

УДК 621.646.4

Ю.Н. РЫКУНИЧ, генеральный директор ПАО «КЦКБА»; Киев;
Я.Б. ФЕДОРІЧКО, начальник отдела ПАО «КЦКБА»; Киев;
Г.И. ЗАЙОНЧКОВСКИЙ, д-р техн. наук; проф. НАУ; Киев;
Е.И. БАРИЛЮК, ассистент НАУ; Киев

УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСА И ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ МАЛОГАБАРИТНЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ КЛАПАНОВ С ДВУХПОЗИЦИОННЫМ ПОЛЯРИЗОВАННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ

Представлены результаты ресурсных испытаний малогабаритных пневматических клапанов с двухпозиционным поляризованным электромагнитным приводом, которые широко используются в авиационной и космической технике в связи с низким уровнем энергопотребления. Их применение в оборудовании космических орбитальных станциях, других летательных аппаратах с длительным периодом эксплуатации делает актуальной задачу увеличения ресурса электромагнитных клапанов (ЭМК) такого типа и повышения их эксплуатационной надежности. Даны научно обоснованные рекомендации по увеличению ресурсных возможностей и повышению эксплуатационной надежности ЭМК этого типа. Результаты исследований внедрены в практику проектирования ЭМК в ПАО «Киевское центральное конструкторское бюро арматуростроения».

Ключевые слова: пневматический клапан, электромагнитный привод, ресурс, надежность, динамические нагрузки, демпфирование.

Введение

Пневматические клапаны с двухпозиционным поляризованным электромагнитным приводом типа ДТВ (двухпозиционный толкающе-втягивающий) нашли широкое применение в авиакосмической технике [1]. Такие электромагнитные клапаны (ЭМК) используются в системах ориентации и стабилизации космических летательных аппаратов, их энергопитания, жизнеобеспечения, управления двигателем малой тяги, дозаправки и т. д. Характерной особенностью таких клапанов является низкий уровень энергопотребления, что особенно важно для космических летательных аппаратов. Их использования в системах оборудования космических орбитальных станций, других летательных аппаратов с длительным периодом эксплуатации делает актуальной задачу увеличения ресурса и повышения эксплуатационной надежности таких ЭМК.

Цель исследований

Результаты опытной отработки малогабаритных ЭМК с приводом типа ДТВ выявили относительно большое количество их полных функциональных отказов, связанных с разрушением стержневых элементов (штоков) электромагнитного привода [2, 3], что ограничивало их ресурс. В связи с этим в ПАО «Киевское центральное конструкторское бюро арматуростроения» (КЦКБА) был проведен комплекс исследований по выявлению особенностей деградационных процессов, происходящих в ЭМК этого типа под действием эксплуатационных нагрузок в процессе отработки установленных ресурсов и разработки рекомендаций по повышению их ресурсных возможностей.

Результаты исследований

В качестве объекта исследования был выбран пневматический ЭМК, конструктивная схема которого приведена на рис. 1.

В открытом положении золотник 9 удерживается около верхнего стопа 1 корпуса

электромагнита силой магнитного потока постоянного магнита 11.

При подаче управляющего сигнала $U_{\text{закр}}$ на закрытие клапана ток в обмотке 10 создает силу притяжения в рабочем зазоре между ползуном 5 и нижним стопом 7 и ослабляет магнитный поток постоянного магнита 11. Под действием этих сил ползун с подвижной системой привода перемещается к нижнему стопу. Но так как величина хода золотника меньше, чем величина рабочего зазора, золотник сядет на седло 8, а ползун, продолжая перемещение, сожмет буферную пружину 6 с усилием герметизации, создав некоторый зазор со стопорной шайбой 14. В результате чего рабочий зазор между ползуном и верхним стопом увеличится, а между ползуном и нижним стопом уменьшится. Магнитный поток постоянного магнита перекидывается к нижнему стопу. Тогда при снятии управляющего сигнала $U_{\text{закр}}$ подвижная система клапана будет удерживать в нижнем (закрытом) положении золотник 9, притиснутым к седлу 8.

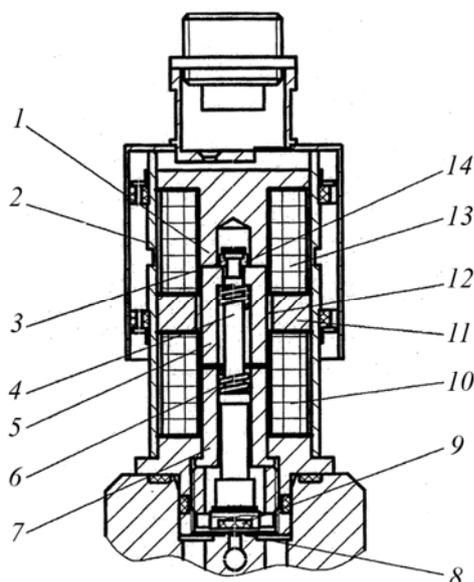


Рис. 1 – Конструктивная схема ЭМК с приводом типа ДТВ: 1 – верхний стоп; 2 – корпус клапана; 3 – шейка штока; 4 – шток; 5 – ползун (якорь); 6 – пружина; 7 – нижний стоп; 8 – седло; 9 – золотник с резиновой вставкой; 10 – нижняя обмотка; 11 – постоянный магнит; 12 – трубка разделительная; 13 – верхняя обмотка; 14 – шайба стопорная

При подаче управляющего сигнала $U_{\text{откр}}$ на открытие клапана ток в обмотке 13 создает силу притяжения в рабочем зазоре между ползуном 5 и верхним стопом 1 электромагнита и ослабляет магнитный поток постоянного магнита 11. Под действием этих сил ползун, ударяя по стопорной шайбе 14, переместится к верхнему стопу 1 и «оторвет» золотник 9 от седла 8. Так как рабочий зазор между ползуном и нижним стопом увеличится, то магнитный поток постоянного магнита перекинется к верхнему стопу. Тогда при снятии управляющего сигнала $U_{\text{откр}}$ подвижная система клапана будет удерживаться в верхнем (открытом) положении постоянным магнитом 11.

Таким образом, работа клапана, имеющего высокое быстродействие, характеризуется цикличностью в срабатывании, а также интенсивными динамическими (ударными) нагрузками.

Проведенные специальные ресурсные испытания опытной партии клапанов с целью выявления основных деградационных процессов в элементах и узлах клапана под действием эксплуатационных нагрузок показали следующее.

При открытии клапана (перемещении подвижной системы ЭМК от седла) имеет место:

– ударное циклическое контактирование ползуна 5 и стопорной шайбы 14 (см. рис. 1), что приводит к выкрашиванию вследствие усталости материала торцевых контактных поверхностей (рис. 2) и изменению c'' относительного положения этих деталей привода (рис. 3);



Рис. 2 – Повреждения верхней торцевой поверхности ползуна (якоря) под действием циклических ударных нагрузок во время открытия клапана (формоизменение поверхности по месту контакта со стопорной шайбой и выкрашивание поверхности по месту контакта с верхним стопом)

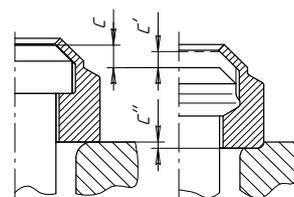


Рис. 3 – Изменение взаимного положения стопорной шайбы, головки штока и ползуна в результате их формоизменения под действием эксплуатационных нагрузок

– циклическое приложение распределенного импульсного усилия, нормального к площади контакта шайбы 14 и головки штока 4, что приводит к изменению формы деталей вследствие накопления односторонних пластических деформаций (рис. 4), изменению взаимного положения c' этих деталей (см. рис. 3) и накоплению микрповреждений в материале шейки штока;

– ударное циклическое контактирование ползуна 5 и верхнего стопа 1, что приводит к деградации макрорельефа поверхностей контакта (рис. 4).

При закрытии клапана (перемещении подвижной системы ЭМК к седлу) имеет место:

– ударное циклическое контактирование золотника 9 и седла 8, что приводит к деградации поверхности резинового уплотнения (рис. 5), вмонтированного в золотник;

– ударное циклическое контактирование ползуна 5 и нижнего стопа 7, что приводит к наклепу торцевых поверхностей контакта.

Таким образом, выявлено, что в процессе отработки ресурса в ЭМК с приводом типа ДТВ имеют место пластические деформации деталей подвижной системы клапана и после определенной наработки разрушение шейки штока (рис. 6), что приводит к полному отказу клапана и ограничивает его ресурс.

Описанные деградационные процессы в элементах ЭМК приводят к определенным эксплуатационным изменениям выходных функциональных параметров клапанов.

По результатам проведенных ресурсных испытаний определены зависимости эксплуатационных изменений функциональных параметров клапана (рис. 7, а) и хода его золотника (рис. 7, б) от количества блок-циклов срабатывания (1 блок-цикл равен 20000 срабатываний).



Рис. 4 – Узел крепления штока и ползуна после наработки 200000 циклов срабатывания

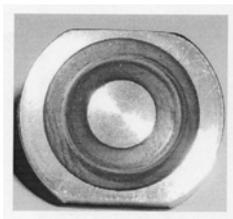
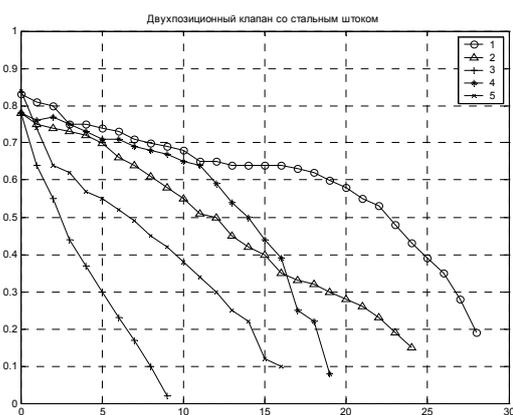


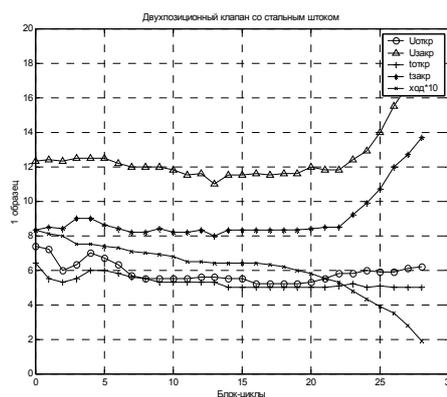
Рис. 5 – Деформация резинового уплотнения золотника



Рис. 6 – Усталостное разрушение шейки штока



а



б

Рис. 7 – Зависимости изменения хода золотника пяти опытных образцов ЭМК с приводом типа ДТВ (а) и функциональных параметров 1-го опытного образца клапана (б) от количества блок-циклов срабатывания

Установлено, что для ЭМК с приводом типа ДТВ в процессе отработки ресурса имеет место определенное уменьшение напряжения $U_{откр}$ и времени $t_{откр}$ открытия клапана, определенное увеличение напряжения $U_{закр}$ и времени $t_{закр}$ закрытия клапана и существенное уменьшение хода золотника $x_{зол}$ 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 $x_{зол}$ от 0,8 мм до критической (0,1 мм) имеет место отказ клапана.

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что определенная часть кинетической энергии подвижной системы ЭМП клапана переходит при его открытии и закрытии в потенциальную энергию деформации конструкционного материала штока и образованию в нем определенных микродеформаций, а оставшаяся часть рассеивается вследствие трения или в специально установленном демпфирующем элементе. По мере увеличения числа срабатываний клапана количество указанных энергетических переходов растёт. Накопление микродеформаций в конструкционном материале штока приводит к возникновению макротрещин, а после определенного количества срабатываний – к разрушению шейки штока и полному отказу клапана.

Реализация результатов выполненных исследований проводилась в КЦКБА путем:

- усовершенствования процесса разработки новых образцов ЭМК для авиакосмической техники;

– разработки конкретных научно обоснованных рекомендаций по совершенствованию конструкций отдельных образцов малогабаритных ЭМК.

Разработан стандарт предприятия СТУ КЦКБА–273:2012 «Методика расчета запасов работоспособности электромагнитных клапанов при проектировании», основные положения которых изложены в работах [4, 5], внедрение которых позволяет уже на ранних этапах проектирования новых ЭМК заложить в их конструкцию необходимые запасы работоспособности с учетом прогнозирования возможных эксплуатационных изменений технического состояния клапанов в процессе выработки ресурса.

Рекомендации по усовершенствованию конструкций отдельных типов ЭМК были направлены на увеличение надежности клапанов за счет:

- усовершенствования геометрии деталей и узлов ЭМК с целью увеличения площади ударного контакта элементов клапана или поперечного сечения шейки штока, снижения влияния концентраторов напряжений;
- использования в подвижной системе ЭМП клапана устройств демпфирования для рассеивания части энергии ударного импульса [6];
- выбора конструкционных материалов, более стойких к влиянию ударных нагрузок.

Так как наиболее слабым звеном ЭМК с приводом ДТВ является узел соединения ползуна (якоря) со штоком, то основная часть разрабатываемых мер была направлена на совершенствование этого узла.

Заслуживает внимания введение в кинематическую цепочку передачи усилий от электромагнита к золотнику демпфирующего элемента, рассеивающего часть кинетической энергии ударного импульса. В качестве демпфирующего элемента рекомендуется использовать плоские прокладки с резины или полиуретана, стандартные резиновые кольца или металлические пружины. Экспериментальная проверка эффективности такого решения была проверена на штатном ЭПМ УФ 098190, используемом в ЭМК УФ 96414-010. В качестве демпфирующего элемента были использованы плоские прокладки с резины ИРП-1338 толщиной 2 мм (рис. 8). Конструкцию защищено патентом Украины [7].

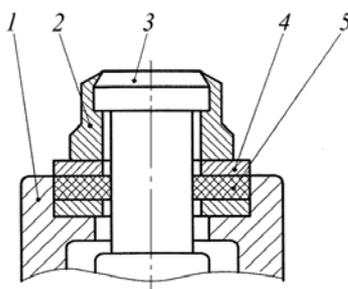


Рис. 8 – Демпфирующее устройство в кинематической цепочке подвижной системы ЭМП клапана:
1 – ползун; 2 – стопорная шайба; 3 – шток; 4 – шайба; 5 – пружинный элемент с малой жесткостью

Введение демпфирующего элемента привело к незначительному снижению быстродействия клапана: увеличению времени открытия клапана с нулевой наработкой с 32,5 мс до 36,3 мс и времени закрытия – с 44,5 мс до 46,2 мс. Однако при этом существенно увеличилось наработка клапан до усталостного разрушения его стержневого элемента.

При ресурсных испытаниях пяти образцов клапанов УФ 96414-010 в штатном исполнении разрушение их стержневых элементов, выполненных из сплава

08X18H10T, наступило при наробтках 6500, 10000, 12000 и 20000 циклов. При тех же условиях были испытаны 2 образца модернизированного клапана УФ 96414-010 с демпфирующими резиновыми прокладками. Испытания были приостановлены после наработки 100000 циклов. Разрушение штоков у этих клапанов не зафиксировано. По результатам дефектации элементов клапанов с демпфирующей прокладкой после отработки 100000 циклов срабатывания существенных изменений технического состояния элементов их подвижной системы не выявлено, в том числе не выявлено существенных формоизменений головки штоков, что характерно для клапанов в штатном исполнении (рис. 9).



Рис. 9 – Вид головки штока ЭМК после ресурсных испытаний: *а* – подвижная система электромагнитного привода без демпфирующего элемента, наработка 20000 циклов; *б* – подвижная система электромагнитного привода с демпфирующим устройством, наработка 1000000 циклов

Для уменьшения выкрашивания торцевой поверхности ползуна рекомендуется в зоне контакта со стопорной шайбой запрессовывать втулку с более износостойким к ударным нагрузкам материалом, например, из стали ХВГ (рис. 10). Проведенные ресурсные испытания ЭМК с доработанным ползуном показали эффективность проведенной доработки. После 100000 срабатываний клапана поверхность ползуна в зоне контакта со стороной шайбой оказалась практически неповрежденной (рис. 11).

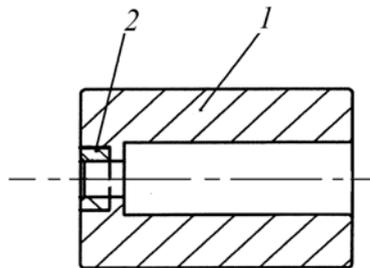


Рис. 10 – Ползун электромагнитного привода клапана с запрессованной втулкой: 1 – ползун (материал пруток 16Х); 2 – втулка (материал ХВГ)



Рис. 11 – Торцевая поверхность ползуна с запрессованной втулкой из стали ХВГ после 100000 циклов срабатывания клапана

Выводы

Обобщение результатов проведенных исследований по обеспечению надежности и безотказности малогабаритных электромагнитных клапанов с приводом типа ДТВ позволяет заключить следующее.

1. Выявлены основные деградационные процессы в элементах и узлах ЭМК с приводом типа ДТВ. Установлено, что наиболее слабым узлом клапана, лимитирующим его ресурс, является узел соединения ползуна (якоря) со штоком, элементы которого подвергаются воздействию интенсивных циклических ударных нагрузок. При определенной наработке происходят существенные формоизменения головки штока, уменьшение хода золотника и разрушение шейки штока.

2. Разработаны и внедрены в ПАО «Киевское центральное конструкторское бюро арматуростроения» в практику проектирования малогабаритных ЭМК стандарт предприятия СТУ КЦКБА–273:2012 «Методика расчета запасов работоспособности электромагнитных клапанов при проектировании».

3. Для уменьшения интенсивности циклических ударных нагрузок на элементы клапана рекомендуется использовать демпфирующие устройства в кинематической цепи подвижной системы электромагнитного привода клапана.

Список литературы: 1. Кармугин, Б. В. Современные конструкции малогабаритной пневмоарматуры [Текст] / Б. В. Кармугин, В. Л. Кисель, А. Г. Лазебник. – К. : Техніка, 1980.– 295 с. 2. Хильчевский, В. В. Надежность трубопроводной арматуры [Текст] / В. В. Хильчевский, А. Е. Ситников, В. А. Ананьевский. – М. : Машиностроение, 1989. – 208 с. 3. Рыкуніч, Ю. Н. Исследование изменения технического состояния элементов пневмоклапанов с электромагнитным приводом [Текст] / Ю. Н. Рыкуніч, А. Е. Ситников, В. Ф. Лабунец, Я. Б. Федоричко // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение. – К. : НТУУ «КПИ», 2002. – Т. 1. – Вып. №42. – С. 173–178. 4. Рыкуніч, Ю. Н. Выбор запасов работоспособности проектируемых электромагнитных клапанов с использованием энергетических критериев [Текст] / Ю. Н. Рыкуніч, А. Е. Ситников // Промислова гідравліка і пневматика. – 2006. – №1 (11). – С. 43–46. 5. Рыкуніч, Ю. М. Визначення запасів працездатності малогабаритних електромагнітних клапанів [Текст] / Ю. М. Рыкуніч // Промислова гідравліка і пневматика. – 2012. – №2 (36). – С. 85–91. 6. Барилюк, Ю. И. Обеспечение безотказности малогабаритных пневматических клапанов с двухпозиционным электромагнитным приводом [Текст] / Е. И. Барилюк, Г. И. Зайончковский, Ю. Н. Рыкуніч и др. // Промислова гідравліка і пневматика. – 2014. – №2 (44). – С. 54–61. 7. Электромагнітний клапан [Текст] : патент 17984 : Україна, МПК F16K31/00 / О. Є. Ситніков, В. Л. Кисіль, Я. Б. Федоричко, Ю. М. Рыкуніч ; КЦКБА. – № u200604886 ; заявл. 03.05.2006 ; опубл. 16.10.2006., Бюл. № 10. – 3 с.

Bibliography (transliterated): 1. Karmugin, B. V., V. L. Kisel' and A. G. Lazebnik. *Sovremennye konstrukcii malogabaritnoj pnevmoarmatury*. Kyiv: Tehnika, 1980. Print. 2. Hil'chevskij, V. V., A. E. Sitnikov and V. A. Anan'evskij. *Nadezhnost' truboprovodnoj armatury*. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 3. Rykunich, Ju. N., et al. "Issledovanie izmeneniya tehničeskogo sostojaniya jelementov pnevmoklapanov s jelektromagnitnym privodom." *Journal of Mechanical Engineering National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*. Ser.: *Mashynobuduvannya*. No. 42.1. Kyiv: NTUU "KPI", 2002. 173–178. Print. 4. Rykunich, Ju. N., and A. E. Sitnikov. "Vybor zapasov rabotosposobnosti proektiruemyh jelektromagnitnyh klapanov s ispol'zovaniem jenergetičeskikh kriteriev." *Promyslova hidravlika i pnevmatyka* 1 (11) (2006): 43–46. Print. 5. Rykunich, Yu. M. "Vyznachennya zapasiv pratsezdatnosti malohabarytnykh jelektromagnitnykh klapaniv." *Promyslova hidravlika i pnevmatyka* 2 (36) (2012): 85–91. Print. 6. Bariljuk, Ju. I., et al. "Obespechenie bezotkaznosti malogabaritnyh pnevmatičeskikh klapanov s dvuhpozicionnym jelektromagnitnym privodom." *Promyslova hidravlika i pnevmatyka* 2 (44) (2014): 54–61. Print. 7. Sytnikov, O. Ye., et al. *Elektromagnitnyy klapan*. Ukraine Patent no. u200604886 (MPK F16K31/00). 16 October 2006. Print.

Поступила (received) 27.11.2014