

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА МАЛОГАБАРИТНЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ КЛАПАНОВ С ДВУХПОЗИЦИОННЫМ ПОЛЯРИЗОВАННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ С УЧЕТОМ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИВОДА

### PREDICTING THE LIFESPAN OF COMPACT-SIZED VALVES WITH TWO-POSITIONED POLARIZED ELECTROMAGNETIC DRIVE AND CONSIDERING THE FATIGUE STRENGTH OF DRIVE ROD ELEMENTS

*Рассмотрены вопросы прогнозирования ресурса малогабаритных клапанов с двухпозиционным поляризованным электромагнитным приводом с учетом усталостной прочности стержневых элементов привода. На основании проведенных ресурсных испытаний определены основные деградиационные процессы, которые имеют место в элементах клапанов при их эксплуатации. Определены корреляционные зависимости между развитием деградиационных процессов в элементах клапанов и изменением их основных функциональных параметров. Определен критический элемент клапана — стержневой элемент (шток) электромагнитного привода, который лимитирует его ресурс. Разработана методика прогнозирования ресурса малогабаритных электромагнитных клапанов на основании использования теории накопления повреждений в критическом элементе клапана, который лимитирует его ресурс.*

*Ключевые слова: малогабаритный пневматический клапан, ресурс, электромагнитный привод, критический элемент, шток, накопление усталостных повреждений, прогнозирование*

#### Введение

Малогабаритные пневматические клапаны с электромагнитным приводом, далее электромагнитные клапаны (ЭМК), представляют собой технические устройства, предназначенные для управления потоком рабочей среды в различных системах космических летательных аппаратов (КЛА). ЭМК широко используются в системах ориентации и стабилизации КЛА, в системах управления двигателей малой тяги, в системах питания, других системах космических аппаратов. На современных изделиях авиационной техники ЭМК используются в противообледенительных системах, системах кондиционирования воздуха, системах наддува топливных баков, других системах [1].

Среди ЭМК, применяемых в КЛА, следует выделить группу клапанов с двухпозиционным поляризованным электромагнитным приводом. Эти изделия потребляют минимальное количество электрической энергии, которая расходуется только на перемещение подвижной системы привода в момент открытия или закрытия клапана, а удержание запорного органа в открытом или закрытом положении обеспечивается за счет магнитного потока постоянного магнита, встроенного в конструкцию привода. Другим преимуществом этой группы клапанов

является их повышенное быстродействие (время открытия и закрытия клапана составляет в среднем 8–12 мс). Такое быстродействие обеспечивается за счет высокой скорости перемещения элементов подвижной системы клапана, что в свою очередь приводит к возникновению интенсивных периодических ударных эксплуатационных нагрузок и вызываемых ими усталостных деформаций и разрушений механических элементов клапана.

Характерными отказами таких ЭМК в эксплуатации является разрушение стержневых элементов (штоков), с помощью которых реализуется кинематическая связь электромагнитного привода с исполнительным элементом клапана [2]. Поэтому важнейшая задача разработчика на этапе проектирования состоит в прогнозировании ресурсных возможностей проектируемого изделия и обоснования его ресурса, в процессе выработки которого с заданной вероятностью не происходили бы отказы ЭМК по причине разрушения его конструктивных элементов.

#### Цель исследований

Следует также отметить, что в настоящее время установление и обоснование ресурса пневматических клапанов с электромагнитным приводом в большинстве

случаев проводится на основании результатов стендовых ресурсных испытаний. Такой способ установления и обоснования ресурса клапанов является очень затратным и продолжительным по времени, а в связи с значительным увеличением ресурсов клапанов — практически бесперспективным. Решение этой проблемы требует разработки научно обоснованной методики прогнозирования изменения технического состояния клапанов под действием эксплуатационных нагрузок с применением различных методов статистического анализа.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что процессу многократного импульсного контактирования деталей принадлежит ведущая роль в формировании эксплуатационных изменений технического состояния малогабаритных ЭМК. Следует также указать, что в литературе по проектированию малогабаритных ЭМК авиакосмической техники [1, 2, 3] эти вопросы пока что не нашли достаточно полного освещения. В работах [2] отмечается лишь то, что элементы подвижной части клапана ударно контактируют с неподвижными элементами его конструкции. Приводятся наиболее возможные

значения коэффициентов динамичности  $k_a$ . Однако последствия контактного взаимодействия элементов клапана и соответствующие механизмы формирования изменения их технического состояния в этих работах авторами практически не рассматриваются. Заслуживают на внимание результаты исследований ряда авторов [4, 5], направленные на обоснование выбора запасов работоспособности малогабаритных ЭМК авиакосмической техники, обеспечивающих выполнение требований нужных показателей безотказной работы ЭМК в процессе нормальной эксплуатации.

В наше время эти вопросы продолжают оставаться актуальными, так как их решение дает возможность прогнозировать изменения технического состояния клапанов в процессе эксплуатации и их ресурс, а также еще на стадии проектирования разрабатывать эффективные меры относительно усовершенствования конструкции клапана.

Этим определяются *цель* настоящих исследований — *прогнозирование ресурса малогабаритных ЭМК с двухпозиционным поляризованным электромагнитным приводом, величина которого ограничивается усталостной прочностью стержневых элементов (штоков) подвижной системы электромагнитного привода клапана.*

Основными *задачами* проведенных исследований были:

- провести анализ физических процессов и соответствующих изменений технического

состояния и основных функциональных параметров малогабаритных пневматических ЭМК с двухпозиционным поляризованным электромагнитным приводом при циклическом функционировании вследствие ударного контактного взаимодействия подвижной системы клапана с неподвижными элементами его конструкции;

- определить критические элементы конструкции клапана, лимитирующие его ресурсные возможности;
- разработать методику прогнозирования ресурса клапанов на основании использования вероятностных моделей накопления усталостных повреждений в стержневых элементах (штоках) ЭМК под действием циклических динамических эксплуатационных нагрузок.

Результаты ресурсных испытаний малогабаритных ЭМК с двухпозиционным поляризованным электромагнитным приводом

Оценка фактического изменения технического состояния ЭМК данного типа и их функциональных параметров в процессе выработки ресурса проводилась на основании результатов специальных ресурсных испытаний до полного отказа испытуемых образцов [4]. В качестве объекта исследований был выбран малогабаритный пневматический ЭМК с двухпозиционным поляризованным электромагнитным приводом разработки ПАО «Киевское центральное конструкторское бюро арматуростроения» (КЦКБА), конструктивная схема которого приведена на рисунке 1.

В открытом положении золотник 8 содержится возле верхнего стопа корпуса электромагнита 2 силой магнитного потока постоянного магнита 13.

При подаче управляющего сигнала  $U_{\text{откр}}$  на закрытие клапана ток в обмотке 11 создает силу притяжения в рабочем зазоре между ползуном 5 и нижним стопом 6 и ослабляет магнитный поток постоянного магнита 13. Под действием этих сил ползун с подвижной системой переместится к нижнему стопу. Но так как величина хода золотника меньше за величину рабочего зазора, золотник сядет на седло 7, а ползун, продолжая перемещаться, сожмет буферную пружину 4 на усилие герметизации, образовав некоторый зазор со стопорной шайбой 9. Теперь рабочий зазор между ползуном и верхним стопом увеличился, а между ползуном и нижним стопом уменьшился, магнитный поток постоянного магнита перебрасывается к нижнему стопу и при снятии сигнала  $U_{\text{закр}}$  подвижная система клапана будет удерживать в нижнем (закрытом) положении золотник 8 прижатый к седлу 7.

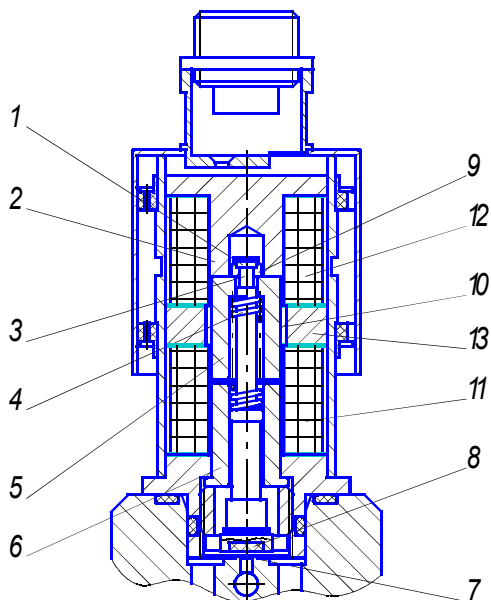


Рисунок 1 — Конструктивна схема клапана с двухпозиционным электромагнитным приводом:

1 — головка штока; 2 — корпус электромагнита; 3 — шейка штока; 4 — буферная пружина; 5 — ползун (якорь); 6 — нижний стоп; 7 — седло; 8 — золотник; 9 — стопорная шайба; 10 — трубка распределительная; 11 — обмотка закрытия; 12 — обмотка открытия; 13 — постоянный магнит

При подаче управляющего сигнала  $U_{откр}$  на открытие клапана ток в обмотке 12 создает силу притяжения в рабочем зазоре между ползуном 5 и верхним стопом корпуса электромагнита 2, и ослабляет магнитный поток постоянного магнита 13. Под действием этих сил ползун, ударяясь по стопорной шайбе, переместится к верхнему стопу и «оторвет» тем самым золотник от седла. Так как рабочий зазор между ползуном и верхним стопом уменьшился, а между ползуном и нижним стопом увеличился, магнитный поток постоянного магнита перебрасывается к верхнему стопу и при снятии сигнала  $U_{откр}$  подвижная система клапана будет содержаться в верхнем (открытом) положении.

Анализ проведенных ресурсных испытаний показал, что при открытии клапана (перемещении подвижной его части от седла) имеет место [4, 6]:

- ударное циклическое контактирование ползуна 5 и шайбы 9, что приводит к выкрашиванию от усталости торцовых поверхностей контакта и изменению относительного положения деталей 5 и 9;
- циклическое приложение распределенного импульсного усилия, нормального к плоскости контакта шайбы 9 и головки штока 3, что приводит к формоизменению деталей 9 и 3 вследствие накопления односторонних пластических деформаций, изменения взаимного положения деталей и накопления микрповреждений в конструктивном материале шейки штока 3;

- ударное циклическое контактирование ползуна 5 и верхнего стопа 2, что приводит к деградации макрорельефа поверхностей контакта деталей 5 и 2. При закрытии клапана (перемещении подвижной его части к седлу) имеет место:
- ударное циклическое контактирование золотника 8 и седла 7, что приводит к деградации макрорельефа поверхностей уплотнения на золотнике;
- ударное циклическое контактирование ползуна 5 и нижнего стопа 6, что приводит к деградации торцовых поверхностей контакта деталей 5 и 6.

Кроме того, в процессе возвратно-поступательного движения подвижной системы клапана имеет место процесс износа цилиндрических поверхностей ползуна 5 и распределительной трубки 10. Вследствие этого имеет место постепенная деградация микрорельефа поверхностей трения и увеличение сил трения.

В процессе испытаний периодически, через каждые 20 тыс. циклов (блок-цикл) срабатывания, контролировались основные функциональные параметры клапана (напряжение  $U_{откр}$  и время  $t_{откр}$  открытия клапана, напряжение  $U_{закр}$  и время  $t_{закр}$  его закрытия), проводился микрообмер деталей клапана и определялся ход золотника  $x_{зол}$ . Проводились фотографирование деталей клапанов после их отказа и анализ поверхностей контактов и мест разрушения шейки штока 3.

По результатам ресурсных испытаний выявлено, что в процессе обработки ресурса в малогабаритных ЭМК с двухпозиционным поляризованным электромагнитным приводом имеет место пластическая деформация деталей подвижной системы клапана и после определенной наработки разрушение шейки штока (рисунок 2), что ограничивает ресурс изделия.



Рисунок 2 — Примеры пластической деформации и разрушения стопорной шайбы 14 и шейки штока 3

Экспериментальным путем получены зависимости изменения основных параметров клапана от наработки. Установлено, что для ЭМК исследуемого типа процессе обработки ресурса имеет место небольшое уменьшение напряжения  $U_{откр}$  и времени  $t_{откр}$  открытия клапана, небольшое уменьшение напряжения  $U_{закр}$  и времени  $t_{закр}$  закрытия клапана и существенное уменьшение хода золотника  $x_{зол}$  (рисунок 3) за счет изменения положения ползуна относительно стопорной шайбы и штока вследствие выработки кольцевой канавки на торцевой

поверхности ползуна и пластической деформации деталей подвижной системы клапана (прежде всего удлинения шейки штока). При уменьшении величины  $x_{\text{зол}}$  от 0,8 мм до критической (0,1 мм) имеет место отказ клапана.

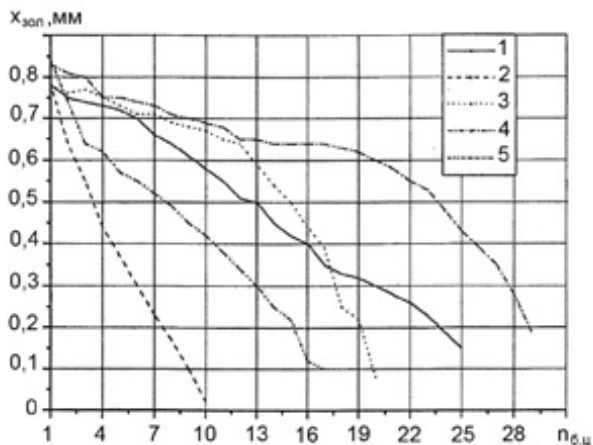


Рисунок 3 — Изменение хода золотника пяти опытных образцов клапана от количества блок-циклов срабатывания (1 блок-цикл равен 20000 циклов)

**Оценка ресурсных возможностей стержневых элементов (штоков) ЭМК штока на основании использования стохастической теории накопления усталостных повреждений в их конструкционном материале.** Результаты проведенных ресурсных испытаний показали, что ресурс малогабаритных ЭМК с двухпозиционным поляризованным электромагнитным приводом в основном определяется усталостной прочностью стержневых элементов (штоков) электромагнитного привода. Имеется определенная корреляционная связь между уменьшением хода золотника  $x_{\text{зол}}$  и величины накопления усталостных повреждений в материале штока от количества блок-циклов срабатывания клапана  $n_{\text{б.ц.}}$ .

Для оценки ресурсных возможностей ЭМК исследуемого типа на основании результатов испытаний опытных образцов изделия разработаны математические модели накопления усталостных повреждений в материале штоков клапанов с использованием стохастической теории накопления повреждений в критическом элементе ЭМК под действием циклических динамических нагрузок в процессе срабатывания клапана. Для их разработки была использована основанная на центральной граничной теореме вероятностная модель суммирования повреждений [7].

С физической точки зрения процесс развития усталостных повреждений в материале штоков клапана связанный с накоплением невосстанавливаемых пластических деформаций, износа, наклепа и других необратимых изменений в структуре материала штока. На развитие этих процессов, в свою очередь, влияют внешние случайные факторы: изменения условий работы и изменение параметров динамических нагрузок

в процессе эксплуатации клапана. В процессе каждого отдельного нагружения (регулярного или случайного) имеет место элементарный акт накопления в материале штока невосстанавливаемых деформаций (приращения повреждения), величина и характер которого есть случайной функцией механических характеристик материала штока, величины напряжений, возникающих при ударном циклическом динамическом нагружении, числа циклов нагружений и других факторов. Процесс накопления повреждений в материале штока в этом случае может рассматриваться как результат статистического суммирования большого количества небольших микроскачков элементарных независимых повреждений. Тогда за  $n$  циклов срабатывания клапана величина накопленной повреждаемости  $B_n^{\Sigma}$  определится суммой  $B_n^{\Sigma} = \sum_{i=1}^n B_i$ , где  $B_i$  — величина повреждаемости в  $i$ -м элементарном цикле. За определенный период эксплуатации, когда количество срабатываний клапана  $n$  будет достаточно большим, за центральной граничной теоремой и принятыми допущениями  $B_n^{\Sigma}$  стремится к нормальному распределению. Такой процесс накопления повреждений в материале штока клапана можно рассматривать как случайный процесс с независимыми приращениями, построенный по типу марковской последовательности.

В качестве процесса накопления усталостных повреждений в материале штока клапана можно рассматривать и не прямые параметры, которые достаточно хорошо отображают характер изменения основных физических процессов повреждаемости в материале штока, таких как, например, ход золотника  $x_{\text{зол}}$ , изменение которого хорошо коррелируется с величиной накопления усталостных повреждений в материале штока ЭМК.

В этом случае характеристики случайного процесса накопления усталостных повреждений в материале штока могут быть определены, исследованы и прогнозированы статистическими методами с использованием представленных на рисунке 3 экспериментальных зависимостей изменения хода золотника от числа блок-циклов срабатывания клапана.

Рассматриваются два случайных процесса (последовательности): исходный порождающий процесс повреждаемости штока клапана

$$B'(t_1), B'(t_2), \dots, B'(t_n)$$

и порожденный им процесс накопленной повреждаемости

$$B(t_1) = B'(t_1), B(t_2) = B'(t_1) + B'(t_2), \dots,$$

$$B^{\Sigma}(t_n) = \sum_{i=1}^n B'(t_i).$$

Первый процесс при определенных допущениях рассматривается как однородный случайный стационарный процесс, а другой как случайный нестационарный процесс.

Оценку накопленной повреждаемости штока клапана в условиях ресурсных испытаний или эксплуатации можно также проводить за аналогичной схемой в случае, если за элементарную повреждаемость принимать феноменологическую повреждаемость (относительную долговечность, относительную деформацию и т. д.) за один элементарный цикл нагружения штока. Применение деформационных критериев усталостного разрушения позволяет использовать гипотезу суммирования повреждаемостей от усталости, в том числе линейную гипотезу суммирования повреждаемостей.

Принимая допущение, что закон распределения накопленных повреждений близкий к нормальному, что потом нашло свое подтверждение в результате обработки экспериментальных данных, были разработаны вероятностные модели суммирования как независимых, так и зависимых случайных повреждений в материале штока клапана. С использованием этих моделей получены математические зависимости для определения математического ожидания  $m_n$  и дисперсии  $S_n^2$  накопленной повреждаемости в материале штока клапана, а также плотности  $f_{B_n^\Sigma}(B_n^\Sigma)$  и функции распределения накопленной повреждаемости для разных возможных значений коэффициента коррекции  $r$ , определяющего связь между элементарными циклами возникновения усталостных повреждений в материале штока  $V^*(t_1), V^*(t_2), \dots, V^*(t_n)$ :

$$m_n = \sum_{i=1}^n m_i = nm; \quad (1)$$

$$S_n^2 = S_n^2(1 + (n-1)r); \quad (2)$$

$$f_{B_n^\Sigma}(B_n^\Sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi S_n^2 n(1+(n-1)r)}} \times \exp\left(-\frac{(B_n^\Sigma - nm)^2}{2S_n^2 n(1+(n-1)r)}\right); \quad (3)$$

$$F_{B_n^\Sigma}(B_n^\Sigma) = \Phi\left(\frac{B_n^\Sigma - nm}{S\sqrt{n(1+(n-1)r)}}\right). \quad (4)$$

Кроме вероятностных характеристик возникновения и накопления усталостных повреждений в материале штока клапана с использованием разработанных моделей можно определить и вероятностные характеристики надежности стержневых элементов (штоков) ЭМК, в том числе вероятностные характеристики числа циклов нагружения до разрушения шейки штока.

Для необратимых процессов условие разрушения шейки штока можно записать в виде  $B_n^\Sigma > B_0^\Sigma$ , где  $B_0^\Sigma$  — граничный (критический) уровень повреждаемости детали. Тогда, с учетом заданного граничного уровня повреждаемости  $B_0^\Sigma$ , вероятность числа циклов срабатывания клапана до разрушения шейки штока будет равняться вероятности не превышения накопленной повреждаемости  $B_n^\Sigma$  допустимого уровня  $B_0^\Sigma$ :

$$F_n(n) = P_{\text{разр}} = P(N < n) = P(B_n^\Sigma > B_0^\Sigma) = \int_{B_0^\Sigma}^{\infty} f_{B_n^\Sigma}(B_n^\Sigma) dB_n^\Sigma = 1 - \Phi\left(\frac{B_0^\Sigma - nm}{\sqrt{n}S}\right). \quad (5)$$

Аналогично определяется и вероятность неразрушения шейки штока клапана

$$P_{\text{неразр}} = P(N > n) = P(B_n^\Sigma < B_0^\Sigma) = \int_{-\infty}^{B_0^\Sigma} f_{B_n^\Sigma}(B_n^\Sigma) dB_n^\Sigma = 1 - P_{\text{руйн}}. \quad (6)$$

Плотность распределения числа циклов срабатывания клапана до разрушения шейки штока определится путем дифференцирования выражения (5)

$$f_n(n) = \frac{dF_n(n)}{dn} = \frac{1}{\sqrt{2\pi n}S^2} \frac{B_0^\Sigma + nm}{2n} \exp\left(-\frac{(B_0^\Sigma - nm)^2}{2nS^2}\right). \quad (7)$$

Выражения для нахождения математического ожидания, дисперсии и коэффициента вариации числа циклов срабатывания клапана до достижения критического состояния (разрушения) штока имеют вид

$$m_{\text{эд}} = \int_0^{\infty} n f_n(n) dn = \frac{B_0^\Sigma}{m} + \frac{S^2}{2m^2};$$

$$S_{\text{эд}}^2 = \frac{B_0^\Sigma S^2}{m^3} + \frac{5 S^4}{4 m^4}; \quad (8)$$

$$v_{\text{эд}} = \frac{S_{\text{эд}}}{m_{\text{эд}}} = \frac{S}{\sqrt{m}} \frac{\sqrt{B_0^\Sigma + \frac{5 S^2}{4 m}}}{B_0^\Sigma + \frac{S^2}{2m}}.$$

Если известны функция и плотность распределения числа циклов нагружения до разрушения штока клапана (5), (7), то можно также определить интенсивность отказов ЭМК данного типа вследствие усталостного разрушения штока клапана по формуле

$$\lambda_n(n) = \frac{f_n(n)}{1 - F_n(n)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi n}S^2} \frac{B_0^\Sigma + nm}{2n} \exp\left(-\frac{(B_0^\Sigma - nm)^2}{2nS^2}\right)}{\Phi\left(\frac{B_0^\Sigma - nm}{\sqrt{n}S}\right)}. \quad (9)$$

На рисунках 4 и 5 изображены модели суммирования повреждаемостей материала штока клапана для разных значений коэффициента корреляции  $r$ . На рисунке 4 построены траектории изменения накопленной повреждаемости в случае незначительной корреляционной зависимости между элементарными повреждаемостями  $r \ll 1$ , а на рисунке 5 — в случае наличия полной корреляционной зависимости ( $r = 1$ ).

На основании разработанных вероятностных моделей, описываемых выражениями (1–9), проведено моделирование процессов возникновения и накопления повреждаемостей в материале штоков ЭМК рассматриваемого типа (величин  $B_i$  и  $B_n^\Sigma$ ) до пересечения последним процессом граничных значений суммарной повреждаемости  $B_0^\Sigma$

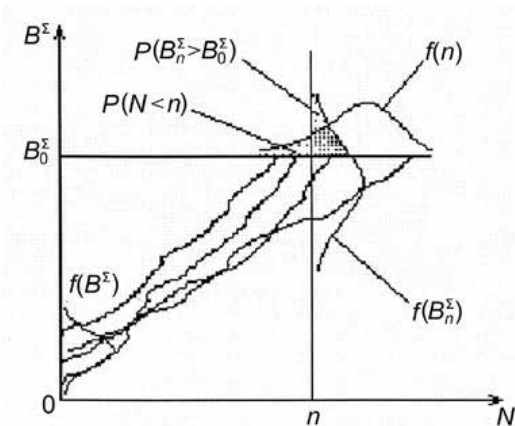


Рисунок 4 — Модель суммирования повреждаемостей при  $r \ll 0$

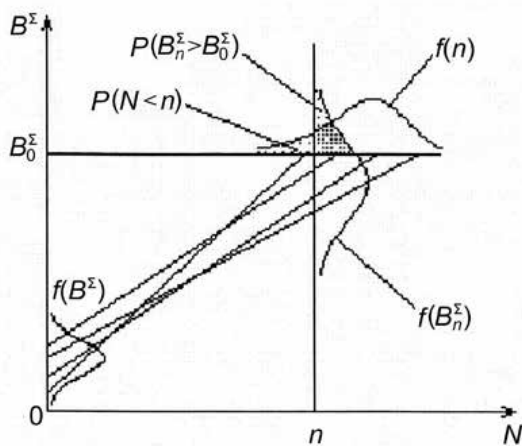


Рисунок 5 — Модель суммирования повреждаемостей при  $r \approx 1$

и определения эксплуатационной надежности клапана – числа циклов (блок-циклов) срабатывания клапана до разрушения шейки штока, на основании которых построены гистограммы и определены вероятностные характеристики выработки ресурса критического элемента клапана–штока (рисунки 6–9).

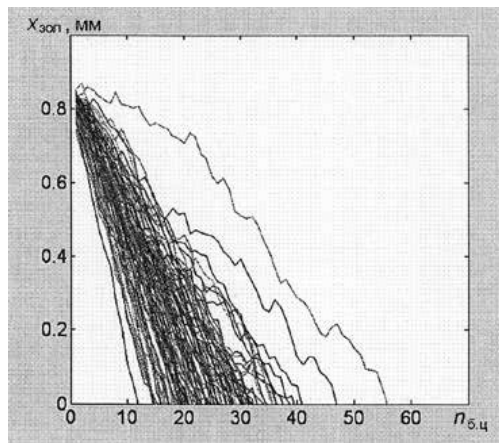


Рисунок 6 — Характеристики процесса возникновения повреждаемостей штока клапана, которые коррелируются с процессом изменения хода штока клапана

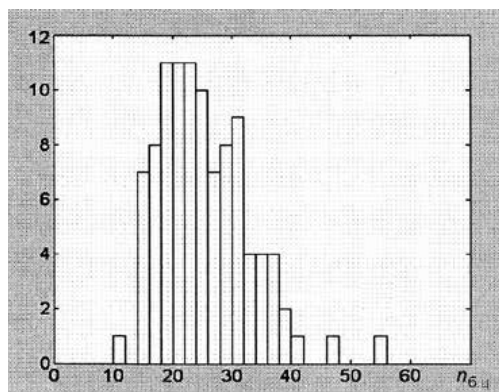


Рисунок 7 — Гистограмма эмпирического распределения числа отказов ЭМК вследствие разрушения шейки штока от числа блок-циклов срабатывания

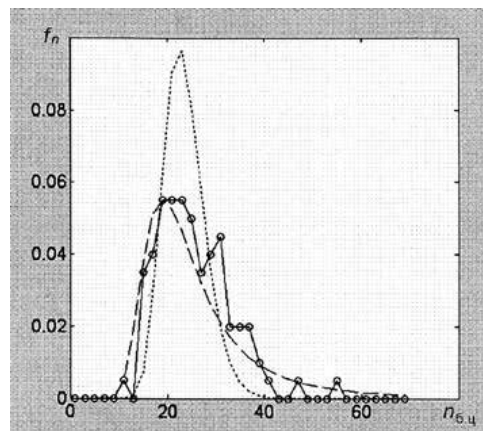


Рисунок 8 — Плотность распределения чисел блок-циклов срабатывания клапана до разрушения шейки штока

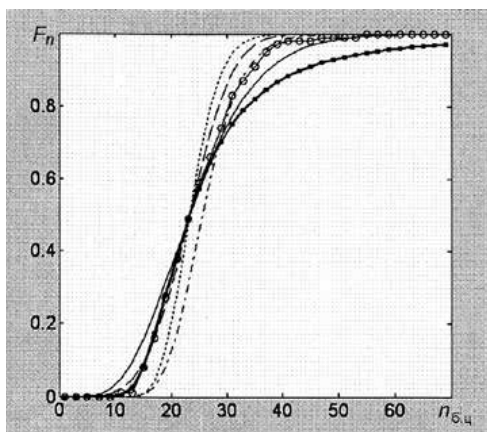


Рисунок 9 — Функция распределения чисел блок-циклов срабатывания клапана до разрушения шейки штока

### Выводы

1. Проведенный анализ результатов ресурсных испытаний показывает, что критическим элементом, определяющим ресурс малогабаритных ЭМК с двухпозиционным поляризованным электромагнитным приводом, является шток электромагнитного привода, разрушение которого приводит к полному отказу клапана. При этом функциональным параметром клапана, по которому можно судить о степени изменения его технического состояния, является ход золотника  $x_{зол}$ , уменьшение которого до величины 0,1 мм приводит к отказу клапана. Прослеживается прямая корреляционная связь между изменением хода золотника клапана и накоплением усталостных повреждений в материале штока.

2. По результатам проведенных ресурсных испытаний ЭМК были определены основные характеристики процесса накопления повреждений в материале штока клапана: математическое ожидание, дисперсия, плотность распределения, а также коэффициент корреляции между элементарными повреждениями за цикл.

3. На основании предложенных моделей накопления повреждений в материале штоком клапанов с двухпозиционным поляризованным электромагнитным приводом разработана методика определения ресурсных возможностей ЭМК данного типа. Ее использование на этапе проектирования ЭМК данного типа позволяет значительно сократить объемы ресурсных испытаний для определения вероятностных характеристик выработки проектируемым клапаном требуемого ресурса.

### Литература

1. Кармугин, Б.В. Современные конструкции малогабаритной пневмоарматуры / Б. В. Кармугин, В.Л. Кисель, А.Г. Лазебник; Под ред. Б. В. Кармугина. — К.: Техніка, 1980. — 296 с.
2. Хильчевский, В.В. Надежность трубопроводной пневмогидроарматуры / В.В. Хильчевский, А.Е. Ситников, В.А. Анянцевский. — М.: Машиностроение, 1989. — 208 с.
3. Гуревич, Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры / Д.Ф. Гуревич. — Л.: Машиностроение, 1969. — 887 с.

4. Рыкунич, Ю.Н. Исследование изменения технического состояния элементов пневмоклапанов с электромагнитным приводом / Ю.Н. Рыкунич, А.Е. Ситников, В.Ф. Лабунец, Я.Б. Федоричко // Вестник НТУУ «Київський політехнічний інститут». — М.: Машиностроение, 2002. — №42, том 1. — С. 173—178.

5. Рыкунич, Ю.Н. Исследование по энергетическим критериям запасов работоспособности поляризованных двухпозиционных электромагнитных клапанов двигательных установок / Ю.Н. Рыкунич, А.Е. Ситников, Л.Г. Александров, Е.И. Барилук, Г.Й. Зайончковский // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». Космонавтика и ракетостроение. — 2013. — №4 (20). — С. 61—67.

6. Рыкуніч, Ю.М. Деформація та руйнування стрижневої системи пневматичного електромагнітного клапана при циклічному ударному навантаженні / Ю.М. Рыкуніч, О.Є. Ситніков, В.В. Астанін, Є.І. Барилук, Г.Й. Зайончковський // Проблеми прочності. — 2014. — № 3 (429).

7. Ветров, А.Н. Вероятностные методы оценки остаточного ресурса конструктивных элементов ГТД в эксплуатации / А.Н. Ветров, А.Г. Кучер // Проблеми прочності, 1989, №8. — С. 70—76.

### References

1. Karmugin, B.V. Sovremennye konstruktsii malogabaritnoy pnevmoarmatury / B.V. Karmugin, V.L. Kisel, A.G. Lazebnik. — K.: Tekhnika 1980. — 296 s.
2. Hilchevskiy, V.V. Nadezhnost truboprovodnoy pnevmogidroarmatury / V.V. Hilchevskiy, A.E. Sitnikov, V.A. Ananievskiy. — M.: Mashinostroyeniye, 1989. — 208 s.
3. Gurevich, D.F. Raschet i konstruirovaniye truboprovodnoy armatury / D.F. Gurevich. — L.: Mashinostroyeniye, 1969. — 887 s.
4. Rykunich, Ju.N. Issledovaniye izmeneniya tekhnicheskogo sostoyaniya elementov pnevmoklapanov s elektromagnitnym privodom / Ju.N. Rykunich, A.E. Sitnikov, V.F. Labunec, Ya.B. Fedorichko // Vestnik NTUU «Kyivskiy politekhnichniy instytut». — Mashinostroyeniye. — 2002. — №42, tom 1. — S. 173—178.
5. Rykunich, Ju.N. Issledovaniye po energeticheskim kriteriyam zapasov rabotosposobnosti polyarizovannykh dvukhpozitsionnykh elektromagnitnykh klapanov dvigatelnykh ustanovok / Ju.N. Rykurich, A.E. Sitnikov, L.G. Aleksandrov, E.I. Barilyuk, G.I. Zajonchkovskiy // Vestnik FGUP «NPO im. S.A. Lavochkina». Kosmonavtika i raketostroyeniye. — 2013. — №4 (20). — S. 61—67.
6. Rykunich, Ju.M. Deformatsiya ta ruynuvannya stryzhnevoi systemy pnevmatichnogo elektromagnitnogo klapanu pry tsyklichnomu udarnomu navantazhenni / Ju.M. Rykunich, O.E. Sitnikov, V.V. Astanin, E.I. Barilyuk, G.Y. Zajonchkovskiy // Problemy prochnosti. — 2014. — № 3 (429).
7. Vetrov, A.N. Veroyatnostnyye metody otsenki ostatochnogo resursa konstruktivnykh jelementov GTD v ekspluatatsiy / A.N. Vetrov, A.G. Kucher // Problemy prochnosti, 1989, №8. — S. 70—76.

Надійшла 2.03.2016 року

**Прогнозування ресурсу малогабаритних пневматичних клапанів з двопозиційним поляризованим електромагнітним приводом з урахуванням утомної міцності стрижневих елементів привода****Г.Й. Зайончковський, Є.І. Барилюк,  
Я.Б. Федоричко**

Розглянуто питання прогнозування ресурсу малогабаритних клапанів з двопозиційним поляризованим електромагнітним приводом з урахуванням утомної міцності стрижневих елементів привода. На підставі проведених ресурсних випробувань визначені основні деградаційні процеси, що мають місце в елементах клапанів упродовж експлуатації. Визначено кореляційні залежності між розвитком деградаційних процесів в елементах клапанів і зміною їх основних функціональних параметрів. Визначено критичний елемент клапана — стрижневий елемент (шток) електромагнітного привода, що лімітує його ресурс. Розроблено методіку прогнозування ресурсу малогабаритних електромагнітних клапанів на підставі використання теорії накопичення пошкоджень у критичному елементі клапана, що лімітує його ресурс.

**Ключові слова:** малогабаритний пневматичний клапан, ресурс, електромагнітний привод, критичний елемент, шток, накопичення утомних пошкоджень, прогнозування.

**Predicting the lifespan of compact-sized valves with two-positioned polarized electromagnetic drive and considering the fatigue strength of drive rod elements****H.I. Zaionchkovskiy, E.I. Barilyuk,  
Ya.B. Fedoruchko**

*The article considers problems of predicting the lifespan of compact-sized valves with two-positioned polarized electromagnetic drive and taking into account the fatigue strength of valve rod elements. Using the conducted recourse tests main degradation processes, which take place in the valve elements during its operation, were determined. Correlational dependencies between the development of degradation processes in the valve elements and the change of their main functional parameters were obtained. The main critical valve element — the rod element of the electromagnetic drive, which limits its recourse — was determined. The methodic of predicting the recourse of compact-sized electromagnetic valves was created. It is based on the theory of the damage accumulation in the critical element, which limits its recourse.*

**Key words:** compact-sized pneumatic valve, recourse, critical element, accumulation of fatigue damage, predicting