

УДК 681.586

А.Г. БУРЯЧЕНКО, Г.С. РАНЧЕНКО, С.М. РЯБОКОНЬ

АО «Элемент», Одесса, Украина

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ АВИАЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

Приведены методика и результаты экспериментальных исследований параметрической надежности (долговременной стабильности параметров) датчиков давления производства фирмы Kulite (США), сертифицированных для полетов и уже около 10 лет довольно широко применяемых в качестве комплектующих изделий в российском и украинском авиадвигателестроении. Исследования проведены на двух выборках – на датчиках, подвергшихся длительному (до 7,5 лет) хранению на складе потребителя и в последующем обеспечивших государственные сертификационные испытания двигателя Д-27 ГП «Ивченко–Прогресс», и на датчиках, интегрированных в состав системы СИД-3-148 (подсистемы САУ двигателя Д-436-148) и прошедших в ее составе эквивалентно-циклические испытания, воспроизводящие воздействия внешних механических и климатических факторов, соответствующих условиям эксплуатации, с общей эквивалентной наработкой более 56000 ч.

Ключевые слова: сертифицированные для полетов датчики, погрешность, долговременная стабильность, ресурс, срок эксплуатации.

Введение

Настоящая статья является продолжением ряда публикаций АО «Элемент», посвященных созданию современных датчиков и систем измерения давления для образцов авиационной техники. В частности, таких публикаций, как [1 – 7], освещающих критерии выбора и основные принципы и результаты использования первичных преобразователей давления, пригодных как для интеграции в состав измерительных блоков, так для установки непосредственно на двигатель и использования в качестве конструктивно обособленных звеньев систем измерения.

В [2, 3, 5] показано, что главным критерием при выборе первичного преобразователя для построения канала измерения давления является его долговременная стабильность, поскольку все остальные составляющие погрешности могут быть компенсированы в процессе обработки сигнала.

В то же время, создание первичных преобразователей давления бортового применения, сохраняющих стабильность характеристик в условиях воздействия жестких дестабилизирующих факторов внешней среды и многократное циклическое изменение контролируемого давления на входе, является непростой задачей (прежде всего в технологическом смысле), что подтверждается практикой изготовителей, присутствующих на мировом рынке.

В этой связи, все данные, полученные по результатам испытаний и эксплуатации, являются ценными источниками информации, как для разработчиков бортовой аппаратуры, так и для самих

фирм-изготовителей датчиков.

В настоящей статье представлены результаты экспериментального исследования долговременной стабильности характеристик закупаемых украинскими авиадвигателестроителями датчиков давления фирмы Kulite по результатам длительного (до 7,5 лет) хранения у потребителя с последующими государственными сертификационными испытаниями (ГСИ) в составе двигателя и по результатам эквивалентно-циклических испытаний в составе систем СИД-3-148 с подтверждением ресурса 40000 ч.

Такое исследование стало возможным, поскольку закупки датчиков (по крайней мере, в небольших количествах) начались уже около 10 лет назад и к настоящему времени:

- стали доступны для исследования образцы, приобретенные в 2005 – 2007 годах;

- были завершены эквивалентно-циклические испытания системы измерения давления СИД-3-148, разработанной АО «Элемент» и являющейся подсистемой САУ двигателя Д-436-148 самолета Ан-148.

1. Экспериментальная часть

1.1. Объект исследований

Изучение параметрической надежности выполнено на двух группах датчиков:

- датчики типов АРТ-358 (двухканальные) и АРТ-359 (одноканальные), изготовленные по заказу ГП «Ивченко–Прогресс» и обеспечившие ГСИ дви-

гателя Д-27 – далее по тексту именуемые первой группой;

- вторая группа – датчики типа АРТ-327 (двухканальные), включенные в комплектацию системы измерения давления СИД-3-148 и прошедшие эквивалентно-циклические испытания в ее составе.

Датчики обеих групп являются первичными преобразователями, т.е. не имеют в своем составе усилителей сигнала и стабилизаторов напряжения питания. Номинальный выходной сигнал датчика в заданном диапазоне преобразования давления составляет 100 мВ при питании напряжением постоянного тока 10 В.

Датчики первой из рассматриваемых групп (11 штук) были выпущены в период с 20.09.2005 по 26.04.2007. Эти датчики использовались на ГП «Ивченко–Прогресс» эпизодически при испытаниях и к моменту установки 11.09.2012 на двигатель Д-27 №27-18 для проведения ГСИ не имели значительной наработки, так что интервалы от 6 до 7,5 лет с даты выпуска до начала ГСИ можно считать временем хранения.

При ГСИ двигателя Д-27 №27-18 наработка каждого из датчиков составила около 400 ч и, соответственно суммарная – немногим более 4000 ч.

Датчики второй группы интегрированы в состав двух систем СИД-3-148 (№ 1024 и № 1025) – по два двухканальных датчика в каждой системе.

С октября 2011 по октябрь 2012 года указанные блоки СИД-3-148 прошли 57 циклов механических и климатических воздействий, состав каждого из которых отражен в табл. 1.

В таблице также указаны значения эквивалентной наработки одного блока в каждом режиме с учетом коэффициента ускорения.

Таблица 1

Состав и последовательность воздействий на блок СИД-3-148 в одном цикле

Наименование воздействия	Эквивалентная наработка, ч
Ударные нагрузки при скорости 120 ударов в минуту	0,5
Вибрационные нагрузки	10
Комбинированное воздействие повышенной влажности при повышенной температуре и включении-выключении питания	240
Пониженная температура (до минус 40 °С)	1
Комбинированное воздействие повышенной (до 80 °С) температуры и включения-выключения питания	240

В результате индивидуальная эквивалентная наработка каждого датчика в составе системы при испытаниях составила 28000 ч, а суммарная для четырех датчиков – 112000 ч.

1.2. Методика исследований

Для первой группы оценка долговременной стабильности выполнена с использованием результатов измерений параметров датчиков изготовителем на приемо-сдаточных испытаниях при выпуске из производства в 2005 – 2007 годах, т.е. индивидуальной функции преобразования.

Дело в том, что обычно и изготовитель, и потребитель при проверке пригодности датчиков ориентируются на номинальную функцию преобразования, которая включает в себя разброс от экземпляра к экземпляру, а в ряде случаев, и температурную составляющую. Допуск при проверке относительно номинальной функции обычно нормируется в пределах $\pm(1... 3) \%FS$ (проценты полной шкалы или проценты от верхнего предела). Такое нормирование бывает удобно «конечному потребителю», но неинформативно для разработчика измерительной системы, в которую датчик интегрируется как первичное звено [3, 5].

Для оценки долговременной стабильности выполнено сравнение индивидуальной функции преобразования датчика, зарегистрированной изготовителем (Kulite), и результатов определения характеристик датчиков в АО «Элемент» после демонтажа с двигателя по завершении ГСИ.

Погрешность нестабильности для каждой заданной точки диапазона P_i вычислялась по формуле:

$$\gamma_{\text{инд}}(P_i) = \frac{100\% \cdot [U_{\text{outEI}}(P_i) - U_{\text{outKul}}(P_i)]}{\Delta U}, \quad (1)$$

где U_{outEI} и U_{outKul} – значения выходного сигнала по результатам измерений в АО «Элемент» и на фирме Kulite соответственно;

ΔU – диапазон (разность между верхним и нижним пределами) выходного сигнала.

Для проведения измерений в АО «Элемент» использованы манометр поршневой МП-60М (кл.0,05), манометр цифровой DPI 800P (кл.0,025), калибратор многофункциональный TRX-II.

Как отмечалось в [2], погрешность измерений при проверке датчика отдельно от системы имеет следующие составляющие:

- задание эталонного давления;
- погрешность, вносимая отклонением питания, подаваемого на датчик, от номинального;
- составляющая, обусловленная погрешностью измерения выходного напряжения датчика.

Используемые при проверке приборы позволили обеспечить уровни указанных составляющих (в пересчете к давлению на входе) не более:

- $\pm 0,05$ % от верхнего предела преобразования давления;

- $\pm 0,01$ % от измеряемого давления;

- $\pm 0,04$ % от измеряемого давления.

Таким образом, погрешность измерений при проверке датчика отдельно от системы не превышает $\pm 0,1$ % от верхнего предела преобразования давления (или диапазона выходного сигнала) датчика ($\pm 0,1$ % FS).

По результатам предшествующих исследований [3] известно, что функция преобразования датчиков близка к линейной и наиболее точно аппроксимируется параболой. Для обеспечения максимальной корректности оценки результатов измерений в АО «Элемент» и сравнения с результатами изготовителя выполнялась аппроксимация полученной в результате измерений табличной зависимости выходного сигнала датчика U_{out} от давления на входе P полиномом второй степени (наилучшим в смысле метода наименьших квадратов) вида:

$$U_{out} = K_0 + K_1 \cdot P + K_2 \cdot P^2. \quad (2)$$

Погрешность аппроксимации для всех датчиков не превысила $0,015$ % от верхнего предела преобразования (типичный график показан на рис. 1), что свидетельствует о высокой степени точности измерений в одном цикле.

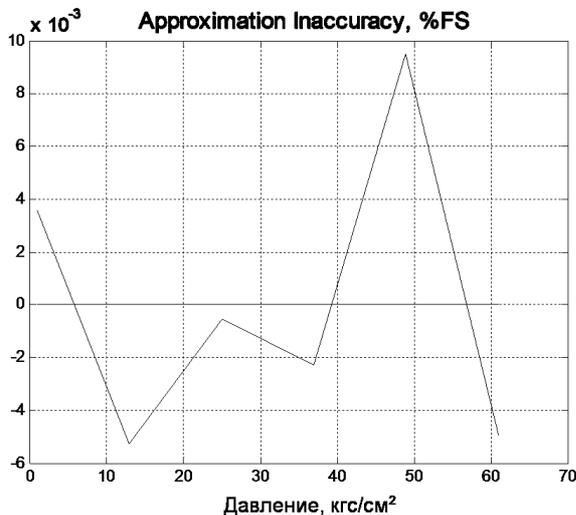


Рис. 1. Типичная зависимость погрешности аппроксимации от измеряемого давления

Проверка формы кривой $U_{out} = f(P)$ использовалась также в качестве критерия в случаях аномальных значений $\gamma_{инд}$ в отдельных точках характеристики, наблюдавшихся у двух датчиков. Одним из таких примеров является датчик типа АРТ-359-1000-3кг/см²G заводской № 6595-1-243. Для этого датчика в двух точках (из шести контролируемых

при выпуске) значения $\gamma_{инд}$ были на порядок выше, чем в остальных четырех точках – табл. 2.

Таблица 2

Датчик АРТ-359 № 6595-1-243. Сравнение измерений при выпуске и при проверке после ГСИ

P, кгс/см ²	U _{out} , mV		$\gamma_{инд}$, %FS
	16.03.2006 Kulite	07.02.2013 «Элемент»	
0,0	0,36	0,32	-0,08
0,6	10,59	10,36	-0,46
1,2	20,40	20,39	-0,02
1,8	30,58	30,38	-0,40
2,4	40,31	40,33	0,04
3,0	50,18	50,22	0,08

Сравнение характера нелинейности функции преобразования по результатам двух указанных измерений (рис. 2) позволило с уверенностью утверждать, что повышенные значения $\gamma_{инд}$ обусловлены несколько менее точными измерениями для двух указанных точек при выпуске. Менее точные измерения в указанных точках при выпуске из производства привели к атипичной форме кривой, отражающей нелинейность.

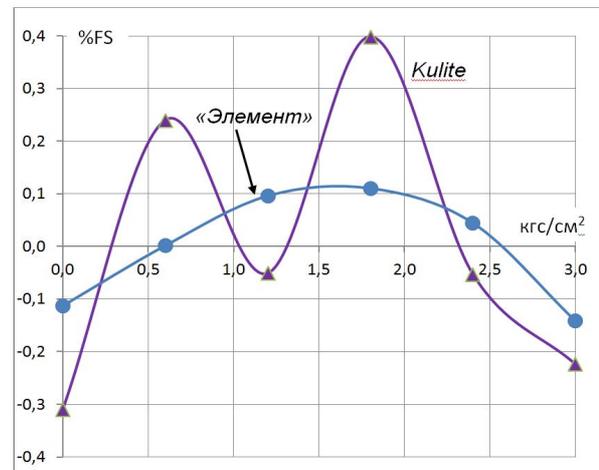


Рис. 2. Датчик АРТ-359 № 6595-1-243. Нелинейность по измерениям Kulite при выпуске и АО «Элемент» после ГСИ

Для второй группы датчиков оценка параметрической надежности выполнена посредством анализа уровня стабильности характеристик измерительных каналов системы СИД-3-148 в процессе эквивалентно-циклических испытаний. Такая методика правомерна, поскольку именно первичное звено – датчик давления – является (по крайней мере, «в норме», при отсутствии нестандартных отклонений) определяющим для обеспечения стабильности во времени [2, 3].

Контроль погрешностей каждого из восьми каналов двух представленных на испытания образцов системы был выполнен перед началом испытаний и затем проводился как в процессе воздействия внешних дестабилизирующих факторов в каждом цикле (таблица 1), так и после завершения каждого цикла.

Погрешность измерений при проверке характеристик измерительного канала определяется погрешностью задания эталонного давления. Это обусловлено тем, что измерительные каналы системы имеют цифровой выход, при этом питание датчика и преобразование его выходного сигнала обеспечиваются последующими функциональными звеньями, входящими в состав канала [3], и две составляющие по сравнению с проверкой датчика отдельно от системы отсутствуют. За счет использования при проверках указанных выше средств измерения давления была обеспечена погрешность на уровне 0,025... 0,05 % FS.

2. Анализ полученных результатов

2.1. Результаты исследований первой группы датчиков

В табл. 3 и на графиках рис. 3, 4 приведены итоговые результаты проверки долговременной стабильности четырех из одиннадцати датчиков первой группы – одноканальных датчиков АРТ-359. Значение давления в каждой точке указано в долях от верхнего предела измерений $P_{\text{в}}$, что позволяет использовать одну ось для датчиков с разными диапазонами преобразования. Смещение характеристик рассчитано по формуле (1)

Итоговые результаты проверки долговременной стабильности каждого из двух каналов остальных семи датчиков первой группы показаны на графиках рис. 4 (датчики типа АРТ-358).

Из таблицы и графиков видно, что типичные значения зарегистрированных изменений (смещений) градуировочных характеристик за 6... 7,5 лет лежат в пределах от минус 0,2 до плюс 0,3 %FS. Максимальное различие составляет 0,5... 0,6 %FS и наблюдается для двух измерительных каналов из восемнадцати рассматриваемых.

Таким образом, смещение характеристик всех исследованных датчиков после длительного хранения у потребителя и последующих испытаний в составе двигателя не превысило 0,1 %FS в год.

Такие показатели долговременной стабильности соответствуют уровню лучших мировых образцов. Причем, следует отметить, что для большинства исследованных датчиков смещение характеристики лежит в пределах $\pm 0,2$ %FS, что сравнимо с приведенной выше оценкой предела суммарной погрешности измерений при проверке – до $\pm 0,1$ %FS.

Таблица 3

Итоговые результаты проверки долговременной стабильности одноканальных датчиков АРТ-359

P/P _в	Долговременная стабильность, %FS за 6... 7,5 лет			
	№6595-1-243	№7365-5-261	№7034-9-336	№7194-1-64
0,00	-0,08	0,02	0,00	-0,52
0,20	—	0,16	0,04	-0,50
0,40	-0,02	0,02	0,02	-0,52
0,60	—	-0,02	0,08	-0,54
0,80	0,04	0,00	0,10	-0,50
1,00	0,08	-0,04	0,12	-0,60

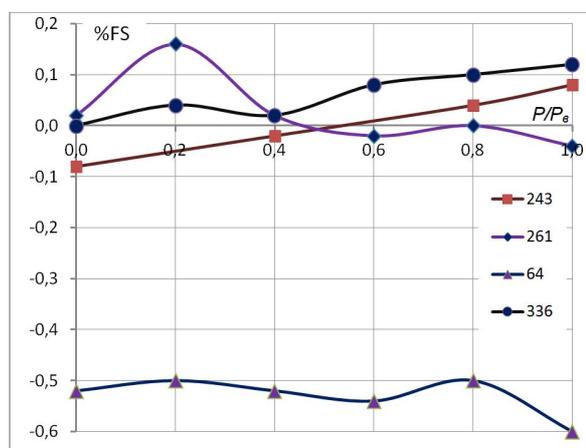


Рис. 4. Одноканальные датчики АРТ-359. Итоговые результаты проверки стабильности за 6... 7,5 лет

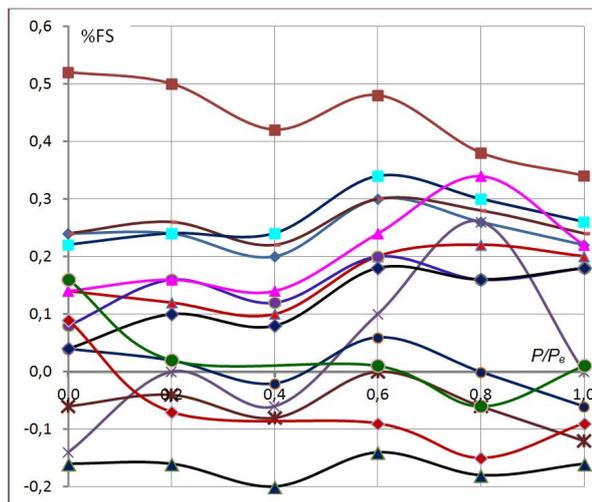


Рис. 4. Двухканальные датчики АРТ-358. Итоговые результаты проверки стабильности за 6... 7,5 лет

2.2. Результаты исследований второй группы датчиков

Первый этап эквивалентно-циклических испытаний, по результатам которого системе СИД-3-148

был установлен ресурс до первого ремонта и межремонтный 12000 ч, описан в [7].

В октябре 2012 года завершен второй этап с суммарной эквивалентной наработкой двух образцов системы СИД-3-148, превышающей 56000 ч.

Испытания прошли без сбоев и отказов. На всем протяжении испытаний при периодическом контроле погрешности измерительных каналов, построенных на базе двухканальных датчиков типа АРТ-327, регистрировались результаты в пределах:

- $\pm 0,15$ % FS для каналов с верхним пределом 137 кПа (1,4 кгс/см²);

- $\pm 0,10$ % FS для каналов с верхним пределом 2550 кПа (26 кгс/см²).

Таким образом, в течение календарного года в условиях практически постоянного воздействия внешних климатических и механических факторов, соответствующих условиям эксплуатации, при эквивалентной суммарной наработке четырех датчиков 112000 ч и индивидуальной 28000 ч, подтверждена параметрическая надежность двухканальных датчиков типа АРТ-327, интегрированных в систему измерения давления СИД-3-148.

С учетом установленных значений рисков потребителя и поставщика $\alpha = \beta = 0,3$ для системы СИД-3-148 подтвержден ресурс 40000 ч. В свою очередь, для датчиков проведенные испытания служат подтверждением ресурса около 80000 ч в заданных условиях эксплуатации.

2.3. Дополнительные данные

Следует также отметить, что эквивалентно-циклическим испытаниям предшествовал анализ технического состояния систем СИД-3-148, находящихся в эксплуатации.

Анализ был выполнен для четырех образцов, обеспечивших сертификационные испытания самолета Ан-148 [6] и подтвердил стабильность характеристик в течение двух-трех лет с даты последней градуировки (корректировки погрешностей) систем.

На рис. 5 приведены результаты проверки системы СИД-3-148 №0402 через 3 года после градуировки – зависимость погрешности от измеряемого давления в диапазоне рабочих температур от минус 40 до +85 °С.

Показанный на графиках уровень погрешностей – менее $\pm 0,15$ %FS – типичен для всех измерительных каналов проверенных образцов.

Таким образом, по результатам исследования восьми двухканальных датчиков АРТ-327 в составе систем СИД-3-148, обеспечивших сертификационные испытания самолета Ан-148, подтверждена стабильность характеристик не хуже $\pm 0,1$ % FS в год.

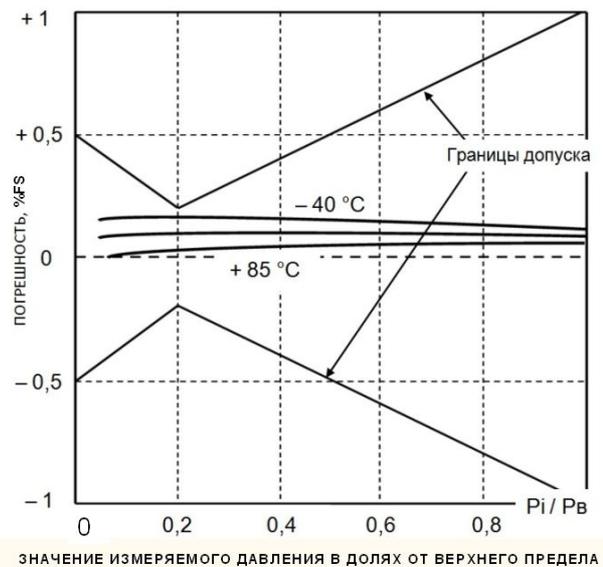


Рис. 5. СИД-3-148 №0402. Типичные характеристики измерительных каналов в диапазоне рабочих температур через 3 года после градуировки

Заключение

1. По результатам экспериментальных исследований оценена параметрическая надежность авиационных датчиков давления фирмы Kulite:

а) в условиях длительного (до 7,5 лет) хранения у потребителя и последующих испытаний в составе двигателя;

б) в условиях, соответствующих эксплуатации, с подтверждением ресурса около 80000 ч при эквивалентной индивидуальной наработке каждого датчика 28000 ч;

с) по результатам хранения и эксплуатации в составе систем СИД-3-148 (до 3 лет).

2. По результатам выполненной оценки подтвержден уровень долговременной стабильности характеристик датчиков не хуже $\pm 0,1$ %FS в год, что соответствует показателям параметрической надежности лучших мировых образцов и позволяет создавать средства контроля давления бортового применения с пределами погрешности $\pm 0,15$ %FS (или ± 1 % от измеряемого значения).

3. Перспективы изучения параметрической надежности авиационных датчиков давления состоят в расширении доказательной базы за счет:

а) проведения исследований в условиях увеличения суммарной и индивидуальной наработки датчиков, в частности, продолжения эквивалентно-циклических испытаний систем СИД-3-148;

б) увеличения объема выборки образцов, исследуемой после эксплуатации в составе двигателей, по мере роста их доступности.

Литература

1. Критерии и результаты оценки надежности датчиков давления для авиационных двигателей [Текст] / А.Г. Буряченко, Н.П. Волошина, Г.С. Ранченко, Ж. Деклама // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – №7 (15). – С. 158 – 161.
2. Буряченко, А.Г. Опыт использования датчиков давления фирмы Kulite [Текст] / А.Г. Буряченко, Н.П. Волошина, Г.С. Ранченко // *Датчики и системы*. – 2004. – № 11. – С. 38 – 40.
3. Буряченко, А.Г. Технические и алгоритмические средства повышения метрологического уровня и надежности датчиков и систем измерения давления [Текст] / А.Г. Буряченко, В.М. Грудинкин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 8 (24). – С. 195 – 199.
4. Гуревич, О.С. Перспективы развития датчиков давления для авиационных и общепромышленных ГТД [Текст] / О.С. Гуревич, А.Г. Буряченко,

Г.С. Ранченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 10 (46). – С. 137 – 141.

5. Буряченко, А.Г. Требования к датчикам давления, интегрируемым в измерительные каналы бортовых ЭСУ [Текст] / А.Г. Буряченко, В.А. Антонец // *Вестник двигателестроения*. – 2010. – №2. – С. 181 – 185.

6. Опыт и результаты сертификационных испытаний интеллектуальной системы измерения давления двигателя Д-436-148 самолета Ан-148 [Текст] / В.М. Грудинкин, А.Г. Буряченко, В.Ф. Миргород, М.В. Драпак // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 7 (43). – С. 18 – 22.

7. Буряченко, А.Г. Увеличение ресурса интеллектуальной системы измерения давления в двигателе Д-436-148 самолета Ан-148 [Текст] / А.Г. Буряченко, Г.С. Ранченко, С.М. Рябоконт // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 7/94. – С. 167 – 170.

Поступила в редакцию 27.05.2013, рассмотрена на редколлегии 13.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник В.Ф. Миргород, АО «Элемент», Одесса.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОЇ НАДІЙНОСТІ АВІАЦІЙНИХ ДАТЧИКІВ ТИСКУ

Г.Г. Буряченко, Г.С. Ранченко, С.М. Рябоконт

Наведено методику та результати експериментальних досліджень параметричної надійності (довготермінової стабільності параметрів) датчиків тиску виробництва фірми Kulite (США), що сертифіковані для польотів та вже близько 10 років достатньо широко використовуються у якості комплектуючих виробів в російському та українському авіадвигунобудуванні. Дослідження проведені на двох вибірках – на датчиках, що зазнали довгострокового (до 7,5 років) зберігання на складі споживача та у подальшому забезпечили державні сертифікаційні випробування двигуна Д-27 ГП «Івченко–Прогрес», та на датчиках, що інтегровані до складу системи СИД-3-148 (підсистеми САУ двигуна Д-436-148) і пройшли у її складі еквівалентно-циклічні випробування з загальною еквівалентним наробітком більш ніж 56000 годин.

Ключові слова: сертифіковані для польотів датчики, похибка, довгострокова стабільність, ресурс, еквівалентно-циклічні випробування.

PARAMETRIC RELIABILITY RESEARCH RESULTS OF AIRCRAFT PRESSURE TRANSDUCERS

A.G. Buryachenko, G.S.Ranchenko, S.V.Ryabokon

Aircraft pressure transducers parametric reliability experimental research methods and results are given (long term stability of parameters). Transducers produced by Kulite Semiconductor Inc. (USA) which are certified for fly were investigated. They are the transducers which are used widely enough by Ukrainian and Russian aircraft building as components during approximately 10 years. Two groups of transducers were investigated: transducers which were stored on the customer's store and then were involved in State Test of SE IVCHENKO–PROGRESS engine D-27 and transducers which were installed inside of the system SID-3-148 (subsystem of engine D-436-148 FADEC). Transducers of SID-3-148 stood the cyclic test with this system. Cyclic test rendered the environmental mechanical and climatic factors of exploitation and the total equivalent operating time were more than 56000 hrs.

Key words: certified for fly transducers, inaccuracy, long term stability, resource, cyclic test.

Буряченко Анна Григорьевна – главный метролог АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: annaodessa2007@rambler.ru.

Ранченко Геннадий Степанович – главный конструктор АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: odessa@element.od.ua

Рябоконт Сергей Михайлович – начальник бюро испытаний АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail: odessa@element.od.ua.