

УДК 681.518.3

Б. В. Чувькин, И. А. Долгова, И. А. Сидорова

ВОПРОСЫ КЛАССИФИКАЦИИ ИНТЕГРИРУЮЩИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

B. V. Chuvykin, I. A. Dolgova, I. A. Sidorova

QUESTIONS OF CLASSIFICATION THE INTEGRATING MEASURING TRANSDUCERS AS PART OF INFORMATION-MEASURING SYSTEMS

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* Рассмотрены некоторые особенности анализа и синтеза интегрирующих измерительных преобразователей (ИИП) как базового элемента информационно-измерительных систем. Объектом исследования являются ИИП замкнутой структуры. Целью работы является классификация ИИП с точки зрения исследования флуктуационных шумов квантования. *Материалы и методы.* Использован системный подход к рассмотрению ИИП, применяется метод фасетной классификации, позволяющий оптимально разделить ИИП по группам, отличающимся определенным набором свойств. *Результаты.* Предложена классификация, представляющая собой качественный подход для исследования механизма возникновения флуктуационных шумов в цифровых ИИП замкнутой структуры. *Выводы.* Предложенная классификация позволяет при практическом использовании ИИП получить максимальный технический эффект при решении сложных инженерных задач в информационно-измерительных системах. Показана конструктивность данной классификации в задачах анализа и синтеза ИИП, а также указываются перспективные пути их совершенствования.

A b s t r a c t. *Background.* Some features of the analysis and synthesis of the integrating measuring transducers as basic element of the information measuring systems are considered. Object of research are integrating measuring transducers with closed structure. The purpose is classification of integrating measuring transducers the point of view to research the fluctuation quantization noises. *Materials and methods.* The systems concept is used to integrating measuring transducers, the facet classification method allowing to separate optimum integrating measuring transducers on groups differing in a certain property set is applied. *Results.* The classification representing high-quality approach for research of origins of fluctuation noise in digital IIP of closed structure is offered. *Conclusions.* The offered classification allows to gain in case of practical use the integrating measuring transducers the maximum technical effect of the solution complex engineering challenges. Constructibility of this classification is shown in tasks of the analysis and synthesis the integrating measuring transducers, and also perspective ways of their enhancement are specified.

К л ю ч е в ы е с л о в а: интегрирующий измерительный преобразователь, информационно-измерительные системы, нелинейность, сигма-дельта-модулятор, методы проектирования, флуктуационный шум квантования.

К e y w o r d s: the integrating measuring transducer, information measuring systems, non-linearity, sigma delta the modulator, design methods, fluctuation quantization noises.

Введение

В настоящее время в области измерительной техники и приборостроения остаются актуальными вопросы совершенствования интегрирующих измерительных преобразователей (ИИП), являющихся важнейшими элементами современных измерительных систем.

ИИП реализуют алгоритм представления непрерывных измерительных сигналов их дискретными по времени интегральными значениями и обладают такими характеристиками, как помехоустойчивость, относительная простота настройки схем, технологичность, низкая стоимость, благодаря чему они находят широкое применение при построении информационно-измерительных систем (ИИС), датчикопреобразующей аппаратуры, высокоточных сигма-дельта аналого-цифровых преобразователей (АЦП), в системах аналого-цифровой обработки аудио-видео-сигналов, в цифровых радиосистемах.

Наибольшее распространение получили ИИП, реализующие алгоритм однобитного аналого-цифрового преобразования в сочетании с алгоритмами цифровой фильтрации, получившими название «однобитные сигма-дельта-модуляторы» (СДМ). Однобитный СДМ относится к классу нелинейных динамических систем из-за наличия в его структуре нелинейного элемента – квантователя. Отличительной особенностью интегрирующих АЦП (ИАЦП), использующих СДМ в качестве промежуточного АЦП, являются уникальные характеристики по линейности преобразования, высокой разрядности в сочетании с простотой реализации по технологии «система на кристалле» (System-on-a-Chip) [1–3].

Непрерывный рост рынка преобразователей информации с сигма-дельта архитектурой подтверждается расширением сферы применения таких преобразователей: наряду с традиционными задачами они используются для решения задач электрокардиографии и электроэнцефалографии, хроматографии, сейсмических исследований и т.п. Анализ номенклатуры интегральных АЦП, выпускаемых ведущими мировыми производителями Texas Instruments, Analog Devices, Maxim Integrated Products, показал, что около 30 % составляют преобразователи с сигма-дельта архитектурой [4].

Как известно [1–3], ИИП представляют собой сложные динамические структуры, для описания которых традиционно использовался математический аппарат линейных импульсных систем. Однако для описания динамических процессов ИИП, использующих метод однобитного квантования, потребовалось расширение традиционных математических понятий и методов в области нелинейных систем [5].

Анализ современной отечественной и зарубежной научной литературы подтверждает, что в последние годы растет число работ, посвященных как теории, так и практике построения ИИП различного вида. Авторами исследуются такие вопросы, как технологические пути совершенствования, вопросы построения сложнофункциональных блоков и специальных фильтров, снижение потребляемой мощности, расширение функциональных возможностей, повышение быстродействия и устойчивости, методики проектирования и компьютерного моделирования и др. 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 [6].

В данной работе предлагается классификация ИИП замкнутой структуры с точки зрения исследования флуктуационных шумов квантования, целью которой является увеличение области поиска новых технических решений и путей совершенствования, а также известных структурно-алгоритмических решений с привлечением математических свойств из других областей науки.

1. Системный подход к анализу интегрирующих измерительных преобразователей как основному элементу ИИС

В последние годы прослеживается устойчивая тенденция усложнения цифровых методов обработки информации ИИП, цифрового управления процессом измерения, использование все более сложных математических методов, большее использование замкнутых структур с обратной связью с целью повышения точности, быстродействия и, как следствие, появление нелинейных методов обработки измерительной информации. Это порождает совершенно новый класс задач, решение которых определяет прогресс в области построения высокоэффективных ИИС. Поэтому исследование теоретических и практических проблем совершенствования ИИП замкнутой структуры является актуальной научно-технической проблемой [7].

Как было сказано выше, для измерения низкочастотных сигналов традиционными лидером среди измерительных преобразователей (ИП) системного применения является ИИП, достоинствами которых как базового элемента при построении современных ИИС являются высокая точность, низкая стоимость, технологичность, относительная простота реализации и настройки схем.

Одной из особенностей ИИС является то, что ее комплектация как единого законченного изделия из частей, выпускаемых различными заводами-изготовителями, часто осуществляется только на месте эксплуатации. Системный принцип построения ИИС обеспечивает ее гибкость по отношению к решаемым задачам благодаря тому, что различные функционально и конструктивно совместимые компоненты обладают определенной автономностью и могут использоваться в составе различных ИИС.

Применяя системный подход к исследованиям ИИП, можно значительно улучшить метрологические характеристики ИИС. При этом могут совершенствоваться структуры, элементная база, алгоритмы измерений и обработки сигналов [8].

Для этого необходимо разбить ИИС на подсистемы более низкого уровня: первичные преобразователи (датчики) физических величин в электрические сигналы, измерительные преобразователи (модуляторы), устройства цифровой обработки, устройства передачи сигнала и его регистрации (модуль формирования выходных данных), которые в свою очередь можно разбить на еще более мелкие подсистемы (рис. 1). В принципе любое техническое устройство может рассматриваться как система – вопрос стоит только в степени детализации.

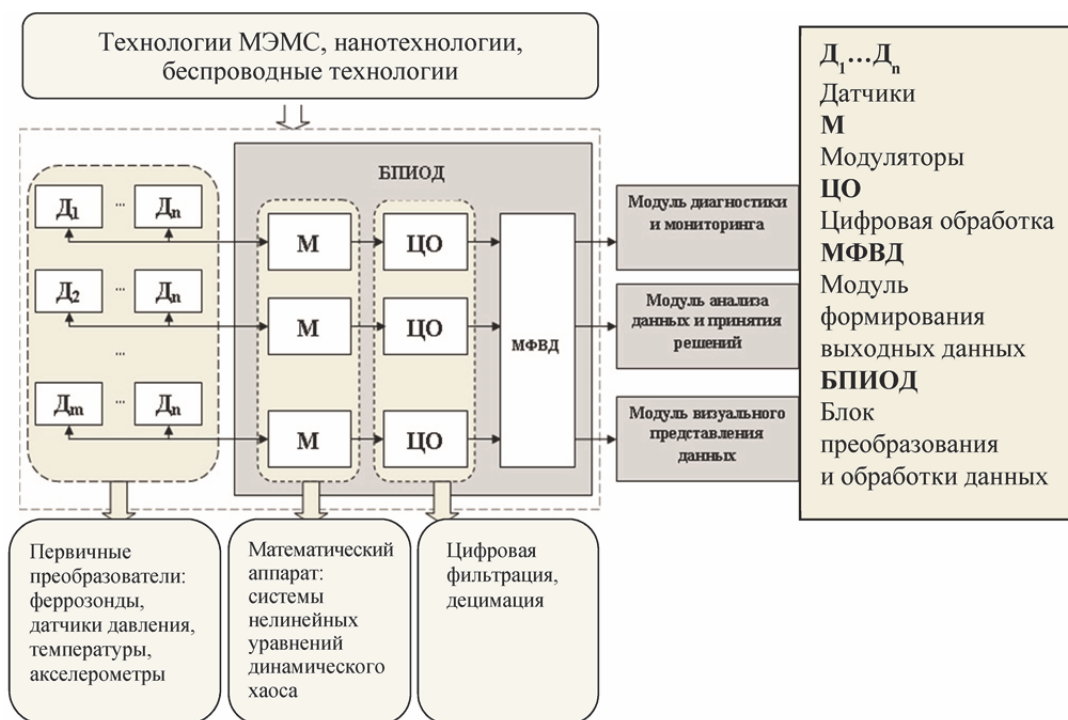


Рис. 1. Функциональная схема ИИС

Так, ИИП также можно представить как отдельную ИИС, состоящую из нескольких функциональных блоков (интеграторы, компараторы и т.д.), содержащих несколько активных (операционные усилители, транзисторы и т.д.) и пассивных (резисторы, конденсаторы и т.д.) элементов, соединенных между собой определенными связями, питающихся от общего источника питания с датчиком или независимо от него, размещенных в одном корпусе с датчиком или на определенном расстоянии от него.

Рассматривая ИИП как целостный объект, являющийся частью ИИС, можно выделить главные цели – обеспечение работоспособности, устойчивости и высокой точности преобразования информации. Таким же целям должна соответствовать и система в целом.

Системное представление ИИП в виде подсистемы, ограничение учитываемых характеристик интегральными показателями, построение обобщенной структуры ИП и другие аналогичные приемы позволяют упростить решаемые задачи и снизить размерность моделей, применяемых для описания таких систем. Использование методов системного анализа при

проектировании ИИП для ИИС позволяет повысить уровень результативности отдельных процессов.

Для ведения системного исследования предлагается использовать алгоритм действий, представленный в работе [8]. Обычно к ИИП предъявляются требования линейности, высокой точности, стабильности, максимальной чувствительности и наименьшего времени преобразования. С целью обеспечения результата преобразования в зависимости от цели измерения используют различные структуры, которые имеют свои достижимые значения точности, чувствительности, быстродействия и энергии, потребляемой от источника входного сигнала. Необходимый вид соединения определяется из условия обеспечения требуемой информационной эффективности. При этом получение максимума значения одного параметра, характеризующего эффективность, обычно сопровождается ухудшением другого и наоборот, т.е. происходит качественный обмен между параметрами. Эта взаимосвязь функционально выражается в виде гиперболической закономерности *H*-распределения (лат. *Hyperbole*) согласно теории информационно-энергетического обмена в ИП [9].

Развитие ИИС, усложнение измерительных задач, условий эксплуатации и алгоритмов функционирования (адаптивные, интеллектуальные) выдвигает новые требования к описанию ИП, входящих в состав ИИС. Уровень основных метрологических характеристик (МХ): точности, разрешающей способности, быстродействия, динамического диапазона исследуемых сигналов, – определяет эффективность ИИС. Результаты анализа основных особенностей ИИС показали, что одной из основных проблем метрологической оценки ИИС является сложность моделирования ИИС, а наличие динамических режимов измерения в ИИС приводит к необходимости исследования динамических свойств ИИП в составе системы и согласование их с объектом. Сложность структуры и многоканальность ИИС делают особенно актуальной проблему расчета МХ ИИС по МХ образующих ее компонентов и конкретно ИИП.

Применение системного подхода и системного анализа при исследовании ИИП позволяет рассматривать ИИС как систему, состоящую из подсистем, выявлять связи между подсистемами и отдельными элементами системы, исследовать возможности совмещения функций ее элементов. На основании системного подхода представляется возможным определить основные факторы, влияющие на погрешность преобразования как отдельных подсистем, так и системы в целом.

Для решения задач анализа и синтеза ИИП необходимо иметь формализованное описание основных подклассов структур ИИП, и для каждого подкласса требуется выделить и описать присущие им свойства. Это позволит решить задачу оптимального выбора структур и алгоритмов ИИП.

2. Классификация ИИП

Существует несколько подходов к классификации ИИП. Согласно [10] преобразователи информации могут быть разделены на классы по признакам, существенным с точки зрения особенности поведения в статике и динамике. Признаки, существенные для статики: наличие квантования сигналов по уровню (аналоговые и цифровые); наличие опорного канала (прямого и уравнивающего преобразования); по назначению результата сравнения.

Признаки, существенные для динамики ИИП, отражают характер процесса преобразования во времени и классифицируются по следующим признакам: наличие дискретизации по времени (непрерывные и импульсные ПИ); наличие квантования по уровню (аналоговые и цифровые); вид импульсной характеристики: с бесконечной импульсной характеристикой и конечной импульсной характеристикой.

С точки зрения структурного совершенствования основными классификационными признаками ИИП являются: наличие каналов прямого и обратного преобразования; тип структуры: замкнутая (с обратной связью) – разомкнутая; наличие преобразователей с нелинейной функцией преобразования; разрядность АЦП [11].

На основе работ [7, 12–13] были выделены основные классификационные признаки ИИП с помощью метода фасетной классификации. Такой принцип классификации позволяет нам оптимально разделить ИИП по группам, отличающимся определенным набором свойств. Каждый классификационный признак мы выбираем таким образом, чтобы он имел содержательное значение с точки зрения следующего уровня. Таким образом, уровни будут логически связаны (рис. 2).

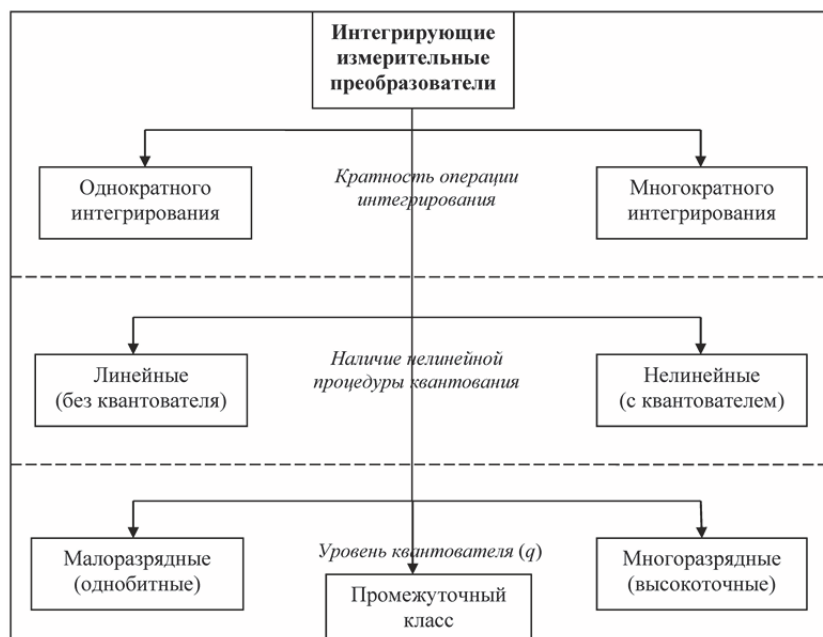


Рис. 2. Классификация ИИП

Классификационные признаки уровня выбираются исходя из содержательного смысла следующего уровня с целью его обоснования и использования. То есть они связаны между собой содержательно.

Первым классификационным признаком ИИП выберем кратность операции интегрирования. Соответственно выделим два подкласса ИИП: с однократным и многократным интегрированием. Основное свойство данного подкласса ИИП – помехоустойчивость. Таким образом, кратность интегрирования связана с подавлением как внутреннего, так и внешнего шума.

Такой выбор первого классификационного признака логически связан со смысловым содержанием второго признака: по наличию нелинейной процедуры квантования ИИП делятся на линейные и нелинейные. Поскольку каждый линейный ИИП можно представить как фильтр нижних частей, увеличение кратности интегрирования позволяет повысить степень подавления высокочастотных компонентов входного сигнала. Квантователь – источник внутреннего шума. Эффект подавления этого шума в нелинейных структурах ИИП также связан с кратностью интегрирования.

Таким образом, на первом уровне классификации ИИП разделяются по свойству фильтрации, а на втором – по фильтрации шумов квантования. Линейные ИИП отличаются от нелинейных тем, что все динамические характеристики однозначно определены и не связаны с входным сигналом. У линейных ИИП одна однозначно связанная фазовая траектория, а у нелинейных многозначная и зависит от начальных условий и параметров входного сигнала, т.е. набор фазовых траекторий (переходных характеристик) в нелинейных ИИП бесконечен. Это принципиальное различие линейных и нелинейных структур [14–17].

Третий классификационный признак делит ИИП на три подкласса:

- многоразрядные, где шум квантования соизмерим со случайной составляющей погрешности ИИП и отдельно не рассматривается, что характерно для линейных ИИП. Многоразрядные ИИП можно отнести к линейным и считать, что у них одна фазовая траектория, а шум квантования – это еще одна случайная составляющая погрешности наряду с другими видами составляющих, таких например, как тепловой шум;

- промежуточный класс, или среднеразрядные, где погрешность квантования рассматривается как доминирующая погрешность. Такие ИИП относим к нелинейным, но при этом основные свойства линейных структур сохраняются (переходной процесс и др.). В таких ИИП погрешность квантования преобладает, поэтому необходимо вводить меры его уменьшения, но после того, как мы его отфильтруем, мы можем считать, что у него так же, как у линейных, одна фазовая траектория и все его динамические свойства описываются линейными моделями и не зависят от входа;

- малоразрядные, или высокоточные, ИИП, у которых динамика переходных процессов свойственна нелинейному классу преобразователей и не может быть описана в рамках линей-

ной модели. К таким динамическим характеристикам можно отнести появление флуктуационных шумов, гармонических колебаний, высокую чувствительность к начальным условиям, бифуркации и т.д. Такие ИИП описываются математическими моделями класса детерминированного хаоса, т.е. нелинейными моделями, для того чтобы корректно решать задачи анализа и синтеза ИИП [14–17].

Конечно, если провести более грубое квантование малоразрядных ИИП, отбросив «мерцающие» кванты, уменьшив разрядность, можно привести к линейному виду, но для однобитных ИИП принципиально невозможно это сделать. Они имеют сверхвысокую чувствительность к начальным условиям, бесконечное число фазовых траекторий, хаотические колебания, которые не являются случайными, что относит их к классу хаотических систем.

Приведенные примеры показывают конструктивность данной классификации в задачах анализа и синтеза ИИП, а также указывают перспективные пути их совершенствования. Главным отличием предложенной автором классификации является качественный подход к рассмотрению ИИП с точки зрения исследования флуктуационных шумов квантования.

Заключение

Главные сложности проектирования ИИП в составе ИИС – это:

- многообразие динамических процессов, т.е. реакций ИИП на входные сигналы, отсутствие статических режимов (все режимы динамические), незатухающие динамические процессы колебательного, квазиколебательного или хаотического характера;

- сложность обеспечения устойчивой работы, поскольку отсутствуют аналитические решения описания переходных процессов, а системы разностных уравнений, которые описывают состояние элементов интеграторов и цифровые фильтры, относятся к классу математических уравнений динамического хаоса;

- основные свойства систем динамического хаоса – высокая чувствительность, неповторимость фазовых траекторий, отсутствие четкой границы значений коэффициентов с обратной связью для границ устойчивости, высокая чувствительность средне-квадратического отклонения шума квантования от входной величины (для линейных структур этой зависимости нет) и т.д.

Трудности проектирования ИИП в ИИС на этапе разработки инженерных методик и рекомендаций связаны с большим многообразием вариантов их построения как на уровне структурно-алгоритмических решений, так и в части использования свойств ИИП в ИИС.

ИИП с многократным интегрированием, относящиеся к классу нелинейных, доминируют на рынке в силу их уникальных характеристик и благодаря развитию технологий микроэлектроники (микроэлектромеханические системы, системы на кристалле), что позволило преодолеть экономический и технологический барьер, снизить стоимость и повысить быстродействие, причем граница использования непрерывно расширяется в область высоких частот, благодаря чему они вытесняют классические АЦП и ИП, которые использовались ранее. Но до настоящего времени при практическом использовании ИИП получить максимальный технический эффект при решении сложных инженерных задач можно лишь, если разработчики (инженеры) будут использовать не только практические рекомендации фирм-разработчиков аппаратуры, но и более глубоко понимать теорию этого класса ИП и использовать предложенную классификацию для поиска новых инженерных решений.

Список литературы

1. Гутников, В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах / В. С. Гутников. – Л. : Энергоатом-издат, 1987. – 186 с.
2. Шахов, Э. К. Методы построения интегрирующих АЦП : учеб. пособие / Э. К. Шахов. – Пенза : РИО ППИ, 1984. – 186 с.
3. Ашанин, В. Н. $\Sigma\Delta$ -аналого-цифровые преобразователи: основы теории и проектирование : моногр. / В. Н. Ашанин, Б. В. Чувькин, Э. К. Шахов. – Пенза : Инф.-изд. центр ПензГУ, 2009. – 188 с.
4. Ашанин, В. Н. 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.
5. 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. – 2012. – № 4. – С. 182–190.

6. Schreier, R. Understanding delta-sigma data converters / R. Schreier, G. C. Temes. – New Jersey : IEEE Press., 2005. – 446 p.
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. – 2013. – С. 39–45.
8. Громков, Н. В. Анализ и синтез измерительных преобразователей с частотным выходным сигналом для информационно-измерительных и управляющих систем : автореф. ... д-ра техн. наук / Громков Н. В. – Пенза, 2010. – 43 с.
9. Новицкий, П. В. Основы информационной теории измерительных устройств / П. В. Новицкий. – Л. : Энергия, 1968.
10. Шахов, Э. К. Интегрирующие развертывающие преобразователи напряжения / Э. К. Шахов, В. Д. Михотин. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
11. Крысин, Ю. М. Информационно-структурные принципы совершенствования средств измерений : моногр. / Ю. М. Крысин, М. Ю. Михеев, И. Ю. Семочкина, Б. В. Чувькин. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 1999. – 134 с.
12. Ашанин, В. Н. Классификация измерительных преобразователей информации непрерывно-дискретной системы гетерогенной структуры / В. Н. Ашанин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3 (19). – С. 98–104.
13. Ashanin, V. N. Development of engineering application for a choice of data converters with sigma delta architecture / V. N. Ashanin, B. V. Chuvykin, A. A. Korotkov, I. A. Sidorova // Selected, peer reviewed papers from the WCSE 2015-IPCE, April 15–17, 2015 / edited by Prof. Maode Ma. – Moscow, Russia, 2015. – P. 251–255.
14. Мун, Ф. Хаотические колебания / Ф. Мун. – М. : Мир, 1990. – 311 с.
15. Шустер, Г. Детерминированный хаос / Г. Шустер. – М. : Мир, 1988. – 362 с.
16. Sigma Delta Modulation of Chaotic Signal / Gary Ushaw // The University of Edinburgh, 1996. – 152 p.
17. Чувькин, Б. В. Методика определения низкочастотных периодических колебаний в однобитных сигналах сигма-дельта-модуляторов / Б. В. Чувькин, И. А. Долгова, И. А. Сидорова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 2 (26). – С. 174–181.

Чувькин Борис Викторович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: chuvykin_bv@mail.ru

Chuvykin Boris Viktorovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information computer systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Долгова Ирина Анатольевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-вычислительных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: Dolgova_IA@mail.ru

Dolgova Irina Anatol'evna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information computer systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сидорова Ирина Александровна

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

Sidorova Irina Aleksandrovna

postgraduate student,
sub-department of information computer systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 681.518.3

Чувькин, Б. В.

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.