

УДК 681.586

А.Г. Буряченко¹, В.А. Антонец²

¹ОАО «Элемент»,

²ОАО «Мотор Сич»

ТРЕБОВАНИЯ К ДАТЧИКАМ ДАВЛЕНИЯ, ИНТЕГРИРУЕМЫМ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КАНАЛЫ БОРТОВЫХ ЭСУ

Проведен анализ результатов более чем 5-летнего опыта интеграции датчиков давления фирмы Kulite (США) в бортовую аппаратуру украинских и российских разработчиков КИ АТ. Показаны проблемы технического и организационного характера и пути их решения. Сформулированы основные требования к датчику, соответствие которым обеспечивает его интеграцию в структуру измерительного канала с учетом современных методов обработки сигналов. Приведена структура канала, обеспечившего в составе системы измерения давления СИД-3-148 двигателя Д-436-148 самолета Ан-148 точность не хуже $\pm 0,15\%$ в диапазоне температур от минус 40 до + 100 °С на базе датчика с погрешностью до $\pm 3\%$.

Датчик давления, первичный преобразователь, градуировка, погрешность измерений, измерительный канал, ресурс, срок службы

Введение

В России и на Украине датчики для авиакосмической индустрии – это прежде всего датчики НИИ ФИ (г. Пенза) и ЧеЗаРа (г. Чернигов). К сожалению, политико-экономическая ситуация, сложившаяся к концу прошлого века, вызвала падение уровня производства датчиков этими предприятиями и, соответственно, привела к снижению качества. К середине 90-х годов отечественные изготовители оказались неспособны обеспечить задачи поддержания работоспособности и модернизации имеющегося парка авиадвигателей, что привело к интенсивным поискам авиастроительными предприятиями зарубежных поставщиков.

ОАО «Элемент», как головная организация Минпромполитики Украины по направлению «Электронные системы измерения, контроля параметров и управления авиационными двигателями», провело ряд работ по выбору зарубежного поставщика, чьи изделия можно было бы использовать в собственных разработках и рекомендовать другим российским и украинским разработчикам комплектующих изделий авиационной техники. Проведенные работы и результаты выбора отражены в ряде публикаций [1 – 5].

По результатам предварительного анализа и последующих испытаний в составе систем СИД-3 и СИД-3-148 были рекомендованы к использованию датчики давления фирмы Kulite Semiconductor Products (США).

Говоря о выборе, следует заметить: ситуация на рынке такова, что по всеобщему признанию собственно технические характеристики датчи-

ков, заявляемые фирмами-лидерами (Kulite, Druck, Auxitrol) сходны, если не идентичны, для датчиков одинакового назначения. Особую актуальность в этих условиях приобретает учет таких факторов, как:

- доработка модели под заказ по Техническому заданию Заказчика;
- информационная и техническая поддержка при выборе датчиков, доступность оперативной связи с представителем изготовителя (как при выборе, согласовании, оформлении заказа, так и при эксплуатации датчиков);
- соотношение цена-качество.

По этим критериям Kulite продемонстрировала бесспорные преимущества, и сегодня датчики Kulite включены в комплектацию агрегатов и систем самолетов Ан-148, Ан-70, Як-130, Ту-334, проходят испытания в составе вновь разрабатываемых изделий.

Опыт сотрудничества насчитывает уже более 10 лет, причем последние 5 из них осуществляются поставки на ОАО «Мотор Сич», ГП «Ивченко-Прогресс», филиал АНТК «Серийный завод «Антонов», ОАО «ВАСО» и другие предприятия.

Пришло время проанализировать результаты и проблемы, а проблемы есть, правда, прежде всего такие, которые подтверждают тезис: «Наши недостатки – это продолжение наших достоинств».

1. Формулирование проблемы

Опыт заказов и использования датчиков Kulite отечественными авиастроителями, в частности ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс» и ОАО «Мотор

Сич», позволяет утверждать, что одно из основных достоинств фирмы как поставщика – готовность дорабатывать датчики под заказ и даже изготавливать по полнопрофильному Техническому заданию Заказчика – обернулось на сегодняшний день неоправданным расширением номенклатуры заказываемых датчиков, полным пренебрежением к их унификации как в отношении конструктивного исполнения, так и в части электрических параметров.

Более того, даже для совершенно идентичных датчиков (а речь здесь и далее идет о первичных преобразователях, которые составляют большую часть заказываемых датчиков) выдвигается, например, требование обеспечить заданный уровень выходного сигнала при различных значениях нагрузки на выходе, после чего они перестают быть идентичными (взаимозаменяемыми), что создает проблемы как Заказчику, так и Изготовителю.

На рис. 1 приведена схема градуировки датчика с нагрузочным резистором R_{load} , а также вариант другой схемы градуировки.

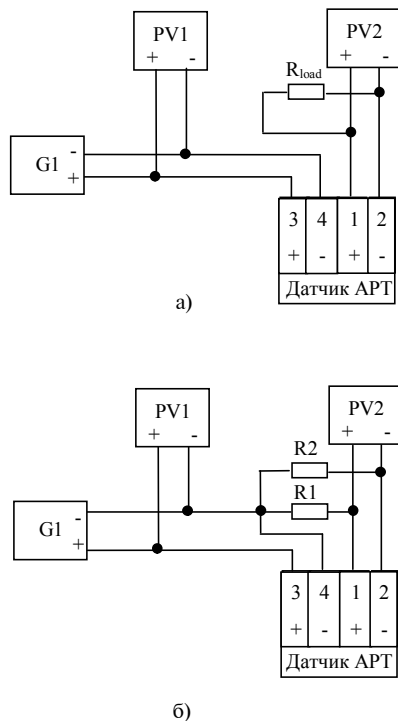


Рис. 1. Схемы градуировки датчиков:
а) с нагрузкой R_{load} на выходе датчика;
б) с имитацией резисторов диагностики

Оценить влияние значения R_{load} на выходной сигнал U_{out} можно, рассматривая выход датчика как генератор тока ($I_{out} \approx const$), тогда:

$$U_{out} \approx I_{out} \cdot (R_{load} \cdot R_{out}) / (R_{load} + R_{out})$$

Типичное выходное сопротивление датчика R_{out} составляет $1 \div 3$ кОм, а задаваемые значения R_{load} лежат в диапазоне от 20 кОм до 20 МОм.

Подобное изменение нагрузки вызывает изменение выходного сигнала до 5%, в то время как задаваемые Заказчиком требования к пределам погрешности этих датчиков, как правило, составляют $\pm 1,0 \div 1,5\%$.

Такой подход делает каждый вариант применения датчика уникальным в своем роде, усложняет даже процесс заказа датчиков (не говоря, об изготовлении), служит помехой для создания ЗИП.

2. Решение проблемы

Требования, предъявляемые к электрическим параметрам заказываемого датчика (первичного преобразователя) давления, диктуются Разработчиком блока бортовой аппаратуры, частью измерительного канала которого должен стать датчик.

К сожалению, как показала практика, превалируют устаревшие подходы, сформировавшиеся еще в то время, когда микропроцессорная обработка сигнала была недоступна. Разработчик стремится переложить на первичный преобразователь требования компенсации температурной погрешности, разброса от экземпляра к экземпляру, не говоря уже о нелинейности.

Так, например, для поставляемых на ОАО «Мотор Сич» и ЗМКБ «Прогресс» датчиков АРТ-381 заданы пределы допускаемой приведенной погрешности $\pm 1\%$ в диапазоне температур от минус 55 до плюс 100 °С. Между тем, типичными для первичных преобразователей в этих условиях являются пределы $\pm 3\%$.

Именно на базе датчиков с пределами погрешности $\pm 3\%$ (датчики АРТ-327) построены измерительные каналы разработанной и изготавливаемой в ОАО «Элемент» бортовой системы измерения давления СИД-3-148 для двигателя Д-436-148 самолета Ан-148, обеспечивающие точность измерений на уровне $\pm 0,15\%$ в диапазоне от минус 40 до плюс 100 °С, т.е. погрешность каналов с датчиками более чем на порядок ниже, чем погрешность датчиков в тех же условиях.

Результаты сертификационных испытаний указанной системы СИД-3-148 в составе самолета приведены в [6].

Принципы построения измерительного канала давления, использованные при разработке системы СИД-3-148, описаны в [3], где даны обобщенная структура канала (рис.2) и алгоритм градуировки, т.е. формирования двухпараметрической математической модели преобразования (на рис.2 отражены математические модели, реализуемые в структурных единицах канала).

Дополнительно к данным [3] следует отметить, что сенсор температуры, необходимо присутствующий в составе канала, показанного на

рис. 2, может быть реализован различными способами – от применения специального чувствительного элемента того или иного типа до интеграции его в состав кристалла датчика давления, вплоть до использования зависимости входного сопротивления тензомоста в качестве информативного сигнала о температуре (этот способ был успешно применен в одном из изделий ОАО «Элемент»).

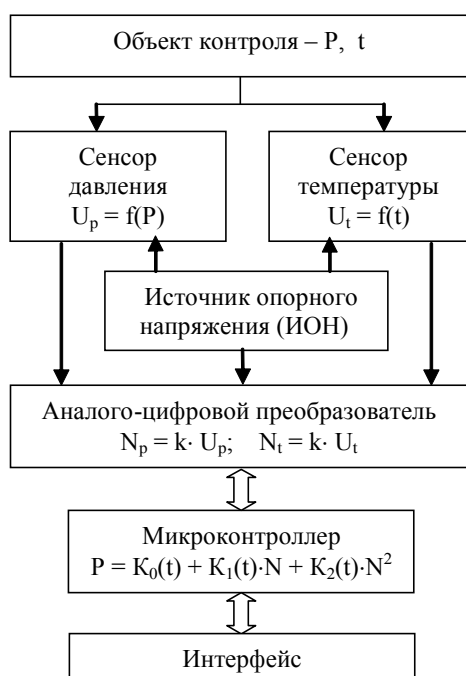


Рис. 2. Обобщенная структурная схема канала измерения давления

При таком построении измерительного канала датчик должен интегрироваться в его структуру изготовителем блока, в состав которого входит канал, и проверка метрологических характеристик должна выполняться для канала в целом.

Между тем, анализируемый нами опыт применения датчиков Kulite показал, что весьма распространен подход, когда Разработчик блока стремится, условно говоря, «отмежеваться» от датчика.

Это было бы оправдано, если бы речь шла о заказе датчика с унифицированным выходным сигналом (т.е. датчика, в составе которого предполагается наличие схемы обработки сигнала первичного преобразователя). Но Разработчик заказывает «первичники» с «милливольтовым» выходом и при этом стремится свести функции собственной части канала фактически только к усилению сигнала. Это приводит к тому, что:

– погрешность измерительного канала в целом превышает погрешность датчика (вместо того, чтобы компенсировать составляющие по-

грешности «первичника», схема обработки только добавляет к ним свои);

– к первичным преобразователям предъявляются завышенные требования, поскольку есть ограничения на погрешность канала в целом, а вторичная схема не обеспечивает компенсации;

– требование снижать до $\pm 1\%$ и менее суммарную погрешность первичного преобразователя в широком диапазоне температур (включая и разброс характеристик от экземпляра к экземпляру) означает введение в структуру первичного преобразователя дополнительных (подстроечных) элементов (что, кстати, отнюдь не является средством повышения надежности) и индивидуальную настройку первичного преобразователя в рабочем температурном диапазоне, но в результате всех этих усилий достигается суммарная погрешность измерительного канала на уровне $\pm 1,5...2\%$, т.е. на порядок хуже, чем при использовании микропроцессорной обработки сигнала датчика в составе канала описанного выше.

Разработчик, исключая градуировку канала в целом (с датчиком), аргументирует это стремлением к взаимозаменяемости датчиков, т.е. имеется в виду, что любой экземпляр датчика данного типа можно подключить к любому экземпляру данного типа измерительного канала и без подстройки получить ожидаемые пределы погрешности $\pm 1,5...2\%$.

Однако на практике это уже обернулось отсутствием взаимозаменяемости датчиков в широком смысле.

Примером, в частности, служит прецедент с упомянутыми датчиками АРТ-381, обеспечивающими пределы суммарной погрешности (включая разброс от экземпляра к экземпляру) $\pm 1\%$ в диапазоне температур от минус 55 до плюс 100 °С при выходе 50 мВ на диапазон в условиях питания 5 В постоянного тока.

Стоило Разработчику изменить схему включения диагностических резисторов (резистор 1 МОм по схеме рис. 1а был заменен на два резистора по 1 МОм согласно рис. 1 б), как датчики, проградуированные Изготовителем по первой схеме, были объявлены непригодными для использования, поскольку их выходной сигнал при новой схеме включения смещается на 1...3 мВ, а подстройка после интеграции датчика в состав канала не предусмотрена.

Парадокс состоит еще и в том, что смещение сигнала датчиков АРТ-381 при изменении схемы градуировки – следствие наличия в структуре датчика подстроечных элементов, т.е., как было сказано ранее, следствие стремления выполнить требования по снижению температурной погрешности первичного преобразователя и разброса от экземпляра к экземпляру.

Не только расчетная оценка, но и проведенные измерения подтвердили, что для обычного симметричного тензомоста, каким является используемый ОАО «Элемент» датчик АРТ-327 (к которому не предъявлялось завышенных требований по погрешностям) такое изменение схемы градуировки несущественно (табл. 1).

Таблица 1
Результаты измерений

| Давление на вход | Значения выходного сигнала U_{out} , мВ ($U_{пит} = 5 В$) | | |
|-------------------------------------|---|------------------------------------|-------------------------------------|
| | Без дополнительных резисторов | Рис.1а $R_{load} \approx 1 МОм$ | Рис.1б $R_1 = R_2 \approx 1 МОм$ |
| АРТ-327, используемые ОАО «Элемент» | | | |
| $P \approx 0$ | 2,0 | 2,0 | 2,0 |
| $P \approx P_{max}$ | 51,5 | 51,4 | 51,4 |
| АРТ-381 | | | |
| $P \approx 0$ | — | 0,0 | -3,1 |
| $P \approx P_{max}$ | — | 50,1 | 47,1 |

Вообще для измерительного канала, представленного на рис. 2, построенного как единое целое с датчиком, датчики являются взаимозаменяемыми не потому, что они имеют строго одинаковые характеристики, а потому, что предусмотрен учет индивидуальных характеристик датчика.

Единственное действительно принципиальное требование к первичному преобразователю в этом случае — стабильность характеристик во времени, достаточные ресурс и срок службы (для используемых ОАО «Элемент» датчиков АРТ-327 Изготовитель установил ресурс и срок службы в соответствии с требованиями к ресурсам и срокам службы самолета — 40000 ч и 40 лет).

В условиях обеспечения ресурсов и сроков службы датчика (и измерительного канала), соответствующих показателям надежности самолета, вопрос о замене датчиков в процессе эксплуатации вообще утрачивает актуальность и стремление к «взаимозаменяемости», понимаемой как замена без подстройки, замена, ради которой жертвуют точностью измерений, лишается последних сколько-нибудь разумных оснований.

В этих условиях единственным объяснением такого стремления может служить только нежелание Разработчика строить измерительный канал как единое целое, обеспечивать компенсацию погрешностей первичного преобразователя и брать на себя ответственность за метрологические характеристики канала с датчиком.

Но именно как единое целое строятся современные измерительные каналы и интеллектуальные датчики давления.

Попытка «разделить» измерительный канал, требуя максимального снижения погрешностей первичных преобразователей в температуре и

минимизации разброса их параметров, попытка уйти от учета индивидуальных характеристик при обработке сигнала и свести эту обработку к усилению — это движение в направлении, противоположном интеллектуализации измерительных устройств.

К сожалению, нельзя не прийти к выводу, что тут организационные проблемы превалируют над техническими.

Обращает на себя внимание тот факт, что в большинстве случаев Разработчик блока не является Заказчиком (покупателем) датчика, а в некоторых случаях даже не проводит метрологическую проверку канала с датчиком. То есть изначально предполагается своего рода «механическая стыковка» первичного преобразователя с блоком обработки сигнала, при которой ответственность за результат весьма размыта, а возникшие проблемы становятся проблемами Потребителя.

Что же касается технических решений, то на примере использования датчиков АРТ-381 (и есть другие аналогичные примеры — АРТ-335, -337) очевидно, что при таком подходе, ценой заметного усложнения первичного преобразователя, удастся достичь пределов суммарной погрешности канала, в лучшем случае, $\pm 1,5\%$, в то время, как для канала, показанного на рис. 2, эти пределы не превышают $\pm 0,15\%$ при упрощении требований к первичному преобразователю.

Заключение

1. Опыт, полученный за время использования авиастроительными предприятиями Украины и России датчиков давления фирмы Kulite, позволяет утверждать, что возможность заказа датчиков по Техническому заданию следует использовать не для расширения номенклатуры датчиков (что происходило в предшествующие 5 лет), а для создания унифицированного ряда, обеспечивающего специфические требования при минимальном количестве исполнений.

2. При формировании требований к датчикам (первичным преобразователям) необходимо максимально учитывать возможности современных методов цифровой обработки сигнала и не переносить на первичный преобразователь требования, которые могут и должны быть обеспечены вторичной аппаратурой.

3. Измерительный канал давления следует градуировать после интеграции первичного преобразователя в его состав, обеспечивая компенсацию температурной погрешности и разброса от экземпляра к экземпляру за счет микропроцессорной обработки сигнала датчика. Это позволяет на базе датчиков с погрешностью до $\pm 3\%$ построить канал с пределами погрешности $\pm 0,15\%$ в рабочем диапазоне температур (типично — от минус 40 до +100 °С).

4. Главным критерием при формировании требований к первичным преобразователям должны быть долговременная стабильность (не хуже $\pm 0,1\%$ в год) и достаточные ресурсы и сроки службы (например, для датчиков Kulite, используемых ОАО «Элемент» в системе СИД-3-148 установлены 40000 ч в течение 40 лет).

Перечень ссылок

1. Буряченко А.Г., Волошина Н.П., Ранченко Г.С., Деклама Ж. Критерии и результаты оценки надежности датчиков давления для авиационных двигателей // Авиационно-космическая техника и технология. 2004. №7 (15).

2. Буряченко А.Г., Волошина Н.П., Ранченко Г.С. Опыт использования датчиков давления фирмы Kulite // Датчики и системы.— 2004.— №11.— с.38 — 40.

3. Буряченко А.Г., Грудинкин В.М. Технические и алгоритмические средства повышения метрологического уровня и надежности

датчиков и систем измерения давления // Авиационно-космическая техника и технология. 2005. №8 (24) .

4. Буряченко А.Г., Ульяшин С.В., Ушаков В.Ю., Деклама Ж. Создание новых средств измерения пульсационного давления для контроля процессов в камерах сгорания малоэмиссионных ГТД // Вестник двигателестроения. 2005. №2.

5. Буряченко А.Г., Ранченко Г.С., Чиверс Дж. Виброкомпенсированный высокотемпературный датчик переменного давления для малоэмиссионных ГТД // Датчики и системы.— 2007.— №10.— с.38 — 41.

6. Грудинкин В.М., Буряченко А.Г., Миргород В.Ф., Драпак М.В. Опыт и результаты сертифицированных испытаний интеллектуальной системы измерения давления двигателя Д-436-148 самолета Ан-148 // Авиационно-космическая техника и технология. 2007. № 7 (43).

Поступила в редакцию 01.06.2010 г.

A.G. Buryachenko, V.A. Antonetz

REQUIREMENTS TO PRESSURE TRANSDUCERS WHICH ARE INTEGRATED IN MEASURING CHANNELS OF ECS ON BOARD

Проведено аналіз результатів більш ніж 5-річного досвіду інтегрування датчиків тиску фірми Kulite (США) до складу бортової апаратури українських та російських розробників КВ АТ. Показано проблеми технічного та організаційного характеру та шляхи їх вирішення. Сформульовано головні вимоги до датчика, відповідність яким забезпечує інтегрування датчика до структури вимірювального каналу з урахуванням сучасних методів обробки сигналів. Наведено структуру каналу, що у складі системи вимірювання тиску СИД-3-148 двигуна Д-436-148 літака Ан-148 забезпечує точність не гіршу ніж $\pm 0,15\%$ у діапазоні від мінус 40 до + 100 °С на базі датчика $\pm 3\%$.

Датчик тиску, первинний перетворювач, градування, похибка вимірювань, вимірювальний канал, ресурс, строк служби

Analysis of more than 5 years experience of Kulite (USA) transducers integration in the board aggregates of Ukrainian and Russian aviation component parts developers is done. Technical and organizational problems and the ways of their solution are shown. Main requirements, which compliance provides the transducers integration in measurement channel taking into account the modern signal processing methods. There is given the structure of channel which (being the part of pressure measuring system SID-3-148 of aircraft An-148 engine D-436-148) provides the accuracy not worse than $\pm 0,15\%$ on temperature range from minus 40 up to + 100 °C on the base of transducer of $\pm 3\%$.

Pressure transducer, sensing device, calibration, inaccuracy of measurements, measuring channel, resource, life time