

ранее был определен точно, то идентификация каналов возмущений будет происходить, как в разомкнутой системе. Если канал управления заранее был определен с ошибкой, то эта ошибка добавится к ошибке идентификации каналов возмущений.

Совместная идентификация каналов возмущений и канала управления возможна только при размыкании обратной связи и независимом от возмущений изменении управления (например, в пределах поля допуска выхода).

#### Заключение

Приведены результаты по теории идентификации, полученные в ИПУ РАН, включая последние работы по построению плотности вероятности оценок параметров по малым выборкам. Рассмотрены

особенности использования адаптивного алгоритма идентификации, оптимального среди одношаговых. Изложен опыт, накопленный при создании адаптивных систем управления с идентификатором (АСИ), ноу-хау и «мелочи», без которых эти системы не работают. Приведены процедуры оценки качества модели и оценки ожидаемой экономической эффективности АСИ по результатам предпроектного обследования.

#### Список литературы

1. Райбман Н.С., Чадеев В.М. Построение моделей процессов производства. М. Энергия. 1975.
2. Чадеев В.М. Плотность вероятности МНК-оценок. Труды ВСПУ-2019. ИПУ РАН.
3. Илюшин В.Б., Чадеев В.М. Идентификация по вероятностному критерию // Автоматика и телемеханика. 1995. № 6. 105-110.

*Чадеев Валентин Маркович – д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Контактный телефон (495) 334-87-59.*

## СОВРЕМЕННЫЕ ДАТЧИКИ ПАРАМЕТРОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ: НОВЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ РЕШЕНИЯ

**Н.И. Аристова, Э.Л. Ицкович (ИПУ РАН)**

*Рассмотрены свойства и характеристики современных датчиков общепромышленного назначения, применяемых для контроля работы производственных объектов предприятий технологических отраслей. Перечислены их отличия от прошлого поколения датчиков и дальнейшие перспективы их развития. Приведен обзор ряда датчиков различных измеряемых величин, разработанных в последние годы российскими организациями.*

*Ключевые слова: датчики общепромышленного назначения, свойства современных датчиков, работы по модернизации датчиков.*

#### Введение

В последние годы увеличилось число физических способов измерения, используемых в датчиках общепромышленного назначения. Этому способствует совершенствование известных чувствительных элементов (сенсоров) датчика и возможность выполнять при обработке сигналов, измеренных сенсорами датчика, специальную математическую обработку. Такая обработка стала возможной, когда в состав датчика был включен программируемый микропроцессорный преобразователь. Эти факторы привели к созданию нового поколения датчиков, в которых увеличена точность, чувствительность и стабильность измерения; упрощено их внедрение; снижены эксплуатационные затраты.

В статье рассматриваются основные общие свойства, характеристики и особенности современных датчиков и выделяются те их свойства и характеристики, которые отличают их от датчиков предыдущих поколений и определяют перспективы их развития.

Приводится обзор ряда датчиков различных измеряемых величин, разработанных в последние годы российскими организациями.

В июне 2019 г. Институт проблем управления отмечает свое 80-летие. В связи с этим напомним читателям о разработках института в области датчикоостроения и систем автоматического контроля в 50–70 гг. XX века,

известные началом широкой автоматизации производства. Эти работы определяли ведущее положение ИПУ в стране в данной области.

#### Результаты работы лаборатории автоматического контроля ИАТ (ИПУ) в годы начала построения датчиков с использованием микропроцессоров

С начала 50-х годов XX века в СССР проводились достаточно интенсивные работы по автоматизации производственных объектов предприятий различных отраслей промышленности.

В Институте автоматизации и телемеханики одним из центров этих работ стала вновь образованная лаборатория автоматического контроля под руководством одного из ведущих специалистов страны в области приборостроения, д-ра техн. наук, проф. Дмитрия Ивановича Агейкина. В лаборатории разрабатывались новые классы датчиков (причем многие из них доводились до серийного промышленного производства), создавались системы автоматического контроля производственных объектов, анализировалось рациональное разделение функций контроля между средствами автоматизации и операторами производственного объекта.

В частности, под руководством Д. И. Агейкина были разработаны и в значительной частью доведены до промышленного выпуска следующие классы датчиков:

- термомагнитные и магнитомеханические газоанализаторы промышленных газов;
- струнные датчики давления, усилия, перемещения, вибрации;
- частотные и времяимпульсные датчики.

Были экспериментально исследованы пионерские разработки Д. И. Агейкина — новые классы датчиков с использованием в их чувствительных элементах переходных процессов, которые позволяют упростить существующие методы преобразования измеряемых величин в выходной сигнал датчика, повысить его точность, уменьшить зависимость от посторонних факторов, увеличить его информативность. В основе этих классов лежит актуальная и по сей день идея об использовании зависимости переходных характеристик динамического звена, которым является чувствительный элемент датчика, от влияния различных параметров окружающей его среды. Всего Д. И. Агейкиным было разработано около 50 оригинальных датчиков, защищенных авторскими свидетельствами и патентами в ведущих странах.

Итоговым трудом Д. И. Агейкина в области датчиков является справочник-энциклопедия «Датчики систем автоматического контроля и регулирования», созданный при участии сотрудников лаборатории Е. Н. Костиной и Н. Н. Кузнецовой [1]. Его уникальность заключается главным образом в том, что в нем в весьма сжатой и концентрированной форме дается теория построения датчиков; систематизируются все физические идеи, на которых могут быть построены датчики; кратко описываются принципы работы основных классов датчиков. Весь этот материал может быть использован и сейчас для разработки новых способов измерения. Эта книга вышла двумя изданиями в 1959 и 1965 гг.

В эти же годы ведущим сотрудником лаборатории д-ром техн. наук, проф. Владимиром Юрьевичем Кнеллером был проанализирован повсеместно используемый термин «Автоматический контроль». Показано, что разные авторы понимают под этим термином разное содержание, не выделена специфика термина и его отличия от термина автоматическое измерение. Все эти разночтения существенно влияют на понимание отдельных работ в области автоматического контроля, на согласование разных разработок и на их рациональное совместное применение. Автором показано и обосновано, что «процесс автоматического контроля — это процесс автоматического получения и обработки информации о состоянии объекта и внешних условиях, конечным этапом которого является обнаружение событий, определяющих управляющие воздействия» [2]. Полученная четкая конкретизация широко используемого термина, не изменившаяся до настоящего времени, играет и сейчас существенную роль при рациональной постановке и решении задач автоматического контроля и при взаимодействии систем автоматического контроля с системами автоматического управления.

#### **Общие свойства современных датчиков технологического производства**

**Классы показателей, измеряемых датчиками технологического производства**

Принято подразделять применяемые в технологических производствах датчики по классам измеряемых ими показателей (величин). Перечислим основные классы показателей, измеряемых датчиками технологического производства, и наиболее распространенные показатели этих классов (но далеко не полностью).

*Физические показатели материальных потоков производства:* объемный и массовый расход потоков сырьевых компонентов, полуфабрикатов, готовой продукции; скорость потоков; плотность потоков; соотношение потоков при смешении; уровень, масса или объем жидкости, шлама, пульпы, сыпучих и кусковых материалов, заполняемых материальными потоками в емкостях.

*Физические показатели режимов технологических процессов:* избыточное и абсолютное давление в разных зонах процесса; разность давлений между отдельными точками процесса; значения температуры в отдельных точках процесса и температурное поле процесса по координатам производственного объекта.

*Качественные показатели материальных производственных потоков:* анализ газов; концентрации определенных веществ в потоке; компонентный состав газообразного, жидкого и твердого вещества в потоке; вязкость потока; теплотворная способность потока; значения температуры насыщенных паров, вспышки, застывания; анализ отдельных показателей качества.

*Показатели производимых и потребляемых предприятием энергоресурсов:* ток, напряжение, мощность получаемой предприятием электроэнергией, расход электроэнергии отдельными производственными объектами; дефекты свойств получаемой предприятием электроэнергией; объем (масса) производимых предприятием отдельных теплоресурсов; расход теплоэнергетических носителей отдельными производственными объектами.

*Показатели текущего состояния оборудования:* вибрация, энергопотребление, акустические индикаторы работы, температура подшипников динамического оборудования; коррозия статического оборудования (в частности, производственных емкостей).

*Экологические показатели работы предприятия:* токсичные выбросы в атмосферу от отдельных производственных объектов, содержание вредных газов в окружающей предприятие воздушной среде; загрязнение отходами предприятия окружающих его вод и почв.

#### **Варианты датчиков и их структура**

Для дальнейшего анализа области датчикоостроения выделим *однородные группы датчиков, характеризующиеся одной основополагающей особенностью*. Данное разделение позволяет очертить отличия свойств конкретных датчиков друг от друга.

1. *Односенсорные датчики или многосенсорные датчики*. Последние могут иметь как ряд однородных сенсоров (например, для анализа распределения температуры по высоте агрегата установлены измерители температуры в отдельных точках температурного поля технологического процесса), так и несколько разнородных сенсоров (например, для расчета расхода жидкости по трубе установлены сенсор перепада давления на су-

жении трубы и сенсор температуры в месте замера перепада давления, корректирующий полученное значение перепада давления по температуре жидкости).

2. Датчики, поставляемые как части систем автоматизации производственных объектов, или датчики, встроенные в оборудование производственного объекта. Последние являются неотъемлемой частью технологического оборудования и обычно характеризуются миниатюрным исполнением (вплоть до нескольких мм<sup>3</sup> при измерении температуры, давления, влажности и других параметров среды) и наличием беспроводной связи с другими средствами автоматизации.

3. Датчики, непосредственно взаимодействующие с измеряемой средой, или датчики, отделенные от измеряемой среды специальными пробоотборниками. Последние отбирают из измеряемой среды пробы, проводят их специальную обработку и передают датчикам для измерения.

4. Датчики, выдающие результирующие значения измеряемых величин непрерывно во времени, или датчики, фиксирующие значения измеряемых величин в определенные, периодические моменты времени. Последние выдают результаты измерения с интервалами времени от десятков секунд до десятков минут.

5. Датчики, используемые (согласно их техническому паспорту) в любых системах автоматизации для работы в определенной среде измерения, и датчики, специально сертифицированные на работу в системах противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ) и на защиту от неправомерных воздействий (киберзащиту). Последние, используемые в системах ПАЗ, сертифицируются по заданному уровню безопасности работы автоматизируемого объекта (стандарты ГОСТ Р МЭК 61511-2011 и ГОСТ Р МЭК 61508-2012), а используемые в системах, которые должны быть специально защищены от несанкционированного доступа, сертифицируются по заданному уровню надежности от киберугроз (стандарт ГОСТ Р МЭК 62443-2017).

Датчики любой из выше выделенных групп в подавляющем большинстве имеют многовариантную блочную структуру, состоящую из следующих блоков:

- один или ряд сенсоров;
- микропроцессорный преобразователь с интерфейсом связи с другими средствами через проводную или беспроводную сеть;
- добавочный, по отдельному требованию, местный показывающий прибор.

*Варианты исполнения сенсоров:*

- различные корпуса сенсоров под определенные свойства измеряемой среды и возможные помехи;
- различные варианты взаимодействия или соединения сенсора с измеряемой и наружной средой;
- различные материалы арматуры сенсора под химически агрессивную, абразивную, гигиеническую, взрывоопасную среду.

*Варианты исполнения преобразователей:*

- различные корпуса преобразователя под определенные свойства окружающей среды и внешние помехи;
- различное питание датчика от своего блока питания или от постороннего источника через полевую сеть;

— различные варианты формирования выходной информации преобразователя по объему и содержанию данных и по связи датчика с другими средствами через различные полевые сети;

— модульная структура, позволяющая комплектовать преобразователи из отдельных, выпускаемых разными фирмами типовых модулей стандартной магистрально-модульной архитектуры по стандарту IEEE 1155 на VXIbus, что позволяет собирать конкретный преобразователь из типовых модулей для применения с заданными сенсорами и в заданной среде.

**Функции, реализуемые современными датчиками**

Поскольку современные датчики благодаря включению в них микропроцессорного преобразователя стали многофункциональными средствами автоматизации, то реализация в каждом из них отдельных вычислительных функций, существенных для данного конкретного применения, может служить важным доводом его выделения из всей возможной группы датчиков заданной измеряемой величины. В разных датчиках разных производителей заложены разные наборы дополнительных к измерению функций. Приведем основной перечень таких функций.

*Преобразование выходного сигнала сенсора* в формат выдаваемого датчиком значения измеряемой величины в заданном наименовании единицы измерения. При этом, если выходные сигналы сенсора зависят, кроме значения измеряемой величины, от текущего состояния среды измерения, то также производится коррекция выходного значения результата измерения по сопутствующим измерениям текущего состояния среды.

*Хранение в базе данных преобразователя* датчика архива измеряемых значений за заданный интервал времени и текущих параметров работы прибора, что позволяет дистанционно, через полевую сеть, выдавать эти данные по запросу пользователя.

*Сопоставление в датчике текущего значения измеряемой величины с прошлыми значениями* этой величины, что дает возможность исключить циклическую передачу по сети каждого текущего измеряемого датчиком значения, а инициативно подключаться к сети только при изменении значения измеряемой величины на заданное отклонение от прошлых ее значений.

*Тестирование оператором текущих параметров работы датчика* через полевую сеть; его калибровка, используемый диапазон измерения, текущее сохранение нуля прибора.

*Реализация функций первичной переработки* получаемой измерительной информации: фильтрация и линеаризация измеряемых показаний, сравнение показаний с заданными значениями, вычисление сводных и статистических показателей по набору последовательных показаний и т. п.

*Самодиагностика работы датчика:* фиксация сбоев, отказов и различных неисправностей в работе датчика; оценка выхода погрешности прибора за паспортную норму; оперативное сообщение оператору о факте и типе возникшего нарушения.

*Метрологический самоконтроль датчика*, определяющий текущую погрешность работы прибора. Самоконтроль выполняется в одном из следующих форматов:

— в датчике используются два аналогичных сенсора для измерения одной и той же величины и сопоставляются значения их замеров;

— в датчике используются два разных по принципу действия сенсора для измерения одной и той же величины и сопоставляются значения их замеров;

— в датчик вводится эталонный объект, имеющий постоянное, определенное измеряемое значение, и периодически датчик проводит измерение эталонного объекта и сопоставляет полученное значение с истинным значением эталона.

*Выполнение в датчике простейших функций управления*: ПИД-регулирование, выдача управляющих воздействий через полевую сеть непосредственно на исполнительный механизм.

#### **Основные характеристики работы датчиков**

*Точностные характеристики датчиков* существенно (на порядок и более) отличаются у разных типов приборов одной и той же измеряемой величины. Они состоят из ряда дополняющих друг друга параметров, учет которых кардинально влияет на выбор прибора:

— основная погрешность датчика, которая позволяет судить о точности его работы и о возможности его использования для цели коммерческого учета (при его соответствующей сертификации Госстандартом РФ как на средство измерения). В общем случае она еще не совсем точно оценивает полную погрешность измерения, поскольку последняя зависит еще и от имеющихся дополнительных погрешностей;

— дополнительные погрешности датчика, зависящие от возможных изменений разных факторов в измеряемой и окружающей средах, которые сказываются на точности работы датчика (если в самом приборе отсутствуют компенсаторы этих изменений);

— воспроизводимость показаний датчика во времени, которая характеризует стабильность показаний прибора и влияет на необходимую частоту его метрологической поверки. Наличие в ряде датчиков функций самоконтроля позволяет своевременно определять момент выхода прибора за пределы нормальной погрешности его работы (например, из-за плавания нуля прибора или изменения свойств сенсора);

— разрешающая способность датчика (порог чувствительности в любой точке шкалы прибора). Она имеет особое значение при использовании датчика в цепи регулирования, когда разрешающая способность определяет своевременность и даже возможное упреждение необходимых управляющих воздействий;

— влияние на точность измерения различных ненаблюдаемых и, следовательно, не учитываемых факторов: появления инородных включений в измеряемой среде, осадка или налипания среды на сенсор, абразивного стачивания сенсора средой.

*Надежностные характеристики датчиков* как точное число часов их наработки на отказ большей частью

не существуют, а если они и приводятся, то их достоверности далеко не всегда можно верить. Ввиду этого особое значение имеют косвенные показатели надежности приборов, позволяющие оценить поведение прибора в имеющихся производственных условиях. Такими косвенными показателями служат общий тираж эксплуатируемых в мире приборов данной серии, показатели эксплуатации приборов данной серии на аналогичных предприятиях.

*Динамические характеристики датчиков*: время транспортного запаздывания и постоянная времени прибора. Они имеют важное значение при измерении быстро изменяющихся во времени величин и при использовании в системах ПАЗ производственных объектов.

*Указанные в технических паспортах свойства, параметры и помехи измеряемой и окружающей среды, на которые рассчитаны датчики*, имеют первостепенное значение для потенциальных потребителей приборов, поскольку они существенно ограничивают допустимый для конкретного места возможной установки приборов класс датчиков. Особенности измеряемой среды определяют объем работ по внедрению и эксплуатации различных допустимых датчиков, а зачастую указывают на нецелесообразность их использования для конкретного объекта.

#### **Важные особенности современных датчиков**

Особенности современных датчиков наглядно выявляются при их сопоставлении с датчиками предыдущего поколения, не имеющими в своем составе микропроцессорного преобразователя. Последние еще занимают основную позицию в измерениях всех показателей работы производственных объектов отечественных технологических предприятий. Предприятиям, приобретающим новые приборы, целесообразно учесть следующие особенности современных датчиков.

*Использование новых способов измерения*, требующих вычислительной обработки выходных сигналов сенсоров и имеющих ряд преимуществ:

— размещение датчика вне измеряемой среды, что расширяет область его применения, упрощает внедрение и эксплуатацию;

— исключение в сенсорах движущихся частей, что повышает надежность работы датчика и упрощает его обслуживание;

— отсутствие особых требований сенсоров к конструкции объекта измерения и к характеру поведения измеряемого показателя, что расширяет возможности использования датчиков в разных местах производственных объектов и удешевляет их установку.

*Передача выходного сигнала датчика через проводную или беспроводную сеть в цифровом виде*, а не в виде низковольтного аналогового сигнала:

— электрические и магнитные помехи уменьшают искажения передаваемых цифровых измерительных данных, что повышает точность измерения и надежность работы прибора;

— использование беспроводной радиопередачи для отправки каждым датчиком цифрового сообщения о ре-

зультате текущего измерения при различной стратегии разделения радиоканалов через: свой временной интервал, свою отведенную датчику частоту или свой отдельный код позволяет при достаточно высокой надежности передавать информацию от датчиков с существенной экономией затрат по сравнению с проводной связью.

*Перспективные функции обработки измерительной информации в преобразователе датчика*, повышающие точность и надежность контроля работы производственных объектов:

- функция адаптации работы датчика, которая в зависимости от текущих свойств измеряемой величины, автоматически изменяет диапазон измерения прибора;

- функция прогнозирования значения измеряемой величины при ее дискретном во времени определении до следующего по времени измерения;

- функции самодиагностики работы датчика и его метрологического самоконтроля.

Все эти функции значительно влияют на качество контроля работы производственных объектов и облегчают работу их операторов.

#### **Отдельные виды датчиков, разработанные российскими организациями в последние годы**

Сегодня без датчиков немыслима работа ни одного предприятия. Эту тематику развивают множество исследователей по всему миру. Результаты исследований публикуются в научных журналах и материалах международных конференций. Отечественные специалисты знакомятся с новинками международного рынка датчиков и современными методами измерения благодаря обзорам, которые регулярно подготавливаются для журнала «Измерения, контроль, автоматизация» его бессменным главным редактором В. Ю. Кнеллером. В связи с обширностью темы рассмотреть достижения мира датчиков в одной статье невозможно.

Ниже приведен краткий обзор новых датчиков и их сенсоров для технологических отраслей промышленности, разработанных отечественными организациями. Обзор основан на открытых публикациях отечественных специализированных изданий и не претендует на всеобъемлющий охват всех направлений развития приборостроения. Однако по представленным примерам можно сделать выводы о развитии данной предметной области в России.

Рассмотрены датчики измерения давления, температуры, концентрации газов и приборы определения качества материальных потоков.

#### **Измерение давления**

При создании датчиков давления остановимся на исследованиях в области выбора и расчета параметров измерительной мембраны.

Основным элементом датчика давления является кремниевый преобразователь с тензорезистивным эффектом. Расчет оптимального расположения тензорезисторов на мембране является основой для проектирования систем датчиков физических величин, в частности, давления. В результате анализа зависимости деформа-

ций в мембране датчика давления от внешней нагрузки подготовлены рекомендации по выбору конструктивно-технологического решения для мембран и расположения тензорезисторов [3].

Следующая работа посвящена волоконно-оптическим датчикам (ВОД) давления, характеризующимися малыми габаритами и массой, невосприимчивостью к электромагнитным помехам, а также совместимостью с современными волоконно-оптическими системами передачи информации. Для использования в измерительной технике наиболее подходят ВОД с амплитудной модуляцией светового сигнала, которые отличаются наиболее простой и технологичной конструкцией и требуют минимальных материальных и временных затрат на монтаж и эксплуатацию. Исследования амплитудных одноволоконных и двухволоконных волоконно-оптических преобразователей (ВОП) отражательного типа для ВОД давления показали, что наибольшую чувствительность и максимальный динамический диапазон измерений обеспечивают одноволоконные ВОП, в схеме которых отражающий элемент — тонкая мембрана — изменяет свою кривизну под действием давления [4].

#### **Измерение температуры**

Измерение температуры выполняется контактным и бесконтактным методами, и современные исследования в области разработки датчиков выполняются в обоих направлениях. Рассмотрим примеры, направленные на адаптацию приборов к сложным условиям промышленной эксплуатации и уменьшение погрешности измерения.

*Пирометрический способ измерения температуры* расплава позволяет проводить измерения бесконтактно и с высоким быстродействием. Общим недостатком пирометрических измерений является высокая погрешность при измерениях, связанная, прежде всего, с неопределенностями коэффициентов черноты, зависящих от состояния поверхностей измеряемых расплавов и контролируемой температуры, влияния поглощений промежуточной средой. Кроме того, процессы выплавки сопровождаются шлакообразованиями, которые также не позволяют вести измерения с необходимой точностью. Для исключения этих неопределенностей разработчиками был предложен пирометрический метод с визирной погружной трубой. При измерении температуры этим методом пирометр визируется на дно погруженного в расплав наконечника трубы. Если расстояние от чувствительного элемента до дна наконечника в 10 раз больше внутреннего радиуса визирной трубы, то в этом методе практически воспроизводится полость абсолютно черного тела (АЧТ) и пирометр показывает истинную температуру независимо от того, из какого материала изготовлена труба. Основной проблемой при применении этого метода является выбор термостойкого материала визирной трубы.

Для решения и этой проблемы в работе [5] предлагается аналог метода с визирной трубой, но излучатель, представляющий собой полость модели АЧТ, изготавливается в виде отдельного тигля из прозрачного для теплового излучения материала. При этом в качестве ра-

диационного пирометра используется оптоволоконный пирометр. Принципиальным отличием нового подхода к измерениям температуры расплавов является использование материала тигля, прозрачного в спектральном диапазоне излучений расплавов. При этом сам расплав, излучающий через стенки тигля, будет формировать излучающую полость типа модели АЧТ.

Авторы следующей разработки устраняют погрешности пирометров и тепловизоров, связанные с влиянием внешней среды на процесс измерения температуры. В реальных промышленных условиях между объектом, температура которого измеряется, и измерительным прибором может присутствовать нестационарное пылевое облако, которое вызывает дополнительную погрешность, значительно искажающую результаты измерений. Для повышения точности измерений температуры с помощью пирометров и тепловизоров предложено изучить влияние запыленности внешней среды на бесконтактные измерения температуры. Для решения указанной задачи разработана специальная экспериментальная установка, с помощью которой проводится экспериментальное моделирование базовых состояний пылевого облака клинкерной пыли и выделены наиболее информативные признаки оценки этих состояний на примере использования пятиканального пирометра со спектральным разделением каналов и оптического пылемера. Предложенная экспериментальная установка позволяет адекватно моделировать различные ситуации запыленного пространства между прибором бесконтактного контроля температуры и объектом измерения. Результаты моделирования могут быть использованы для коррекции погрешности и повышения точности измерений температуры при наличии в среде измерения пылевого облака, например, клинкерной пыли [6].

Измерение температуры можно выполнять с помощью градиентных датчиков теплового потока (ГДТП). На сегодняшний день распространены перспективные приборы на основе монокристалла висмута чистоты 0,9999. Такие ГДТП характеризуются чувствительностью  $S_0=5...20$  мВ/Вт, рабочим диапазоном температур 20...540 К (верхняя граница близка к точке плавления висмута) и имеют толщину около 0,2 мм. ГДТП характеризуются целым рядом преимуществ использования по сравнению с альтернативными методами измерения температуры. Например, многочисленные работы, выполненные в ударных трубах и на промышленных турбогенераторах мощностью 160 МВт, показали, помимо прочего, что ГДТП являются единственными датчиками, работоспособными в условиях электромагнитных воздействий порядка 2...4 Тл и гамма-излучения.

Однако этот метод не лишен серьезных и принципиально неустранимых недостатков, связанных с особенностями висмута, а именно: его низкой теплоустойчивостью (до 544,5 К — точки плавления висмута); значительной трудоемкостью и малой пригодностью технологии изготовления к условиям промышленного производства; ограничениями толщины датчика технологически достижимым пределом, равным 0,1 мм.

Изложенные причины привели к необходимости создания нового семейства ГДТП — гетерогенных ГДТП на основе использования композитов из разнородных материалов, сочетание которых позволит устранить указанные проблемы. Преимущество подхода заключается в том, что композиты можно создавать в простейших условиях, широко варьируя ассортимент используемых материалов. К настоящему времени созданы ГДТП на основе композиций сталь 12Х18Н9Т + никель, сталь 65Х13 + никель, хромель + алюмель и железо + константан. Эти ГДТП применимы при температурах до 1300 К и выше. Авторы подчеркивают, что применение высокотемпературных ГДТП оправдано в промышленных условиях. В настоящее время датчики из композита сталь 12Х18Н9Т + никель устанавливаются на трубах котельных агрегатов [7].

#### *Измерение концентрации газов*

Для датчиков, которые сигнализируют об утечках или о превышении предельно-допустимой концентрации опасного газа, важными характеристиками являются скорость реакции, время восстановления после реакции, селективность и чувствительность.

Полупроводниковые датчики измерения газов характеризуются относительно низкой стоимостью, простой в использовании, чувствительностью и мобильностью. Принцип действия таких датчиков основан на изменении поверхностного сопротивления полупроводниковой пленки в результате адсорбции молекул газа. Адсорбция любого газа зависит от температуры; каждый газ имеет свою характерную температуру максимальной адсорбции. Поэтому селективность датчика определяется его рабочей температурой (часто говорят, что принцип действия таких приборов основан на нагреве). При разных рабочих температурах одним датчиком можно контролировать разные газы при различных рабочих температурах. Исследования в области полупроводниковых датчиков выполняются в направлении выбора материала с высокой чувствительностью к низкой концентрации детектируемого газа, обладающего быстрой реакцией на детектируемый газ и быстро восстанавливающегося. В подтверждение сказанному приведем ряд примеров.

#### *Полупроводниковые датчики измерения газов, работающие за счет нагрева*

Интенсивное развитие ряда областей полупроводниковой техники и химии вызывает все возрастающий интерес к исследованию поверхности полупроводников, что связано с необходимостью получения всесторонней информации о ее физико-химическом состоянии: идет ли речь об уменьшении параметров существующих приборов современной микро- и оптоэлектроники, о создании и работе новых приборов, действие которых основано на использовании поверхностных явлений, о применении полупроводников в качестве датчиков и разработке соответствующих методов физико-химического анализа, о подборе катализаторов и др. Лидерами среди материалов современной полупроводниковой техники, пришедших на смену элементарным полупро-

водникам (кремнию и германию), по-прежнему остаются полупроводники типа  $A_{III}B_{V}$ .

Авторы [8] изучили изменения поверхностной активности полупроводников типа  $A_{III}B_{V}$  (GaAs, InAs, InSb, InP), экспонированных на воздухе, термовакуумированных, подвергнутых механохимическому диспергированию в воде, изопропиловом спирте, методами гидролитической адсорбции, механохимии, ИК-спектроскопии. В результате исследований сформулированы практические рекомендации по использованию изученных полупроводников в качестве материалов (активных элементов) газовых сенсоров-датчиков. Цель использования современных полупроводников в приборах измерения концентрации газа — повышение надежности эксплуатации и точности измерений.

Задача селективного определения компонентов газовых смесей может быть решена посредством применения фильтрационных элементов. Одними из ключевых факторов, влияющих на прохождение газа через фильтрационный элемент, являются размер и морфология пор. Исследователями проведены работы по получению структур с интегрированными мембранами на основе канального кремния, сформированного на подложках кремния n-типа. Изучены структурные параметры каналов в зависимости от режимов анодного травления и состава электролита. Разработана лабораторная технология формирования интегрированных мембран на основе пористого кремния толщиной более 100 мкм [9].

В настоящее время для контроля содержания кислорода в воздухе используются кислородные газовые анализаторы, основанные на магнитном методе анализа. Возможности их применения в пожаро- и взрывоопасных условиях ограничены большими габаритами и инерционностью. Устранение перечисленных недостатков возможно за счет применения люминесцентного метода. Люминесценция ряда координационных соединений Ru (II), Ir (III) и Pt (II) с дииминовыми, циклометаллированными или порфириновыми лигандами эффективно тушится кислородом. Спектры поглощения и люминесценции указанных комплексов находятся в видимом диапазоне, поэтому использование светодиодов и волоконно-оптических систем для создания газоанализаторов нового поколения представляется весьма перспективным. В работе [10] предлагается новая основа для люминесцирующего сенсорного элемента на основе иммобилизованного комплекса в катионообменной мембране. Исследования характеристик нового сенсорного элемента планируется продолжить. В результате будут сформулированы рекомендации для областей применения датчиков на его основе.

Выше отмечалось, что полупроводниковые датчики измерения концентрации газов выполняют адсорбцию того или иного газа при различных температурах, то есть для функционирования прибора необходимо нагревать его чувствительный элемент. Варианты нагрева полупроводников в датчиках измерения концентрации газов стали одним из направлений исследований с целью улучшения характеристик газоанализаторов. Для

улучшения селективности к газам и уменьшения энергопотребления исследуются возможности использования импульсного нагрева (режима работы, при котором нагрев включается периодически с определенной частотой и длительностью). Также ведутся исследования и патентуются способы, когда температура чувствительного слоя все время изменяется, а по поведению электрического сопротивления чувствительного элемента определяется концентрация детектируемого газа. Однако эти режимы работы не приводят к значительному уменьшению энергопотребления, а рабочая температура остается высокой [11].

*Полупроводниковые датчики измерения газов, работающие за счет освещения*

Известны разработки полупроводниковых датчиков, использующих принцип освещения чувствительного элемента ультрафиолетовым светом. Однако светодиоды, используемые для этого, на порядок дороже светодиодов видимого диапазона, имеют низкий коэффициент полезного действия и соответственно высокое энергопотребление.

Исследования принципов работы датчиков на основе освещения с целью уменьшения энергопотребления были продолжены. В результате появился новый наноструктурированный газовый датчик, позволяющий следить за окружающей средой без нагревания, за счет освещения чувствительного элемента зеленым светом. Таким образом конструкция нового прибора аналогична классическому полупроводниковому газовому датчику, но в нем отсутствует нагревательный элемент и установлен зеленый светодиод. Энергопотребление светодиода может быть порядка 1 мВт. Повышенная чувствительность датчика к водороду возникает из-за использования композитов на основе оксидов цинка и индия определенной структуры (нанокристаллических) [11].

#### **Контроль качественных показателей материальных потоков**

Важнейшим классом измеряемых величин для производства в целом и для каждого технологического агрегата в отдельности являются качественные показатели всех поступающих, промежуточных и выпускаемых материальных потоков: сырьевых компонентов, производимых агрегатами полуфабрикатов, потоков смешения (компаундирования) ряда полуфабрикатов, разных видов готовой продукции. Этому классу измерений уделяется особое внимание на страницах журнала. Специализированные тематические подборки были опубликованы в мартовских выпусках в 2017 и 2018 гг. Здесь же приведем результаты двух исследований из области ИК-спектроскопии и колориметрии.

*Новый инфракрасный (ИК) фурье-спектрометр* с выносным оптоволоконным зондом предназначен для автоматизированной системы экспресс-идентификации и контроля качества органических соединений (в жидкой фазе) без пробоподготовки, а также для использования в составе системы контроля и управления в производственных технологических линиях. Возмож-

*Не стоит сомневаться, что с помощью имеющихся теперь у нас на вооружении технических средств человеческое заблуждение может легко перейти те границы, за которыми в нем появляется нечто дьявольское.*

Жак Лакан

ность создания такого прибора связана с появлением эффективных оптоволоконных световодов для среднего ИК-диапазона (для спектрального диапазона, используемого в молекулярной спектроскопии; именно в этом диапазоне сосредоточены вращательно-колебательные полосы поглощения большинства исследуемых химических соединений). С помощью соответствующих оптоволоконных зондов ИК-излучение от фурье-спектрометра направляется в контролируемые зоны технологического процесса, а затем возвращается на фотоприемник прибора. Это и является основным отличием указанного прибора от существующих аналогов. Прибор позволяет выполнять дистанционные измерения спектральных характеристик исследуемых объектов (различных жидкостей, например, топлив, горюче-смазочных материалов, различных химических реактивов и т.п.), а именно: спектров пропускания, отражения и нарушенного полного внутреннего отражения с помощью инфракрасных оптоволоконных зондов. Предлагаемый ИК фурье-спектрометр не имеет аналогов в России и серийных аналогов за рубежом. Максимальный спектральный диапазон работы прибора 2,8...18 мкм ( $555...3570 \text{ см}^{-1}$ ) по уровню 10% максимальной интенсивности. Это позволяет эффективно использовать существующие для среднего ИК-диапазона оптоволоконные зонды и различные чувствительные (узкополосные) приемники ИК-излучения. [12].

Современные колориметрические методы и приборы позволяют осуществлять измерения спектров пропускания и/или отражения исследуемого объекта в области длин волн  $\lambda = 380...760 \text{ нм}$  и вычислять на основе спектральных данных параметры цвета (цветности) в любой из известных колориметрических систем. Использование спектрометров в составе колориметрических приборов связано как с усложнением конструкции последних, так и существенным возрастанием их стоимости. В связи с этим представляет интерес применение для колориметрических исследований оптико-спектральных датчиков на основе фотодиода с тремя фотоприемными площадками, имеющими оптические фильтры для выделения красного (R), зеленого (G) или синего (B) компонентов регистрируемого излучения. Использование такого фотодиода позволяет упростить конструкцию колориметрического датчика, оптимизировать его массогабаритные характеристики (вплоть до создания миниатюрного варианта), а также снизить стоимость. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что разработанный колориметрический датчик на основе RGB-фотодиода

обеспечивает измерение параметров цветности прозрачных и диффузно отражающих объектов на уровне различимых визуально оттенков цвета. Представляется целесообразным использовать такой датчик для получения цифровой информации о цвете объекта в таких, например, областях, как спектроскопия, фотометрия и даже медицина [13].

#### Промышленные датчики и Industrial Internet of Things

В последние годы мы много говорим о цифровой революции и технологиях, на которых она базируется.

Industry 4.0 — переход на автоматизированное цифровое производство, осуществляемое в режиме реального времени в постоянном взаимодействии с внешней средой, выходящее за границы одного предприятия, с перспективой объединения в глобальную промышленную сеть вещей и услуг ([www.tadviser.ru](http://www.tadviser.ru)).

Значимым и стремительно развиваемым компонентом Industry 4.0 является Industrial Internet of Things (IIoT), предоставляющий «вещам» возможность использовать преимущества остальных технологий цифровизации — облачных приложений, больших данных, современного алгоритмического и аналитического обеспечения. В настоящее время производители промышленных датчиков уже выпускают изделия, соответствующие требованиям IIoT. В первую очередь эти изделия применяются на дискретных производствах. Однако появляются приборы и для отдельных применений на предприятиях, характеризующихся непрерывным производственным циклом. Приведем один пример.

Компания Pepperl+Fuchs разработала ультразвуковой беспроводной радиодатчик для контроля уровня заполнения в мобильных контейнерах, резервуарах и бункерах. Кроме того, устройство с питанием от аккумулятора определяет геолокацию контейнера и передает собранные данные через соединение GSM или LoRaWAN в определенный пункт сбора данных в Internet. Сервис WILSEN.service не только обеспечивает безопасный обмен данными, но и позволяет централизованно управлять всеми датчиками IIoT в полевых условиях. В свою очередь, к услуге могут быть подключены программные системы и платформы для обработки бизнес-данных (<http://www.pepperl-fuchs.com>).

#### Заключение

Последние годы отметились совершенствованием и увеличением разнообразия сенсоров датчика и возможностью проводить в микропроцессорном преобразователе датчика всю необходимую математическую обработку измеряемых сенсорами датчика сигналов. Эти факторы привели к увеличению точности, чувствительности и стабильности работы датчиков; к упрощению их установки; к снижению эксплуатационных затрат. На рынке появилось большое разнообразие приборов, измеряющих одни и те же величины при одинаковых свойствах измеряемой и окружающей среды, но отличающихся друг от друга техническими характеристиками, условиями установки и работы, методами обслуживания, экономическими

показателями эксплуатации, стоимостными параметрами. Ввиду этого потенциальные покупатели датчиков могут отбирать для работы в конкретных условиях наиболее рациональные по ряду важных критериев приборы из широкого набора представленных на рынке средств. Важно лишь правильно воспользоваться появившимися возможностями, а для этого необходимо хорошо представлять различия и особенности работы разных типов датчиков, измеряющих одни и те же величины

Как видно из представленного обзора отдельных видов датчиков, разработанных российскими организациями в последние годы, самое пристальное внимание сегодня уделяется созданию и применению новых материалов с более эффективными электрофизическими и эксплуатационными показателями для микросистемной техники. Отдельный класс разработок направлен на улучшение точностных показателей в ходе измерений. Исследований в области новых методов измерений значительно меньше, хотя и такие работы проводятся. Важно, что они не ограничены теоретическим этапом. В частности, в [3] приведены результаты натурных испытаний предложенного оптоволоконного пирометра при измерениях температуры расплава в закалочной печи в ОАО «Омсктрансмаш» (г. Омск). Разработка прибора выполнялась коллективами Омского государственного технического университета и НПП «Эталон» (г. Омск).

Авторы наноструктурированного газового датчика, функционирующего за счет освещения чувствительного элемента зеленым светом, представили результаты экспериментов, свидетельствующие о возможности нового прибора в перспективе заменить собой аппаратуру предыдущего поколения. Разработка выполнена сотрудниками МГУ им. М. В. Ломоносова и Курчатовского института и НИФХИ им. Л. Я. Карпова [11]. Созданные учеными сенсоры перспективны как для эффективного контроля степени загрязнения окружающей среды, так и для мониторинга состава воздуха в замкнутых помещениях, начиная от учебных аудиторий и заканчивая космическими станциями.

В 2012–2017 гг. в ходе диссертационного исследования, выполненного в ИПУ РАН, были разработаны методы коррекции показаний гидростатических уровнемеров применительно к условиям эксплуатации АЭС. Данные методы успешно зарекомендовали себя на практике и позволили снизить погрешность показаний измерительных каналов уровня в переходных режимах до 3% за счет учета множества динамически меняющихся параметров рабочей среды и целого ряда технических характеристик измерительных каналов, привнося при этом унификацию настроечных параметров датчиков разности давлений. Впоследствии их внедрение в атомной отрасли РФ позволило пересмо-

треть применяемые методы и подходы по корректировке показаний промышленных гидростатических уровнемеров с выходным аналоговым сигналом в целом [14].

#### Список литературы

1. Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н.Н. Датчики систем автоматического контроля и регулирования. Машгиз. 1965.
2. Кнеллер В.Ю. Об определении и специфике автоматического контроля // Автоматика и телемеханика. 1962. № 4. стр. 509–518.
3. Тиняков Ю.Н., Николаева А.С. О расчете мембран датчиков давления. [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_25415027\\_30583932.PDF](https://elibrary.ru/download/elibrary_25415027_30583932.PDF).
4. Вознесенская А.О. Амплитудный волоконно-оптический преобразователь отражательного типа для датчика давления <http://pribor.ifmo.ru/file/article/5869.pdf>
5. Захаренко В.А., Веприкова Я.Р., Кропачев Д.Ю. Пирометр для измерения температуры расплавов [http://vestnik.omgту.ru/images/stories/arhiv/2018/pmt/4\\_160\\_2018/114-118.pdf](http://vestnik.omgту.ru/images/stories/arhiv/2018/pmt/4_160_2018/114-118.pdf)
6. Чернышев Н.С., Ионов Б.П., Ионов А.Б. Экспериментальная установка для изучения влияния запыленности на бесконтактные измерения температуры [http://vestnik.omgту.ru/images/stories/arhiv/2018/pmt/2\\_158\\_2018/110-115.pdf](http://vestnik.omgту.ru/images/stories/arhiv/2018/pmt/2_158_2018/110-115.pdf)
7. Митяков А.В. Градиентные датчики теплового потока в физическом и промышленном эксперименте <http://pribor.ifmo.ru/file/article/4862.pdf>
8. Кировская И.А., Юрьева А.В., Эккерт А.О., Уманский И.Ю., Колесников Л.В., Матяш Ю.И., Корнеев С.А. Исследование активности поверхности полупроводников типа АПШВ. Возможности их использования в сенсорной технике [http://vestnik.omgту.ru/images/stories/arhiv/2018/pmt/5\\_161\\_2018/111-115.pdf](http://vestnik.omgту.ru/images/stories/arhiv/2018/pmt/5_161_2018/111-115.pdf)
9. Болотов В.В., Ивлев К.Е., Князев Е.В., Пономарева И.В. Формирование и структурные исследования интегрированных мембран на основе канального кремния [http://vestnik.omgту.ru/images/stories/arhiv/2018/pmt/3\\_159\\_2018/59-63.pdf](http://vestnik.omgту.ru/images/stories/arhiv/2018/pmt/3_159_2018/59-63.pdf)
10. Ермолаев В.С., Иночкин М.В., Пузык И.П., Хлопонин Л.В., Пузык М.В. Сенсорный элемент люминесцентного кислородного датчика <http://pribor.ifmo.ru/file/article/5288.pdf>
11. Гопаненко Н. Физики МГУ изобрели новый датчик контроля состава воздуха // Электронное периодическое издание «Э Вести». 2017. Ноябрь. <http://www.e-vesti.ru/ru/fiziki-mgu-izobreli-novyj-datchik-kontrolya-sostava-vozduha/>
12. Балашов А.А., Вагин В.А., Егоров А.И., Хорохорин А.И. Инфракрасный фурье-спектрометр с выносным оптоволоконным зондом <https://cyberleninka.ru/article/v/infrakrasnyy-furije-spektrometr-s-vynosnym-optovolokonnyy-zondom>
13. Белов Н.П., Грисимов В.Н., Смирнов Ю.Ю., Шерстобитова А.С., Ясков А.Д. Колориметрический датчик на основе трехэлементного RGB-фотодиода <http://pribor.ifmo.ru/file/article/6184.pdf>
14. Калашников А.А. Справочник по настройке промышленных гидростатических уровнемеров. М.: Инфра-Инженерия. 2017. 194 с.

*Аристова Наталья Игоревна* – канд. техн. наук, старший научный сотрудник,

*Ицкович Эммануил Львович* – д-р техн. наук, главный научный сотрудник ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН.

Контактные телефоны: (495) 334-90-21, 334-91-30.

E-mail: [avtprom@ipu.ru](mailto:avtprom@ipu.ru)