

**ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ДАТЧИКОВОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ
ИЗМЕРЕНИЯ, КОНТРОЛЯ, УПРАВЛЕНИЯ И ДИАГНОСТИКИ
ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ**

**А. В. ГОРИШ, Е. А. ГОРИШ, О. С. ГРАЕВСКИЙ, Д. А. КРЮЧКОВ,
Ю. Н. МАКАРОВ**

*Научно-исследовательский институт космического приборостроения,
Москва, Россия, e-mail: iic-kryuchkov@yandex.ru*

Рассмотрены вопросы конструирования датчиков для измерения физических параметров. Приведено описание принципов преобразования чувствительных элементов датчиков.

Ключевые слова: *контактные датчики, системы для измерения, контроля, управления и диагностики.*

The problems of sensors construction for physical parameters measurement are considered. The description of sensors sensitive elements transformation is presented.

Key words: *contact sensors, system for measurement, monitoring, control and diagnostics.*

Основу каждой системы для измерения, контроля, управления и диагностики (СИКУД) различных физических параметров (температуры, тепловых потоков, уровней и расходов жидких сред, статических и медленноменяющихся давлений, механических напряжений, вибраций и т. д.) составляют первичные преобразователи (датчики). При их проектировании используются достижения в области физики, химии, математики, электродинамики, оптоэлектроники, теории прочности, метрологии, теории информации и др. Вместе с тем, разработчик должен обладать развитой интуицией, практическим опытом, знанием передовых технологий и способностью к ассоциативному мышлению.

Мир датчиков чрезвычайно многообразен: большое число физических параметров, разнообразие физических зависимостей и инженер-

но-технических объектов, предопределяющих специфику СИКУД (авиационная техника, энергетика, машиностроение, судостроение, объекты нефтегазовой промышленности и пр.), разнообразие параметров самих датчиков (диапазон, точность, надежность и др.). Таким образом, при проектировании датчиков существует множество проблем и их возможных решений.

Любой технический объект, в особенности сложный, нуждается в экспериментальной отработке и проверке заложенных в него проектных решений и расчетов. Решающая роль в проведении такого «*experimentum cruris*» принадлежит датчикам. Для этого они должны наиболее полно соответствовать условиям регистрации параметров, а технологические процедуры регистрации должны, по возможности, предусматривать снижение погрешностей получаемых результатов. Поэтому необходимо помнить, что регистрируемое значение физического параметра носит относительный характер.

Погрешности датчиков нельзя исключить полностью или снизить до бесконечно малого значения. Стремление получить большой объем информации от датчика неизбежно ведет либо к его неработоспособности, либо к таким энергетическим затратам на регистрируемый процесс, сопровождающимся возрастанием энтропии, что может быть нарушен сам исследуемый процесс.

В принципе датчик предназначен для регистрации параметров веществ в четырех агрегатных состояниях: твердого тела (металлы, диэлектрики, полупроводники, композиционные материалы); жидкости (криогенные, высококипящие, расплавленные металлы); газа (спокойные газы и газовые потоки при давлениях от глубокого вакуума до высоких значений); плазмы (низкотемпературная плотная, высокотемпературная разреженная).

Датчики СИКУД должны обеспечивать регистрацию параметров конструктивных элементов и рабочих продуктов: температуры, тепловых потоков, давления, силы, перемещения, скорости, деформации, линейных и вибрационных ускорений, расходов, уровней, сплошности, акустических давлений, газового состава, влажности и т. д. Регистрируемые физические величины могут характеризоваться временными (стационарные, динамические, непрерывные, дискретные), пространственными (сосредоточенные, распределенные), корреляционными (независимые, зависимые) свойствами. Априорные сведения об этих свойствах позволяют осуществлять разработку новых и выбор существующих датчиков, определять их число и места установки на исследуемом объекте.

Преобладающее большинство датчиков – контактные, т. е. располагаются на объекте в местах непосредственной регистрации исследуемых параметров. Важнейшей особенностью является то, что, как правило, в этом месте на датчик одновременно воздействуют многие физические факторы. Он должен быть защищен от разрушительного влияния указанных факторов (механически надежен), а также обладать селективностью по отношению к регистрируемому параметру и независимостью (в пределах допустимой погрешности) по отношению ко всем остальным факторам (метрологически надежен). Таким образом, датчик представляет многополюсник с несколькими входами и одним выходом. Разделение воздействий путем изучения функций влияния по каждому из дестабилизирующих факторов практически нереально, поскольку требуется информация о всех влияющих факторах в местах установки основного датчика. Это целесообразно только в частных случаях. Если исследуемый параметр, например давление, а преобладающий влияющий фактор – температура, то целесообразна двухпараметровая реализация датчика, и поправки на температуру могут быть выполнены вполне корректно.

Однако главная задача проектирования датчика состоит в выборе принципов преобразования, при которых обеспечивается его надежная селективность к одному исследуемому параметру. Промежуточная задача – автоматическая компенсаторная коррекция дестабилизирующих воздействий на датчик, как правило, реализуемая в виде частных и ограниченных по своим возможностям решений. К таким же задачам относят конструкционную реализацию различных защитных мер от прямых воздействий влияющих факторов на датчик. Ее решают с помощью разделительных трубопроводов и полостей, волноводов, световодов, механических фильтров, теплозащитных прокладок, технологических приспособлений и др.

Заметим, что все защитные меры одновременно служат источниками систематических погрешностей датчиков при регистрации основного параметра, в том числе и защита чувствительного элемента от прямого контакта с окружающей средой.

Датчик также может оказывать дестабилизирующее влияние на исследуемый объект. Регистрация параметра объекта будет корректной в случае, когда установка на него датчика не меняет физическую картину изучаемого процесса и поведение контролируемого параметра. Это условие необходимое, но не достаточное. Процессы регистрации

корректны, если датчик способен воспринять и правильно воспроизвести действительное поведение данного параметра во времени.

В результате к процессу проектирования датчиков предъявляются требования не только взаимопротиворечивые, но даже и взаимоисключающие. Эту проблему можно устранить определением целевых функций и решением оптимизационных задач, которые чаще всего строго аналитически не решаются, и разработчику требуются практический опыт и интуиция.

Описание в общем виде процессов взаимодействия датчика с исследуемым объектом и преобразования в нем регистрируемой величины позволяет формализовать обобщенную структурную схему любого гипотетического датчика в виде, представленном на рис. 1. Смысл такой

формализации – единство методологии рассмотрения разнотипных датчиков. Здесь звено 1 – отвечает за восприятие входного воздействия и одновременную защиту датчика; звено 2 – осуществляет передачу входного воздействия чувствительному

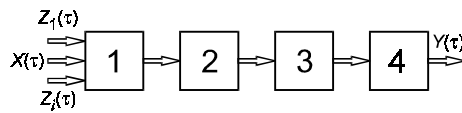


Рис. 1. Структурная схема датчика

элементу и одновременную защиту чувствительности элемента; звено 3 – чувствительный элемент, преобразующий исследуемую величину (уже преобразованную предыдущим звеном) в электрическую, электромагнитную и др.; звено 4 – согласующее устройство (входит в состав датчика по необходимости); $X(\tau)$ – исследуемая величина (входное воздействие); $Y(\tau)$ – выходная величина датчика; $Z_1(\tau)$, $Z_2(\tau)$ – влияющие (дестабилизирующие) факторы; τ – время.

В конкретных реализациях датчиков те или иные звенья могут отсутствовать или их функции могут быть выражены неявно, или может быть несколько звеньев одного и того же назначения, например звено 2 (см. рис. 1). Последовательность преобразований в каждом конкретном датчике своя, но укладывается в предлагаемую структурную схему.

При этом каждое звено осуществляет функции преобразования и вносит свой вклад в точность и динамические свойства датчика. Более того, этот вклад будет решающим в формировании погрешности результата регистрации всей системы, в состав которой входит датчик.

Устранение несовершенств метрологических характеристик датчика возможно лишь с известными ограничениями: увеличение точности

при снижении динамических характеристик и, наоборот, повышение динамических параметров за счет прочности и надежности и т. д.

Каждый датчик описывается оператором, устанавливающим однозначную связь между его входной $X(\tau)$ и выходной $Y(\tau)$ величинами. Этот оператор определяет как статические, так и динамические характеристики датчика. Если оператор линеен (для него справедлив принцип суперпозиции), то такие датчики могут называться линейными.

В зависимости от структуры физической модели датчика и модели его взаимодействия со средой существуют датчики с сосредоточенными (вход представлен в виде точки) и распределенными (вход распределен по некоторой поверхности) параметрами. Первый датчик описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями, а второй – уравнениями в частных производных или с помощью более сложных представлений.

Порядок уравнения определяет порядок датчика. Так, датчик с сосредоточенными параметрами первого порядка описывается уравнением

$$\partial Y(\tau)/\partial \tau + aY(\tau) = bX(\tau), \quad (1)$$

где a, b – постоянные коэффициенты.

Таким образом можно описать многочисленные датчики различных типов, например, уравнение *датчика температуры с однородной структурой* имеет вид

$$dt_d(\tau)/d\tau + at_d(\tau) = at_n(\tau), \quad (2)$$

где t_d – температура датчика, однозначно определяющая его выходной параметр; t_n – регистрируемое значение исследуемой температуры; $a = \alpha S/mc$; α – коэффициент конвективного теплообмена датчика со средой; S – площадь его регистрируемой поверхности; m – масса части датчика, воспринимающая информацию; c – удельная теплоемкость материала датчика.

Подавляющее большинство датчиков описывается уравнением для датчика с сосредоточенными параметрами второго порядка апериодического и колебательного типов

$$\frac{d^2 Y(\tau)}{d\tau^2} + c \frac{dY(\tau)}{d\tau} + aY(\tau) = bX(\tau). \quad (3)$$

Ниже рассмотрим некоторые типы датчиков.

Датчик температуры в защитной оболочке (неоднородная структура). Оболочка считается тонкой, однородной, в ней отсутствуют градиенты температуры. В этом случае уравнение имеет вид

$$\frac{d^2 t_d(\tau)}{d\tau^2} + c \frac{dt_d(\tau)}{d\tau} + at_d(\tau) = bt_n(\tau); \quad (4)$$

$$c = \lambda \left[\frac{S_{чЭ}}{c_{чЭ}} + \frac{S_{об}}{c_{об}} \right] + \alpha_{об} \frac{S_{об}}{c_{об}},$$

где λ – коэффициент теплопроводности промежутка между чувствительным элементом (ЧЭ) и оболочкой; $S_{чЭ}$, $S_{об}$, $c_{чЭ}$, $c_{об}$ – площади поверхности и полные теплоемкости ЧЭ и оболочки; $\alpha_{об}$ – коэффициент конвективного теплообмена оболочки со средой;

$$a = \lambda \frac{S_{чЭ}}{c_{чЭ}} \alpha_{об} \frac{S_{об}}{c_{об}}; \quad b = \alpha_{об} \frac{S_{об}}{c_{об}} \lambda \frac{S_{чЭ}}{c_{чЭ}}.$$

Датчик вибрационных ускорений

$$m \frac{d^2 X(\tau)}{d\tau^2} + k \frac{dX(\tau)}{d\tau} + \sigma X(\tau) = ma(\tau), \quad (5)$$

где m , k – инерционная масса и коэффициент демпфирования датчика; σ – жесткость упругого элемента; X – виброосмещение; a – регистрируемое ускорение.

Датчик давления мембранного типа

$$m \frac{d^2 X_m(\tau)}{d\tau^2} + k_m \frac{dX_m(\tau)}{d\tau} + \sigma_m X_m(\tau) = p_n(\tau),$$

где m , X_m , k_m , σ_m – масса, прогиб, коэффициент демпфирования, жесткость мембраны; p_n – регистрируемое давление.

Существенно более полное описание датчика можно получить, если рассматривать модель с распределенными параметрами.

Датчик температуры любой сложной структуры

$$\frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial t} = a_T \nabla^2 t(x, y, z, \tau) \quad (6)$$

с граничным условием (на поверхности датчика при равенстве отводимого и подводимого тепловых потоков s)

$$\lambda \frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial n} \Big|_s + \alpha [t(x, y, z, \tau)] \Big|_s = -t_n(\tau) = 0. \quad (7)$$

Здесь a_T – коэффициент температуропроводности датчика; n – нормаль к его поверхности; $t|_s$ – температура на поверхности.

Датчик давления мембранного типа

$$E \left[\frac{\partial^2 X_m(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial X_m(r, \tau)}{\partial r} \right] + p_n(\tau) = k_m \frac{\partial X_m(r, \tau)}{\partial r} + m_s \frac{\partial^2 X_m(r, \tau)}{\partial r^2} \quad (8)$$

с граничным условием $X_m(r, \tau)|_{r=R} = 0$.

Здесь E – упругий коэффициент материала мембраны; r , R – ее текущий и начальный радиусы; m_s – погонная масса поверхности мембраны.

Решение уравнений (1) – (8) с разной степенью приближения для различных структур датчиков позволяет для априори известных условий применения создавать датчики с прогнозируемыми метрологическими характеристиками.

Для общей методологии проектирования датчиков представляется принципиальной необходимостью их обоснованной классификации по существенным независимым классификационным признакам. Эта классификация не может и не должна претендовать на полное подробное описание датчика, но должна определять его принципиальную принадлежность к конкретному типу. Таких классификационных признаков может быть всего четыре:

- параметр, исследуемый датчиком;
- агрегатное состояние объекта исследования;
- принцип преобразования в ЧЭ датчика;
- число компонентов параметра (если параметр – векторная величина) или число исследуемых параметров.

Остальные классификационные признаки, часто встречающиеся в литературе, либо имеют вторичную природу, либо несущественны,

вследствие чего любая такая классификация носит эклектический характер [4 – 8 и др.].

Предлагаемая общая классификация представлена на рис. 2. Она не только не исключает, но предполагает возможность и необходимость в ряде случаев разветвленной классификации внутри каждого типа датчиков.

В попытках дать определение датчика, все время присутствует желание чрезмерно расширить трактовку этого понятия. Очевидно, что «граница слева» должна определяться включением в состав датчика всех тех звеньев преобразования исследуемой величины, без которых его функция преобразования утрачивает свою определенность (воспроизво-

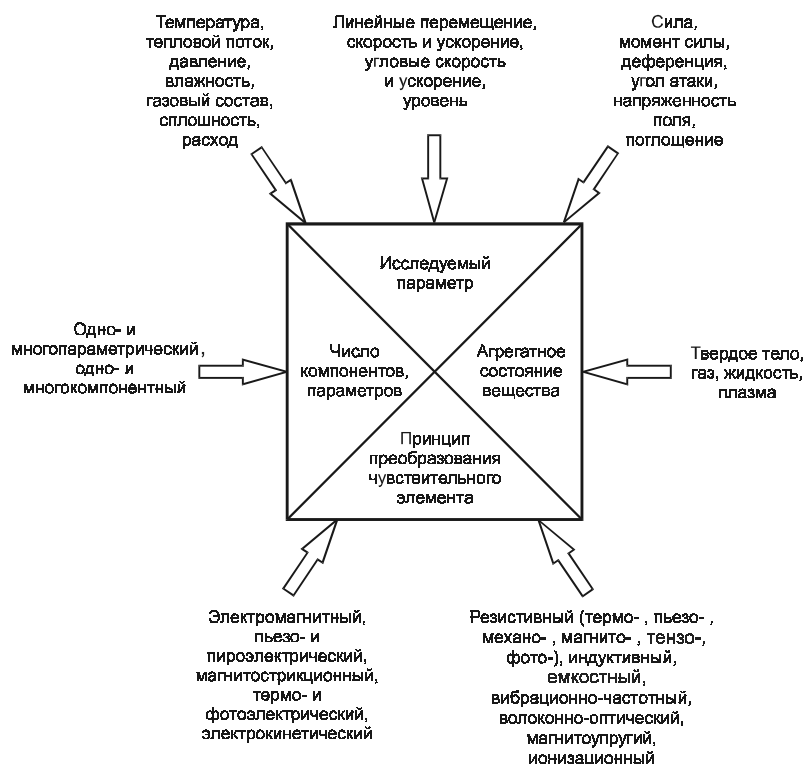


Рис. 2. Классификация датчиков

димось, временную стабильность, динамические свойства и т. д.). Для этого, по-видимому, целесообразно использовать промежуточные понятия, например, пленочный тензометр или пленочный емкостный элемент, которые становятся датчиками при наклеивании на исследуемую поверхность, и их функции преобразования включают в себя свойства клеевого слоя и самой поверхности. В состав вибродатчика должен входить механический фильтр, а в состав датчика динамического давления – разделительная полость или трубопровод.

«Граница справа», по мнению авторов, должна определяться тем звеном преобразования, присутствие которого в конкретном датчике необходимо, например, согласование ЧЭ датчика с измерительной линией по реактивной составляющей, термокомпенсационные элементы и т. д.

В последние 15 – 20 лет обозначилась тенденция проектирования так называемых «интеллектуальных датчиков», сдвигающих «правую границу» настолько, что каждый такой датчик превращается в автономную СИКУД. К числу «интеллектуальных» функций относят цифровое преобразование аналоговой информации, компенсацию недостатков датчика (нелинейность функции преобразования, влияющие факторы), самодиагностику. Безусловно, все эти функции должны быть присущи информационному каналу, но весьма спорной является необходимость и целесообразность наделять ими каждый датчик. Ведь датчики располагаются в местах наиболее концентрированного воздействия всех влияющих факторов, присущих данному объекту, и на работу электронных элементов в таких эксплуатационно-напряженных местах будут сильно влиять помехи. Кроме того, построение современных СИКУД позволяет эти функции делать общими для групп датчиков. Поэтому в большинстве специально немотивированных случаев усложнение структуры датчика и повышение его стоимости из-за наращивания функций, без которых он может обойтись, едва ли оправданно. С точки зрения метрологической и механической надежности датчика, необходима минимизация его структуры.

Таким образом, в изложенной трактовке датчик – это самостоятельное, конструктивно автономное средство, размещаемое в месте отбора информации, состоящее из минимально необходимого числа звеньев преобразования исследуемой величины, обладающее однозначной функцией преобразования и требуемыми для данных целей исследования взаимно согласованными (непротиворечивыми) метрологическими

характеристиками и надежностью. Такой подход позволяет одновременно обеспечить высокую технологичность базовых конструкций и строить на их основе унифицированные ряды датчиков.

На каждом инженерно-техническом объекте (ИТО) важнейшим является надежность как отдельных приборов, агрегатов, систем, так и изделия в целом. Все датчики, применяемые в ИТО, относятся, в основном, к невосстановимым приборам, поэтому их надежность характеризуют вероятностью выхода из строя за время эксплуатации в составе изделия. Требования к надежности датчиков всегда рассматриваются в двух аспектах: метрологическом и механическом. При этом надежность датчиков должна достигать 0,999 – 0,9999, а в некоторых случаях и выше. Проблему создания датчиков необходимо рассматривать комплексно. Ее решение включает следующие направления [6 – 11].

1. Информационное обеспечение разработок, которое должно давать достаточно полное представление обо всем предшествующем опыте создания конструкции датчика, его оперативном использовании применительно к конкретным ситуациям, установлении объективно сложившихся закономерностей (научно-методологических, практических, технологических и метрологических) развития конструирования датчиков с целью выработки оптимальных научно-обоснованных путей создания датчиков новых классов в рамках унифицированных рядов.

2. Специальные вопросы теории и опытов с целью создания как основ проектирования датчиков, так и основ САПР конкретных типов и отдельных конструктивных узлов. Реализация этой задачи связана с поиском, изучением и анализом новых физических явлений и эффектов, оценкой области их возможного использования для создания ЧЭ, изучением вариантов конструкций в статическом и динамическом режимах. Необходим учет влияния воздействия различных дестабилизирующих факторов на новые конструкции датчиков и опытная проверка этого влияния, опытная проверка научно-технических, технологических и конструкторских решений с учетом метрологических и конструктивных требований. При этом определяющее значение имеет глубокий и всесторонний анализ статических и динамических погрешностей датчиков, а также динамических характеристик с учетом исследования динамики изменений влияющих факторов и оценки реакции ЧЭ на эти воздействия; обеспечение вопросов унификации с учетом эффектов потерь на этапах проектирования, производства и эксплуатации.

3. Технологическое обеспечение разработок, которое должно охватывать знание существующих материалов с учетом стойкости в

широком диапазоне температур, комплектующих изделий, высокотемпературных компаундов, клеев и различных композиционных составов, вопросы технологии, создание новых технологических процессов с учетом потребностей будущего производства. Сюда же относятся изучение, создание и применение новейших технологических процессов и технологического оборудования, достижений микроэлектроники, разработка и изготовление макетных образцов датчиков, их опытное исследование с учетом всех дестабилизирующих факторов, возникающих при эксплуатации изделия в составе ИТО, внедрение в серийное производство и, наконец, авторский надзор.

4. Метрологическое обеспечение разработок должно охватывать развернутую систему исследований, определяющую как технологические процессы, контроль и управление ими, так и качество и свойства выпускаемой датчиковой аппаратуры. Метрологическое обеспечение имеет первостепенное значение для учета материально-технических ресурсов, планирования и обеспечения качества выпускаемых датчиков, взаимозаменяемости конструктивных элементов и узлов и совершенствования технологии, обеспечения безопасности труда и других видов деятельности.

Особенностью метрологического обеспечения датчиков является поддержание на высоком уровне единства и достоверности эталонных средств измерений в отраслях, где создаются датчики. Метрологические службы этих отраслей должны осуществлять разработку и проведение организационно-технических мероприятий, способствующих повышению эффективности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и производства, а также решать задачи по управлению качеством, стандартизацией и унификацией контрольно-измерительного и испытательного оборудования.

5. Разработка специальных методических и практических рекомендаций с целью создания теоретических и экспериментальных основ проектирования различных типов датчиков. Реализация задач этого класса связана с поиском, изучением, исследованием и анализом новых физических явлений и эффектов, созданием теорий расчета конструктивных решений как в статическом, так и в динамических режимах, строгим учетом влияния различных дестабилизирующих факторов на новые конструкционные модели, экспериментальной проверкой и подтверждением конструкционных разработок и отработанных технических решений с учетом метрологических и эксплуатационных требований. При этом необходимо знать статические и динамические погрешности, а также контролировать динамические характеристики по резуль-

татам исследования влияния дестабилизирующих факторов и оценки реакции датчиков на эти воздействия.

6. Техническое обеспечение разработки датчика включает в себя техническое задание, где четко формулируется задача проектирования конкретного типа датчика, приводятся теоретическое и техническое обоснования принципиальной возможности его реализации.

Каждое из перечисленных направлений представляет собой самостоятельную и достаточно сложную техническую задачу, решение которой должно в обязательном порядке выполняться в комплексе и взаимосвязи. Особое внимание следует обратить на совместимость проектируемых и реализуемых датчиков и их СИКУД для различных изделий ИТО.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Сретенский В. Н.** Метрологическое обеспечение производства приборов микроэлектроники. М.: Радио и связь, 1988.
2. **Алейников А. Ф.** Многофункциональные датчики. Новосибирск: ФТИ, 1991.
3. **Виглеб Г.** Датчики. М.: Мир, 1989.
4. **Како Н., Яманэ Я.** Датчики и микроЭВМ. Л.: Энергоатомиздат, 1989.
5. **Осипович Л.** Датчики физических величин. М.: Машиностроение, 1979.
6. **Коптев Ю. Н., Гориш А. В.** Датчиковая аппаратура для ракетно-космической техники // Радиотехника. 1995. № 10.
7. **Коптев Ю. Н., Гориш А. В.** Волоконно-оптические датчики космического базирования // Там же.
8. **Гориш А. В.** Принципы оптимизации пьезокерамических чувствительных элементов датчиков // Экология, мониторинг и рациональное природопользование: Труды МГУЛ. М., 1998. Вып. 294(II).
9. **Гориш А. В., Гришин В. М., Бульканов М. М.** Патентный информационно-библиографический банк данных «Материалы, технологии, изделия пьезоэлектроники» // Там же.
10. **Коптев Ю. Н. и др.** Датчики теплофизических и механических параметров. М: ИПРЖР, 1998 – 2000. Т. 1 – 3.
11. **Малков Я. В.** Философия проектирования датчиков для измерения физических величин // Экология, мониторинг и рациональное природопользование: Труды МГУЛ. М., 1997. Вып. 288(II).

Дата принятия 18.02.2010 г.