

**ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ  
И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

УДК 681.586

*А. Г. Дмитриенко, В. И. Волчихин, А. В. Блинов, Е. А. Ломтев***ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ДАТЧИКОВОЙ АППАРАТУРЫ  
И СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ, МОНИТОРИНГА, КОНТРОЛЯ  
И ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ  
НА ЕЕ ОСНОВЕ***A. G. Dmitrienko, V. I. Volchihin, A. V. Blinov, E. A. Lomtev***DEVELOPMENT TRENDS FOR SENSORS AND MEASURING,  
MONITORING, CONTROL AND DIAGNOSTIC SYSTEMS FOR  
TECHNICALLY COMPLEX OBJECTS BASED ON THEM**

**А н н о т а ц и я.** Изложены принципы формирования интеллектуальных систем контроля и диагностики. Рассмотрены основные направления развития датчиков для систем мониторинга и контроля технически сложных объектов. Предложены варианты расширения эксплуатационных возможностей, увеличения точности и надежности перспективных датчиков.

**A b s t r a c t.** Basic principles for the development of smart testing and diagnostics systems have been given. The main development trends for sensors of monitoring, control and diagnostic systems for technically complex objects have been analyzed. Some variants of operational capability enlargement, accuracy and reliability increase for advanced sensors have been offered.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** мониторинг, датчик, ракетно-космическая техника, датчиковая аппаратура, интеллектуальный датчик, информационно-измерительные и управляющие системы.

**Key words:** monitoring, sensor, of rocket-and-space engineering, sensors' based equipment, smart sensor, weapons and military equipment, information-measuring and operating systems.

Одним из важнейших направлений совершенствования технически сложных производственно-технологических объектов, комплексов и систем, особенно в таких наукоемких областях, как ракетно-космическая техника (РКТ), оружие и военная техника (ВВТ), энергетика, авиация, является оснащение вновь проектируемых, строящихся и уже функционирующих объектов информационно-измерительными и управляющими системами неразрушающего контроля, мониторинга состояния и диагностики.

Современные информационно-измерительные и управляющие системы обладают следующими особенностями:

- интеллектуальностью, заключающейся в формировании, получении, преобразовании, передаче, накоплении, обработке, представлении, документировании и выдаче информации в удобном для пользователя виде, для передачи в другие системы, адаптации к условиям эксплуатации и внешним влияющим факторам;
- блочно-модульной реконфигурируемой структурой;
- комплексностью, т.е. взаимодействием системы с номенклатурой унифицированных мониторинговых датчиков различных физических величин по единому информационному протоколу;
- иерархичностью – возможностью адаптации системы под задачи объекта на основе реконфигурирования и гибкого программно-алгоритмического обеспечения.

Датчики как источники информации определяют уровень качества информационно-измерительных и управляющих систем.

Современные тенденции развития техники обуславливают необходимость значительно улучшить характеристики датчико-преобразующей аппаратуры (ДПА) по точности, надежности, расширению эксплуатационных возможностей и существенному снижению массы и энергопотребления за счет внедрения новейших достижений микроэлектроники и критических технологий, использования перспективных высокостабильных материалов, микропроцессорных модулей и интеллектуальных датчиков.

Интеллектуальные датчики позволяют осуществлять в автоматическом режиме:

- самокалибровку, самодиагностику и тестирование самостоятельно по программе и по внешнему запросу;
- адаптацию к изменению внешней окружающей среды и контролируемым диапазонам с целью повышения точности и достоверности измерений;
- внутридатчиковую предварительную обработку, анализ и оценку информации с целью ее ранжирования, сжатия, запоминания, преобразования и передачи;
- многофункциональность (одновременное измерение нескольких физических параметров: давление, температура, ускорение и др.);
- построение распределенных и беспроводных систем и сетей.

В своем составе интеллектуальные мониторинговые датчики наряду с первичными преобразователями содержат аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, микропроцессор, микроконтроллер, оперативно-запоминающее устройство, интерфейсы ввода-вывода информации.

Реализация требований предприятий-заказчиков датчиковой аппаратуры возможна при соблюдении следующих условий:

- расширение диапазонов измерений измеряемых величин;
- повышение быстродействия преимущественно за счет применения современной элементной базы;
- повышение точности измерений за счет применения наиболее эффективных принципов преобразования и разработки интеллектуальных датчиков;
- повышение виброустойчивости преимущественно за счет уменьшения габаритов и массы, применения компенсационных элементов, технологий микромеханики;
- увеличение дистанционности измерений;
- повышение помехоустойчивости за счет использования корреляционных методов измерений, передачи информационных сигналов по волоконно-оптическим линиям связи, использования избыточных кодов, аналоговой и цифровой фильтрации;
- увеличение ресурса работы датчиков за счет подбора особо стабильных и прочных материалов;
- повышение надежности за счет резервирования и применения элементов с малой или равной интенсивностью отказов;
- снижение затрат на обслуживание, эксплуатацию;
- обеспечение широкой унификации и стандартизации датчиков.

Из всех требований общего характера необходимо выделить требования, предъявляемые разработчиками космических аппаратов (КА) к ДПА, устанавливаемой на КА. Датчики для КА должны иметь очень высокие показатели по безотказности работы ( $(P) > 0,995-0,999$

за 10–15 лет эксплуатации), тогда как вероятность безотказной работы для стендовых датчиков в среднем 0,95–0,98 за 10 лет, а для датчиков, устанавливаемых на двигательных установках, ракетах-носителях и разгонных блоках, – 0,99–0,995 за несколько часов.

Датчики должны быть работоспособны при длительном воздействии параметров открытого космоса, таких как:

- радиационные пояса Земли;
- галактические космические лучи;
- солнечные космические лучи;
- магнитосферная плазма;
- метеоритно-техногенные тела;
- высокоэнергетические электроны;
- глубокий вакуум и др.

Кроме того, предъявляются более жесткие требования к энергетическим и габаритно-массовым показателям.

К настоящему времени стало совершенно очевидным, что микроэлектронная технология улучшает все типы датчиковой аппаратуры. Это приводит к тому, что датчики, построенные на традиционных принципах преобразования (индуктивный, емкостный, взаимдуктивный, вихрековый, тензорезистивный, пьезоэлектрический и др.), получают возможность дальнейшего развития метрологических и конструкторско-эксплуатационных характеристик.

Отдельно необходимо остановиться на проблеме материалов, используемых при построении ДПА, так как кардинальный прорыв в области повышения качества датчиков в первую очередь связан с применением новых и совершенствованием традиционных конструктивных, функциональных и «интеллектуальных» материалов.

Основное внимание в датчиках физических величин уделяется функциональным материалам, к которым относят материалы, непосредственно участвующие в процессе функционального преобразования входной измеряемой величины в выходную. Процесс преобразования заключается в использовании определенных физических эффектов, присущих данному материалу, для однозначной идентификации входной величины.

На практике известны и находят все большее применение следующие функциональные материалы: сегнетоэлектрические, пьезоэлектрические, пироэлектрические, фотоэлектрохимические, с ионной электропроводностью, со смешанной проводимостью, полупроводниковые, металлические тонкопленочные проводники, сверхпроводящие, магнитные, электрооптические, диэлектрические. В классе функциональных материалов следует отметить достижения в области органических пьезоэлектриков и токопроводящих полимеров.

В настоящее время стремительно развивается совершенно новый класс материалов – так называемые «интеллектуальные» («умные») материалы. Такие материалы характеризуются способностью изменять свойства под действием различных факторов окружающей среды и внешних управляющих воздействий, а также восстанавливать свои свойства после прекращения их действия.

К интеллектуальным материалам относят сплавы с памятью формы, магнитострикционные материалы, магнитные и реологические (обладающие структурной вязкостью) жидкости, электролюминесцирующие материалы, пьезоэлектрики, бифункциональные сополимеры, электропроводящие полимеры и ряд других, которые позволяют изменять свои свойства в режиме реального времени с помощью электрических, тепловых, электромагнитных и иных воздействий.

В отличие от существующих в ракетно-космической промышленности вновь разработанные в ОАО «Научно-исследовательский институт физических измерений» (ОАО НИИФИ) системы мониторинга и неразрушающего контроля обладают интеллектуальностью, комплексностью, иерархичностью и реконфигурированной организацией распределенных датчиков физических величин.

Разрабатываемые в настоящее время интеллектуальные системы неразрушающего контроля имеют гибкую архитектуру и формируются по принципу достаточности, позволяющему регламентировать выбор минимального числа интеллектуальных датчиков, обеспечивающих селекцию таких диагностических признаков, которые инвариантны к контролируемой конструкции оборудования и форме связи с параметрами ее технического состояния, что обеспечивает применение стандартных процедур неразрушающего контроля. Система реализует

встроенную самодиагностику и контроль состояния программно-аппаратных средств, включая датчики физических величин.

При проектировании всех базовых интеллектуальных систем мониторинга и контроля технически сложных объектов в них были заложены принципы, обеспечивающие возможность адаптации к задачам контроля и мониторинга как объектов РКТ и ВВТ, в том числе новых, так и объектов народного хозяйства (гидросооружений, мостов, тепловых станций, строительных конструкций и т.п.)

Необходимо подчеркнуть, что разработка и производство ДПА для РКТ и ВВТ представляют собой сложнейшие наукоемкие задачи и невозможны без создания новых теорий проектирования, использующих методы математического моделирования, без решения вопросов стандартизации и унификации изделий, без разработки специальных технологий, автоматизации производства и процесса испытаний.

ОАО НИИФИ как единственный исполнитель и головное предприятие по реализации Проекта № 25 Комиссии при Президенте РФ по модернизации и технологическому развитию экономики России «Создание интеллектуальных систем мониторинга и контроля технически сложных объектов» выполняет ОКР «Диагностика» по созданию интеллектуальных систем мониторинга и контроля (СМиК) состояния технически сложных объектов в части работ 2011–2012 гг. по ракетно-космической технике и наземной космической инфраструктуре (НКИ) (при участии Пензенского государственного университета).

Разработаны технический проект на модули и унифицированные ряды мониторинговых датчиков физических величин нового поколения, в том числе интеллектуальных беспроводных: интеллектуальные датчики динамических, акустических давлений, абсолютного, избыточного давления, вибрации, силы, температуры, тока, угла наклона объекта, осевых и радиальных биений, а также контроля газового состава, интеллектуальный дефектоскоп, модуль передачи данных с радиоканалом.

Выполнены технические проекты на базовые объектовые интеллектуальные системы мониторинга и контроля состояния типовых ТСО РКТ и НКИ:

– СМиК наземной безопасности агрегатов систем и сооружений стартового комплекса СК 17П32-6;

– СМиК визуализации и регистрации результатов выполнения операций технологических графиков подготовки и пуска РКН типа «Союз-2» с РБ «Фрегат»;

– СМиК состояния ТСО НКИ на основе датчиков физических величин нового поколения на испытательном стенде ФКП «НИЦ РКП», энергоснабжения и жизнеобеспечения комплексов НКИ;

– базовая бортовая объектовая интеллектуальная СМиК РКТ (РН и РБ);

– СМиК технического состояния двигателя при огневых стендовых испытаниях;

– СМиК технического состояния космических аппаратов;

– система неразрушающего контроля (СНК) ТСО НКИ.

Отличительными от существующих систем мониторинга и контроля особенностями созданных базовых объектовых интеллектуальных систем мониторинга и контроля типовых ТСО РКТ и НКИ являются следующие:

• Для мониторинга и контроля наземной безопасности агрегатов, систем и сооружений стартового комплекса СК 17П32-6:

1) локализация аварийной ситуации и прекращение ее развития;

2) диагностика и удаленное конфигурирование датчиков;

3) передача данных по радиоканалам, оптоволоконной линии связи, скоростной сети Ethernet;

4) сопряжение с существующими и перспективными системами регистрации и визуализации.

Новизна разрабатываемых СМиК заключается в многоуровневой иерархической структуре реконфигурируемой системы, построенной с использованием современных методов и средств моделирования, реализации технически сложного объекта как комплексного объекта измерения, реализующего многокритериальное регулирование.

• Для мониторинга, контроля, регистрации результатов выполнения операций технологических графиков подготовки и пуска РКН «Союз-2» с РБ «Фрегат»:

## Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

- 1) автоматический отбой или остановка процесса подготовки в случае возникновения аварийной ситуации;
- 2) переход на режим управления выходом из аварийной ситуации, ее локализацией и прекращением развития;
- 3) контроль хода и параметров процесса подготовки и пуска и состояния участвующего в этом процессе оборудования и систем;
- 4) прием сообщений от исполнительных органов управляемых элементов, систем и агрегатов об исполнении команд, включая и ручные операции;
- 5) оперативное отображение и регистрация контрольных параметров процесса подготовки и состояния контролируемого оборудования и систем, а также результатов счета, обработки и логических операций;
- 6) оперативная сигнализация отклонений параметров процесса подготовки от нормального хода, возникновения аварийных ситуаций и отказов (неисправностей) бортовых и наземных систем;
- 7) отображение рекомендаций по выходу из аварийных ситуаций и устранению отказов (неисправностей);
- 8) обработка и анализ контролируемых параметров процесса подготовки и состояния бортовых систем РКН и наземных систем и агрегатов технических и стартовых комплексов;
- 9) определение (распознавание; идентификация) отклонений от нормального хода процесса подготовки, в том числе приводящих к аварийным ситуациям;
- 10) прогнозирование развития технологического процесса подготовки и состояния участвующих в этом процессе систем и оборудования.

- Для мониторинга, контроля, визуализации результатов контроля состояния (критических параметров) технически сложных устройств для руководителя работ при испытаниях и штатной эксплуатации составных частей РКН «Союз-2» с РБ «Фрегат»:

- 1) прием от СМиК сообщений о результатах выполнения технологических операций, включая и ручные операции, и физических значениях параметров технологического процесса;
- 2) анализ полученных данных с целью выявления технических неисправностей оборудования (агрегатов, систем и др.) и отклонений от нормального хода процесса подготовки, в том числе приводящих к аварийным ситуациям;
- 3) контроль хода и параметров процесса подготовки и пуска и состояния участвующих в этом процессе оборудования и систем;
- 4) оперативное отображение и регистрация контрольных параметров процесса подготовки и состояния контролируемого оборудования и систем, а также результатов счета, обработки и логических операций;
- 5) оперативная сигнализация отклонений параметров процесса подготовки от нормального хода, возникновения аварийных ситуаций и отказов (неисправностей) бортовых и наземных систем;
- 6) отображение подсказывающей информации (рекомендаций) по выходу из аварийных ситуаций и устранению отказов (неисправностей);
- 7) прогнозирование развития технологического процесса подготовки и состояния участвующих в этом процессе систем и оборудования.

- Для мониторинга и контроля состояния стартовых агрегатов и систем на испытательном стенде ФКП «НИЦ РКП»:

- 1) сбор данных с мониторинговых датчиков о состоянии стартовых агрегатов и систем, их обработка, сжатие, документирование, архивирование и хранение;
- 2) анализ полученных данных с целью выявления технических неисправностей оборудования (агрегатов, систем, конструкций и др.);
- 3) представление информации пользователям о текущем состоянии объектов мониторинга, возникновении угроз, критических ситуаций и аварий;
- 4) прогнозирование остаточного на текущий момент времени ресурса стартовых агрегатов и систем;
- 5) формирование перечня составных частей стартовых агрегатов и систем, требующих выполнения ремонтно-восстановительных работ;

6) прогноз возможных аварий с выработкой рекомендаций, направленных на их предотвращение и минимизацию ущербов;

7) поддержка принятия оперативных решений, обеспечивающих наилучший в сложившихся обстоятельствах выход из предаварийных ситуаций (вплоть до приостановки работ).

• Для мониторинга и контроля систем электроснабжения и жизнеобеспечения комплексов ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры:

1) сбор данных датчиками физических величин о техническом состоянии технически сложных объектов наземной космической инфраструктуры, их обработка, сжатие, архивирование, хранение и передача в каналы связи;

2) анализ полученных данных с целью выявления технических неисправностей оборудования (агрегатов, систем, конструкций и др.) и нарушений технологических процессов функционирования ТСО;

3) представление информации о текущем техническом состоянии ТСО в пункты мониторинга (ПМ) и (или) эксплуатирующему персоналу;

4) документирование и архивирование данных о техническом состоянии ТСО;

5) передача информации в ПМ и (или) эксплуатирующему персоналу о техническом состоянии ТСО при угрозе возникновения критических ситуаций и аварий, а также в соответствующие центры системного мониторинга и оперативного управления;

6) получение информации о состоянии ТСО НКИ и бортовых технологических систем РКТ в необходимом количестве и качестве для обеспечения наблюдаемости их технического состояния.

• Для мониторинга и контроля ракетно-космической техники (РН и РБ):

1) диагностика бортового оборудования летательного объекта в реальном масштабе времени, передача информации по радиоканалу;

2) реализация модуля ЭВМ на платформе прикладных процессоров ОМАР (система на кристалле), позволяющего повысить производительность, снизить энергопотребление, повысить надежность.

Разработанная распределенная ультразвуковая СНК позволяет определять наличие дефектов в элементах конструкций, отличается принципиально новой методикой электронного управления сканирующего луча и применением фазированных решеток, с помощью которых возможно получать объемное изображение дефекта с размерами на отдельных напряженных элементах конструкций НКИ.

Отличительными особенностями разработанных датчиков и систем диагностики на их основе для ракетных двигателей типа РД191 ОАО НПО «Энергомаш» является то, что созданные унифицированные технические решения могут быть с незначительной доработкой, например в части изменения установочных размеров, использованы при разработке датчиков для серии создаваемых и модернизируемых двигателей ОАО «Конструкторское бюро химавтоматики» (ОАО КБХА) – РД 0146 (на жидких кислороде и водороде для разгонных блоков) и РД0124, РД0124А (на жидком кислороде и керосине для ракет-носителей «Союз-2» и «Ангара»). С ОАО КБХА и ОАО НПО «Энергомаш» согласованы технические задания на разработку ряда датчиков и систем для данных двигателей.

В рамках выполнения Президентского проекта созданы новые базовые прогрессивные технологии изготовления интеллектуальных датчиков физических величин на основе микромеханики и нанотехнологий, а также процессы автоматизированной сборки и программирования электронных блоков.

Внедрение вновь разработанных технологий позволяет перейти на новый уровень разработки интеллектуальных датчиков и на их основе интеллектуальных систем мониторинга и контроля технически сложных объектов.

При выполнении работ в рамках ОКР «Диагностика» в диссертационном совете Пензенского государственного университета четыре целевых аспиранта от ОАО НИИФИ защитили диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по направлениям исследований:

– высокоточные низкочастотные акселерометры для систем управления движением изделий ракетно-космической техники;

– измерительные цепи емкостных МЭМС-датчиков для ракетно-космической техники;

– цифровые вторичные преобразователи для емкостных датчиков давления;

– вторичные преобразователи для тензометрических датчиков давления.

## Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

Следует отметить, что разрабатываемые СМиК и в целом Проект № 25 соответствуют «Перечню приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации», утвержденному Указом Президента от 07.07.2011 № 899 (п. «Информационно-телекоммуникационные системы», подп. 1, 13, 14, 21 перечня критических технологий).

Научно-технологический задел, полученный при создании интеллектуальных распределенных датчиков и СМиК, позволяет перейти к задачам создания инновационных технологий интеллектуальных базовых несущих и модульных металлических и неметаллических конструкций с монтируемыми (встроенными) распределенными сенсорными сетями и реконфигурируемыми системами мониторинга и контроля их состояния в изделиях РКТ и объектах НКИ, а также их диверсификации в другие отрасли экономики по созданию «умных» конструкций при строительстве и эксплуатации зданий, сооружений и других объектов инфраструктуры России.

Рассмотренная выше концепция создания интеллектуальных датчиков и систем мониторинга и контроля состояния техники и объектов инфраструктуры формируется на основе современных мировых тенденций развития интеллектуальных информационно-управляющих систем с учетом «Основ политики РФ в области развития науки и технологий на период до 2020 г. и дальнейшую перспективу» и крайне нуждается в ускорении своего развития.

---

### **Дмитриенко Алексей Геннадьевич**

кандидат технических наук, генеральный директор,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
E-mail: niifi@sura.ru

### **Dmitrienko Aleksey Gennad'evich**

candidate of technical sciences,  
director general,  
Research Institute  
of Physical Measurements

### **Волчихин Владимир Иванович**

доктор технических наук, профессор, ректор,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: rektorat@pnzgu.ru

### **Volchikhin Vladimir Ivanovich**

doctor of technical sciences, professor, rector,  
Penza State University

### **Блинов Александр Вячеславович**

кандидат технических наук,  
заместитель генерального директора  
по научной работе,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
E-mail: niifi@sura.ru

### **Blinov Aleksandr Vyacheslavovich**

candidate of technical sciences,  
deputy general director for scientific activity,  
Research Institute  
of Physical Measurements

### **Ломтев Евгений Александрович**

доктор технических наук, профессор,  
советник ректора,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: iit@pnzgu.ru

### **Lomtev Evgeniy Aleksandrovich**

doctor of technical sciences, professor,  
advisor to the rector,  
Penza State University

---

УДК 681.586

**Дмитриенко, А. Г.**

**Тенденции развития датчиковой аппаратуры и систем измерения, мониторинга, контроля и диагностики технически сложных объектов на ее основе / А. Г. Дмитриенко, В. И. Волчихин, А. В. Блинов, Е. А. Ломтев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 2. – С. 6–12.**