

УДК 621.646.4



А.Е. Ситников, канд. техн. наук,

Е.И. Барилюк

Киевское центральное конструкторское бюро арматуростроения,

Г.И. Зайончковский, д-р техн. наук

Национальный авиационный университет, г. Киев

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КЛАПАНОВ С УЧЕТОМ ПРИЧИННЫХ СВЯЗЕЙ ИХ ОТКАЗОВ

За результатами досліджень зміни технічного стану електромагнітних клапанів під час експлуатації надано рекомендації з визначення їх надійності з урахуванням причинних зв'язків відмов.

The results of the experimental research of the change of the technical condition and pneumatic valves functional parameters with electromagnetic drive in the process of maintenance are showed and the recommendations are given on reliability defining with taking into account of the casual relation.

Актуальность исследований

Традиционный подход к определению показателей безотказности электромагнитных клапанов (ЭМК) [1, 2, 5] при проектировании обычно не учитывает причинные связи их отказов. Данные об отказах рассматриваются как однородная информация, для обработки которой применяют одно из параметрических распределений: биномиальное, экспоненциальное, Вейбулла и другие. Такой подход упрощает процедуру расчета, но снижает его эффективность, так как не в полной мере оцениваются возможные причины отказов при разработке мер по их предотвращению. При таком подходе результаты расчетов дают заниженные оценки показателей безотказности. Эффективность разработки может быть повышена, если при анализе возможных отказов будут учитываться их причинно-следственные связи [6]. Кроме того, расчет надежности проектируемых изделий должен предусматривать дифференцированный подход к каждой группе отказов.

Объект исследований

Объектом исследований были малогабаритные пневматические электромагнитные клапаны разработки Киевского центрального конструкторского бюро арматуростроения (КЦКБА), широко применяемые в авиакосмической технике.

Результаты исследований

В зависимости от качества информации о причинах отказов ЭМК могут быть условно разделены на две группы: детерминированную и стохастическую. В качестве определяющего критерия следует выделить возможность прогнозирования отказа и его причин.

Отказ прогнозируем, если он является следствием исследованных физических закономерностей.

Появление детерминированных отказов обусловлено действием известных физических законов. Например, известно, что в рассматриваемых условиях отказ должен проявиться с определенной вероятностью. Стохастическую компоненту события составляет момент проявления отказа.

Если отказ является следствием неизученных закономерностей и поэтому не поддается прогнозированию, то он относится к категории стохастических отказов. Как правило, по частоте проявления стохастические отказы существенно отличаются от детерминированных, поэтому их еще называют редкими отказами. По мере познания физической природы отказов, количественное соотношение их меняется: доля стохастических отказов сокращается, доля детерминированных растет.

К группе детерминированных отказов относятся такие, причины которых закономерно обусловлены и исследованы. Они могут быть предсказаны прогнозированием изменения технического состояния ЭМК в эксплуатации. К этой группе могут быть отнесены параметрические и прочностные отказы.

Параметрические отказы проявляются в виде выхода значений контролируемого параметра за границы, указанные в Техническом задании (ТЗ) и регистрируются путем измерения параметра. Как правило, они влияют на качество функционирования, но не приводят к полному прекращению выполнения изделием своих функций.

Прочностные отказы проявляются в виде разрушений элементов конструкции ЭМК, либо в виде их недопустимой остаточной деформации (рис. 1, 2). Часто прочностные отказы не могут быть выявлены приборными методами, проявляются внезапно и приводят к полной утрате работоспособности клапана.

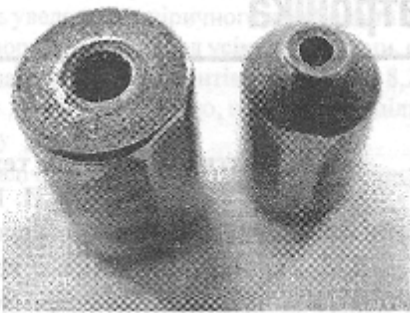


Рис. 1. Изменение технического состояния контактной поверхности ползуна со стопорной шайбой в клапане с двухпозиционным электромагнитным приводом.

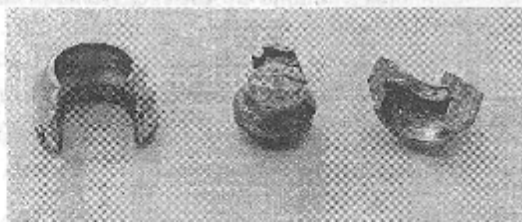


Рис. 2. Пластическая деформация стопорной шайбы и головки штока клапана с двухпозиционным электромагнитным приводом.

Характерными примерами стохастических (редких) отказов электромагнитных клапанов и их интенсивность, оцененная по данным опытной отработки изделий, являются:

- разрыв электрической цепи «ШР — обмотка электромагнита» после наработки 10^5 и более циклов срабатывания. При анализе причин отказа было установлено, что разрыв электрической цепи произошел в результате усталостного разрушения провода в месте спая (рис. 3).
- спай проводов обмотки электромагнита и ШР оказался в газовом пузыре (вне компаунда) и имел возможность совершать колебательные движения при срабатывании электромагнитного привода. Расчетная интенсивность такого отказа составляла $\lambda_1 = 10^8$ 1/цикл;
- пробой электрического сопротивления изоляции в слабом, предварительно поврежденном месте ($\lambda_2 = 10^8$ 1/цикл);
- размагничивание магнитной системы электромагнитного привода ($\lambda_3 = 10^8$ 1/цикл);
- заклинивание ползуна в разделительной трубке клапана из-за попадания в зазор крупных фрагментов защитного покрытия — химикеля ($\lambda_4 = 10^8$ 1/цикл);
- негерметичность в затворе клапана вследствие попадания на линию контакта посторонних механических частиц ($\lambda_5 = 10^7$ 1/цикл);
- самоотвинчивание резьбовых соединений в узлах настройки и контровки ($\lambda_6 = 10^6$ 1/цикл).

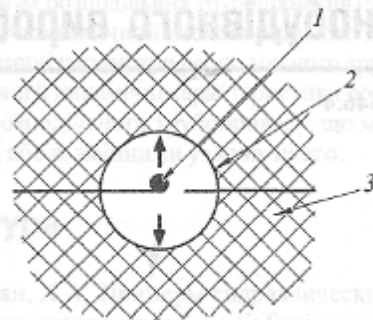


Рис. 3. Усталостное разрушение провода в месте спая:

- 1 — спай проводов обмотки и ШР;
2 — газовый пузырь; 3 — компаунд.

Анализ статистических данных показывает, что стохастические отказы, как правило, проявляются обычно не в период приемо-сдаточных испытаний (ПСИ) изделия, а после наработки электромагнитным приводом клапана значительного количества циклов.

В отношении стохастических отказов могут быть выдвинуты лишь предположения о причине их возникновения; воспроизвести эти отказы удастся крайне редко.

Вероятность безотказной работы $P_{ЭМК}(t)$ клапана в общем случае может быть представлена в виде

$$P_{ЭМК}(t) = P_{ФП}(t) \cdot P_{пр.о}(t) \cdot P_{р.о}(t),$$

где $P_{ФП}(t)$ — вероятность невыхода функциональных параметров (ФП) клапана за границы ТЗ; $P_{пр.о}(t)$ — вероятность неразрушения элементов ЭМК (прочностных отказов); $P_{р.о}(t)$ — вероятность безотказной работы клапана в отношении «редких» (стохастических) отказов.

Так как в проявлении «редких» отказов, как правило, доминирует стохастическая составляющая, учитывать их целесообразно по экспериментально установленным частотам появления λ_i , например, с использованием экспоненциального распределения. Вероятность безотказной работы в отношении стохастических отказов может быть рассчитана как

$$P_{р.о}(t) = e^{-\lambda t},$$

где λ — интенсивность отказов; t — время безотказной работы изделия, заданное ТЗ.

Вероятность безотказной работы клапана в отношении параметрического отказа может быть найдена как

$$P_{ФП}(t) = F(u),$$

где u — квантиль нормированного нормального распределения, равный

$$u = \frac{[x]^p - x_i}{s},$$

где $[x]^p$ — предельно допустимое верхнее значение ФП

по ТЗ; x_i — ожидаемое номинальное значение ФП; s — среднее-квадратичное отклонение ФП, равное $s = MV$, где M — математическое ожидание ФП; V — коэффициент вариации ФП, определяемый по справочным данным.

Вероятность неразрушения элемента конструкции клапана определится как

$$P_{\text{нр.о}}(t) = F(u),$$

где квантиль нормального распределения прочностных отказов

$$u = \frac{[W] - W_i}{sW},$$

$[W]$ — предельно допустимое значение удельной кинетической энергии, воспринимаемой конструктивным элементом, определяемое по справочным данным; W_i — удельная кинетическая энергия единичного удара, воспринимаемая конструктивным элементом

$$W_i = \frac{mv^2}{2S},$$

m — масса подвижной системы электромагнитного привода клапана; v — скорость перемещения подвижной системы в момент, предшествующий удару; S — площадь поперечного сечения стержневого элемента клапана, воспринимающего удар.

Применение предлагаемого подхода к расчету безотказности ЭМК при проектировании дает возможность повысить общую эффективность разработки за счет определения перечня возможных отказов клапана и своевременной разработки мер по их предотвращению.

Заключение

1. Разработаны рекомендации по оценке вероятности безотказной работы проектируемого ЭМВ, учитывающие различный характер проявления их отказов в процессе эксплуатации.
2. Эффективность предлагаемой методики апробирована в процессе разработки в КЦКБА малогабаритных пневматических ЭМК, широко применяемых в авиакосмической технике.

Литература

1. ГОСТ 27.301-83 Надежность в технике. Прогнозирование надежности изделий при конструировании. Общие требования. — М.: Госкомитет СССР по стандартам, изд-во стандартов, 1983. — 40 с.
2. ДСТУ 2862-94 Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. — К.: Держстандарт України, 1994. — 40 с.
3. Експериментальне дослідження меж і запасів працездатності клапанів з електромагнітним приводом / Звіт з науково-дослідної роботи, номер державної реєстрації № 0106U011814, КЦКБА, 2006. — 168 с.
4. Проников, А.С. Параметрическая надежность машин. — М.: изд-во МВТУ, 2002. — 580 с.
5. РД 24-207-06-90 Руководящий документ. Расчет показателей надежности на этапе проектирования. — Л.: ЦКБА, 1980. — 105 с.
6. Хильчевский, В.В. Надежность трубопроводной пневмогидроарматуры / В.В. Хильчевский, А.Е. Ситников, В.А. Ананьевский — М.: Машиностроение, 1989. — 208 с.

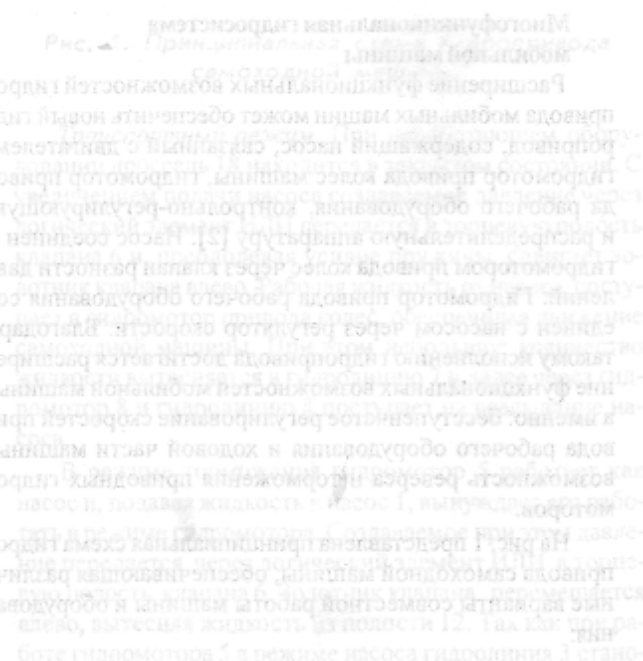


Рис. 1. Принципова схема пневматичного привода клапана