

## **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ, ИСТОЧНИКОВ ПОГРЕШНОСТИ И ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ\***

**О.Ю. Бушув**

В соответствии с ГОСТ Р 8.673–2009 обязательным этапом при разработке интеллектуальных датчиков с функцией метрологического самоконтроля является анализ составляющих погрешности датчика. В данной работе проанализированы возможные неисправности и источники нарастания погрешности тензометрических преобразователей давления. Выявлены те неисправности, которые влияют на частотную характеристику тензопреобразователей, и, следовательно, могут быть обнаружены при анализе динамических характеристик датчика.

*Ключевые слова:* тензопреобразователи давления, неисправности, источники погрешности, диагностика и обнаружение неисправностей, метрологический самоконтроль, интеллектуальные датчики, частотная характеристика.

### **Введение**

В настоящее время наблюдается рост интереса со стороны промышленности к так называемым интеллектуальным средствам измерения [1], обладающим большими возможностями по сравнению с традиционными средствами измерения. Это вызвано, с одной стороны, необходимостью обеспечения максимального срока службы прибора без необходимости его демонтажа и обслуживания при сохранении метрологических характеристик и надежности, с другой стороны, необходимостью обеспечения уверенности в том, что датчик работает надлежащим образом, соответствует предъявляемым к нему требованиям, а не отклоняется ввиду нарушения технических условий при его изготовлении или влияния на него каких-либо случайных факторов. Особенно велика потребность в таких приборах в радиохимической и аэрокосмической промышленности, где регулярный демонтаж датчика невозможен или затруднен.

В то же время наблюдается несоответствие большинства «интеллектуальных» датчиков, представленных сегодня на рынке, требованиям, которые предъявляются к ним, например, со стороны ГОСТ Р 8.673–2009 ГСИ. «Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения». В данном документе излагаются основные термины и определения, касающиеся интеллектуальных датчиков и систем измерения. Так, в нем говорится, что интеллектуальный датчик должен обеспечивать автоматическую проверку того, находится ли его текущая погрешность измерений в заданных пределах.

Состояние датчика, при котором его погрешность в процессе эксплуатации в рабочих условиях находится в установленных пределах, называют метрологической исправностью. На наш взгляд, современное развитие измерительной техники не позволяет произвести мгновенный переход к интеллектуальным средствам измерения, обеспечивающим в полной мере метрологический самоконтроль. Для его обеспечения необходимо проведение масштабных научных исследований, направленных, в том числе, на выявление критической составляющей погрешности средства измерения, формирование пригодных для контроля параметров, характеризующих эту погрешность, разработка конструкторских решений, позволяющих внедрить принцип самоконтроля в средство измерения.

### **Рекомендации ГОСТ Р 8.734–2011**

В соответствии с ГОСТ Р 8.734–2011 выбор метода метрологического самоконтроля при разработке интеллектуального средства измерения должен опираться на результаты анализа состав-

---

\* Работа выполнена в рамках Государственного контракта № 16.552.11.7058 от 12.07.12 г. Заказчик – Министерство образования и науки Российской Федерации.

ляющих погрешности датчика. В ряде случаев речь может идти не только об источниках погрешности, но и о неисправностях преобразователя. Под неисправностью понимается некоторый дефект или нарушение в конструкции преобразователя, приводящие к тому, что преобразователь в данный момент времени не соответствует хотя бы одному из требований, характеризующих нормальное выполнение заданных функций, или находится на грани отказа. В том числе неисправность может являться причиной нарастания погрешности.

Был предложен метод оценки состояния тензопреобразователя давления, основанный на анализе его частотной характеристики [3]. Цель данной работы – проанализировать возможные неисправности и источники погрешностей тензопреобразователя давления и оценить возможность диагностики данных неисправностей при помощи анализа частотной характеристики преобразователя.

При выявлении источников погрешности, нарастающей в процессе эксплуатации, рекомендуется [2], в частности, выполнить следующие этапы: анализ ожидаемых условий эксплуатации; анализ публикаций в научно-технической литературе, касающихся причин возникновения погрешностей аналогов; анализ опыта эксплуатации аналогов по сведениям о причинах метрологических отказов в процессе эксплуатации; выявление «слабых звеньев» аналогов (под «слабыми звеньями» понимают элементы и узлы конструкции, изменение характеристик которых, в том числе вследствие изменения свойств материалов, может со временем привести к существенному росту погрешности).

В [2] указывается, что возникновение погрешности в процессе эксплуатации, в основном, обусловлено:

а) изменением характеристик материалов, элементов и узлов конструкции, а также технологических процессов (при их полном соответствии конструкторско-технологической документации);

б) повреждениями, вызванными нарушениями технологических процессов изготовления датчиков или каналов измерительной системы;

в) вторичными повреждениями в процессе эксплуатации как следствием процессов, вызванных повреждениями пункта б).

В ГОСТ Р 8.734–2011 также приведены источники погрешности и условия их возникновения, характерные для датчиков и преобразователей давления. К первому рангу приоритета отнесены такие источники погрешности и условия их возникновения, как:

- выбросы давления за пределы диапазона, указанного в документации;
- осадки, засорение технологической мембраны;
- отклонение функции преобразования, обусловленное эффектами старения, например временем, давлением, температурой, перегрузкой;
- слишком большой «бросок давления вниз» в рабочих условиях.

Ко второму рангу приоритета отнесены:

- эрозионный износ, коррозия на технологической диафрагме, вплоть до разрыва диафрагмы;
- технологическое уплотнение в контакте с фронтальной стороной диафрагмы.

### **Анализ информации в научно-технической литературе**

Для выявления наиболее существенных источников погрешностей тензопреобразователей давления был проведен анализ научно-технической литературы. Так, в [4] одной из основных причин выхода тензопреобразователей из строя названо повреждение диафрагмы в результате гидравлических ударов или резких пульсаций давления. В [5] описана мембранно-рычажная схема преобразования давления в электрический сигнал в мембранном блоке датчика давления и проанализированы причины появления мультипликативной и аддитивной составляющих погрешности в процессе эксплуатации.

Описанная в [5] конструкция тензопреобразователя и мембранного блока включает в себя мембрану (измерительную или измерительно-разделительную), ленточную тягу, рычаг и мембрану тензопреобразователя с припаянным к нему полупроводниковым чувствительным элементом. Деформация моста Уинстона, выполненного на чувствительном элементе, приводит к изменению сопротивления его плеч пропорционально измеряемому давлению. Утверждается, что из-

меряемое давление, воспринимаемое мембраной, уравнивается в мембранном блоке жесткостью мембраны и жесткостью тензопреобразователя.

Жесткость мембраны и жесткость тензопреобразователя зависят от их формы и геометрических размеров, а также от формы и геометрических размеров составляющих частей и модуля упругости материала мембран и чувствительных элементов. Изменение жесткости (в результате изменения геометрических размеров или модуля упругости материалов) может привести к нарастанию погрешности преобразования, причем изменение размера (например, длины ленточной тяги) приводит к возникновению аддитивной погрешности, а изменение модуля упругости – мультипликативной. Наряду с этим, изменение жесткости приводит к изменению собственных частот конструктивных элементов, что позволяет связать нарастание погрешности с уходом собственных частот от начальных значений.

Причинами изменения геометрических размеров элементов мембранного блока могут быть: температурная деформация; релаксация напряжений в сварных соединениях мембраны с корпусом и жестким центром; деформация элементов крепления узла тензопреобразователя; остаточные деформации мембраны после перегрузок; изменение усилия затяжки винтов. Изменение модуля упругости материала мембраны, как указывается в [5] может иметь место в результате отрыва дислокационных петель от точек закрепления и роста плотности дислокаций при деформации материала мембраны, вследствие односторонних перегрузок как при изготовлении, так и при эксплуатации датчиков. Также в [5] указывается, что возникновение мультипликативной погрешности может быть обусловлено изменением характера напряжений в мембране, которые присутствуют вследствие воздействия на мембрану термомодеформационного сварочного цикла.

В работе [6] приведены основные типы дефектов микроэлектронных датчиков, способствующих деградации их характеристик. В частности, рассматриваются причины отказов полупроводниковых чувствительных элементов, которые разделены на три вида:

- 1) выход основных электрических параметров за установленные нормы;
- 2) короткие замыкания р–п-переходов и планарных структур;
- 3) обрывы металлизации и выводов.

Первый вид отказов относится к постепенным и может возникать от дефектов, которые находятся на поверхности в виде загрязнений, из-за наличия инверсионных слоев или ионных токов утечки, а также от дефектов полупроводникового материала [6]. Эти дефекты являются причиной изменения электрических параметров, например, таких, как напряжение разбаланса моста, сопротивление изоляции и др. Второй вид отказов относится к катастрофическим и проявляется при наличии дефектов окисла в виде проколов и микротрещин, которые возникают в процессе фотолитографии и термического окисления.

Отказы полупроводниковых чувствительных элементов, связанные с тонкопленочной металлизацией, возникают в результате:

- разрыва металлизации в области контактных окон на ступеньках окисной пленки;
- образования изолирующих пленок в местах контакта металлизации и диффузионного слоя, что или увеличивает сопротивление границы раздела металл-полупроводник, или приводит к полному электрическому обрыву омических контактов.

На основе анализа литературы можно заключить, что рассматриваемый в данной работе метод, основанный на оценке частотной характеристики преобразователя давления, наиболее перспективен для выявления тех дефектов, которые связаны с изменением жесткости конструктивных элементов преобразователя – деформация мембраны, изменение ее модуля упругости, изменение размеров рычажного механизма, нарушение резьбовых и сварочных соединений, плотности зажимов и др.

#### **Анализ опыта эксплуатации и «слабых звеньев» тензопреобразователя**

Анализ опыта эксплуатации тензопреобразователей давления, содержащегося в базе данных одного из предприятий Челябинской области, позволил сделать следующие выводы относительно причин отказов тензометрических датчиков давления. Наиболее распространенными причинами отказов стали: деформация мембран или разрушение тензопреобразователя вследствие превышения предельно допустимого давления, пневмо- и гидроудара или кратковременной пере-

грузки односторонним давлением; загрязнение измерительных полостей, попадание внутрь датчика и электронного блока инородных тел, жидкости, влаги вследствие неплотно закрытой крышки; вмятины, царапины на мембране, нарушение резьбы и перекося корпуса датчика в результате механических воздействий; нарушение герметичности вследствие дефектов в сварных швах. Кроме того, частыми причинами отказов является несанкционированный доступ к частям датчика со стороны потребителя; выход из строя ЦАП, электронного блока датчика в результате электрокоррозии, нерегламентированных поворотов корпуса электронного блока до замыкания и обрыва проводов; сильное превышение электрического напряжения или температуры окружающей среды.

Некоторые из перечисленных причин не приводят мгновенно к полному отказу датчика. В таком случае может наблюдаться постепенный уход метрологических характеристик, без явных признаков полной неработоспособности. В связи с этим необходима разработка методик, позволяющих осуществлять контроль метрологической исправности датчика на основе диагностических признаков, позволяющих следить за появлением причины отказа на ранних этапах ее развития.

По итогам проведенного анализа представляется возможным выбрать ряд типичных причин неисправностей и отказов датчиков, которые в то же время предположительно существенно влияют на частотную характеристику преобразователей. Это: изменение геометрии мембраны (утончение в результате коррозии, пластические и остаточные деформации); нарушение сварных соединений мембраны и корпуса; нарушение плотности резьбового соединения между внешним корпусом и тензопреобразователем; налипание инородных тел, появление уплотнения в технологической мембране; изменение модуля упругости мембраны. Для детального исследования влияния данных факторов на частоты собственных колебаний предполагается проведение дополнительного компьютерного моделирования и физических экспериментов.

### *Литература*

1. ГОСТ Р 8.673–2009 ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.
2. ГОСТ Р 8.734–2011 ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля.
3. Бушуев, О.Ю. Исследование динамической характеристики тензопреобразователя давления с целью диагностики его состояния / О.Ю. Бушуев, А.С. Семенов, А.О. Чернявский // Датчики и системы. – 2011. – № 4. – С. 21–24.
4. Пинчук, Р. Три составляющих успеха «Данфосс» в области контроля давления / Р. Пинчук // Компоненты и технологии. – 2010. – № 1. – С. 20–23.
5. Мартыненко, В.Т. Исследование причин, влияющих на погрешность преобразования датчиков разности давлений «Сапфир-22» / В.Т. Мартыненко // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – № 6. – С. 31–34.
6. Михайлов, П.Г. Разработка и исследование методов и средств диагностики элементов и структур микроэлектронных датчиков / П.Г. Михайлов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – №10. – С. 45–47.

**Бушуев Олег Юрьевич**, аспирант кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), младший научный сотрудник; bushuev@init.susu.ac.ru.

## ANALYSIS OF THE POSSIBLE FAULTS, SOURCES OF UNCERTAINTIES AND FAILURE REASONS FOR TENSOMETRIC PRESSURE SENSOR

**O.Yu. Bushuev**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, bushuev@init.susu.ac.ru

According to GOST R 8.673-2009, analysis of faults and the sources of inaccuracy of an intelligent sensor device with the function of metrological self-check should be done as a part of development process. In the paper possible faults of tensometric pressure sensors are considered and analyzed. The faults that influence the frequency response and therefore can be detected by analyzing the frequency response of a sensor are explored.

*Keywords:* tensometric pressure sensors, faults, sources of inaccuracy, fault detection and diagnosis, metrological self-check, intelligent sensors, frequency response.

### References

1. GOST R 8.673-2009 GSI. *Datchiki intellektual'nye i sistemy izmeritel'nye intellektual'nye. Osnovnye termini i opredeleniya*. [Intellectual Sensors and Intellectual Measuring Systems. Main Terms and Definitions].
2. GOST R 8.734-2011 GSI. *Datchiki intellektual'nye i sistemy izmeritel'nye intellektual'nye. Metody metrologicheskogo samokontrolya*. [Intellectual Sensors and Intellectual Measuring Systems. Methods of Metrological Self-check].
3. Bushuev O.Yu., Semenov A.S., Chernyavsky A.O. Study of Dynamical Characteristic of Tensometric Pressure Transducer for the Diagnostics of Its Condition [Issledovanie dinamicheskoy kharakteristiki tenzopreobrazovatelya davleniya s tsel'yu diagnostiki ego sostoyaniya]. *Datchiki i sistemy [Sensors and Systems]*, 2011, no. 4, pp. 21–24.
4. Pinchuk R. The Three Components of the Success of "Danfoss" in the Pressure Control [Tri sostavlyauschikh uspekha "Danfoss" v oblasti kontrolya davleniya]. *Komponenti i tekhnologii [Components and Technologies]*, 2010, no. 1, pp. 20–23.
5. Martinenko V.T. Study of Factors Influencing the Uncertainty of Differential Pressure Sensors "Sapphire-22" [Issledovanie prichin, vliyauschikh na pogreschnost' preobrazovaniya datchikov raznosti davleniy "Sapfir-22"]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnosika [Devices and Systems. Management, Monitoring, Diagnostics]*, 2005, no 6, pp. 31–34.
6. Mikhailov P.G. Development and Research of Diagnostic Methods and Techniques of Diagnostics of Microelectronic Sensor Elements and Structures [Razrabotka i issledovanie metodov i sredstv diagnostiki elementov i struktur mikroelektronnikh datchikov]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnosika [Devices and Systems. Management, Monitoring, Diagnostics]*, 2002, no 10, pp. 45–47.

*Поступила в редакцию 6 сентября 2013 г.*