

УДК 681.586

## Интеллектуальные датчики и особенности их применения в ракетно-космической технике

**Лобанов Антон Андреевич<sup>1</sup>**

— курсант кафедры телеметрических систем и комплексной обработки информации. Научные интересы: измерительные системы, искусственный интеллект, повышение точности средств телеизмерений. E-mail: tosha.lobanov03@mail.ru

**Козырев Геннадий Иванович<sup>1</sup>**

— д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры телеметрических систем и комплексной обработки информации. Научные интересы: измерительные системы, искусственный интеллект, повышение точности средств телеизмерений. E-mail: gen-kozyrev@yandex.ru

**Хомоненко Анатолий Дмитриевич<sup>1,2</sup>**

— д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры математического и программного обеспечения; профессор кафедры «Информационные и вычислительные системы». Научные интересы: информационные системы, обработка больших данных, вероятностное моделирование геоинформационных систем, генетические алгоритмы, информационная безопасность. E-mail: khomon@mail.ru

<sup>1</sup>Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Россия, 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

<sup>2</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Лобанов А. А., Козырев Г. И., Хомоненко А. Д. Интеллектуальные датчики и особенности их применения в ракетно-космической технике // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2026. № 1 (45). С. 67–80. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-67-80

**Аннотация.** Проводится комплексный анализ архитектуры, функциональных возможностей и метрологических характеристик интеллектуальных датчиков, а также разработка метода повышения точности измерений. **Цель:** комплексный анализ интеллектуальных датчиков (ИД) применительно к изделиям ракетно-космической техники (РКТ) с детальной проработкой метода повышения точности измерений на основе введения структурной избыточности. **Методы:** включают системный анализ архитектуры и функций ИД и описание процедуры текущей (в процессе эксплуатации) идентификации параметров ИД при неизвестных входных сигналах. **Результаты:** показано, что применение ИД с функциями самоадаптации и метрологического самоконтроля принципиально меняет архитектуру распределенных систем управления РКТ. Разработаны рекомендации по выбору протоколов связи для различных подсистем РКТ. **Практическая значимость:** заключается в формировании критериев выбора и проектирования ИД, а также в предложении математического аппарата для создания ИД с функцией метрологического самоконтроля, что необходимо для повышения автономности, надежности и точности измерений в изделиях РКТ.

**Ключевые слова:** измерительные системы, искусственный интеллект, самодиагностика, микропроцессорная обработка, системы на кристалле, протоколы связи, распределенные системы управления

**2.3.5** — математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки); **1.2.1** — искусственный интеллект и машинное обучение (технические науки)

## Введение

Современные сложные технические системы, в частности в ракетно-космической отрасли, функционируют в условиях воздействия многочисленных возмущающих факторов при жестких ограничениях по массогабаритным характеристикам и энергопотреблению, а также требований максимальной автономности. Обеспечение требуемого качества и надежности управления в таких условиях является критически важной задачей, которая не может быть полноценно решена с применением традиционных средств измерений.

Ключевой проблемой при создании таких систем является противоречие между ростом объемов измерительной информации и ограниченной пропускной способностью каналов связи, а также вычислительными ресурсами центральных процессоров. Традиционные датчики, представляющие лишь первичные аналоговые сигналы или «сырые» цифровые данные, становятся узким местом в системах, где критически важны быстрая локальная обработка информации, самодиагностика и адаптация к изменяющимся условиям в реальном времени.

Разрешение данной проблемы стало возможным с появлением интеллектуальных датчиков (ИД) — принципиально нового класса измерительных преобразователей, созданных благодаря бурному развитию интегральной схемотехники и микропроцессорной техники. ИД представляют собой совокупность аппаратных и программных средств, функционально объединяющих в одном корпусе первичный преобразователь, микропроцессор и средства коммуникации. Это позволяет выполнять операции по преобразованию, коррекции и повышению достоверности измерительной информации непосредственно в месте ее возникновения.

Целью статьи является комплексный анализ архитектуры, функциональных возможностей и метрологических характеристик ИД, а также оценка потенциала их применения в изделиях ракетно-космической техники (РКТ) для повышения автономности, надежности и точности измерений.

## Анализ интеллектуальных датчиков

### *Понятие и определение интеллектуального датчика*

Понятие ИД сформировалось в результате развития микроэлектроники, позволившей интегрировать в один корпус с чувствительным элементом аналого-цифровые преобразователи и микропроцессоры. В отличие от простых интегральных датчиков, где объединение элементов направлено на линеаризацию и термокомпенсацию, ИД обладают расширенным набором функций.

Согласно [1] под интеллектуальным датчиком понимается адаптивный датчик с функцией метрологического контроля. Адаптивный датчик — это датчик, параметры и/или алгоритмы работы которого в процессе эксплуатации могут изменяться в зависимости от сигналов содержащихся в нем преобразователей. В общем случае ИД предназначен для выполнения следующих задач:

- автоматическая коррекция погрешности;
- самовосстановление при возникновении единичного дефекта в датчике;
- самообучение;
- взаимодействие с техническими подсистемами для передачи информации о результатах оператору через интерфейс технических подсистем.

Таким образом, ИД — это не просто измеритель, а сложное устройство, способное к адаптации, самодиагностике и взаимодействию с системой управления [2].

### *Типы интеллектуальных датчиков*

Прямая формализованная классификация ИД в виде единого нормативного перечня в отечественной практике отсутствует. Их ключевые отличительные функции и признаки определяются основополагающим стандартом терминологии. ГОСТ устанавливает, что ИД — это устройство, выполняющее функции преобразования измеряемой величины и обладающее одним или несколькими из следующих свойств:

- способность к самоадаптации — свойство автономно изменять алгоритмы функционирования

или параметры для сохранения или улучшения характеристик при изменении внешних условий;

- способность к самокалибровке — свойство выполнять процедуру калибровки, включая корректировку градуировочной характеристики без участия оператора;

- наличие встроенной диагностики — свойство отслеживать состояние компонентов и выявлять отклонения от нормального функционирования.

На практике, исходя из данных определений, сложилась функциональная типология ИД по доминирующему дополнительному свойству: самоадаптирующиеся, самокалибрующиеся, датчики со встроенной диагностикой и комбинированные.

В области разработки бортовых радиоэлектронных комплексов специального назначения на основе внутренних стандартов и технической практики профильных организаций применяется ведомственная классификация по целевому применению и условиям эксплуатации. В ее рамках, в частности, выделяется подкласс бортовых интеллектуальных телеметрических датчиков, предназначенных для работы в составе изделий РКТ в условиях воздействия комплекса дестабилизирующих факторов.

#### **Функции интеллектуального датчика**

Функциональные возможности ИД, определяемые ГОСТ и современной практикой, включают [3–5]:

- коррекцию статических и динамических характеристик: автоматическое устранение систематических погрешностей (нелинейность, гистерезис, влияние температуры);

- самодиагностику и контроль исправности: обнаружение внутренних неисправностей, обрывов или коротких замыканий линий связи;

- вычисление вторичных параметров (например, расчет расхода жидкости или газа по перепаду давления);

- хранение данных: возможность хранить калибровочные коэффициенты, серийный номер, историю ошибок, метрологический паспорт в своей памяти;

- связь и взаимодействие: поддержка промышленных сетевых протоколов (HART, Profibus, Modbus, OPC UA) для интеграции в АСУ ТП;

- удаленную настройку и конфигурирование: дистанционное изменение диапазонов измерений, порогов срабатывания и других параметров.

ИД позволяет формировать поток данных с необходимой достоверностью на основе анализа большого числа результатов отдельных относительно недостоверных измерений.

#### **Принцип работы интеллектуального датчика**

ИД представляет собой электронное устройство, основанное на объединении чувствительных элементов, схем преобразования сигналов и средств микропроцессорной техники. Использование микропроцессоров непосредственно в составе ИД является основой для улучшения его метрологических и эксплуатационных характеристик.

Принцип работы строится на последовательном преобразовании сигнала, которое включает в себя следующие этапы:

1. Физическая величина воздействует на первичный чувствительный элемент.

2. Полученный аналоговый сигнал усиливается и фильтруется.

3. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) оцифровывает сигнал.

4. Микропроцессор обрабатывает цифровые данные по заданным алгоритмам: выполняет коррекцию погрешностей, линеаризацию, вычисления, самодиагностику.

5. Обработанная информация передается во внешнюю систему через цифровой интерфейс.

Одним из ключевых принципов интеллектуального подхода является перенос функциональной нагрузки с механических узлов на перепрограммируемые электронные и информационные компоненты.

**Вывод.** Принцип работы ИД основан на тесной интеграции измерительной и вычислительной частей в едином устройстве. Это позволяет получать первичный, зашумленный, с нелинейными преобразованиями сигнал от чувствительного элемента в виде точного, готового к использованию цифрового информационного продукта, обладающего высокой достоверностью и обогащенного данными о состоянии самого датчика.

### Структурная схема интеллектуального датчика

Структурная схема ИД варьируется в зависимости от типов первичных измерительных преобразователей. Достаточно общая развернутая структурная схема ИД представлена на рис. 1 [3].

Приведенная схема демонстрирует, что ИД является сложной микропроцессорной системой, объединяющей измерительные, вычислительные и коммуникационные функции.

#### Режимы работы интеллектуального датчика

Режимы работы являются ключевым аспектом интеллектуальности ИД, позволяя гибко управлять энергопотреблением, приоритетами и функциями. Следует назвать следующие режимы работы ИД [3, 6]:

1. Номинальный (рабочий) режим. Штатное выполнение всех измерительных и вычислительных функций с передачей данных.
2. Режим пониженного потребления. Перевод микропроцессора и периферии в состояние минимального энергопотребления с возможностью пробуждения по таймеру или команде. Критически важен для автономных систем.
3. Режим самодиагностики. Проверка исправности измерительного тракта, памяти и компонентов по команде или расписанию.

4. Режим калибровки и конфигурации. Позволяет загружать новые калибровочные коэффициенты, менять диапазоны измерений и настраивать параметры.

5. Режим тревоги (событий). Немедленная и самостоятельная отправка аварийного сообщения при превышении заданных порогов, без ожидания опроса.

6. Буферный режим (регистрации данных). Накопление данных во внутренней памяти для последующей передачи, например при отсутствии связи.

7. Резервный режим (горячий резерв). Работа в паре с другим ИД, где один активен, а второй находится в «горячем» резерве, готовый к мгновенному включению.

Эти режимы часто комбинируются, что позволяет создавать гибкие и адаптивные измерительные системы.

#### Протоколы сети интеллектуальных датчиков

Для связи ИД с системой управления используется широкий спектр проводных и беспроводных протоколов [7]:

1. Проводные протоколы:
  - Modbus: широко распространенный промышленный протокол для связи с ПЛК (программируемый логический контроллер);



Рис. 1. Структурная схема интеллектуального датчика

- HART (Highway Addressable Remote Transducer): протокол, позволяющий передавать цифровые данные поверх аналогового сигнала 4–20 мА;

- Profibus, Profinet, EtherCAT: высокоскоростные протоколы для задач автоматизации в реальном времени;

- CAN (Controller Area Network): надежный протокол, популярный в автомобильной и аэрокосмической отраслях;

- IO-Link: протокол «точка-точка» для подключения датчиков и исполнительных механизмов.

## 2. Беспроводные протоколы:

- Zigbee: для сетей с низким энергопотреблением и поддержкой Mesh-топологии;

- BLE (Bluetooth Low Energy): для передачи данных на короткие расстояния;

- LoRaWAN (Long Range Wide Area Network): для организации долгодействующих сетей с большим радиусом действия;

- WirelessHART: беспроводная версия протокола HART.

Выбор протокола зависит от требований к скорости, надежности, расстоянию, энергопотреблению и стоимости.

## **Протоколы обмена интеллектуальных датчиков**

Протоколы обмена определяют правила и форматы взаимодействия ИД с контроллерами. Различают несколько видов обмена:

- циклический обмен: регулярная передача процессных данных (измеренных значений);

- ациклический обмен: передача параметров или событий по запросу (например, для изменения настроек);

- комбинированный обмен: одновременная передача аналоговой и цифровой информации.

Ключевые стандарты [8, 9]:

- IEC 61131-9 — стандартизирует технологию ввода-вывода для датчиков и исполнительных механизмов;

- ISO/IEC/IEEE 21450:2010 — определяет интерфейс ИД и форматы электронной таблицы данных преобразователя (ЭТДП), что позволяет унифицировать описание возможностей датчика.

Реализация протоколов может быть аппаратной (специализированные контроллеры) или программной. Важным аспектом является безопасность, обеспечиваемая синхронизацией сообщений и контролем времени их поступления.

## **Метрологические характеристики интеллектуальных датчиков**

Использование ИД кардинально меняет подход к обеспечению точности и надежности измерений. Несмотря на то что точность первичного преобразователя в реальных условиях может ухудшаться (например, с 0,25 до 1% под влиянием внешних факторов), ИД существенно компенсирует повышение точности за счет внутренних вычислений. Алгоритмы позволяют [3]:

- корректировать начальное смещение и крутизну характеристики;

- линеаризовать статическую характеристику табличным методом или с помощью полиномов;

- реализовывать дифференциальные и адаптивные методы коррекции возмущений.

ИД надежнее традиционных датчиков благодаря:

- упрощению измерительного преобразователя за счет программной коррекции его недостатков;

- минимизации аналоговой части — основного источника неисправностей;

- введению систем автоматического контроля старения компонентов (перенапряжения, перегрев);

- возможности автоматической самокалибровки по встроенным или внешним эталонам.

Кроме того, ИД предоставляют доступ к богатой внутренней диагностической информации (напряжения питания, история ошибок, дата последней калибровки), что переводит техническое обслуживание на прогностический уровень.

## **Требования, предъявляемые к интеллектуальным датчикам**

При использовании в ответственных системах, таких как ракетно-космическая техника, к ИД предъявляются повышенные требования, направленные на обеспечение функциональной безопасности. Основные из них включают:

1. Избыточность и резервирование. Для ответственных функций ИД должны иметь резервные конфигурации (например, режим «горячего» резерва).

2. Функциональное разделение. Одиночная неисправность не должна одновременно затрагивать функции управления, сигнализации и аварийной остановки.

3. Безопасность отказа. Любая неисправность должна приводить систему в predetermined безопасное состояние с наименьшими последствиями.

4. Самоконтроль. ИД должны обнаруживать неисправности датчиков, аппаратного и программного обеспечения.

5. Надежное электропитание. Требуется использование энергонезависимой памяти и бесперебойных источников питания с контролем их исправности.

6. Защита от несанкционированного доступа. Изменение параметров и конфигурации должно быть доступно только подготовленному персоналу с использованием паролей или физических ключей.

7. Ремонтопригодность и защита от ошибок при монтаже. Конструкция должна обеспечивать легкий доступ для ремонта, а разъемы должны быть защищены от неправильного подключения.

8. Работа в реальном времени. Время отклика ИД должно соответствовать динамическим постоянным времени обслуживаемого оборудования.

### **Системы на кристалле (SoC)**

Современные интеллектуальные датчики все чаще строятся на основе систем на кристалле (System-on-a-Chip, SoC). SoC — это интегральная схема, которая объединяет на одном кремниевом кристалле все или большинство компонентов вычислительной системы.

Ключевые компоненты SoC для ИД [10]:

1. Процессорное ядро (central processing unit, CPU): архитектуры ARM Cortex-M (для энергоэффективных задач) или Cortex-A (для сложных ОС и алгоритмов).

2. Периферийные интерфейсы: встроенные АЦП, ЦАП, интерфейсы I2C, SPI, UART, Ethernet, CAN, а также радиомодули (Wi-Fi, BLE, LoRa).

3. Специализированные аппаратные ускорители:

- цифровые сигнальные процессоры (digital signal processor, DSP): для высокоскоростного выполнения операций цифровой фильтрации и быстрого преобразования Фурье (БПФ);

- нейропроцессоры (neural processing unit, NPU): для эффективного выполнения алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта (TinyML) непосредственно на датчике.

Преимущества SoC для ИД:

- компактность и снижение стоимости за счет интеграции;

- высокая энергоэффективность;

- рост производительности благодаря специализированным ускорителям;

- повышенная надежность (меньше внешних компонентов — меньше точек отказа).

**Вывод.** Использование SoC является естественным и прогрессивным этапом эволюции ИД. Главное их отличие от простых микроконтроллеров — в интеграции специализированных вычислительных блоков (DSP, NPU) на одном кристалле с процессором и периферией. Они характерны тем, что превращают датчик из устройства, которое лишь собирает данные, в устройство, которое способно интеллектуально их обрабатывать с высокой скоростью и малым энергопотреблением, реализуя сложные алгоритмы, включая искусственный интеллект, непосредственно «на краю» сети (edge computing).

### **Алгоритмы обработки данных в интеллектуальных датчиках**

Алгоритмы, выполняемые микропроцессором ИД, являются сутью его интеллектуальности. Их можно разделить на несколько уровней:

1. Базовые алгоритмы:

- цифровые фильтры: скользящее среднее (для сглаживания), медианный фильтр (для подавления импульсных помех), фильтр Калмана (для оптимальной оценки состояния в условиях шума);

- калибровка и компенсация: линейная калибровка (коррекция смещения и усиления), термокомпенсация (учет влияния температуры).

2. Алгоритмы среднего уровня:

- пороговая обработка с гистерезисом: для обнаружения событий и предотвращения «дребезга»;
- сжатие данных: дельта-кодирование, алгоритм «поворотной двери» (для снижения объема передаваемой информации);
- расчет производных величин (например, вычисление среднеквадратического значения (RMS) вибрации из данных акселерометра);
- быстрое преобразование Фурье: для перевода сигнала в частотную область (вибродиагностика, анализ гармоник).

Эти алгоритмы позволяют ИД не просто собирать данные, но и извлекать из них ценную информацию, принимая предварительные решения на месте.

**Особенности применения интеллектуальных датчиков в ракетно-космической технике**

В космической отрасли ИД решают задачу перехода от аналоговых и ручных методов сбора данных к цифровым, сетевым и интеллектуальным решениям. Это позволяет снизить массу и энергопотребление кабельной сети, повысить надежность данных, разгрузить центральный бортовой компьютер и обеспечить высокий уровень автономности аппарата.

**Основные подсистемы бортовой аппаратуры и использование в них ИД**

1. Система терморегулирования (СТР):

- задача: поддержание температурного режима;
- ИД: умные датчики температуры;
- функции: линеаризация и температурная компенсация, самодиагностика на обрывы, самостоятельный мониторинг пороговых значений, цифровая фильтрация помех.

2. Двигательная установка (ДУ) и система подачи топлива:

- задача: управление тягой, контроль расхода и давления;
- ИД: датчики давления, расходомеры, датчики положения клапанов;
- функции: коррекция показаний по температуре, вычисление массового расхода по перепаду давления, контроль герметичности по динамике изменения давления.

3. Система энергопитания (СЭП):

- задача: контроль состояния источников энергии;
- ИД: датчики тока, напряжения, контроля состояния аккумуляторов;
- функции: мониторинг состояния аккумуляторов, точное определение уровня заряда, прогнозирование отказов на основе анализа тенденций.

4. Система ориентации и стабилизации (СОС):

- задача: определение и поддержание положения ракеты или космического аппарата в пространстве;
- ИД: умные гироскопы, акселерометры, звездные датчики;
- функции: компенсация собственного дрейфа, слияние данных с нескольких сенсоров в инерциальном измерительном блоке (IMU) для вычисления ориентации, автоматическая калибровка в полете.

5. Система управления и контроля полезной нагрузки:

- задача: управление научными приборами и служебными системами;
- ИД: датчики положения антенн, солнечных батарей, датчики состояния оптики;
- функции: первичная обработка больших массивов научных данных на месте для экономии трафика, участие в адаптивном контуре управления (например, наведение антенны).

Конкретные решаемые задачи:

- повышение отказоустойчивости: система собственной реконфигурации при отказе одного ИД, используя данные соседних;
- снижение затрат на запуск: цифровые шины (CAN, SpaceWire) заменяют тяжелые жгуты аналоговых проводов;
- автономность: ИД самостоятельно реагирует на критические изменения (например, скачок давления), не дожидаясь команды с Земли;
- упрощение модернизации: ввод нового датчика в цифровую сеть значительно проще прокладки новых аналоговых линий.

**Анализ выбора протоколов для различных подсистем РКТ**

Для системного выбора протоколов связи при проектировании распределенных измери-

тельных систем на базе ИД разработана сравнительная характеристика (табл. 1), учитывающая специфические требования ракетно-космической техники.

1. Для критических систем (ДУ, система отделения ступеней):

- CAN — оптимален для распределенных систем управления с требованием детерминированного времени отклика;
- MIL-STD-1553 — для систем с повышенными требованиями к отказоустойчивости.

2. Для высокоскоростных систем:

- SpaceWire — выбор для научной аппаратуры с высокими потоками данных;
- EtherCAT — для сложных систем управления с жесткими временными требованиями.

3. Для вспомогательных систем:

- WirelessHART — для датчиков на подвижных элементах конструкции;
- LoRaWAN — для наземной инфраструктуры сопровождения.

**Вывод.** Применение интеллектуальных датчиков в изделиях РКТ является не просто техническим усовершенствованием, а стратегической необходимостью. Они трансформируются из пассивных источников данных в активные узлы бортовых систем, берут на себя значительную долю функций по обработке информации, диагностике и локальному управлению. Это краеугольный камень для создания полностью автономных, надежных и долговечных космических аппаратов, способных выполнять сложные миссии в условиях значительного удаления от Земли.

Таблица 1

Сравнительный анализ протоколов связи

Протокол	Скорость передачи	Дальность, м	Энергопотребление	Помехозащищенность	Применение в РКТ	Преимущества
						Недостатки
CAN	1 Мбит/с (CAN FD — до 8 Мбит/с)	до 40	Низкое	Высокая	Системы управления двигателем, топливные системы	Высокая надежность Низкая задержка Ограниченная дальность
SpaceWire	2–400 Мбит/с	до 10	Среднее	Высокая	Высокоскоростные научные приборы, системы ориентации	Экстремальная скорость Стандарт для космических применений Высокая стоимость
MIL-STD-1553	1 Мбит/с	до 300	Среднее	Очень высокая	Военные космические аппараты, критичные системы управления	Доказанная надежность Поддержка горячего резерва Высокая сложность
EtherCAT	до 100 Мбит/с	до 100	Среднее	Высокая	Системы управления полезной нагрузкой	Детерминированное время отклика Гибкая топология Сложность реализации
WirelessHART	250 кбит/с	до 100	Низкое	Средняя	Датчики вращающихся элементов, системы мониторинга	Отсутствие кабелей Self-organizing network Уязвимость к помехам
LoRaWAN	0,3–50 кбит/с	до 10 000	Ультранизкое	Высокая	Наземные телеметрические системы, мониторинг развертываемых элементов	Экстремальная дальность Минимальное энергопотребление Низкая скорость

**Совершенствование точностных характеристик измерительных преобразователей на базе интеллектуальных датчиков**

*Метод оперативной идентификации параметров структурно-избыточного датчика с применением предварительного функционального преобразования*

Рассмотрим измерительную систему, в которой функция преобразования основного канала структурно-избыточного датчика (СИД) аппроксимируется линейным полиномиальным уравнением:

$$y_1(t) = a_0(\xi) + a_1(\xi)x(t), \tag{1}$$

где  $x(t)$  — входная измеряемая величина;  
 $y_1(t)$  — выходной сигнал основного измерительного канала;  
 $a_0(\xi), a_1(\xi)$  — коэффициенты статической характеристики, подверженные влиянию вектора неконтролируемых дестабилизирующих факторов  $\xi(t)$ .

Если принять за основу номинальные (паспортные) значения коэффициентов  $a_{0н}$  и  $a_{1н}$ , то реальные параметры удобно представить как совокупность номинальной составляющей и отклонения:

$$a_0(\xi) = a_{0н} + \Delta a_0(\xi); a_1(\xi) = a_{1н} + \Delta a_1(\xi), \tag{2}$$

где  $\Delta a_0(\xi)$  характеризует аддитивную составляющую погрешности (смещение нуля), а  $\Delta a_1(\xi)$  — мультипликативную составляющую (вариацию чувствительности), приведенные к выходу.

Для создания избыточности используется дополнительный канал, осуществляющий предварительное функциональное преобразование (ПФП) входного сигнала по степенному закону с показателем  $m$ . Его статическая характеристика имеет вид:

$$y_2(t) = a_0(\xi) + a_1(\xi)x^m(t). \tag{3}$$

Наблюдаемые выходные сигналы  $y_1(t)$  и  $y_2(t)$  образуют систему двух уравнений (1) и (3) с тремя неизвестными:  $a_0(\xi), a_1(\xi)$  и  $x(t)$ . Для разрешимости системы необходимо третье уравнение, которое учитывает стохастическую природу сигналов (наличие шума  $\mu(t)$ ). В качестве такого уравнения выступает регрессионная связь между выходными сигналами каналов:

$$y_2(t) = b_0 + b_1 y_1(t) + \dots + b_m y_1^m(t). \tag{4}$$

Здесь коэффициенты  $b_0, b_1, \dots, b_m$  идентифицируются путем обработки временных реализаций

$$[y_2(t_i), y_1(t_i)], i = 1, 2, \dots, N, N > m + 1$$

с использованием метода наименьших квадратов (МНК).

Для установления связи между коэффициентами регрессии  $b_i$  и физическими параметрами датчика  $a_0(\xi)$  и  $a_1(\xi)$  выразим  $x(t)$  из (1) и подставим в (4):

$$y_2(t) = a_0(\xi) + \frac{(y_1(t) - a_0(\xi))^m}{a_1^{m-1}(\xi)}. \tag{5}$$

Применяя к выражению (5) формулу бинома Ньютона, раскладываем его в ряд:

$$\hat{b}_0 = \hat{a}_0 + \frac{(-1)^m a_0^{\hat{m}}}{a_1^{\hat{m}-1}}; \hat{b}_i = \frac{(-1)^{m-i} C_m^{m-i} a_0^{\hat{m}-i}}{a_1^{\hat{m}-i}}, \tag{6}$$

где  $C_m^{m-i}$  — биномиальный коэффициент,  $i = 1, \dots, m$ .

Полученное соотношение (6) позволяет выразить оценки коэффициентов регрессии через искомые параметры основного канала:

$$\begin{cases} \hat{b}_j = f_j(\hat{a}_0, \hat{a}_1), j \neq k, 0 \leq j \leq m, 0 \leq k \leq m. \\ \hat{b}_k = g_k(\hat{a}_0, \hat{a}_1) \end{cases} \tag{7}$$

Таким образом, вычислив по экспериментальным данным оценки коэффициентов  $b_i$ , можно решить систему (7) и найти оценки  $\hat{a}_0(\xi)$  и  $\hat{a}_1(\xi)$ . Например, в частном случае для квадратичного преобразования ( $m = 2$ ) система (7) приобретает вид [11]:

$$\hat{b}_0 = \hat{a}_0 + \frac{\hat{a}_0^2}{\hat{a}_1}; \hat{b}_1 = -\frac{2\hat{a}_0}{\hat{a}_1}; \hat{b}_2 = \frac{1}{\hat{a}_1}.$$

Решение этой системы относительно параметров датчика находится аналитически:

$$\hat{a}_1 = \frac{1}{\hat{b}_2}; \hat{a}_0 = -\frac{\hat{b}_1}{2\hat{b}_2}.$$

Следовательно, идентифицировав коэффициенты  $b_i$  регрессионной модели (4), можно определить текущие значения  $a_0(\xi)$  и  $a_1(\xi)$  для основного канала СИД. Подставляя их в исходное уравнение (1), получаем уточненную оценку входного сигнала:

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\hat{a}_1(\xi)} [y_1(t) - \hat{a}_0(\xi)]. \tag{8}$$

Как следует из (2), данная процедура обеспечивает автоматическую коррекцию как аддитивной, так и мультипликативной составляющих погрешности.

Важным условием корректности идентификации является выбор интервала наблюдения  $T_n = t_N - t_1$ . Длительность интервала должна быть достаточной для накопления данных, но при этом гарантировать квазистационарность параметров  $a_0(\xi)$  и  $a_1(\xi)$  (их неизменность в течение цикла измерения). Точность оценивания  $\hat{b}_i$  и, как следствие,  $\hat{a}_0(\xi)$ ,  $\hat{a}_1(\xi)$  повышается с увеличением динамической вариабельности сигналов  $y_1(t)$  и  $y_2(t)$ , что способствует снижению обусловленности ковариационной матрицы МНК-оценок.

**Архитектура интеллектуального датчика со структурной избыточностью**

Вычисленное по формуле (8) значение  $\hat{x}(t)$  представляет собой результат измерения с повышенной точностью. Оно может быть принято в качестве опорного (виртуального эталона) при реализации функций метрологического самоконтроля. Для сравнения: результат, полученный с использованием только номинальных коэффициентов без коррекции, выглядит следующим образом:

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\hat{a}_1(\xi)} [y_1(t) - \hat{a}_0(\xi)].$$

Согласно [1], ИД обязан выполнять метрологический самоконтроль, то есть оценивать собственную метрологическую исправность и присваивать статус измерительной информации. Упрощенная структура такого минимально-избыточного ИД, функционирующего в условиях воздействия дестабилизирующих факторов  $\xi(t)$  и шумов  $\mu(t)$ , представлена на рисунке 2 [12].

В состав устройства входят: измерительные каналы (ИК), аналого-цифровые преобразователи (АЦП), постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) для хранения номинальных данных и вычислительное устройство (ВУ), реализующее алгоритмы идентификации и коррекции.

Необходимым условием состоятельности оценок  $\hat{a}_0(\xi)$  и  $\hat{a}_1(\xi)$  при априорно неизвестном входном сигнале  $x(t)$  является невырожденность информационной матрицы Фишера, формируемой при МНК-оценивании коэффициентов  $b_0, \dots, b_m$  модели (4).

В процессе самодиагностики вычислительное ядро ИД может вычислять и сравнивать с установленными допусками следующие диагностические признаки:

- абсолютную  $\Delta x$  или среднеквадратическую  $\sigma_x$  погрешности измерения;
- текущие значения дрейфа нуля  $\Delta a_0$  и чувствительности  $\Delta a_1$ ;
- величину остаточной погрешности расчета  $\hat{x}(t)$ .

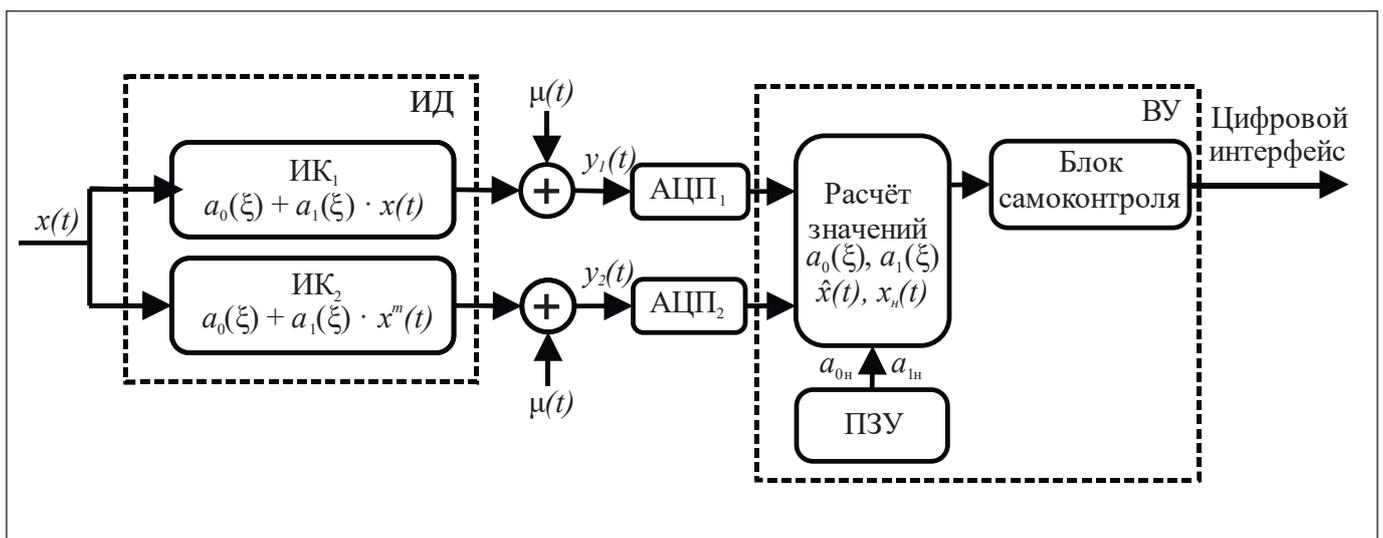


Рис. 2. Функциональная схема интеллектуального датчика с минимальной структурной избыточностью

На рис. 3 представлены результаты моделирования, отражающие зависимость приведенной среднеквадратической погрешности  $\gamma_x = \sigma_x / Lx$  оценки входного сигнала  $x(t)$ , где  $Lx$  — диапазон измерений сигнала  $x(t)$ , от уровня шума  $\gamma_{ш} = \sigma_{ш} / Lx$  и порядка нелинейности  $m$  в дополнительном канале. Для наглядности данные представлены в логарифмическом масштабе.

Анализ характеристик показывает, что форма и спектральный состав сигнала  $x(t)$  оказывают незначительное влияние на точность идентификации. Ключевым требованием является обеспечение относительного изменения сигнала  $\Delta / L \geq 0,01$  (1%) за время наблюдения  $T_n$ . Моделирование подтверждает, что оптимальной с точки зрения точности является степень нелинейности  $m = 2$ . При  $m > 2$  наблюдается ухудшение обусловленности информационной матрицы Фишера, что приводит к резкому росту погрешности оценивания, перекрывающему потенциальный выигрыш от увеличения асимметрии операторов основного и дополнительных каналов.

**Заключение**

Проведенный комплексный анализ убедительно демонстрирует, что ИД представляют собой не просто эволюционное развитие измерительной техники, а качественно новый подход к построению распределенных систем управления. Современные тенденции развития ИД указывают

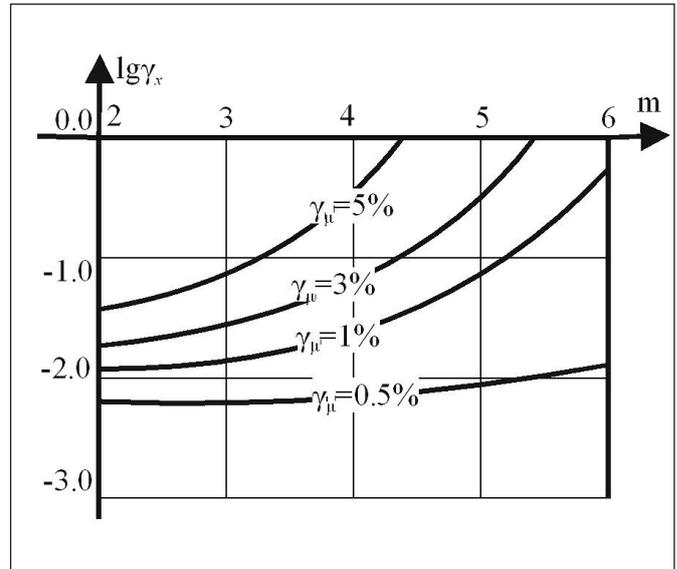


Рис. 3. Влияние уровня шума и порядка нелинейности ПФП на результирующую погрешность измерений

на их тесную интеграцию с технологиями искусственного интеллекта и системами на кристалле. В процессе трансформации ИД из простых измерительных устройств в активные узлы распределенных систем они становятся системообразующим фактором для современных и перспективных комплексов управления. Требования к ИД в ответственных применениях сводятся к трем основным принципам: безопасность отказа, устойчивость к ошибкам и несанкционированному доступу, максимальная самостоятельность в диагностике и устранении последствий сбоев.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

- ГОСТ Р 8.673-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения = State system for ensuring the uniformity of measurements. Intelligent sensors and intelligent measuring systems. Basic terms and definitions: национальный стандарт Российской Федерации: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2009 г. № 1098-ст; дата введения: 2010-12-01. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.
- Белозубов Е. М., Васильев В. А., Чернов П. С. Метрологический самоконтроль интеллектуальных датчиков измерительных и управляющих систем // Измерительная техника. 2018. № 7. С. 11–17.
- Телеметрия: учебник / А. И. Лоскутов [и др.]; под общ. ред. А. И. Лоскутова. СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2017. 343 с.
- Элементы концепции построения интеллектуальных систем мониторинга и контроля изделий ракетно-космической техники и объектов наземно-космической инфраструктуры / А. Г. Дмитриенко [и др.] // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 2 (24). С. 5–13. DOI: 10.21685/2307-5538-2018-2-1.

5. Минигалиев Г. Б., Долганов А. В. Выбор контроллера управления и интеллектуальные датчики: учебное пособие. Нижнекамск: Нижнекамский химико-технологический институт, 2015. 136 с.
6. ГОСТ Р МЭК 60770-3-2016. Датчики для применения в системах управления промышленным процессом. Часть 3. Методы оценки характеристик интеллектуальных датчиков = Transmitters for use in industrial-process control systems. Part 3. Methods for performance evaluation of intelligent transmitters: национальный стандарт Российской Федерации: введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 1 июня 2016 г. № 466-ст: дата введения: 2017-04-01. М.: Стандартинформ, 2016. 58 с.
7. Васильев В. А., Чернов П. С. Интеллектуальные датчики, сети датчиков и цифровые интерфейсы // Измерительная техника. 2012. № 10. С. 3–6.
8. IEC 61131-9:2022. Programmable controllers — Part 9: Single-drop digital communication interface for small sensors and actuators (SDCI). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2022. 677 p.
9. ISO/IEC/IEEE 21450:2010. Information technology — Smart transducer interface for sensors and actuators — Common functions, communication protocols, and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) formats. Geneva: International Organization for Standardization, 2010. 325 p.
10. Беляев А. А., Волобуев П. С. Проектирование систем на кристалле с программируемой архитектурой: учебное пособие. М.: НИУ МИЭТ, 2018. 135 с.
11. Козырев Г. И., Юдицких Е. О., Усиков В. Д. Повышение точности телеметрических датчиков на основе использования принципа многоканальности // Вестник метролога. 2023. № 3. С. 15–23.
12. Синтез интеллектуальных датчиков на основе введения минимальной структурной избыточности / Г. И. Козырев [и др.] // Измерительная техника. 2020. № 11. С. 22–27.

Дата поступления: 20.02.2026

Решение о публикации: 24.02.2026

## The Use of Intelligent Sensors in Space and Rocket Technology

**Anton A. Lobanov**<sup>1</sup>

— Cadet of the Department of Telemetry Systems and Integrated Information Processing. Research interests: measuring systems, artificial intelligence, improving the accuracy of telemetry. E-mail: tosha.lobanov03@mail.ru

**Gennady I. Kozyrev**<sup>1</sup>

— Dr. Sci. in Engineering, Full Professor, Professor of Department of Telemetry Systems and Integrated Information Processing. Research interests: measuring systems, artificial intelligence, improving the accuracy of telemetry. E-mail: gen-kozyrev@yandex.ru

**Anatoly D. Khomonenko**<sup>1,2</sup>

— Dr. Sci. in Engineering, Full Professor, Professor of the Department of Mathematical and Software Engineering; Professor of the Information and Computing Systems Department. Research interests: information systems, big data processing, probabilistic modelling of geographic information systems, genetic algorithms, information security. E-mail: khomon@mail.ru

<sup>1</sup>Mozhaisky Military Aerospace Academy, 13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, Russia, 197198

<sup>2</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky ave., Saint Petersburg, Russia, 190031

**For citation:** Lobanov A. A., Kozyrev G. I., Khomonenko A. D. The Use of Intelligent Sensors in Space and Rocket Technology, *Intellectual Technologies on Transport*, 2026, no. 1 (45), pp. 67–80. DOI: 10.20295/2413-2527-2026-145-67-80

**Abstract.** *This paper presents a comprehensive analysis of the architecture, functional capabilities, and metrological properties of intelligent sensors, and proposes a method to enhance measurement accuracy. **Purpose:** to perform an in-depth analysis of intelligent sensors (IS) in relation to rocket and space technology (RST) products, and develop a detailed approach for improving measurement accuracy via the introduction of structural redundancy. **Methods:** a systematic analysis of IS architectures and functionalities was undertaken, together with formulation of a procedure for real-time identification of IS parameters during operation under unknown input signals. **Results:** it has been demonstrated that the integration of IS featuring self-adaptation and metrological self-monitoring fundamentally alters the architecture of distributed RST control systems. In addition, recommendations have been developed for selecting communication protocols appropriate to various RST subsystems. **Practical significance:** the establishment of criteria for the selection and design of IS, along with the introduction of a mathematical framework for creating IS with metrological self-monitoring function to enhance the autonomy, reliability, and measurement accuracy of RST products.*

**Keywords:** *measurement systems, artificial intelligence, self-diagnostics, intelligent processing, system on a chip, communication protocols, distributed control systems*

## REFERENCES

1. GOST R 8.673—2009. Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmereniy. Datchiki intellektualnye i sistemy izmeritelnye intellektualnye. Osnovnye terminy i opredeleniya [GOST R 8.673—2009. State system for ensuring the uniformity of measurements. Intelligent sensors and intelligent measuring systems. Basic terms and definitions]. Effective from December 01, 2010. Moscow, StandartInform Publishing House, 2019, 12 p. (In Russian)
2. Belozubov E. M., Vasilyev V. A., Chernov P. S. Metrologicheskiy samokontrol intellektualnykh datchikov izmeritelnykh i upravlyayushchikh sistem [Metrological Self-Checking of Smart Sensors of Measurement and Control Systems], *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2018, no. 7, pp. 11–17. (In Russian)
3. Loskutov A. I., et al. Telemetriya: uchebnik [Telemetry: a Textbook]. Saint Petersburg, Mozhaisky Military Aerospace Academy, 2017, 343 p. (In Russian)
4. Dmitrienko A. G., et al. Elementy kontseptsii postroeniya intellektualnykh sistem monitoringa i kontrolya izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki i obektov nazemno-kosmicheskoy infrastruktury [Elements of Development Concept for Intelligent Monitoring and Control Systems in the Items of Rocket and Space Equipment and Objects of Ground-Based Space Infrastructure], *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol. [Measuring. Monitoring. Management. Control]*, 2018, no. 2 (24), pp. 5–13. DOI: 10.21685/2307-5538-2018-2-1. (In Russian)
5. Minigaliev G. B., Dolganov A. V. Vybor kontrollera upravleniya i intellektualnye datchiki: uchebnoe posobie [Selecting a Management Controller and Intelligent Sensors: A Textbook]. Nizhnekamsk, Nizhnekamsk Chemical-Technological Institute, 2015, 136 p. (In Russian)
6. GOST R MEK 60770-3—2016. Datchiki dlya primeneniya v sistemakh upravleniya promyshlennym protsessom. Chast 3. Metody otsenki kharakteristik intellektualnykh datchikov [GOST R MEK 60770-3—2016. Transmitters for use in industrial-process control systems. Part 3. Methods for performance evaluation of intelligent transmitters]. Effective from April 01, 2017. Moscow, StandartInform Publishing House, 2016, 58 p. (In Russian)
7. Vasilyev V. A., Chernov P. S. Intellektualnye datchiki, seti datchikov i tsifrovye interfeysy [Smart Sensors, Sensor Networks and Digital Interfaces], *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2012, no. 10, pp. 3–6. (In Russian)

8. IEC 61131-9:2022. Programmable controllers — Part 9: Single-drop digital communication interface for small sensors and actuators (SDCI). Geneva, International Electrotechnical Commission, 2022, 677 p.
9. ISO/IEC/IEEE 21450:2010. Information technology — Smart transducer interface for sensors and actuators — Common functions, communication protocols, and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) formats. Geneva, International Organization for Standardization, 2010, 325 p.
10. Belyaev A.A., Volobuev P.S. Proektirovanie sistem na kristalle s programmiruemyy arkhitekturoy: uchebnoe posobie [Tutorial on Programmable Architecture System-on-a-Chip Design]. Moscow, National Research University of Electronic Technology, 2018, 135 p. (In Russian)
11. Kozyrev G.I., Yudickih E.O., Usikov V.D. Povyshenie tochnosti telemetricheskikh datchikov na osnove ispolzovaniya printsipa mnogokanalnosti [Increasing to Accuracy Telemetry Sensor on Base of the Use the Principle to Channelling], *Vestnik Metrologa*, 2023, no. 3, pp. 15–23. (In Russian)
12. Kozyrev G.I., et al. Sintez intellektualnykh datchikov na osnove vvedeniya minimalnoy strukturnoy izbytochnosti [Synthesis of Smart Sensors Based on the Introduction of Minimal Structural Redundancy], *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2020, no. 11, pp. 22–27. (In Russian)

Received: 20.02.2026

Accepted: 24.02.2026