

В. В. БАВЫКИНА, канд. техн. наук, Ю. А. КОВАЛЬ, д-р. техн. наук

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ИЗМЕРЕНИЯ СДВИГА ШКАЛ В СИСТЕМАХ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ КРИТЕРИЮ

Практически ни одна из существующих и вновь создаваемых систем передачи и извлечения информации, измерений, контроля и управления любыми процессами не может обойтись без учета и измерения времени и стабильных генераторов. Прямо или косвенно частотно-временные методы используются: для исследования космоса, мирового океана и земной коры; при создании совершенных навигационных, локационных и связных систем, высокоточного оружия и военной техники; для обеспечения измерений в физике, радиоастрономии и др. Основой для реализации этих методов является синхронность или привязка территориально разнесенных генераторов, выступающих или в качестве источников стабильной частоты, или в качестве хранителей времени.

Поскольку после распада СССР большая часть технических средств Государственной службы единого времени и эталонных частот осталась в России, из первоочередных актуальных задач для Украины встала задача организации частотно-временного обеспечения в стране. [1]. Актуальной задачей для Украины также является синхронизации опорных генераторов в национальной цифровой системе связи [2].

Системы, реализующие современные частотно-временные методы, относятся к классу многопозиционных информационно-измерительных систем и могут быть условно названы системами синхронизации времени и частоты (ССВЧ) [3]. В основе практически всех методов синхронизации лежит передача информации о шкалах времени. Сопоставительный анализ методов синхронизации показывает, что в настоящее время наивысшую точность обеспечивают: перевозимые квантовые часы (ПКЧ); спутниковые радионавигационные системы (СРНС) GPS и ГЛОНАСС; связные ИСЗ; радиометеорный метод синхронизации (РМС). Находит широкое применение менее точный, но сравнительно простой метод передачи сигналов синхронизации по каналам телевидения (ТВ). Каждый из перечисленных методов синхронизации (см. табл.) обладает определенными преимуществами и недостатками, которые необходимо учитывать при решении конкретных задач.

Анализируя принципы построения и источники погрешностей ССВЧ, следует выделить алгоритмы измерений сдвига шкал времени. Принципиально отличаясь от алгоритмов работы в других системах, алгоритмы измерений сдвигов шкал в ССВЧ обеспечивают учет либо исключение времени задержки сигналов синхронизации в среде распространения. Особая роль алгоритмов измерений сдвига шкал объясняется следующими причинами:

- 1) эти алгоритмы присущи только ССВЧ;
- 2) выбор алгоритма измерений существенно влияет на особенности технической реализации ССВЧ;
- 3) различные алгоритмы измерений сдвига шкал времени по-разному трансформируют источники погрешностей в результирующую погрешность измерений;
- 4) алгоритмы измерений сдвига шкал времени непосредственно связаны с заключительным этапом измерений – обработкой их результатов, после которой оцениваются не только сдвиги шкал, но и погрешности измерений (случайные, систематические и грубые промахи).

Алгоритмы измерения сдвигов шкал времени можно разделить на две группы [3, 4].

К первой группе относятся, так называемые, **пассивные алгоритмы**, отличительной особенностью которых является излучение сигналов только в одном из пунктов. К пассивным алгоритмам относятся односторонний алгоритм (ОА) и алгоритм общего охвата (АОО). В случае ОА один пункт (*A*) излучает сигналы, которые принимаются во втором пункте (*B*). Сдвиг шкал времени пунктов при этом можно определить, если известно время

задержки сигналов между пунктами τ_p . В случае АОО используется дополнительный высокостабильный источник, сигналы которого принимаются в синхронизируемых пунктах. Этот алгоритм называется также взаимным или дифференциальным.

Алгоритмы второй группы – **активные**, основанные на двусторонней передаче информации. При этом время задержки сигналов между пунктами может быть неизвестным, требуется только его высокая стабильность и обратимость (в идеальном случае $\tau_p^{AB} = \tau_p^{BA}$).

Различают три основных, а также ряд комбинированных и модифицированных активных алгоритмов. К основным алгоритмам принято относить: встречный алгоритм (ВА); ретрансляционный алгоритм (РА); опорно-ретрансляционный алгоритм (ОРА).

Задача сравнения алгоритмов измерения сдвига шкал осложняется весьма ограниченным кругом количественных показателей, по которым возможно проводить такие сравнения. Значительная часть показателей являются качественными (см. таблицу).

Таблица

Методы и системы	Алгоритмы	Погрешности	Достоинства	Общие недостатки / Недостатки для Украины
ПКЧ	Пассивный	1...10 нс	Прямые измерения	Малая оперативность; высокая стоимость / Отсутствие отечественных ПКЧ
ИСЗ связи	Активные	1...100 нс	Глобальная зона действия; оперативность	Излучение в пунктах синхронизации / Зависимость от зарубежных систем
СРНС (GPS и ГЛОНАС)	ОА	0,1...1 мкс	Глобальная зона действия; отсутствие излучения в пунктах синхронизации	Малая оперативность. Селективный доступ (GPS) / Зависимость от зарубежных систем
	АОО	20...50 нс		
РМС	Активные	10...30 нс (по огибающим сигналов); < 1 нс (по фазе несущей сигнала)	Оперативность; экономичность; независимость от зарубежных систем	Излучение в пунктах синхронизации. Дальность до 2000 км
ТВ	ОА	2...20 мкс	Простота реализации; отсутствие излучения в пунктах синхронизации	Низкая точность; ограниченная зона действия

Достоинства и недостатки алгоритмов являются в основном взаимоисключающими. Например, отсутствие излучения (в одном из пунктов для ОА; в обоих пунктах для АОО) является, с одной стороны, достоинством пассивных алгоритмов, а с другой стороны, – их недостатком, поскольку приводит к погрешностям, связанным с ошибками в определении τ_p . Наоборот, необходимость излучения в пунктах для активных алгоритмов – недостаток этих алгоритмов, однако при этом практически исключаются погрешности, вызванные временем задержки сигналов. Все это обосновывает целесообразность выработки объективных показателей для сравнения алгоритмов.

Количественным показателем, по которому можно сравнивать алгоритмы, является оценка помеховой погрешности [3, 4]. Что касается сравнение алгоритмов с точки зрения аппаратурных и канальных погрешностей, то такие сравнения возможны только по группам алгоритмов (пассивные и активные).

Полученные в работах [3, 4] соотношения для расчетов помеховых погрешностей не могут быть использованы для эквивалентного сравнения алгоритмов, поскольку в этих соотношениях отсутствует информация о затраченной на каждое единичное измерение энергии. Поэтому для сравнения различных алгоритмов предлагается ввести эффективную помеховую погрешность (ЭПП), среднее квадратическое отклонение (СКО) которой определяется эффективной шириной спектра сигнала $\Delta\omega_{эф}$, спектральной плотностью шума в пунктах N_0 и суммарной энергией \mathcal{E}_Σ принимаемых сигналов, соответствующих единичному измерению (наблюдению), –

$$\sigma_{\Delta T_{эф}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2\mathcal{E}_\Sigma}{N_0} \cdot \Delta\omega_{эф}}} \quad (1)$$

На основе ЭПП введем коэффициент эффективной помеховой погрешности измерения сдвига шкал в виде отношения СКО ЭПП к СКО помеховой погрешности соответствующего алгоритма

$$K_{эф} = \frac{\sigma_{\Delta T_{эф}}}{\sigma_{\Delta T}} \quad (2)$$

Для ОА СКО помеховой погрешности единичного измерения совпадает с СКО ЭПП. Поэтому для ОА коэффициент эффективной помеховой погрешности $K_{эф}=1$.

Для упрощения анализа остальных алгоритмов положим одинаковыми как спектральные плотности шума в пунктах, так и эффективную ширину спектра сигналов:

$$N_0^A = N_0^B = N_0; \quad \Delta\omega_{эф}^A = \Delta\omega_{эф}^B = \Delta\omega_{эф} \quad (3)$$

В случае АОО, ВА и ОРА (для $n=1$) для выполнения одного измерения необходим прием двух сигналов. Поэтому суммарная энергия принимаемых сигналов в выражении (1) составит

$$\mathcal{E}_\Sigma = \mathcal{E}_A + \mathcal{E}_B, \quad (4)$$

где $\mathcal{E}_A, \mathcal{E}_B$ – значения энергий принимаемых сигналов в пунктах A и B соответственно.

Учитывая соотношения (1) – (4) и приведенные в работах [3, 4] соотношения для СКО помеховых погрешностей, коэффициенты эффективной помеховой погрешности для АОО, ВА и ОРА (для $n=1$) составят:

$$K_{эф} = \frac{\sqrt{\mathcal{E}_A \cdot \mathcal{E}_B}}{\mathcal{E}_\Sigma} = \frac{\sqrt{x}}{1+x} \quad \text{– для АОО;}$$

$$K_{эф} = \frac{2 \cdot \sqrt{\mathcal{E}_A \cdot \mathcal{E}_B}}{\mathcal{E}_\Sigma} = \frac{2 \cdot \sqrt{x}}{1+x} \quad \text{– для ВА и ОРА (n=1),}$$

где $x = \mathcal{E}_A / \mathcal{E}_B$.

Коэффициенты эффективной помеховой погрешности у рассматриваемых алгоритмов принимают максимальные значения $K_{эф}=0,5$ для АОО и $K_{эф}=1$ для ВА и ОРА (для $n=1$) в случае, если $x=1$, то есть $\mathcal{E}_A = \mathcal{E}_B$ (см. рис. 1).

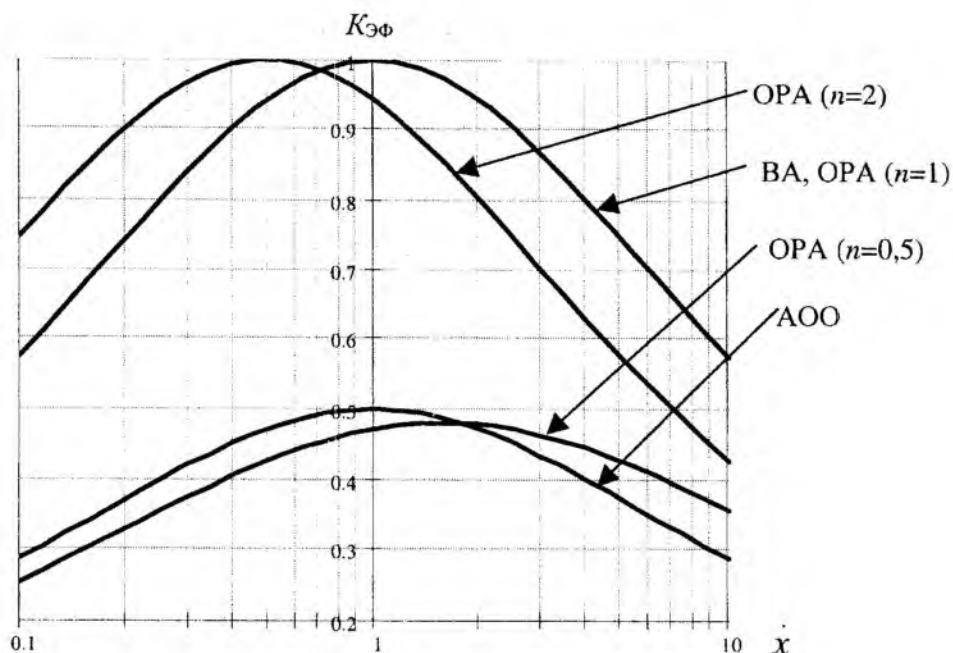


Рис. 1

Для получения единичного измерения (наблюдения) в одном из пунктов в случае РА и ОРА (для $n \neq 1$) необходимо излучить и соответственно принять три сигнала. При этом суммарная энергия принимаемых сигналов в выражении (1) составит: $\mathcal{E}_\Sigma = 2\mathcal{E}_A + \mathcal{E}_B$ – для единичного измерения в пункте A ; $\mathcal{E}_\Sigma = 2\mathcal{E}_B + \mathcal{E}_A$ – для единичного измерения в пункте B . При этом коэффициент эффективной помеховой погрешности в случае РА имеет вид

$$K_{эф}(n, x) = \frac{2|n|}{\sqrt{(n^2 - 2n + 2) \cdot \left(2 + \frac{1}{x}\right) + n^2 \cdot (1 + 2 \cdot x)}}, \quad (5)$$

где $x = \mathcal{E}_A / \mathcal{E}_B$ – для пункта A ; $x = \mathcal{E}_B / \mathcal{E}_A$ – для пункта B ; n – коэффициент опорной ретрансляции ($n \leq -1$ – для РА; $n > -1$ – для ОРА).

Результаты количественных оценок для коэффициента эффективной помеховой погрешности РА и ОРА (для $n \neq 1$), полученные на основании соотношения (5), приведены на рис. 2.

Выполненный анализ показал, что минимальные помеховые погрешности по критерию максимально возможного значения коэффициента эффективной помеховой погрешности ($K_{эф}=1$) обеспечивают ОА, ВА и ОРА ($n=1$ и $n=2$). Однако с точки зрения перераспределения суммарной излучаемой энергии между синхронизируемыми пунктами алгоритмы не равноценны. Для выполнения одного измерения в случае ОА необходимо излучить один сигнал из одного пункта, в случае ВА и ОРА ($n=1$) – по одному сигналу из каждого пункта, а в случае ОРА ($n=2$) – два сигнала из одного пункта и один сигнал из другого пункта.

Для устранения погрешности, вызванной нестабильностью канальной задержки сигналов, без обмена результатами измерений между пунктами в работе [3] предложено два модифицированных алгоритма, основанных на изменении знака коэффициента опорной ретрансляции в течение одного или соседних периодов измерений. Модифицированный алгоритм, у которого изменяется знак коэффициента опорной ретрансляции в соседних периодах измерений, сокращенно обозначим " $\pm n \times 2T$ ". Модифицированный алгоритм с изменением знака коэффициента опорной ретрансляции в каждом пункте или в одном периоде измерений различных пунктов по аналогии обозначим " $\pm n \times 1T$ ".

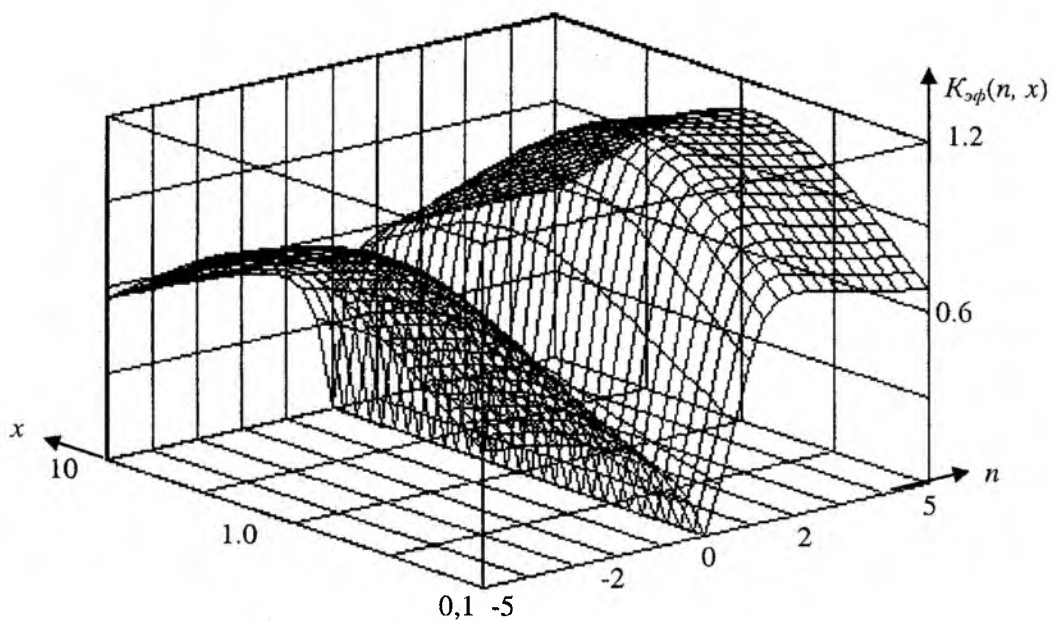


Рис. 2

Расчеты приводят к следующим выражениям для коэффициентов эффективной помеховой погрешности данных модифицированных алгоритмов:

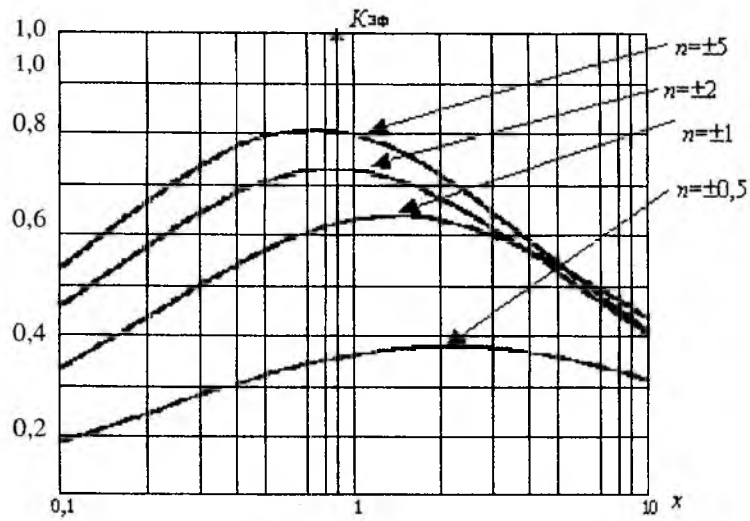
– для алгоритма " $\pm n \times 2T$ "

$$K_{\text{эф}}(n, x) = \frac{2 \cdot |n|}{\sqrt{(n^2 + 2) \cdot (2 + \frac{1}{x}) + n^2 \cdot (1 + 2x)}};$$

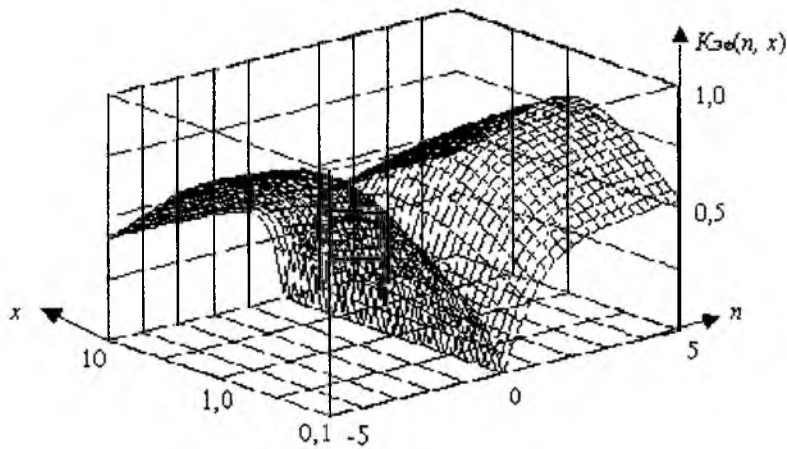
– для алгоритма " $\pm n \times 1T$ "

$$K_{\text{эф}}(n, x) = \frac{4 \cdot |n|}{\sqrt{(2n^2 + 1) \cdot (6 + \frac{2}{x}) + 2n^2 \cdot (2 + 6x)}}.$$

Зависимости коэффициентов эффективной помеховой погрешности для модифицированных алгоритмов " $\pm n \times 2T$ " и " $\pm n \times 1T$ " от n и x приведены соответственно на рис. 3 и рис. 4.



а



б

Рис. 3

Для сокращения вдвое числа излучаемых сигналов в одном из пунктов предложен алгоритм повторной опорной ретрансляции (АПОР) [5]. При этом один из пунктов, например пункт B , работает в ждущем режиме, а пункт A – в активном режиме. Сигнал, принятый в пункте B , ретранслируется с коэффициентом ретрансляции $n_B=1$. После приема этого сигнала в пункте A организуется повторная ретрансляция с учетом оценки значения сдвига шкал $\overline{\Delta T}^{AB}$ в этом пункте.

Коэффициент эффективной помеховой погрешности измерения сдвига шкал для АПОР составит:

– для измерений в пункте B

$$K_{\Sigma\Phi}^B(n, x) = \frac{2 \cdot |n_A|}{\sqrt{\left((n_A)^2 + 4 \cdot n_A + 8\right) \cdot \left(2 + \frac{1}{x}\right) + (n_A)^2 (1 + 2 \cdot x)}}; \quad (6)$$

– для совместной обработки результатов измерений в пунктах

$$K_{\Sigma\Phi}^{\Sigma AB}(n, x) = \frac{2 \cdot |n_A|}{\sqrt{\left((n_A)^2 + 2 \cdot n_A + 2\right) \cdot \left(2 + \frac{1}{x}\right) + (n_A)^2 (1 + 2 \cdot x)}}; \quad (7)$$

где $x = \mathcal{E}_B / \mathcal{E}_A$; n_A – коэффициент ретрансляции в пункте A .

Графические иллюстрации соотношений (6) и (7) представлены соответственно на рис. 5 и рис. 6.

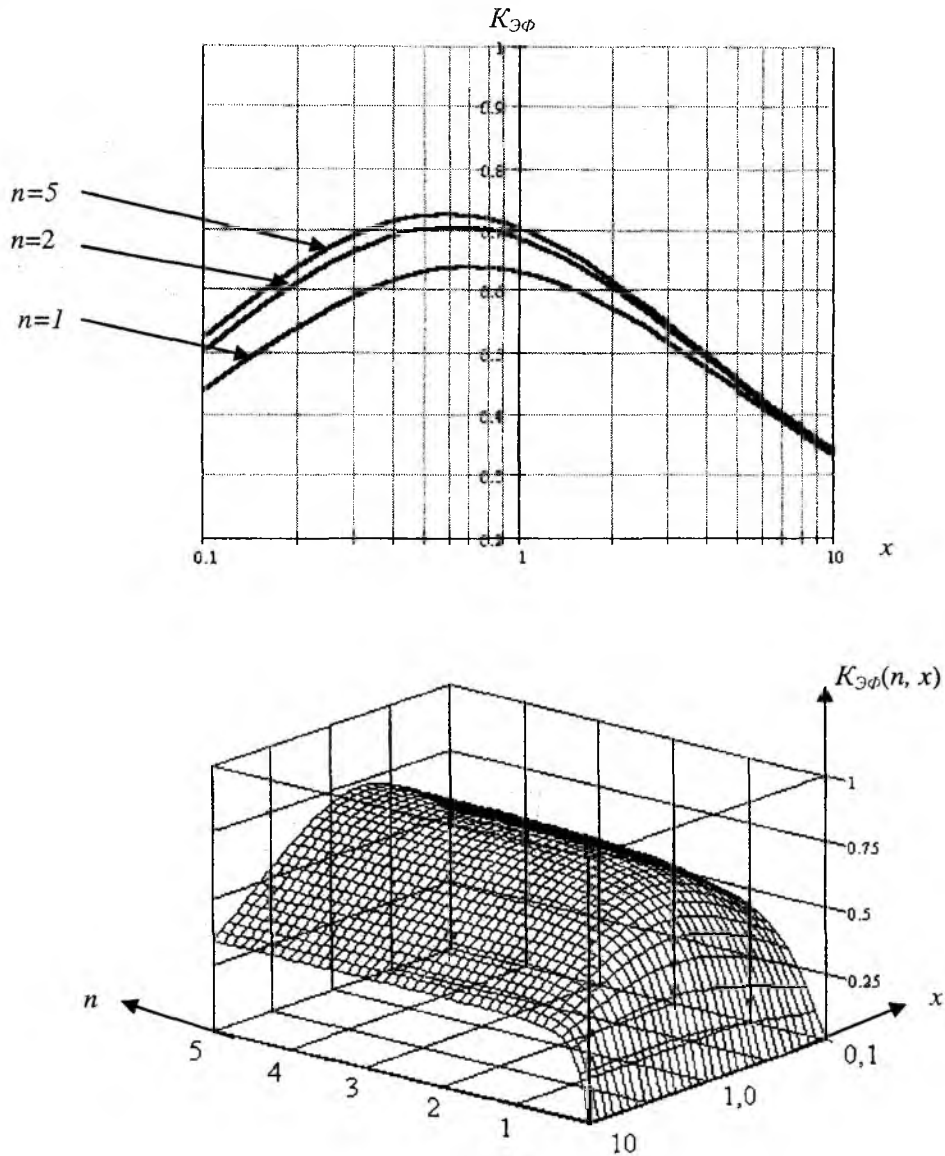


Рис. 4

Таким образом, предложенный коэффициент эффективной помеховой погрешности является своеобразным коэффициентом использования энергии в алгоритме измерений, поскольку позволяет сопоставить затраченную на единичное измерение суммарную энергию с достигнутым значением потенциального СКО помеховой погрешности.

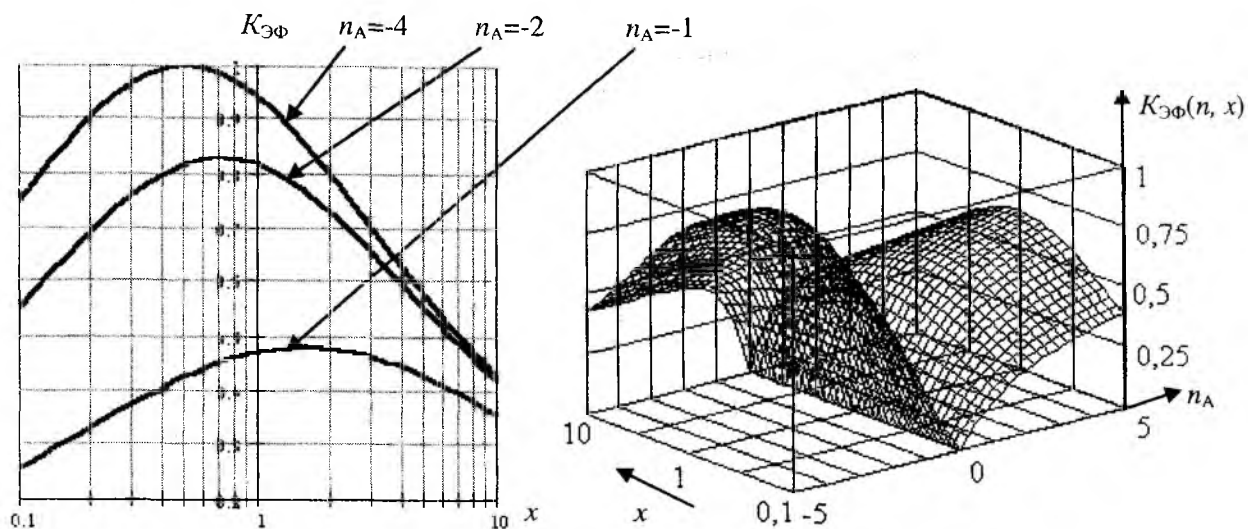


Рис. 5

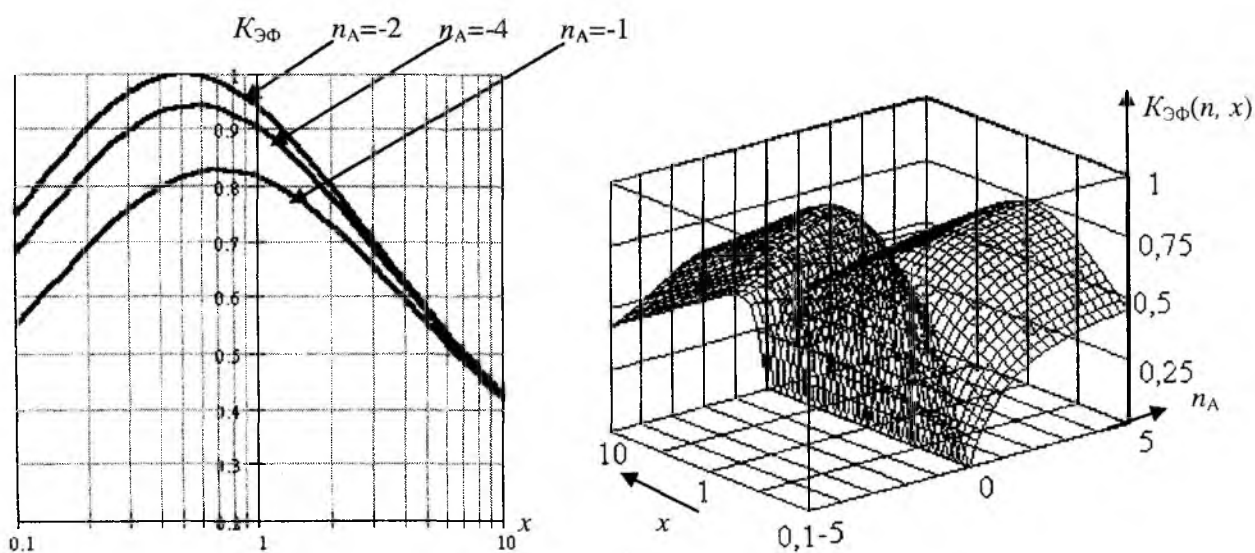


Рис. 6

Список литературы: 1. Державна програма створення та розвитку Державної служби єдиного часу і еталонних частот. //Український метрологічний журнал. –1996, вип. 4. С. 13–16. 2. Система синхронізації первичної цифрової мережі зв'язу України. Основні положення. Міністерство зв'язу України. УНІИС, Київ, 1996. 3. Кащеев Б. Л., Коваль Ю. А., Горбач В. И., Бондарь Б. Г. Метеоры сегодня. Киев.: Техника, 1996. 196 с. 4. Величко О. М., Миронов М. Т., Сидоренко Г. С. та ін. 5. Коваль Ю. А., Троцин О. Л. Анализ алгоритмов синхронизации эталонов времени и частоты // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2000. Вып. 113. С. 47-526. 6. Коваль Ю. А., Бавыкина В. В., Троцин О. Л. Анализ путей совершенствования алгоритмов измерения сдвига шкал в системах синхронизации времени и частоты // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. Вып. 118. С. 85-91.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 26.02.2002