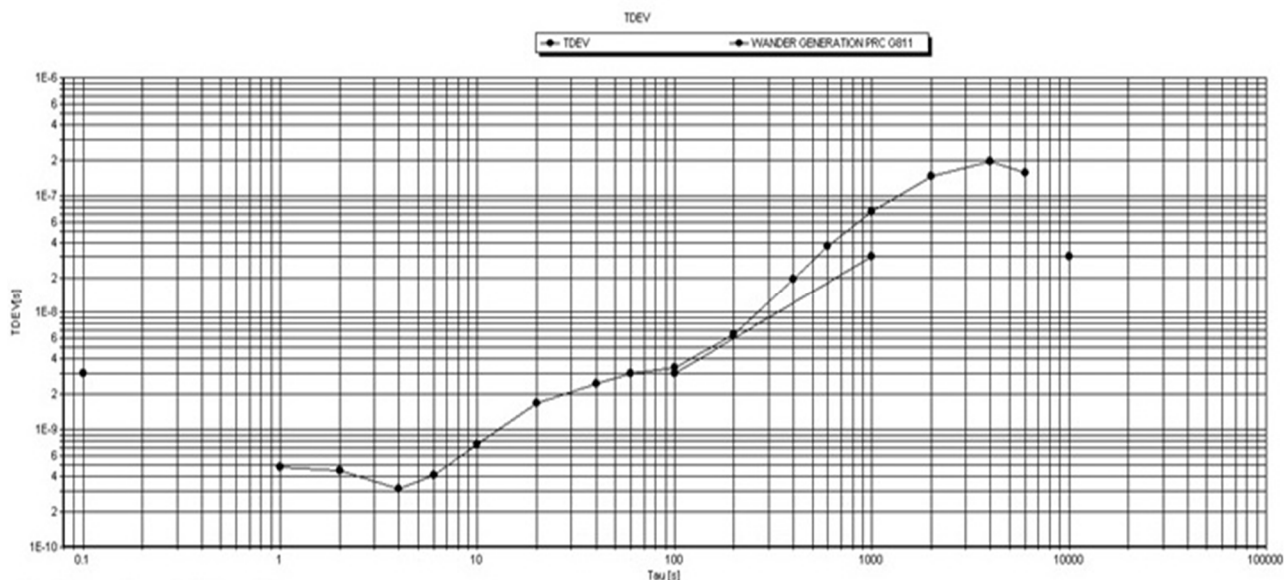


Рис. 3. Измерение параметров стабильности на участке RTP

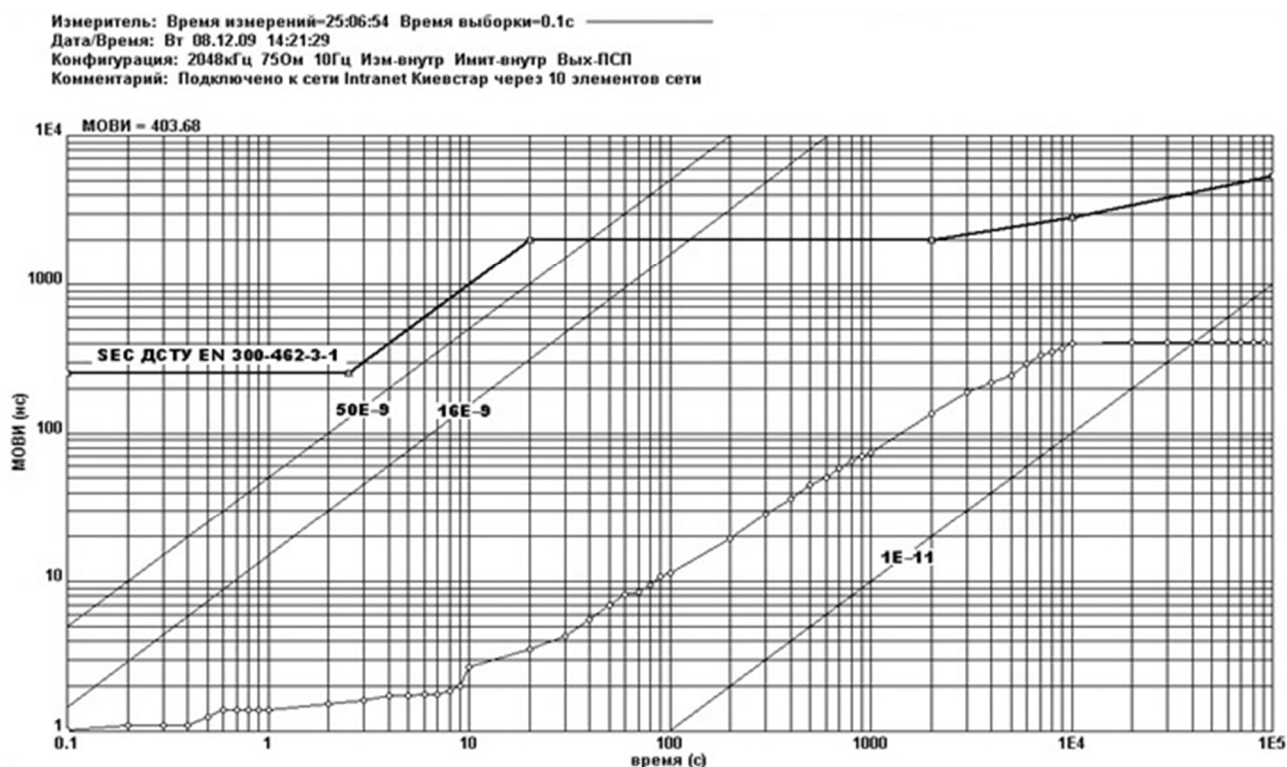


Рис. 4. Измерение параметров стабильности на участке NTP

Можно сделать вывод о том, что синхронизацию тактовой частоты в сетях с коммутацией пакетов для верхнего уровня иерархии с помощью NTP на практике реализовать не удастся, так как даже на интервале усреднения  $\tau > 10$  суток невозможно получить нестабильность частоты на уровне  $1 \cdot 10^{-11}$  (по аналогии с цифровой транспортной сетью для тактовой синхронизации коммутационных узлов). В то же время RTP позволяет сделать это на интервале усреднения  $\tau < 1$  суток. Такое решение с использованием опорного сигнала GPS (ГЛОНАСС) наиболее оптимально для тактовой синхронизации в IP-сетях.

Как следует из анализа и приведенных результатов измерений на пилотной сети синхронизации АО «Киевстар», комбинирование различных протоколов сличения времени приемлемо для обеспечения синхронизации БС от пакетных сетей на всех уровнях. Такой метод позволяет эффективно использовать преимущества различных протоколов, что существенно упростит планирование сети на различных уровнях иерархии.

**Литература**

1. Савчук А.В. Синхронизация текущего времени: Протокол сетевого времени / А.В. Савчук, В.Н. Шапошников, И.П. Черняк // Зв'язок. – 2007. – №6. – С.10-15.
2. Савчук А.В. Синхронизация текущего времени: Протокол прецизионного времени / А.В. Савчук, В.Н. Шапошников, И.П. Черняк // Зв'язок. – 2008. – №2. – С.28-33.
3. Нетес В.А. Ethernet операторского класса / В.А. Нетес // Вестник связи. – 2010. – №11.
4. Вакась В. И. Сравнительный анализ протоколов временной синхронизации для сетей нового поколения (NGN) / В.И. Вакась, И.П. Черняк // 19-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009). – Материалы конф. – Севастополь: Вебер. – 2009. – С.289-290.
5. Вакась В. И. Синхронизация базовых станций мобильной связи в транспортном окружении сети IP/MPLS / В.И. Вакась, И.П. Черняк // 20-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2010). – Материалы конф. – Севастополь: Вебер. – 2010. – С.335-336.
6. Вакась В. И. Синхронизация базовых станций при внедрении технологий IP-сетей / В.И. Вакась, И.П. Черняк // 21-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2011). – Материалы конф. – Севастополь: Вебер. – 2011. – С.374 -375.

УДК 621.316.722.1.

**Зайцев Г. Ф.**, д.т.н.; **Лысенко Д.А.**, асп.; **Булгач Т.В.**, асп.; **Градобоева Н.В.**, к.т.н.  
(Государственный университет информационно-коммуникационных технологий)

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНАЛОГОВОГО КОМБИНИРОВАННОГО  
СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ С АСТАТИЗМОМ ВТОРОГО ПОРЯДКА.  
АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАБИЛИЗАТОРА**

**Зайцев Г.Ф., Лысенко Д.А., Булгач Т.В., Градобоева Н.В. Математична модель аналогового комбінованого стабілізатора напруги з астатизмом другого порядку. Аналіз динамічних характеристик стабілізатора.** Побудована математична модель аналогового комбінованого стабілізатора напруги з астатизмом другого порядку. Виконано аналіз помилок стабілізації при різних законах зміни відхилення вхідної напруги від номінальної і показано, що стабілізатор з астатизмом другого порядку має більш високу точність стабілізації напруги у порівнянні з традиційним статичним стабілізатором і стабілізатором з астатизмом першого порядку.

**Ключові слова:** СТАБІЛІЗАТОР НАПРУГИ, АСТАТИЗМ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

**Зайцев Г.Ф., Лысенко Д.А., Булгач Т.В., Градобоева Н.В. Математическая модель аналогового комбинированного стабилизатора напряжения с астатизмом второго порядка. Анализ динамических характеристик стабилизатора.** Построена математическая модель аналогового комбинированного стабилизатора напряжения с астатизмом второго порядка. Выполнен анализ ошибок стабилизации при различных законах изменения отклонения входного напряжения от номинального и показано, что стабилизатор с астатизмом второго порядка обладает более высокой точностью стабилизации напряжения по сравнению с традиционным статическим стабилизатором и стабилизатором с астатизмом первого порядка.

**Ключевые слова:** СТАБИЛИЗАТОР НАПРЯЖЕНИЯ, АСТАТИЗМ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

**Zaitsev H.F., Lysenko D. O., Bulhach T. V., Hradoboieva N. V. Mathematical model of combined analog voltage stabilizer with the astatism of second order. Analysis of the dynamic characteristics of stabilizer.** The mathematical model of combined analog voltage stabilizer with an astatism of second order is constructed. The analysis of the errors stabilization under the different laws of deviations between input voltage and nominal is carried out, and it is proved that the uninterrupted stabilizer with the astatism of second order has more high accuracy of stabilization comparatively with the traditional static stabilizer and the stabilizer with astatism of first order.

**Key words:** VOLTAGE STABILIZER, ASTATISM, MATHEMATICAL MODEL

**1. Математическая модель аналогового комбинированного стабилизатора напряжения с астатизмом второго порядка.** Математическая модель аналогового комбинированного стабилизатора напряжения с разомкнутой связью по отклонению входного напряжения с астатизмом второго порядка (рис. 1) отличается от математической