



# Вісник СевНТУ

114

---

Севастополь 2011

---

Міністерство освіти і науки,  
молоді та спорту України  
Севастопольський національний  
технічний університет

ВИПУСК **114**/2011

---

# ВІСНИК СевНТУ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Збірник засновано у 1995 році

Серія: **Інформатика, електроніка,  
ЗВ'ЯЗОК**

---

Севастополь 2011

---

Засновник, редакція,  
видавець та виготовлювач  
Севастопольський національний  
технічний університет

Публікації у збірнику визнаються  
при захисті дисертаційних робіт  
(Постанова ВАК від 10.03.2010 р. № 1-05/2,  
Бюлетень ВАК № 4, 2010)

Головний редактор **Є.В. Пашков**, д-р техн. наук, професор

**Редакційно-видавничча рада СевНТУ:** О.Г. Лук'янчук, канд. техн. наук, доц. (заст. головного редактора); А.П. Фалалеев, канд. техн. наук, доц. (заст. головного редактора); В.О. Крамарь, канд. техн. наук, доц. (заст. головного редактора); В.К. Марігодов, д-р техн. наук, проф., (науковий редактор технічних серій); С.Ф. Барановський, д-р фіз.-мат. наук, проф. (науковий редактор серії "Фізика біологічних систем і молекул"); Ю.К. Новосолов, д-р техн. наук, проф. (науковий редактор серії «Машиноприладобудування та транспорт»); М.С. Колесов, д-р філос. наук, проф. (науковий редактор гуманітарних серій); Т.М. Одинцова, канд. екон. наук, доц. (науковий редактор економічних серій); Л.М. Абросімова, канд. пед. наук, доц. (науковий редактор серії "Педагогіка"); Е.Ф. Бабуров, д-р техн. наук, проф.; О.І. Бохонський, д-р техн. наук, проф.; М.П. Євстигнєєв, д-р фіз.-мат. наук, проф.; С.Р. Зіборов, канд. техн. наук, доц.; І.В. Колесова, канд. екон. наук, доц.; В.Я. Копп, д-р техн. наук, проф.; В.І. Плаксін, д-р екон. наук, проф.; О.М. Поляков, канд. техн. наук, доц.; В.М. Торлін, д-р техн. наук, проф.; О.О. Чемшит, д-р політ. наук, проф.; Т.О. Кокодей, канд. екон. наук, доц. (кор.).

**Редакційна колегія серії «Інформатика, електроніка, зв'язок»:** С.Р. Зіборов, канд. техн. наук, доц. (відп. редактор); В.В. Вертегел, канд. техн. наук, доц. (відп. секретар); Е.Ф. Бабуров, д-р техн. наук, проф.; Ю.Б. Гімплєвич, д-р техн. наук, доц.; В.О. Гусєв, д-р техн. наук, проф.; С.В. Доценко, д-р фіз.-мат. наук, проф.; Л.М. Лобкова, д-р техн. наук, проф.; О.В. Скатков, д-р техн. наук, проф.; Л.А. Кареліна, інженер I кат. (техн. секретар).

**Науковий редактор** **В.К. Марігодов**, професор, д-р техн. наук

Рекомендовано до друку Вченою радою СевНТУ, протокол № 8 від 31 березня 2011 р.

В статтях збірки наведені результати теоретичних і експериментальних досліджень з сучасних проблем інформатики, електроніки і зв'язку. Розглядаються методи обробки інформації, принципи побудови радіоелектронних пристроїв, радіовимірювальних технічних приладів і систем. Збірка призначена для фахівців, викладачів, аспірантів і студентів, що спеціалізуються у галузі інформатики і радіоелектроніки.

В статтях сборника представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по современным проблемам информатики, электроники и связи. Рассматриваются методы обработки информации, принципы построения радиоэлектронных устройств, радиоизмерительных приборов и систем. Сборник предназначен для специалистов, преподавателей, аспирантов и студентов, специализирующихся в области информатики и радиоэлектроники.

The journal presents theoretical and experimental research results on the modern problems of informatics, electronics, and communications. The methods of information processing and the principles of designing radio electronic devices, radio measuring devices and systems are considered. The journal's target readership consists of professionals, teachers, post graduate and graduate students specializing in the area of informatics and radio electronics.

## ЗМІСТ

Глатц Э., Фидлер У., Чернега В. Самоорганизующаяся ячеистая беспроводная городская сеть для аварийно-спасательных служб .....	3
Апраксин Ю.К., Волкова Т.В. Расширение возможностей аппаратной реализации протоколов распределенных технических систем .....	8
Луговская Л.П., Шевченко В.И., Скатков И.А. Динамическая кластеризация информационных потоков .....	14
Скатков А.В., Балакирева И.А. Интеллектуальные системы поддержки принятия решения в многокритериальных задачах управления КМОП-технологиями .....	21
Ткаченко К.С. Аппроксимация Парето-множеств в задаче анализа многопроцессорных вычислительных систем .....	26
Ловягин В.С. Статистический мониторинг вирусных атак на основе параметрических критериев .....	31
Брюховецкий А.А., Скатков А.В. Оптимизация структурных решений управления памятью с использованием методов искусственных иммунных систем .....	36
Доценко С.В., Кузнецов С.А. Корреляционное описание взволнованной морской поверхности в прибрежной зоне .....	40
Песчанский А.И. Полумарковская модель однолинейной системы с потерями и мгновенным контролем качества обслуживания .....	47
Ротко В.Ф. Реализация булевой функции в классе субоптимальных бинарных программ .....	53
Доронина Ю.В. Уровни абстрагирования при моделировании отраслевых систем .....	61
Доронина Ю.В., Копт В.Я. Выбор оптимальной структуры информационной системы на основе иерархических моделей .....	67
Дрозин А.Ю. Алгоритм расчета корреляционной функции двумерного поля методом случайных координат .....	72
Изидинов А.С., Кожяев Е.А. Вариантный анализ структур систем мониторинга .....	77
Фисун С.Н., Копылов А.И. Использование криптографических сервисов .NET и Java для защиты информации от несанкционированного доступа .....	81
Сосновский Ю.В., Стадник И.П. Повышение эффективности моделирования нестационарных информационных процессов посредством интегрированного многоверсионного подхода .....	87
Иванченко О.В., Кривонос М.В., Бирюков Д.Ю. Математическая модель цифрового средства измерений с двухзвенным аналого-цифровым преобразователем последовательных приближений .....	90
Бондарев В.Н. Правило обучения каскадной нейронной сети для выделения окрашенных гауссовых сигналов .....	95
Воронин Д.Ю. Обеспечение высокой терминальной готовности на основе информационных технологий распределения ресурсов .....	100
Караетьян В.А. Организация интерфейса между Delphi-приложением и средствами системы Matlab .....	106
Карлусов В.Ю. Расчёт нерекурсивных цифровых фильтров в базисе Хартли .....	111
Сапожников Н.Е., Моисеев Д.В., Шокин А.Г. Преобразователь напряжение-вероятность .....	116
Сапожников Н.Е., Моисеев Д.В. Вероятностный широкодиапазонный спектрометр повышенной точности .....	119
Маригодов В.К., Тихонов Г.А. Способ распознавания подводных объектов .....	123
Маригодов В.К., Тихонов Г.А. Помехоустойчивость идеального приемника при воздействии помех с произвольным спектром .....	127
Лобкова Л.М., Головин В.В. Анализ эффективной ширины диаграммы направленности антенн космических систем связи .....	130
Лобкова Л.М., Головин В.В. Статистика поля в апертуре приемной антенны космических систем радиосвязи .....	137
Савочкин А.А., Нудьга А.А. Исследование многодиапазонных фрактальных антенн .....	142
Салицкий В.Б., Солдатенко А.С. Анализ абберационных погрешностей электронно-зондового метода измерения электрических полей .....	149
Гимплевич Ю.Б., Саламатин В.В., Лащенко И.В. Измеритель комплексного коэффициента отражения на основе калибруемого двухдетекторного волноводно-щелевого преобразователя .....	155
Трушкин А.Н. Измеритель S-параметров четырехполосника .....	159

УДК 389

О.В. Иванченко, канд. техн. наук,

М.В. Кривонос, бакалавр,

Д.Ю. Бирюков, бакалавр

*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ С ДВУХЗВЕННЫМ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПРИБЛИЖЕНИЙ**

*Представлена опорная математическая модель цифрового средства измерений, содержащего многошаговый аналого-цифровой преобразователь (АЦП) последовательных приближений. Получены расчетные соотношения для оценки результата измерений с учетом особенностей построения АЦП.*

**Ключевые слова:** *цифровые средства измерений, двухзвенная модель АЦП последовательных приближений, нормированная весовая функция.*

В современном мире высоких технологий выполняется огромное количество измерений различных характеристик сложных технических систем, нередко функционирующих в экстремальных условиях (например, системы управления и обеспечения безопасности АЭС; информационно-управляющие системы аэрокосмической техники и т. д.). Поэтому для таких систем особую практическую значимость приобретают задачи по обеспечению малых погрешностей результатов измерений.

Решение этих задач с требуемым быстродействием достигается за счет широкого использования цифровых средств измерений (ЦСИ), основу которых составляют аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП).

Многовариантность задач проектирования ЦСИ с использованием АЦП и большие затраты на отработку, проверку рабочих версий обуславливают внедрение современных математических и инженерных методов системного анализа, развитых средств автоматизированного моделирования [1]. В [1–3] детально характеризуются области применения АЦП и ЦАП, специфику которых можно определить по значению основных электрических и конструктивных параметров, что значительно упрощает работу по проектированию ЦСИ. Однако, несмотря на это, существенным недостатком, с которым сталкиваются различные производители ЦСИ, является отсутствие единого математического аппарата, обеспечивающего возможность оценки выполнения требований по погрешности результатов измерений расчетным путем при минимальном объеме экспериментального материала [2]. К тому же, решение этой задачи с каждым годом усложняется, поскольку возникают дополнительные физико-технологические, эксплуатационные и экономические ограничения при производстве микроэлектроники. В частности, данные по прогнозируемому скейлингу параметров [3] интегральных схем за период 2009–2012 гг., включая ЦАП и АЦП, изменятся следующим образом: напряжение питания уменьшится с 0,9 В до 0,6 В; разброс напряжения питания не превысит 40 мВ; тактовая частота увеличится с 2,5 ГГц до 3,0 ГГц и т.д.

Исходя из этого, подтверждается актуальность построения математических моделей цифровых средств измерения, в состав которых входят различные цифровые устройства, такие как рассматриваемый ниже двухзвенный АЦП последовательного приближения.

Целью статьи является построение математической модели цифрового средства измерений с двухзвенным АЦП последовательного приближения, адекватно отражающей свойства цифрового средства измерения с учетом взаимного влияния метрологических и эксплуатационных характеристик.

Известно [2], что математическая модель средства измерения представляет собой математическое описание его особенностей и свойств, влияющих на результат измерения.

Как правило, при разработке тех или иных моделей считается, что особенности, свойства СИ определяются динамическими, шумовыми параметрами внутренних элементов и схемотехники. При этом динамические свойства средства измерения учитываются путём оценки его инерционности посредством определения длительности переходных процессов до момента времени  $T_r$  (рисунок 1), когда прибор начинает работать в установившемся (устойчивом) режиме. На рисунке 1 изображена нормированная весовая функция  $w_o(\tau)$ , с помощью которой можно получить наглядное представление о длительности переходного процесса в цифровом средстве измерения.

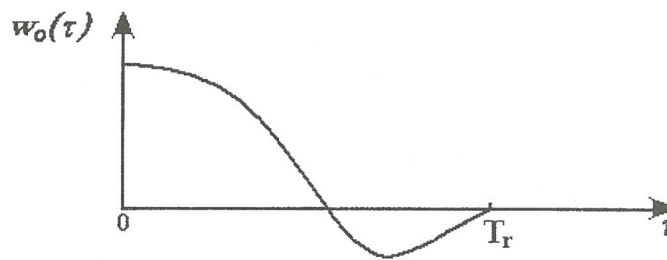


Рисунок 1 — Нормированная весовая функции  $w_0(\tau)$  СИ

В теории измерений [2, 4] наряду с нормированными весовой  $w_0(\tau)$  и переходной  $h_0(t)$  функциями, в качестве динамических математических моделей аналоговых средств измерений (АСИ) применяются еще три вида моделей. Но если их использование для отображения свойств АСИ особых проблем не вызывает, то при решении аналогичной задачи для ЦСИ возникают трудности, связанные с получением  $w_0(\tau)$  и  $h_0(t)$  в дискретной форме представления. Кроме того, особые сложности возникают при оценке взаимного влияния метрологических и эксплуатационных характеристик. Рассмотрим на примере разрабатываемой модели ЦСИ с АЦП последовательного приближения как частично устраняются отмеченные трудности.

Согласно [1, 2, 4] основной вклад в формирование погрешностей цифрового средства измерения вносят аналоговые измерительные преобразователи (АИП) и АЦП. Упрощенная структурная схема цифрового средства измерения изображена на рисунке 2.

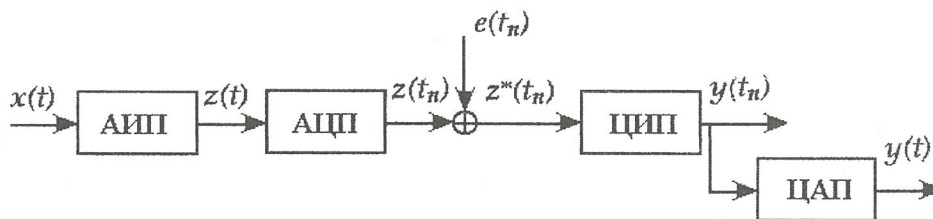


Рисунок 2 — Структурная схема цифрового средства измерения

В соответствии со структурной схемой (рисунок 2) в аналоговую часть цифрового средства измерения входят аналоговый измерительный преобразователь (АИП) и АЦП. С помощью АИП осуществляется преобразование измеряемой величины  $x(t)$  в величину  $z(t)$ , которая является входной для АЦП. Математическая модель АИП без учета аддитивной погрешности записывается в форме линейного дифференциального уравнения вида [2]

$$\sum_{i=0}^n a_i \frac{d^i z(t)}{dt^i} = k_1 \sum_{j=0}^m b_j \frac{d^j x(t)}{dt^j}, \tag{1}$$

где  $a_i, i = \overline{0, n}; b_j, j = \overline{0, m}$  — постоянные коэффициенты, причем  $a_0 = b_0 = 1$ ;  $k_1$  — коэффициент чувствительности АИП.

Безусловно, пользоваться соотношением (1) для моделирования процессов функционирования АИП очень неудобно и сложно. Такая же ситуация возникает при использовании подобных моделей других составных частей ЦСИ. В частности, при построении моделей АЦП и цифрового измерительного преобразователя (ЦИП) необходимо учитывать их коэффициенты чувствительности  $k_2, k_3$  соответственно. Поэтому с целью упрощения в [2, 4] была получена обобщенная модель ЦСИ, согласно которой результат измерения в дискретной форме записывается в виде

$$y(t_n) = k \sum_{\xi=0}^{r-1} w_{0\xi} x(t_{n-\xi}), \tag{2}$$

где  $k = k_1 k_2 k_3$  — коэффициент чувствительности ЦСИ;  $r = r_1 + r_3 - 1$ ,  $r_1, r_3$  — число интервалов преобразования АИП и ЦИП соответственно.

Уравнение (2) рассматривается как основное результирующее соотношение математической модели ЦСИ. С помощью данного уравнения выполняется операторное преобразование измеряемой величины  $x(t_{n-\xi})$ , представленной в виде последовательности, в результат измерения  $y(t_n)$ . Коэффициенты  $w_{o\xi}$ ,  $\xi = \overline{0, r-1}$  называются нормированными весовыми коэффициентами ЦСИ, а их упорядоченная совокупность – нормированной дискретной весовой функцией (НДВФ). Она совместно с коэффициентом чувствительности представляет опорную математическую модель ЦСИ в форме дискретной весовой функции, т. е.  $kw_{o\xi}$ , где  $\xi = \overline{0, r-1}$  [2].

Важное свойство НДВФ – каждая сумма сомножителей в правой части (2) равна единице и, следовательно, справедливо

$$\sum_{\xi=0}^{r-1} w_{o\xi} = 1. \quad (3)$$

Наглядная иллюстрация поведения НДВФ ЦСИ в зависимости от времени показана на рисунке 3.

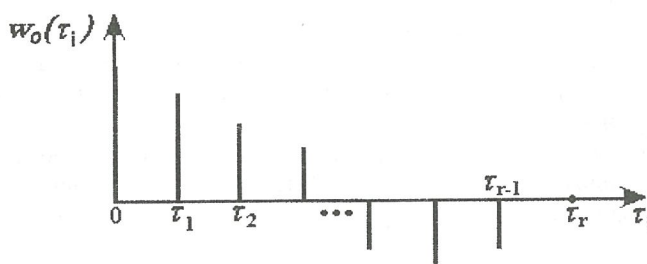


Рисунок 3 — Графическое изображение нормированной дискретной весовой функции ЦСИ

С учетом физической сущности особый интерес представляет поведение НДВФ в зависимости от погрешности ЦСИ и продолжительности времени эксплуатации. Для этого формально укрупним объект исследования, перейдя от упрощенной структурной схемы цифрового средства измерений (рисунок 2) к его представлению в виде инерционного четырехполюсника (ИЧП), процесс функционирования которого можно описать с помощью соответствующих метрологических характеристик.

Будем полагать, что основным элементом ЦСИ, формализовано выполненного в виде ИЧП, является АЦП последовательного приближения. Любой АЦП последовательного приближения можно рассматривать как некоторый многомерный набор одноразрядных двоичных квантователей (ОДК) [1]. Это позволяет нам использовать известную двухзвенную модель ОДК для оценки результатов измерений ЦСИ с учетом инерционных свойств АЦП последовательного приближения.

Двухзвенная модель АЦП последовательного приближения в первом приближении учитывает инерционные свойства ЦСИ. Она включает в свой состав ЦАП и компаратор напряжений, эквивалентно представляемые последовательно включенными звеньями первого порядка с постоянными времени  $\tau_o$  и  $\tau_k$  [2]. Передаточная функция данной модели записывается следующим образом

$$W(p) = \frac{1}{(p\tau_o + 1)(p\tau_k + 1)}. \quad (4)$$

Применим обратное преобразование Лапласа к уравнению (4), полагая  $\tau_o = \tau_k$

$$w(t) = L^{-1}\{W(p)\} = \frac{1}{\tau_o} e^{-\frac{t}{\tau_o}} (1 + t - \tau_o). \quad (5)$$

Функция  $w(t)$  является весовой функцией двухзвенного АЦП последовательного приближения.

Учитывая уровень формализации задачи для модели (2), с помощью соотношения (5) можно определить значения нормированных весовых коэффициентов  $w_{o\xi}$ ,  $\xi = \overline{0, r-1}$  ЦСИ.

Для построения математической модели на основе соотношений (2),(3) запишем коэффициент чувствительности ЦСИ в виде  $k = 1/q$ , где  $q$  – размер единицы величины, воспроизводимой ЦСИ. Известно [2, 4], что основные особенности формирования результата измерения учитываются с помощью определения значения  $q$ , а именно

$$\frac{[x]}{[x_o]} = q \neq 1, \tag{6}$$

где  $[x]$  – единица величины, которую воспроизводит ЦСИ с учетом аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности;  $[x_o]$  – величина государственного эталона.

Выражение (6) представляет математическую модель единицы величины, воспроизводимой цифровым средством измерения. Наиболее интересные и рациональные операции определения отношения  $\frac{[x]}{[x_o]}$  рассмотрены в [1, 2].

Используя опорную модель (соотношения (2), (3)), запишем оценочную модель для определения весовой функции ЦСИ, представленного в виде инерционного четырехполосника с АЦП ПП, как

$$w(t_n) = kw_o(t_n), \quad n = 0, 1, \dots, \tag{7}$$

где  $w_o(t_n) = \begin{cases} \sum_{\xi=0}^n w_{o\xi} = 1 & \text{при } n \leq r-1, \\ 0 & \text{при } n > r-1. \end{cases}$

На рисунке 4 в трехмерной системе координат представлена зависимости весовой функции ЦСИ с двухзвенным АЦП ПП, полученная с использованием соотношений (4)–(7). Расчеты выполнены для случая измерения постоянного напряжения 0,1 В (истинное значение) при следующих исходных данных: разрешающая способность проектируемого ЦСИ составляет  $D = 0,01$  мкВ; погрешность измерения постоянного напряжения для соответствующего поддиапазона изменяется в пределах от  $\pm 0,05\% \pm 3D$  до  $\pm 0,5\% \pm 3D$ ; постоянная времени звеньев первого порядка  $\tau_o = 1$  с.

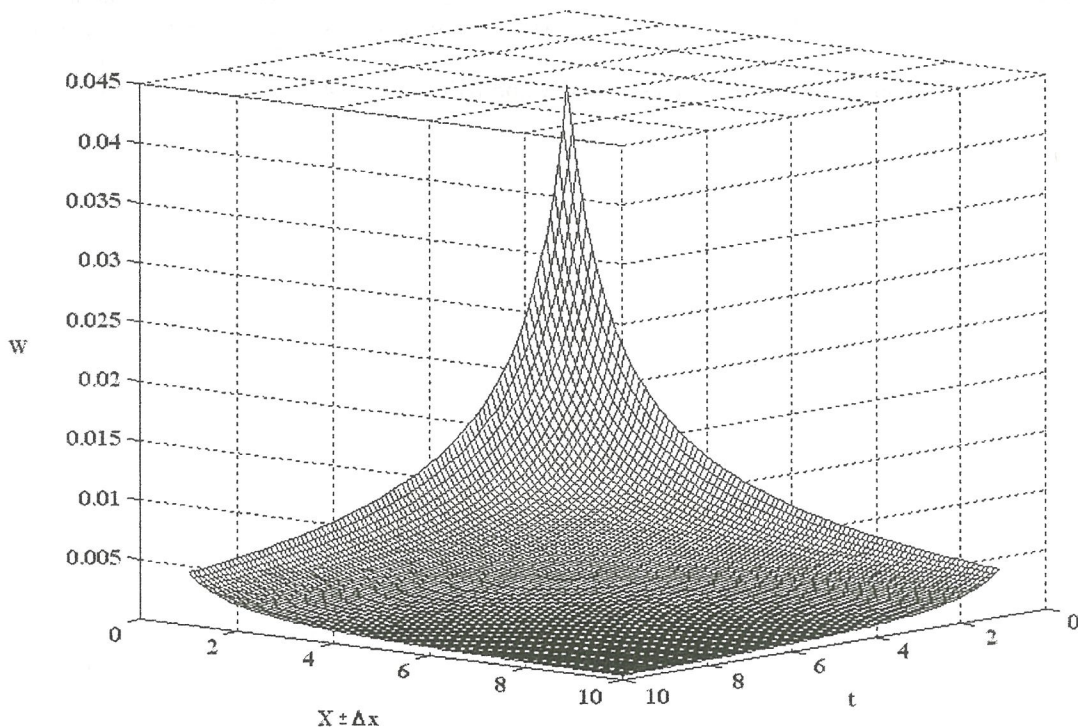


Рисунок 4 — Зависимость весовой функции ( $W$ ) ЦСИ с двухзвенным АЦП ПП от продолжительности функционирования ( $t$ ) и точности измерения величины  $[x] = X \pm \Delta x$

Результаты расчетов, выполненные с использованием основных соотношений предложенной модели, свидетельствуют об адекватном отражении существующих зависимостей между основными характеристиками и параметрами ЦСИ. В разработанной модели основное внимание уделено оценке весовой функции для установленного уровня формализации представления объекта исследования.

Дальнейшие перспективы применения модели связаны с решением задач по обоснованию предельных величин различных параметров и синтезу ЦСИ с заданными характеристиками.

**Библиографический список использованной литературы**

1. Федорков Б.Г. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение / Б.Г. Федорков, В.А. Телец; под ред. Федоркова Б.Г. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 320 с.
2. Назаров Н.Г. Метрология. Основные понятия и математические модели / Н.Г. Назаров. — М.: Высш. шк., 2002. — 348 с.
3. Шука А.А. Электроника / А.А. Шука. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008. — 752 с.
4. Назаров Н.Г. Измерения: планирование и обработка результатов / Н.Г. Назаров. — М.: Изд-во стандартов, 2000. — 304 с.

Поступила в редакцию 17.09.2010 г.

**Іванченко О.В., Кривонос М.В., Бірюков Д.Ю. Математична модель цифрового засобу вимірювань з двома ланками аналогово-цифрового перетворювача послідовних приближень**

Представлена опорна математична модель цифрового засобу вимірювань, що містить багатокроковий АЦП послідовних приближень. Отримано розрахункові співвідношення для оцінки результату вимірювань з урахуванням особливостей побудови АЦП.

**Ключові слова:** цифрові засоби вимірювань, модель АЦП з двома ланками послідовних приближень, нормована вагова функція.

**Ivanchenko O.V., Krivonos M.V., Biryukov D.Yu. A mathematical model of a digital meter with a double-hinged successive approximation analog-to-digital converter**

A basic mathematical model of a digital meter containing multistep successive approximation ADC is provided. The design equations for measurement results estimation that consider ADC construction features are found.

**Keywords:** digital meters, double-hinged successive approximation ADC, normalized weight function.