

УДК 681.586

А.Г. БУРЯЧЕНКО¹, Н.П. ВОЛОШИНА¹, Г.С. РАНЧЕНКО¹, Ж. ДЕКЛАМА²¹ОАО «Элемент», Одесса, Украина²Фирма Kulite, Леония, США

КРИТЕРИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Проведен анализ причин отсутствия в каталогах датчиков давления производства зарубежных фирм документально подтвержденных сведений о надежности. Предложена методика расчета и оценки показателей надежности датчиков давления в соответствии с условиями эксплуатации в составе авиадвигателей. Даны примеры расчета, приведены результаты экспериментальной проверки.

датчик давления, надежность, пульсации давления, ресурс, наработка

Введение

В системах современного самолета для контроля параметров состояния и режима работы эксплуатируется от 52 до 88 датчиков давления [1], причем около 10% из них – в составе двигателя. Условия эксплуатации двигательных датчиков являются жесткими – воздействие повышенного уровня вибрации, ударов, линейного ускорения, широкий диапазон и резкие перепады температур. Наличие таких воздействий обуславливают повышенные требования к надежности, а если учесть, что каждый датчик, входя в комплектацию двигателя, становится элементом многокомпонентной системы с наперед заданными высокими надежностными показателями, то можно ожидать, что требования будут ужесточаться. Требования по безотказности – это отражение требований к безопасности полета. Поэтому обеспечение и документальное подтверждение изготовителем заданных значений показателей надежности – важное условие выбора датчиков для комплектации авиационного двигателя.

1. Формулирование проблемы

Предварительный выбор датчиков осуществляется на основе анализа данных изготовителя, т.е. характеристик, приводимых в каталогах. Исследования рынка датчиков давления производства отече-

ственных и зарубежных фирм позволяет утверждать, что значения показателей надежности не только редко приводятся в каталогах, содержащих подробные сведения о множестве других характеристик (включая вспомогательные данные о принципе действия и технологии производства), но даже далеко не всегда сообщаются при специальном запросе – прежде всего это относится к зарубежным фирмам. Не является исключением и фирма Kulite (США), изготовитель качественных (в чем мы убедились на практике) датчиков давления, в том числе специально предназначенных для авиастроения (имеющих соответствующие сертификаты). Мотивация фирмы следующая: для авиационных датчиков заранее заданы только общие технические данные, которые покупатель конкретизирует и дополняет при заказе, и расчет надежностных показателей должен выполняться для строго оговоренной спецификации данного заказа. Приведенная ниже методика и результаты расчета подтверждают справедливость этого утверждения – определяющую роль при оценке ответственности ресурса датчика заданному ресурсу двигателя играет знание режимов работы, в частности частот пульсаций контролируемых давлений.

Проведенные исследования – теоретические и экспериментальные – имели своей целью анализ соответствия показателей надежности датчиков давления типа АРТ, изготавливаемых фирмой Kulite по

заказам ОАО «Элемент», ГП ЗМКБ «Прогресс» и ОАО «Мотор-Сич», требованиям, предъявляемым при эксплуатации в составе изделий заказчиков. Типичная конструкция чувствительного элемента датчиков типа АРТ представлена на рис. 1.

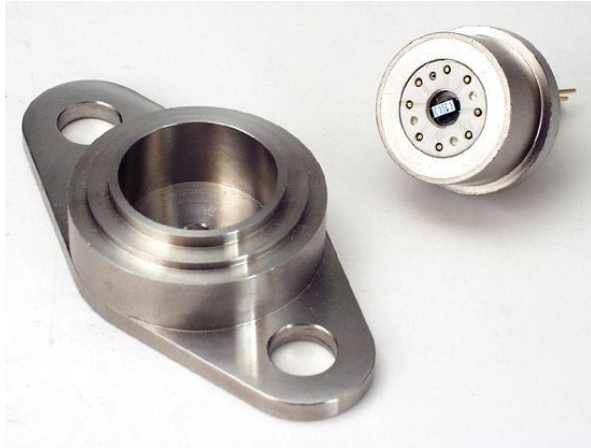


Рис. 1. Чувствительный элемент датчика давления и деталь корпуса, в которую он монтируется

2. Решение проблемы

Прогнозирование надежности электрической схемы – интегральных тензорезисторов, сварных и паяных контактов – выполнено согласно руководящему документу изготовителя [2] методом суммирования интенсивностей отказов элементов, который в отечественной нормативной документации [3] получил название «лямбда-метода». Известно, что в результате такого прогнозирования получают оценку наиболее неблагоприятного варианта, следовательно значение наработки на отказ обычно занижено. В результате расчета было получено значение около 10,5 млн. часов. При таких показателях надежности электрической части можно сделать вывод, что определяющим фактором становится механическая прочность конструкции, поэтому согласно [4] оценка показателей надежности должна проводиться «на основе прочностных характеристик материала деталей и условий их нагружения». Анализ конструкции нагружаемого элемента показал, что механическая прочность определяется прочностью

сварного шва, соединяющего защитную стальную мембрану с основанием, поскольку миниатюрный чувствительный элемент изготовлен из монокристаллического кремния и при его проектировании предусмотрена работоспособность в условиях многократной перегрузки. Соединение круглой защитной мембраны с основанием выполнено по кольцевому периметру с внутренним и внешним диаметрами D_{in} и D_{ex} , поэтому Механические напряжения, возникающие при воздействии на мембрану измеряемого давления P , вычисляются по формуле

$$\sigma = P \cdot D_{in}^2 / (D_{in}^2 - D_{ex}^2).$$

С учетом заданных условий эксплуатации рассчитывались следующие режимы нагружения:

- режим 1 – циклическое нагружение (пульсации давления) с размахом 12 ... 20% при статическом давлении 0,5 от $P_{ном}$ – такой режим можно считать характерным для 10% времени работы датчика в составе двигателя;
- режим 2 – циклическое нагружение с размахом 12% при статическом давлении $P_{ном}$ – характерен для 90% времени работы;
- режим 3 – циклическое нагружение от нуля до $P_{ном}$ – число циклов за время эксплуатации равно числу взлетов и посадок.

Выполнено моделирование процесса развития возникшей в шве трещины, уменьшающей площадь соединения. По результатам моделирования оценено число циклов нагружения $N_{пред}$, приводящее к разрушению соединения. Результаты оценки для двух моделей датчиков типа АРТ – $P_{ном} = 25 \text{ bar}$ и $P_{ном} = 135 \text{ bar}$ – приведены в табл. 1. Дополнительно в таблице приведено минимальное время наработки до $0,5 \cdot N_{пред}$. Время оценено, исходя из заданной для условий эксплуатации частоты пульсаций f в режимах 1 и 2, по формуле:

$$\tau = 0,5 \cdot N_{пред} / f.$$

Полученные результаты проще всего оценить, сравнив число циклов до разрушения $N_{пред}$ при ра-

боте в заданном режиме с реализуемым на практике до истощения ресурса двигателя числом циклов такого режима $N_{\text{ресурс}}$. Приняв средний ресурс за 32 000 ч и учитывая приведенные выше данные о доле каждого режима в общем времени работы двигателя и о частоте пульсаций при работе в режимах

1 и 2, получаем результаты, показанные в табл. 2. Результаты сравнения наглядно демонстрируют, что $N_{\text{ресурс}} \ll N_{\text{пред}}$, иными словами, каждый датчик без замены в процессе эксплуатации обеспечит работу двигателя в течение всего ресурса.

Таблица 1

Результаты моделирования процесса развития возникшей в шве трещины

№ реж.	Предельные давления цикла, P, bar	Механические напряжения в сварном шве, σ , bar	Число циклов до разрушения, $N_{\text{пред}}$	Наработка до $0,5 \cdot N_{\text{пред}}$ на заданной частоте, τ , ч
Датчик АРТ-327, $P_{\text{ном}} = 25 \text{ bar}$				
1	11 – 12,5 – 11	40,7 – 46 – 40,7	$1,38 \cdot 10^{13}$	3833333 на $f = 500 \text{ Гц}$
2	22 – 25 – 22	81,4 – 92 – 81,4	$1,09 \cdot 10^{12}$	302778 на $f = 500 \text{ Гц}$
3	0 – 25 – 0	0 – 92 – 0	$3,7 \cdot 10^8$	–
Датчик АРТ-337, $P_{\text{ном}} = 135 \text{ bar}$				
1	66 – 67 – 66	186 – 190 – 186	$2,44 \cdot 10^{14}$	96 82540 на $f = 3 \text{ 500 Гц}$
3	0 – 135 – 0	370 – 372 – 370	$6,64 \cdot 10^6$	–

Таблица 2

Результаты моделирования при среднем ресурсе 32 000 часов

№ реж.	Предельные давления цикла, P, bar	Число циклов до разрушения, $N_{\text{пред}}$	Число циклов до выработки ресурса самолета, $N_{\text{ресурс}}$
Датчик АРТ-327, $P_{\text{ном}} = 25 \text{ bar}$			
1	11 – 12,5 – 11	$1,38 \cdot 10^{13}$	$5,6 \cdot 10^9$
2	22 – 25 – 22	$1,09 \cdot 10^{12}$	$5,2 \cdot 10^{10}$
3	0 – 25 – 0	$3,7 \cdot 10^8$	10 000
Датчик АРТ-337, $P_{\text{ном}} = 135 \text{ bar}$			
1	66 – 67 – 66	$2,44 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{10}$
3	0 – 135 – 0	$6,64 \cdot 10^6$	10 000

Кроме того, очевидно, что отсутствие в каталогах на датчики давления зарубежных фирм показателей надежности в виде привычного нам «количества часов» обусловлено объективными обстоятельствами и знанием конкретных условий эксплуатации, и, в частности, режимов изменения измеряемого давления, действительно необходимо при оценке соответствия датчиков требованиям по надежности.

Теоретические расчеты подтверждены экспериментом. Перед закупкой датчиков (в 1998 г.) были проведены испытания предоставленного фирмой образца. Испытания проводились в ОАО "Элемент" и во ФГУП «НИИ физических измерений». Про-

грамма испытаний включала воздействия, перечисленные в табл. 3, в том числе $1,7 \cdot 10^7$ периодов пульсаций давления частотой 6,3 кГц, которая соответствует частоте пульсаций топливного насоса, и 33 000 циклов нагружения от минимального до максимального давления. Датчик успешно прошел испытания, причем контроль параметров подтвердил заявленные фирмой высокие показатели долговременной стабильности. Высокие метрологические и эксплуатационные характеристики датчиков типа АРТ фирмы Kulite отмечены главным конструктором ФГУП «НИИ физических измерений» в [1].

Таблица 3

Результаты испытаний

Наименование воздействующего фактора	Основные количественные характеристики
1. Повышенная температура окружающей среды	до 125 °С
2. Пониженная температура окружающей среды	до –55 °С
3. Повышенная влажность	до 90% при 50 °С
4. Роса и внутреннее обледенение	от +30 до –20 °С
5. Резкое изменение температуры (термоциклы)	от +125 до –60 °С
6. Синусоидальная вибрация	от 5 до 2 000 Гц ; до 30 g
7. Механические удары одиночного и многократного действия	до 15 g
8. Циклическое изменение давления на входе датчика	– от минимального до максимального измеряемого – 30 000 циклов, – от минимального до допустимого перегрузочного – 3 000 циклов, – пульсации с частотой 6,3 кГц и амплитудой 12... 20% при $P_{ном} = 1, 7 \cdot 10^7$ периодов

В настоящее время все купленные для комплектации изделий ОАО "Элемент" и часть купленных ЗМКБ «Прогресс» датчиков Kulite проходят входной контроль по расширенной программе, включающей проверку долговременной стабильности в условиях воздействия ряда дестабилизирующих факторов. Датчики в составе разработанной ОАО "Элемент" системы измерения давления СИД-3 успешно прошли межведомственные испытания.

Заключение

1. Проведенные исследования подтвердили рациональность методического подхода фирмы Kulite к вопросу оценки надежности датчиков давления, предназначенных для авиационного применения. Определяющим критерием является оценка наработки на отказ в условиях пульсаций измеряемого давления, следовательно время наработки зависит от частоты и амплитуды пульсаций, которые должен задать заказчик.

2. Исследования подтвердили соответствие показателей надежности датчиков давления фирмы Kulite требованиям, предъявляемым отечественными разработчиками и изготовителями авиационных двигателей.

3. Перспективы дальнейших исследований заключаются в детальном изучении параметрической надежности – долговременной стабильности параметров датчиков, о которой здесь кратко упомянуто при изложении результатов экспериментальных исследований и в разработке методов прогнозирования долговременной стабильности по результатам ускоренных проверок параметров.

Литература

1. Мокров Е. Датчики и преобразующая аппаратура НИИ физических измерений для авиационно-космической техники и других отраслей народного хозяйства // Электронные компоненты. – 2003. – № 2.
2. MIL-HDBK 217F. Military handbook. Reliability prediction of electronic equipment
3. ДСТУ 2861-94 Надежность техники. Анализ надежности. Основные положения.
4. ДСТУ 2862-94 Надежность техники. Методы расчета показателей надежности. Общие требования.

Поступила в редакцию 12.05.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Л. Костенко, Национальный политехнический университет, Одесса.