

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.518.3

И. А. Сидорова

НОВЫЙ ПОДХОД К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ИНТЕГРИРУЮЩИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

I. A. Sidorova

NEW APPROACH TO IMPROVEMENT OF THE INTEGRATING MEASURING TRANSDUCERS FOR INFORMATION AND MEASURING SYSTEMS

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Рассмотрены некоторые особенности анализа и синтеза интегрирующих измерительных преобразователей, относящихся к классу нелинейных динамических систем. Объектом исследования являются интегрирующие измерительные преобразователи с однобитным квантованием замкнутой структуры. Целью работы является поиск новых путей совершенствования интегрирующих измерительных преобразователей как базового элемента информационно-измерительных систем. *Материалы и методы.* Используется системный подход к рассмотрению интегрирующих измерительных преобразователей, применяется эффективный метод анализа и переноса достижений из смежных областей, основанный на общности математических моделей. *Результаты.* Предложен новый подход к решению задач совершенствования интегрирующих измерительных преобразователей для информационно-измерительных систем, согласно которому интегрирующий измерительный преобразователь рассматривается как нелинейная динамическая структура, для описания которой применяется математическая теория детерминированного хаоса. *Выводы.* Новый подход позволяет существенно расширить область поиска новых технических решений, проводить исследования свойств нелинейных интегрирующих измерительных преобразователей с использованием элементов анализа теории динамического хаоса, в перспективе использовать технические возможности по реализации сложных методов цифровой обработки сигналов и получить максимальный технический эффект при практическом использовании интегрирующих измерительных преобразователей для решения сложных инженерных задач в информационно-измерительных системах.

A b s t r a c t. *Background.* Some features of the analysis and synthesis of the integrating measuring transducers belonging to the class of nonlinear dynamic systems are considered. Integrating measuring transducers with one-bit quantization with the closed structure are an ob-

ject of researching. The purpose of this paper is to search a new ways to improvement of the integrating measuring transducers as basic element of information and measuring systems. *Materials and methods.* The systems concept to consideration of integrating measuring transducers is used, the effective method of the analysis and transfer of achievements from adjacent areas based on a mathematical models is applied. *Results.* Approach to the solution of tasks of enhancement of integrating measuring transducers for the information and measuring systems according to integrating measuring transducers is considered as nonlinear dynamic structure to which description the theory of the determined chaos is applied is offered. *Conclusions.* New approach allows to expand significantly the field of search of new technical solutions, to conduct researches of properties of the nonlinear integrating measuring transducers with use of elements of the analysis of the dynamic chaos theory, in the long term to use technical capabilities on realization the difficult methods of digital signals processing and to gain the maximum technical effect at practical use of the integrating measuring transducers for the solution of complex engineering challenges in information and measuring systems.

К л ю ч е в ы е с л о в а: интегрирующий измерительный преобразователь, информационно-измерительные системы, нелинейность, сигма-дельта модулятор, системы детерминированного хаоса.

К e y w o r d s: integrating measuring transducers, information and measuring systems, nonlinearity, sigma-delta modulator, systems of the determined chaos.

Введение

В соответствии с Государственной программой «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013–2025 годы», утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации № 2396-р от 15 декабря 2012 г., важнейшей задачей современной российской микроэлектроники является существенное сокращение отставания российской электроники и радиоэлектроники от мировых показателей (достижение уровня технологии 0,010 мкм к 2025 г.); увеличение доли отечественных радиоэлектронных изделий как на внутреннем, так и на мировом рынке радиоэлектроники (до 40 % на внутреннем рынке, 0,8 % на мировом рынке к 2025 г.); увеличение доли инновационной продукции в радиоэлектронной промышленности; рост числа отечественных и зарубежных патентов на объекты интеллектуальной собственности, полученных научными организациями и их работниками. Непрерывная тенденция повышения уровня значимости цифровых измерений, обработки информации и развитие технологий стимулирует развитие теории и дальнейшее совершенствование средств измерений. Поэтому в настоящее время в области измерительной техники и приборостроения остаются актуальными вопросы совершенствования интегрирующих измерительных преобразователей (ИИП), являющихся важнейшими элементами современных информационно-измерительных систем (ИИС).

Наибольшее распространение получили ИИП с сигма-дельта-архитектурой, реализующие алгоритм одноканального аналого-цифрового преобразования, так называемые одноканальные сигма-дельта-модуляторы (СДМ). СДМ относятся к классу нелинейных динамических систем из-за наличия в их структуре нелинейного элемента – квантователя. Отличительной особенностью СДМ являются уникальные характеристики по линейности функции преобразования, высокой разрядности в сочетании с простотой реализации по технологии «система на кристалле». Непрерывный рост рынка ИИП с сигма-дельта архитектурой подтверждает расширение сферы применения таких преобразователей в ИИС: наряду с традиционными задачами они используются в измерительных системах электрокардиографии и электроэнцефалографии, хроматографии, сейсмических исследований [1, 2].

Анализ современной отечественной и зарубежной научной литературы подтверждает, что в последние годы растет число работ, посвященных как теории, так и практике построения ИИП с сигма-дельта-архитектурой, обладающими наилучшими показателями по точности преобразования. Им посвящено большое количество научных работ, выполненных в научных школах, возглавляемых отечественными учеными В. В. Бариновым, Е. Н. Бормонтовым,

В. И. Диденко, С. В. Кондратенко, А. С. Коротковым, М. Ю. Михеевым и др. Особое место среди них занимает научная школа Э. К. Шахова. В ряде работ, в первую очередь зарубежных авторов R. Schreier, O. Feely, L. O. Chua, H. Wang Soren, Chris Dunn, Mark Sandler, для исследования СДМ предлагается использовать теорию динамического хаоса – раздел математики, изучающий методы и способы решения нелинейных уравнений [3–6].

Многие проблемы при проектировании ИИС связаны с математически сложными задачами, возникающими при описании процессов преобразования информации в ИИП и нахождении оптимальных инженерных решений по заданной совокупности технических характеристик, в первую очередь это улучшение отношения «быстродействие – точность» или «объем информации – потребляемая мощность» [7, 8]. Все более жесткие ограничения накладываются на энергоэффективность в связи с миниатюризацией и построения ИИС в виде автономных модулей [9]. Жесткие ограничения требуют совершенствования существующих и поиск совершенно новых технических и структурно-алгоритмических решений, в связи с чем возникла потребность в развитии и расширении традиционных математических понятий и методов в области нелинейных динамических систем.

Метод переноса как основной метод поиска новых технических решений на этапе синтеза ИИП

При проектировании ИИП с однобитным квантователем инженер сталкивается с такими проблемами, как многообразие динамических процессов (незатухающие динамические процессы колебательного, квазиколебательного или хаотического характера), неповторяемость фазовых траекторий, отсутствие четкой границы значений коэффициентов обратной связи (ОС) для границ устойчивости, высокая чувствительность флуктуационного шума квантования от входной величины [10]. Решение данных проблем в рамках классической теории линейных импульсных систем встречает неразрешимые трудности, связанные с тем, что ИИП относятся к классу нелинейных замкнутых структур [11, 12].

Начиная с середины 80-х гг. двадцатого столетия различными научными коллективами как в России, так и за рубежом ведутся активные исследования в области применения явления детерминированного хаоса в различных областях науки и техники. Эти исследования охватывают системы с импульсной модуляцией, радиосистемы, приложения к теории автоматического управления и регулирования, силовой преобразовательной технике, космической технике, квантовой электронике и др. [13–25].

Системы детерминированного хаоса задаются в виде нелинейной динамической системы:

$$\begin{cases} x_{k+1} = F(x_k) + \xi_k, \\ y_{k+1} = F(x_{k+1}) + \eta_{k+1}, \end{cases} \quad (1)$$

где $x_k \in R^N$ – вектор начального состояния системы; $y_k \in R^M$ – вектор выходного состояния системы; $\xi_k \in R^N$ – шумы при движении системы; $\eta_k \in R^M$ – помехи в канале наблюдения. В наиболее обобщенной форме фазовые траектории, которые описывают такую систему, представляют собой решения системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n), \\ \dots \\ \dot{x}_i = f_i(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n), \\ \dots \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n). \end{cases} \quad (2)$$

Анализ научных работ в области нелинейных систем показал, что авторы в смежных областях при исследовании нелинейных структур используют математический аппарат детерминированного хаоса, благодаря чему получены положительные результаты, ориентированные

на использование достижений современной микро- и нанoeлектроники. Поэтому основным подходом на пути совершенствования ИИП как элемента ИИС, связанным с использованием математического аппарата детерминированного хаоса, был выбран известный и эффективный принцип анализа и переноса достижений и использования элементов анализа из смежных областей на уровне формализованных математических моделей и, в первую очередь, имитационных моделей.

В области теории автоматического управления было проанализировано несколько работ, в которых предложены способы управления с помощью методики параметрического синтеза, расширяющей рабочие границы устойчивости путем смещения зон квазипериодических и стохастических режимов функционирования [13]. Исследование общих свойств систем с нелинейными фильтрами различного типа в цепи управления, вопросами анализа периодических и квазипериодических движений, устойчивости с учетом и без учета шумового воздействия на систему приведено в научной работе [14]. Комплексное исследование хаотических сигналов и методов их обработки, автоматизация инженерных расчетов нелинейных замкнутых систем автоматического управления на основе бифуркационного подхода представлено в работе [15].

В теории радиосистем и радиотехники за последние десятилетия написано большое количество научных трудов (от научных статей до докторских диссертаций и грантов), связанных с режимом детерминированного хаоса. В работах [16, 17] приводится определение детерминированного хаоса, обсуждаются его свойства, формулируются условия возникновения хаотических автоколебаний и дается радиотехническая схема генератора, которая эти условия реализует. В работе [18] показано, что построение математической модели и бифуркационных диаграмм позволяет более точно определить границу устойчивости с точки зрения возникновения детерминированного хаоса, приближая тем самым математическую модель к реальному устройству в хаотическом режиме работы.

В зарубежных работах [19–21] показано, как известные методы нелинейной динамики могут быть применены к анализу поведения СДМ для определения значений параметров, при которых возможна устойчивая работа СДМ и которые трудно получить, используя другие подходы. В работе [22] исследуется влияние хаотического режима работы на сложность модулятора, его устойчивость и производительность.

В области измерительной техники вопросы, связанные с анализом работы ИИП в составе ИИС в режиме хаотических и квазипериодических колебаний, из-за сложности математического описания встречаются лишь в отдельных отечественных [23–25] работах. Но при этом нет работ, где математический аппарат теории нелинейных систем был бы изложен как методологический инструмент для анализа динамических свойств нелинейных ИИП. По этой причине предлагается новый подход, основной тезис которого – рассмотрение ИИП как нелинейной динамической системы, для корректного описания которой необходимо использовать адекватный математический аппарат – теорию детерминированного хаоса.

Применение нового подхода к совершенствованию ИИП для ИИС

В результате анализа достижений в смежных областях проведена систематизация и выбраны инструменты для исследования динамических свойств нелинейных ИИП, положенные в основу нового подхода к решению задач совершенствования и расширения потенциальных возможностей ИИП, который объединяет необходимые элементы анализа и расчета математических моделей из теории нелинейных систем и использует результаты исследований из области измерительной техники на сегодняшний день.

В качестве математического аппарата для описания свойств ИИП используется аппарат теории детерминированного хаоса, методы спектрального и корреляционного анализа. Для исследования свойств нелинейных ИИП предлагается применять следующие инструменты анализа из теории нелинейных динамических систем: обнаружение хаотических колебаний (исследование аномальных отклонений); выделение различных хаотических режимов (исследование сценариев перехода от периодических колебаний к хаотическим и обратно); построение качественных характеристик (бифуркационных диаграмм); измерение количественных свойств (расчет устойчивости, корреляции).

Для исследуемых нелинейных систем нахождение аналитических решений в большинстве случаев невозможно, а численное моделирование является эффективным средством, но трудоемким процессом. Моделирование таких систем является возможным с использованием имитационных моделей. По этой причине была выбрана и обоснована базовая модель для исследования свойств нелинейных ИИП, удовлетворяющая следующим критериям:

- 1) базовая модель должна быть максимально простой с точки зрения расчета;
- 2) базовая модель должна отражать все основные свойства нелинейных систем детерминированного хаоса;
- 3) модель должна позволять решать практические задачи (обладать свойством конструктивности).

Как известно из теории нелинейных систем, свойства хаотических колебаний не зависят от вида нелинейности и проявляются в разностных уравнениях такого класса только с размерностью $n \geq 3$, и с увеличением размерности свойства не меняются [12]. Поэтому в качестве базовой модели согласно вышеперечисленным критериям с точки зрения практической реализации и простоты вычислений был выбран ИИП третьего порядка с однобитным квантователем, теоретически обеспечивающий абсолютную линейность функции преобразования.

На основе предложенного подхода проведем исследование свойств перемежаемости (перехода от периодических колебаний к хаотическим и обратно) и высокой чувствительности к начальным условиям на базовой имитационной модели СДМ третьего порядка. На рис. 1 представлена Simulink-модель СДМ третьего порядка, где элементы Integ1, Integ2, Integ3 имитируют работу интеграторов; Td = 1 – дискретизатор (задает шаг дискретизации); Tint1, Tint2, Tint3 – постоянные времени интеграторов, Sign выполняет однобитный квантователь.

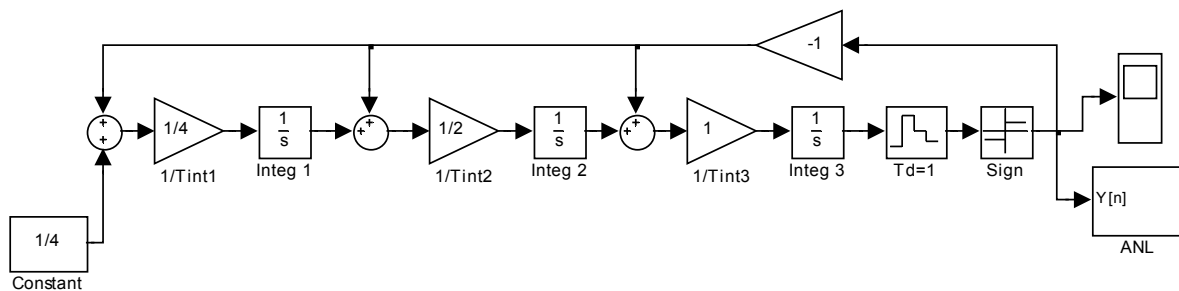


Рис. 1. Simulink-модель структуры СДМ третьего порядка

Система разностных уравнений, описывающая работу СДМ третьего порядка, имеет вид

$$\begin{cases} U_{1[n]} = U_{1[n-1]} + \varepsilon X_{[n]} - \varepsilon \lambda_1 Y_{[n-1]}, \\ U_{2[n]} = U_{2[n-1]} + \varepsilon U_{1[n-1]} - \varepsilon \lambda_2 Y_{[n-1]} - \frac{\varepsilon^2}{2!} \lambda_1 Y_{[n-1]} + \frac{\varepsilon^2}{2!} X, \\ U_{3[n]} = U_{3[n-1]} + \varepsilon U_{2[n-1]} + \frac{\varepsilon^2}{2!} U_{1[n-1]} - \varepsilon \lambda_3 Y_{[n-1]} - \frac{\varepsilon^2}{2} \lambda_2 Y_{[n-1]} - \frac{\varepsilon^3}{6} \lambda_1 Y_{[n-1]} + \frac{\varepsilon^3}{6} X, \\ Y_{[n]} = \text{sign}(U_{3[n]}), \end{cases} \quad (3)$$

где $U_{k[n]}$ – напряжение на выходе k -го интегратора в моменты времени дискретизации $t_n = nh$; h – шаг дискретизации, n – номер шага; $\varepsilon = h\tau^{-1}$ – относительная постоянная времени интегратора; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – масштабные коэффициенты обратной связи; X – входной сигнал, Y – выходной сигнал.

Блок-анализатор ANL выполняет функцию определения наличия низкочастотных периодических колебаний в выходном сигнале модулятора путем их режекторной фильтрации, т.е. подавления периодических сигналов с заданным периодом T .

Функцию режекторной фильтрации выполняет набор из k -цифровых фильтров, каждый из которых подавляет колебание с заданным периодом, кратным iT . Наличие нулевой реакции

i -го фильтра (отображается как сплошная линия на экране виртуального осциллографа) говорит о присутствии в сигнале периодического колебания с периодом iT . При добавлении смещения 10^{-9} к входному сигналу U_x периодичность нарушается и на осциллограмме (рис. 2) видно, как периодические колебания сменяются хаотическими и обратно на 2, 4, и 6 гармониках (нумерация сверху вниз), что дает возможность оценить чувствительность к начальным условиям ИИП, относящихся к классу систем детерминированного хаоса.

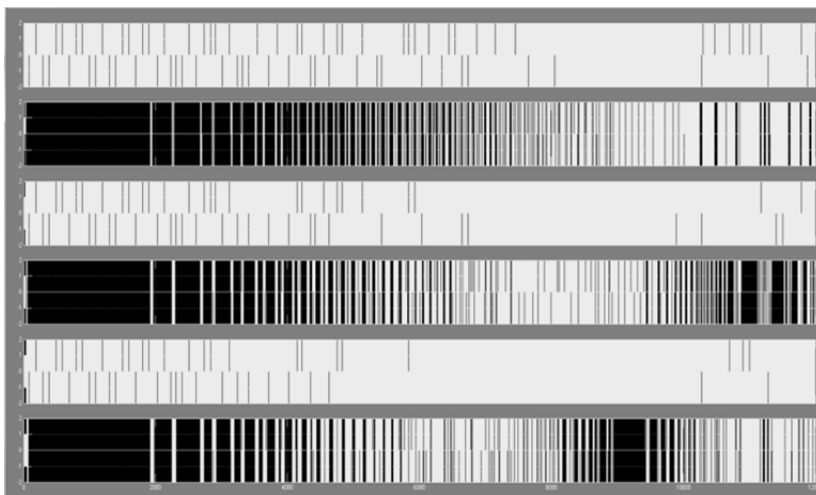


Рис. 2. Результат моделирования на этапе оценки чувствительности

На рис. 3 представлены бифуркационные диаграммы для входных сигналов $U_{x1} = 1/4$ (слева) и $U_{x2} = 1/4 + 10^{-9}$ (справа). Незамкнутая траектория на графике справа свидетельствует о наличии в системе хаотического процесса.

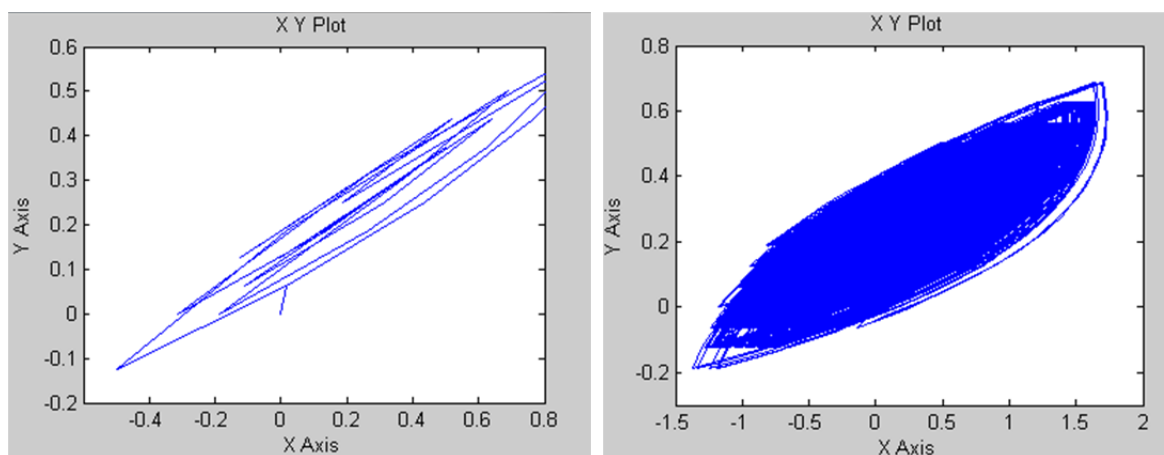


Рис. 3. Бифуркационные диаграммы выходного сигнала СДМ

Таким образом, на основе выявленных свойств представляется возможным решить практическую задачу выбора эффективного метода борьбы с низкочастотными колебаниями путем прямого численного эксперимента как для идеальной модели, так и для модели, содержащей элементы, имитирующие инструментальную погрешность элементов реальных схем.

Заключение

Проведен анализ отечественных и зарубежных работ, касающихся вопросов анализа и синтеза ИИП, работающих в режиме хаотических колебаний в составе ИИС. Сделан вывод, что адекватным решением задачи совершенствования ИИП с многократным интегрированием и нелинейной функцией преобразования является использование нового подхода для исследо-

вания свойств нелинейных ИИП, основанного на применении теории нелинейных импульсных систем и математического аппарата детерминированного хаоса, что обеспечит полноту анализа ИИП как нелинейного преобразователя. Проведено исследование свойств перемежаемости и чувствительности к начальным условиям для ИИП с однобитным квантованием, что подтвердило адекватность применения нового подхода. Из проведенного анализа сделан вывод, что наблюдается необычайно быстрый рост числа теоретических и экспериментальных работ по исследованию хаотической динамики, анализ предметной области которых дает понимание широты охвата данного направления исследований в различных областях науки и техники, где теория нелинейных систем уже несколько десятилетий эффективно используется.

Список литературы

1. Чувькин, Б. В. $\Sigma\Delta$ -аналого-цифровые преобразователи: основы теории и проектирование : моногр. / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов. – Пенза : Инф.-изд. центр ПГУ, 2009. – 188 с.
2. Сидорова, И. А. Анализ состояния и тенденций производства интегральных преобразователей информации $\Sigma\Delta$ -архитектуры / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, А. А. Коротков, И. А. Сидорова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 1 (29). – С. 26–35.
3. Сидорова, И. А. Использование теории детерминированного хаоса при моделировании интегрирующих измерительных преобразователей. / И. А. Сидорова // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. ст. III ежегод. межвуз. науч.-практ. конф. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. – С. 25–29.
4. Шустер, Г. Детерминированный хаос. / Г. Шустер. – М. : Мир, 1988. – 362 с.
5. Schreier, R. Understanding delta-sigma data converters / R. Schreier, G. C. Temes. – New Jersey : IEEE Press., 2005. – 446 p.
6. Мун, Ф. Хаотические колебания / Ф. Мун. – М. : Мир, 1990. – 311 с.
7. Чувькин, Б. В. Вопросы проектирования высокоточных сигма-дельта АЦП в составе информационно-измерительных систем / Б. В. Чувькин, И. А. Долгова, И. А. Сидорова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 3 (5). – С. 39–44.
8. Новицкий, П. В. Основы информационной теории измерительных устройств / П. В. Новицкий. – Л. : Энергия, 1968. – 248 с.
9. Сидорова, И. А. Метод повышения энергоэффективности датчиковых беспроводных систем / Б. В. Чувькин, О. В. Тужилкин, И. А. Сидорова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 3. – С. 155–158.
10. Сидорова, И. А. Анализ флуктуационных шумов нелинейных динамических систем с однобитным квантованием / Б. В. Чувькин, А. В. Селезнев, И. А. Сидорова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 3. – С. 151–154.
11. Сидорова, И. А. Анализ системы с нелинейной динамикой на примере сигма-дельта-модулятора третьего порядка / Б. В. Чувькин, И. Ю. Семочкина, И. А. Сидорова // XXI век: Итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – Пенза : Изд-во ПГТА, 2012. – № 4. – С. 182–190.
12. Сидорова, И. А. Вопросы классификации интегрирующих измерительных преобразователей в составе информационно-измерительных систем / Б. В. Чувькин, И. А. Долгова, И. А. Сидорова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 4 (14). – С. 16–22.
13. Михальченко, С. Г. Функционирование импульсно-модуляционных преобразователей в зонах мультистабильности / С. Г. Михальченко // Доклады Томского университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 1 (25), ч. 1. – С. 259–268.
14. Палей, Д. Э. Исследование динамики дискретных систем фазовой синхронизации второго порядка с нелинейным фильтром : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.12.11 / Палей Дмитрий Эзрович. – М., 1998. – 17 с.
15. Старков, С. О. Обработка и передача информации с использованием дискретных хаотических систем : автореферат дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.03 / Старков Сергей Олегович. – М., 2002. – 35 с.
16. Анищенко, В. С. Генератор Анищенко – Астахова как одна из базовых моделей детерминированного хаоса / В. С. Анищенко, В. В. Астахов, Т. Е. Вадивасова // Известия Саратовского университета. – 2005. – Т. 5, № 1. – С. 54–68.

17. Анищенко, В. С. Регулярные и хаотические автоколебания. Синхронизация и влияние флуктуаций : учебник / В. С. Анищенко, В. В. Астахов, Т.Е. Вадивасова. – Долгопрудный : Интеллект, 2009. – 312 с.
18. Антипов, О. И. Влияние учета активных потерь на детерминированный хаос в импульсном стабилизаторе напряжения инвертирующего типа / О. И. Антипов, В. А. Неганов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2007. – Т. 10, № 4. – С. 48–55.
19. Orla, Feely. Nonlinear Dynamics of Chaotic Double-Loop Sigma-Delta Modulation / Feely Orla // Department of Electronic and Electrical Engineering University College Dublin (Dublin 4, Ireland, available online 22 May 2002). – Dublin, 2002.
20. Wang, H. On the Stability of Third-Order Sigma-Delta Modulation / H. Wang. – Proc. ISCAS, 1993. – P. 1377–1380.
21. Gray, R. M. Oversampled sigma-delta modulation / R. M. Gray // IEEE Trans. Commun. – 1987, May. – Vol. 35. – P. 481–489 ; Vol. 37. – P. 588–599, 956–967.
22. Schreier, R. On the Use of Chaos to Reduce Idle-Channel Tones in Delta-Sigma Modulators / R. Schreier // IEEE Transactions on Circuits & Systems. – 1994, Aug. – Vol. 41, № 8. – P. 539–547.
23. Вигдорович, В. Н. Хаотическая составляющая шума измерительных систем как критерий их сравнения и совершенствования / В. Н. Вигдорович, А. Б. Опаричев, М. А. Каримбеков, Е. Б. Опаричев // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2010. – № 1. – С. 94–96.
24. Патрушева, Т. В. Численный анализ помехоустойчивости измерительного преобразователя на основе генератора хаоса / Т. В. Патрушева, Е. М. Патрушев, В. Н. Седалищев // Вестник югорского государственного университета. – 2013. – № 2 (29). – С. 90–95.
25. Патрушева, Т. В. Низкодобротные измерительные преобразователи, реализующие режимы детерминированных хаотических колебаний / Т. В. Патрушева, Е. М. Патрушев, В. Н. Седалищев // Ползуновский альманах. – 2015. – № 1. – С. 65–67.

Сидорова Ирина Александровна

программист,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: irina-penza@mail.ru

Sidorova Irina Aleksandrovna

programmer,
sub-department of information and computing systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.518.3

Сидорова, И. А.

Новый подход к совершенствованию интегрирующих измерительных преобразователей для информационно-измерительных систем / И. А. Сидорова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 3 (17). – С. 61–68.