БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент США № 5.329.189.
2. Аналоговый перемножитель напряжений [Текст] : заявка на патент Российской Федерации, МПК8 H03F 3/45. / Прокопенко Н.Н., Конев Д.Н., Серебряков А.И.; № 2008147666/09; заявл. 02.12.2008.

Прокопенко Николай Николаевич
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса»
E-mail: prokopenko@sssu.ru
346500, Шевченко, 147, Шахты. Тел: 88636 22-20-37

Конев Даниил Николаевич
Email: prokopenko@sssu.ru
Тел: 88636 22-20-37

Серебряков Александр Игоревич
Email: prokopenko@sssu.ru
Тел: 88636 22-20-37

Prokopenko Nicolay Nicolaeich
State educational institution of the higher vocational training «South Russian State University of Economics and Service»
E-mail: prokopenko@sssu.ru
147, Shevchenko, Shakhti, 346500, Phone: 88636 22-20-37

Konev Danil Nicolaevich
E-mail: prokopenko@sssu.ru
Phone: 88636 22-20-37

Serebryakov Alexandr Igorevich
E-mail: prokopenko@sssu.ru
Phone: 88636 22-20-37

УДК.621.391

Е.А. Семенищев, В.И. Марчук

СГЛАЖИВАНИЕ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ОБЪЕДИНЕННОГО КРИТЕРИЯ СРЕДНЕГО КВАДРАТА КОНЕЧНОЙ РАЗНОСТИ ВТОРОГО ПОРЯДКА И МИНИМУМА СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОГО ОТКЛОНЕНИЯ

В работе представлен метод сглаживания сигналов, представленный единственной реализацией случайного процесса конечной длинны, в условиях ограниченного объёма априорной информации о функции сигнала и статистических характеристиках шума. Представлен подход к возможности использования полученного метода для сглаживания сигналов по мере поступления данных и произведён расчёт элементов необходимых для построения сглаживающего фильтра на основе полученных выражений.

Метод; процесс; фильтр.

E.A. Semenishev, V.I. Marchuk

SMOOTHING OF SIGNALS ON THE BASIS OF INCORPORATED CRITERION OF THE AVERAGE SQUARE OF THE FINAL DIFFERENCE OF THE SECOND ORDER AND THE MINIMUM OF THE SREDNEKVADRATICHESKY DEVIATION

In work the method of smoothing of the signals presented by unique realisation of casual process final are long, in the conditions of the limited volume of the aprioristic information on function of a signal and statistical characteristics of noise is presented. The approach to possibility of use of the received method for smoothing of signals in process of receipt of the data is presented and necessary calculation of elements is made for construction of the smoothing filter on the basis of the received expressions.

Method; process; filter.

В современных системах сбора, обработки и передачи данных главенствующую роль занимают интеллектуальные датчики, позволяющие производить постоянный мониторинг и передачу полученной информации на удалённый терминал. Процесс передачи сигналов сопряжён с внесением в реализацию случайной составляющей, для уменьшения которой предварительная обработка получаемых значений производится непосредственно после чувствительного элемента и передача данных к последующим системам мониторинга осуществляется в цифровом виде. Современные датчиковые системы производят оцифровку получаемых значений и очищение измерительной информации от шумовой составляющей, для последующей передачи в целях повышения помехозащищенности производится её кодирование. В связи с чем на чувствительный элемент и блок предварительной обработки накладываются высокие требования. При производстве измерительного элемента существуют технологические приделы, вследствие чего особый интерес для повышения достоверности представляют алгоритмы предварительной обработки. Чаще всего в качестве таких алгоритмов используются методы, основанные на минимизации критерия среднеквадратического отклонения или максимизации отношения сигнал/шум. Выбор метода обусловлен количеством априорной информации и решаемой задачей [1]. В условиях ограниченного объёма информации о функции сигнала и статистических характеристиках шума данная задача осложняется.

В связи с чем значительный интерес представляет использование многокритериальных методов обработки результатов измерений, представленных единственной реализацией при ограниченном объёме априорной информации о функциях полезной составляющей и шуме.

Целью работы является разработка и исследование комбинированного метода сглаживания входного сигнала, представленного единственной реализацией нестационарного случайного процесса в условиях ограниченного объёма априорной информации о функции сигнала и статистических характеристиках шума, а также исследование возможности создания устройства, реализующего полученные алгоритмы.

Пусть исходная входная реализация представляют собой дискретную последовательность значений измеряемой физической величины $Y(t_k)$, полученную в равноотстоящие моменты времени $t_k = k \cdot T$, где $k = \overline{1,n}$ ($T > 0$ – константа), n – объём выборки. Данную выборку результатов измерений можно рассматривать как реализацию случайного процесса $Y(t)$, который является аддитивной смесью полезного сигнала и шума. Упрощенная математическая модель входного сигнала представляется в виде [2]:

$$Y(t_k) = s(t_k) + \eta(t_k), \; k = \overline{1,n}. \tag{1}$$

где $s(t_k)$ – полезная составляющая; $\eta(t_k)$ – аддитивная шумовая составляющая.

Функциональная зависимость от времени $s(t_k) = s_k$ полезной составляющей ограничена. Предполагается, что аддитивный шум $\eta(t_k) = \eta_k$ имеет нормальный закон распределения, а математическое ожидание равно нулю.

Получение оценки $\bar{s}_k = \bar{s}(t_k)$ величины s_k можно интерпретировать как уменьшение дисперсии аддитивного шума η_k. В работе предлагается уменьшить дисперсию измеряемого процесса путём существенного уменьшения суммы квадратов конечных разностей второго порядка, его значений:

$$\sum_{k=1}^{n-2} \left(\bar{s}_k - 2 \cdot \bar{s}_{k+1} - \bar{s}_{k+2}\right)^2 , \tag{2}$$

При этом в качестве меры расхождения исходного и полезного сигналов используется сумма:

$$\sum_{k=1}^{n} \left(\bar{s}_k - Y_k\right)^2 . \tag{3}$$

Для определения оценок $\bar{s}_k$ будем стремиться одновременно уменьшить суммы (2 и 3). Эта цель достигается минимизацией двухкритериальных целевых функций вида [3]:

$$\varphi(\bar{s}_1, \bar{s}_2, ..., \bar{s}_n) = \alpha \sum_{k=1}^{n} (\bar{s}_k - Y_k)^2 + \sum_{k=1}^{n-2} \left(\bar{s}_k - 2 \cdot \bar{s}_{k+1} - \bar{s}_{k+2}\right)^2 , \tag{4}$$

где α – постоянные регулировочные множители.

При реализации рассматриваемых методов сглаживания, на основе имитационного моделирования были получены границы регулировочных коэффициентов при значениях $0{,}01 \le \alpha \le 4.44$.

Заметим, что целевые функции (4) непрерывны и ограничены снизу на множестве R^n, поэтому, по крайней мере в одной точке, $(\bar{s}_1, \bar{s}_2, ..., \bar{s}_n)$ достигает своего наименьшего значения.

Для нахождения точки наименьшего значения целевых функций $\varphi(\bar{s}_1, \bar{s}_2, ..., \bar{s}_n)$ (4) применим метод наискорейшего спуска [4]. Зададим точность $\varepsilon > 0$, с которой будут найдены значения $\bar{s}_1, \bar{s}_2, ..., \bar{s}_n$. В качестве начальной итерации примем $\bar{s}_k = Y_k$, $k = \overline{1,n}$. При каждом $1 \le k \le n$ зададим величину a_k, присвоив ей значение левой части k –го уравнения систем:

$$\begin{cases}(1+\alpha+\beta)\cdot\bar{s}_1-(2+\beta)\cdot\bar{s}_2+\bar{s}_3-\alpha\cdot y_1=0;\\ (5+\alpha+2\cdot\beta)\cdot\bar{s}_2-(\beta+2)\cdot\bar{s}_1-(\beta+4)\cdot\bar{s}_3+\bar{s}_4-\alpha\cdot y_2=0;\\ \bar{s}_{k-2}-(\beta+4)\cdot(\bar{s}_{k-1}+\bar{s}_{k+1})+(\alpha+2\cdot\beta+6)\cdot\bar{s}_k+\bar{s}_{k+2}-\alpha\cdot y_k=0,\quad 2<k<n-2;\\ \bar{s}_{n-3}-(\beta+4)\cdot\bar{s}_{n-2}+(\alpha+2\cdot\beta+5)\cdot\bar{s}_{n-1}-(\beta-2)\cdot\bar{s}_n-\alpha\cdot y_{n-1}=0;\\ \bar{s}_{n-2}-(\beta+2)\cdot\bar{s}_{n-1}+(\alpha+\beta+1)\cdot\bar{s}_n-\alpha\cdot y_n=0.\end{cases} \quad (5)$$

Введём величину

$$q=\alpha\cdot\sum_{i=1}^{n}a_i^2+\sum_{i=1}^{n-2}(a_i-2\cdot a_{i+1}+a_{i+2})^2. \quad (6)$$

Если $q=0$, то в точке $\bar{s}=(\bar{s}_1,\bar{s}_2,...,\bar{s}_n)$ функция φ достигает наименьшего значения. Заметим, что $\bar{a}=(a_1,a_2,...,a_n)=\frac{1}{2}grad\ \varphi(\bar{s})$ и что $q=0$ тогда и только тогда, когда $\bar{a}=\bar{0}$. В случае $q\neq 0$ функция $f(t)=\varphi(\bar{s}+t\cdot\bar{a})$ является квадратичной функцией с положительной второй производной. Решив уравнение $f'(t)=0$, найдём точку минимума для целевой функции вида (4):

$$t=\frac{\alpha\cdot\sum_{i=1}^{n}a_i\cdot(y_i-\bar{s}_i)+\sum_{i=1}^{n-2}(2\cdot a_{i+1}-a_i+a_{i+2})\cdot(\bar{s}_i-2\cdot\bar{s}_{i+1}+\bar{s}_{i+2})}{q}, \quad (7)$$

Так как в точке $\bar{s}$ производная функции φ по направлению вектора $\bar{a}$ положительна, то $f'(0)>0$; следовательно $t\neq 0$. Произведем коррекцию значений $\bar{s}_1,\bar{s}_2,...,\bar{s}_n$:

$$\bar{s}_k=\bar{s}_k+t\cdot a_k,\ k=\overline{1,n}.$$

После этого проверяем условие

$$\max_{1\le k\le n}|a_k|\le\frac{\varepsilon}{|t|\sqrt{n}}. \quad (8)$$

Если неравенство (8) выполняется, требуемая точность считается достигнутой, и расчет заканчивается. Тогда $|t\bar{a}|=|t|\sqrt{\sum_{k=1}^{n}a_k^2}\le|t|\sqrt{n}\,\underset{1\le k\le n}{MAX}|a_k|\le\varepsilon$, т.е. расстояние между двумя последними итерациями в пространстве R^n не превосходит ε. В случае невыполнения условия (8) повторяется расчет величин $q,t,\bar{s}_1,\bar{s}_2,\ldots,\bar{s}_n$ и проверка указанного условия.

Таким образом, вектор оценок $(\bar{s}_1,\bar{s}_2,...,\bar{s}_n)$ итерационно корректируется так, чтобы целевая функция $\varphi(\bar{s}_1,\bar{s}_2,...,\bar{s}_n)$ достигла своего наименьшего значения. На некотором шаге итерационного процесса выполнится условие (8) и вычисления прекращаются. Полученный вектор оценок $(\bar{s}_1,\bar{s}_2,...,\bar{s}_n)$ с заданной точностью будет являться точкой наименьшего значения целевой функции $\varphi(\bar{s}_1, \bar{s}_2, ..., \bar{s}_n)$ при заданных начальных условиях.

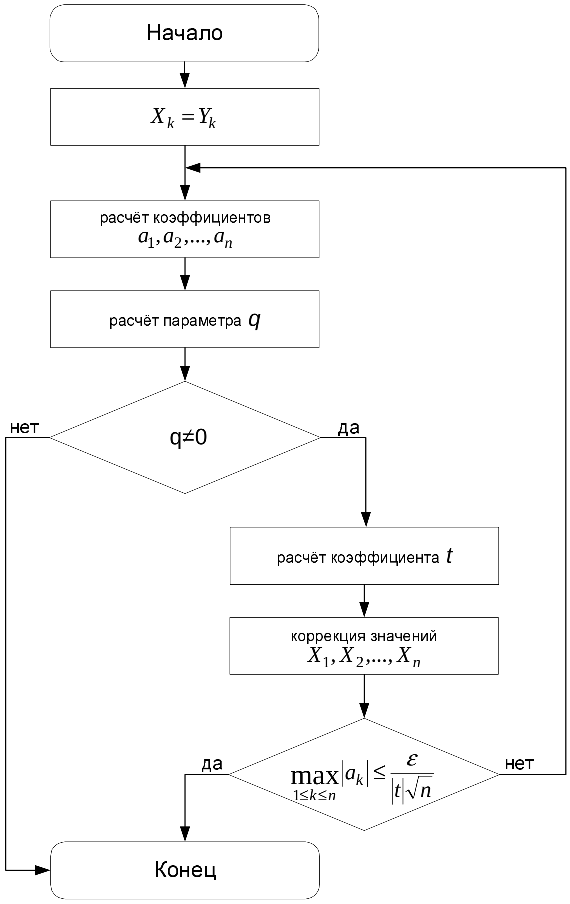


Рис. 1. Алгоритм вычисления оценок многокритериальными методами сглаживания сигналов

Для проверки эффективности многокритериального метода сглаживания цифровых сигналов, в качестве критерия используем среднеквадратическое отклонение оценок от значений входной реализации:

$$\sigma_{ош} = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} (\bar{s}_k - s_k)^2 \Big/ n-1}, \qquad (9)$$

На рис. 1 представлен алгоритм получения оценок многокритериальным методом сглаживания сигналов, основанный на минимизации целевой функции вида (4), в условиях априорной неопределённости.

Используя полученные алгоритмы, удалось реализовать метод сглаживания сигналов на основе машинного моделирования [3].

На рис. 2 представлены зависимости $\sigma_{\hat{i}\o} = f(\alpha)$, которые получены при обработке исходной реализации (1), где в качестве функции полезного сигнала S_k использовались: составная модель полезного сигнала (кривая 1), сигнал треугольной формы (кривая 2), экспоненциальная функция (кривая 3), параболическая функция (кривая 4), а также гармоническая функция (кривая 5), при этом аддитивный шум имеет гауссовский закон распределения $\eta_k \in \eta(0{,}0.1)$.

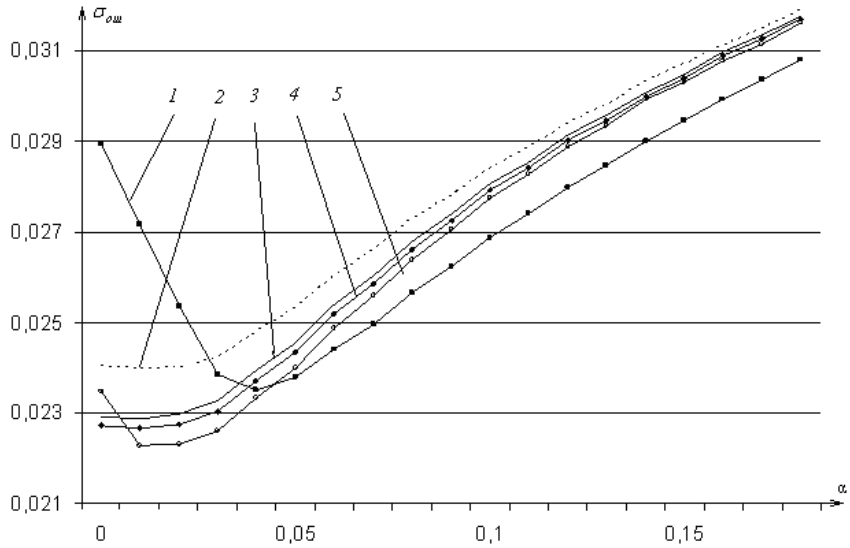


Рис. 2. З*ависимости* $\sigma_{\hat{i}\o} = f(\alpha)$

Анализ результатов, представленных на рис. 2, показал, что использование двухкритериальной целевой функции вида (4) позволяет локализовать значение параметра α на одном участке $0{,}01 \le \alpha \le 0{,}04$ (табл. 1) при обработке реализаций сигнала с различными функциями S_k, в сравнении с многокритериальной целевой функцией, полученной в работах [1, 3, 5]. Погрешность в выборе параметра α приводит к увеличению погрешности в среднем на 5%, исключение составляет оценка составной функции полезного сигнала – увеличение при этом составляет до 10%.

В табл. 1 приведены значения параметра $\alpha_{\min}$, при котором значения среднеквадратической погрешности являются минимальными, значения $\sigma_{\hat{i}\o} = f(\alpha)$. Значения $\alpha_{min\,1}$ получены для целевой функции вида 4, $\alpha_{min\,2}$, основанной на минимизации целевой функции на основе объеденного критерия минимума среднего квадрата конечной разности первого порядка и минимума выражения (3) [2].

Таблица 1

Значения параметра $\alpha_{\min}$

Сигнал / Исследуемый параметр	Составная модель полезного сигнала	Сигнал треугольной формы	Экспоненциальная функция	Параболическая функция	Гармоническая функция
$\alpha_{\min 1}$	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01
$\sigma_{îø\ 1} = f(\alpha)$	0,024	0,024	0,023	0,023	0,023
$\alpha_{\min 2}$	0,21	0,08	0,08	0,09	0,21
$\sigma_{îø\ 2} = f(\alpha)$	0,026	0,027	0,033	0,034	0,04

Таким образом, минимум среднеквадратической погрешности $\sigma_{îø} = f(\alpha)$, для целевой функции вида (4) при различных функциях полезного сигнала, достигается на значительно меньшем интервале α, чем в результатах, полученных ранее [4].

Для обработки цифровых сигналов по мере поступления данных предлагается обработка входной реализации путём нахождения оценок многокритериальной целевой функции (4) в задаваемом окне k с последующим скольжением окна l по всем значениям входной реализации.

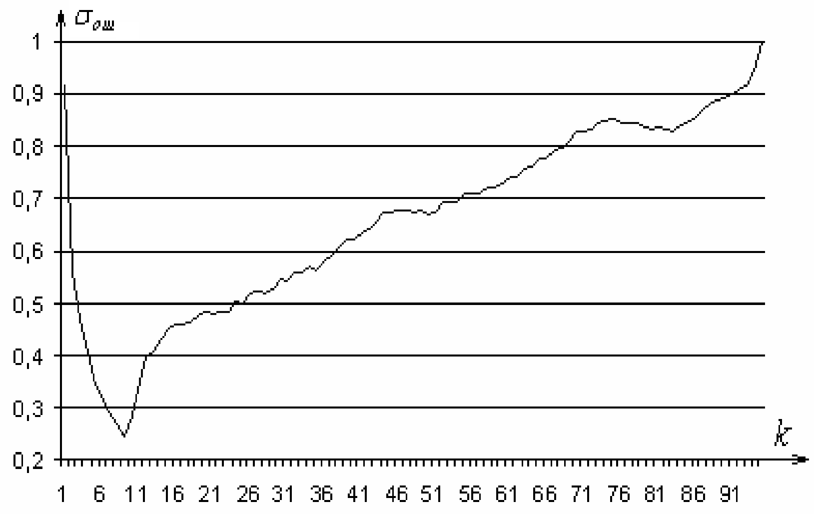
Процесс получения оценок в скользящем окне параметра $\bar{s}_k$ осуществляется параллельной обработкой исходных значений, находящихся в обрабатываемом окне, многокритериальной целевой функцией с различными параметрами обработки α. Переход между оценками, полученными с различными параметрами α, осуществляется условием:

$$\bar{s}_k = \begin{cases} \bar{s}_k(\alpha_1) & (\bar{s}_k(\alpha_1) - \bar{s}_k(\alpha_2))^2 \le p \\ \bar{s}_k(\alpha_2) & (\bar{s}_k(\alpha_1) - \bar{s}_k(\alpha_2))^2 > p \end{cases}$$

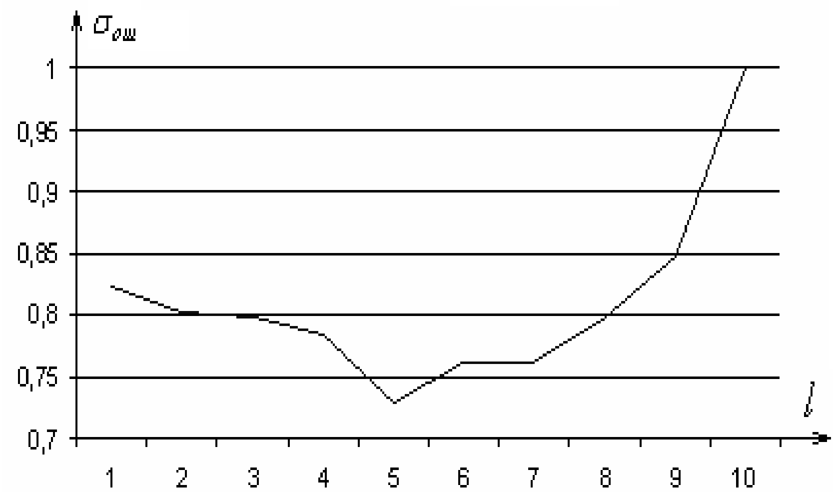
где $\bar{s}_k(\alpha_1)$, $\bar{s}_k(\alpha_2)$ – оценки входной реализации, полученные при параметрах $\alpha_1(\sigma_{ош})$ и $\alpha_2(\sigma_{ош})$, p – пороговое значение, определённое экспериментально при дисперсии аддитивной шумовой составляющей $\sigma_ш < 0{,}2$, составляет $p = 0{,}15$.

Выбор величины окна обработки k и шага перемещения окна l обусловлен минимумом среднеквадратической погрешности и минимума итерационных затрат, для получения оценок входной реализации и представлен на рис. 2 [7].

Анализ результатов, представленных на рис. 2, показал что, минимум зависимости $\sigma_{ош}(k)$ достигается при $n > 20$, $k = 10$, а $\sigma_{ош}(l)$ при $l = 5$ и слабо зависит от функции полезной составляющей s_k.



а



б

Рис. 2. График изменения значения среднеквадратического отклонения от ширины окна (а) и величины шага перемещения окна (б)

Используя полученные выражения метода сглаживания цифровых сигналов при использовании одновременно объединенного критерия (4), получен алгоритм реализации методов в условиях априорной неопределённости о функции сигнала и статистических характеристиках шума, представленный на рис. 1. Результаты расчёта требуемых ресурсов для реализаций полученного алгоритма в виде устройства сглаживания сигналов представлены в табл. 2.

Анализ результатов, представленных в табл. 2 и 3, показал, что для реализации предложенных алгоритмов в виде цифрового фильтра потребуется не менее 91 операции, часть из которых можно распараллелить, тем самым повысив скорость обработки.

Таблица 2

Результаты анализов

Выполняемая функция	Количество используемых элементов
Операций умножения	$31+(N-4)\cdot 4$
Операций сложения	$45+(N-4)\cdot 4$
Логические	2
Регистры	4
Компаратор	2

В случае реализации выражения (5) в виде матрицы количество вычислительных затрат уменьшится, результаты расчёта представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты анализов

Выполняемая функция	Количество используемых элементов
Операций умножения	32
Операций сложения	51
Логические	2
Регистры	4
Компаратор	2

В результате проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

- предложен метод сглаживания цифровых сигналов, представленных единой реализацией в условиях ограниченного объёма априорной информации о функции сигнала и статистических характеристиках шума;

- предложен подход к обработке дискретных значений входной реализации по мере поступления данных;

- произведён расчёт элементов, требуемых для реализации полученных алгоритмов в виде цифрового фильтра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Практические аспекты цифровой обработки сигналов (Practical aspects of digital signal processing) / Монография / Под ред. В.И. Марчука. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2007. – 207 с. ISBN 978-5-93834-330-6.

2. *Марчук В.И., Румянцев К.Е., Шрайфель И.С.* Двухкритериальный метод обработки результатов измерений // Авиакосмическое приборостроение. – 2005. – № 12. – С.33–35.

3. Информационные, телекоммуникационные и программные средства цифровой обработки сигналов/ Монография/ Под общ. ред. д.т.н., проф. В.И. Марчука. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2008. – 155 с. ISBN 978-5-93834-399-3.

4. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике (для научных работников и инженеров) – М., 1974. – 832 с., ил.

5. *Семенищев Е.А., Марчук В.И., Шерстобитов А.И.* Исследование эффективности модифицированного метода сглаживания результатов измерений на основе двухкритериальной целевой функции //Материалы Международной научной конференции «Статистические методы в естественных гуманитарных и технических науках». – Таганрог, 2006. – С. 35-37.

Семенищев Евгений Александрович
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса»
E-mail: sea.sea@mail.ru
346500, Шевченко, 147, Шахты. Тел: 88636 22-20-37

Марчук Владимир Иванович
E-mail: marchuk@sssu.ru
Тел: 8-918-508-82-73

Semenishev Evgeni Alexandrovich
State educational institution of the higher vocational training «South Russian State University of Economics and Service»
E-mail: sea.sea@mail.ru
147, Shevchenko, Shakhti, 346500, Phone: 88636 22-20-37

Marchuk Vladimir Ivanovich
E-mail: marchuk@sssu.ru
Phone: 8-918-508-82-73

УДК 621.317

А.И. Гавлицкий

ОСОБЕННОСТИ СХЕМОТЕХНИКИ СВЕРХНИЗКОВОЛЬТНЫХ ПРЕЦИЗИОННЫХ АНАЛОГОВЫХ ПЕРЕМНОЖИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Рассматриваются точностные параметры низковольтных аналоговых перемножителей напряжения для систем формирования, передачи, приема и обработки сигналов.

Параметр; систем; прием.

A.I. Gavlicky

EXTRA LOW-VOLTAGE PRECISION ANALOGOUS VOLTAGE MULTIPLIERS CIRCUIT TECHNIQUE FEATURES

Precision parameters of extra low-voltage analogous voltage multipliers for data processing and transmission systems are considered.

Parameter; system; transmission.

Системная интеграция смешанной системы на кристалле (СНК) выдвигает жесткие требования к аналоговой части, отвечающей за усиление, обработку и преобразование входных сигналов. Следует отметить, что при определении точ-