

УДК 621.646.4

ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ КОНТАКТУЮЧИХ ДЕТАЛЕЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КЛАПАНІВ У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Ситніков А. Е., Федоричко Я. Б., Маринець Д. В.

Національний авіаційний університет

m.d.v.1328@mail.ru

Наведено результати досліджень зміни технічного стану контактуючих деталей електромагнітних клапанів, що мають місце в процесі експлуатації.

The outcomes of researches of change of availability index of product of contacting parts of valves with a solenoid drive are resulted, which one take place during their exploitation.

Постановка проблеми

Пневматичні клапани з електромагнітним приводом широко використовуються в системах обладнання авіакосмічної техніки. Встановлення і обґрунтування їх ресурсу в більшості випадків проводиться на підставі результатів стендових ресурсних випробувань. Такий спосіб встановлення і обґрунтування ресурсу клапанів є дуже затратним і тривалим за часом, а у зв'язку зі значним збільшенням потрібних ресурсів клапанів — практично безперспективний. Вирішення цієї проблеми потребує розробки науково обґрунтованої методики прогнозування зміни технічного стану клапанів під дією експлуатаційних навантажень із застосуванням методів статистичного аналізу.

Проблема підвищення ресурсу пневматичних клапанів з електромагнітним приводом набуває актуальності у зв'язку з широким використанням їх в системах сучасних пасажирських і транспортних літаків, ресурс яких до першого капітального ремонту становить 10...12 тис. льотних годин.

Накопичений досвід розробки і експлуатації пневматичних клапанів з електромагнітним приводом для виробів авіакосмічної техніки показує, що особливостями їх функціонування є:

- циклічність спрацьовування;
- імпульсний характер переміщення і контактування рухомої системи клапана з нерухомими елементами конструкції при спрацьовуванні.

Останнє призводить до того, що в зоні контактування деталі клапана зазнають впливу динамічних навантажень великої інтенсивності, внаслідок яких матеріалі деталей виникають значні динамічні напруження. Це сприяє розвитку різних процесів утомленості в елементах конструкції клапана і значно зменшує його ресурс.

Аналіз досліджень і публікацій

Питанням визначення і прогнозування ресурсу пневматичних клапанів з електромагнітним приводом певний час не приділялось достатньої уваги. Це можна пояснити тим, що такі клапани в більшості випадків застосовувалися на виробках космічної техніки з невеликим життєвим циклом.

У літературі з проектування пневматичних клапанів авіакосмічної техніки ці питання поки

що не знайшли достатньо повного висвітлення. У працях [5; 6] відмічається лише те, що елементи рухомої частини клапана ударно контактують з нерухомими елементами його конструкції. Наводяться найбільш імовірні значення коефіцієнтів динамічності k_d . Проте наслідки контактної взаємодії елементів клапана і відповідні механізми формування зміни їх технічного стану в цих працях авторами практично не розглядаються.

Цілі

Основна мета досліджень — аналіз фізичних процесів та відповідних змін технічного стану пневматичних клапанів з електромагнітним приводом при циклічній роботі внаслідок ударної контактної взаємодії рухомої системи клапана з нерухомими елементами його конструкції, а також порівняння цих процесів для двох типів електромагнітних клапанів — з штоком та без нього.

Матеріали дослідження

Однією з особливостей експлуатації електромагнітних клапанів (ЕМК) є те, що найбільш істотні експлуатаційні зміни в елементах їх конструкції часто відбуваються під впливом навантажень, пов'язаних з функціонуванням електромагнітного приводу. Переміщення рухливої системи ЕМК із одного крайнього положення в інше, що відбувається, як правило, під дією електромагнітних сил, носить імпульсний характер. Час спрацьовування клапана становить 0,01 ... 0,03 с. У процесі спрацьовування ЕМК його рухома система (якір з золотником) під дією імпульсного прикладення зусиль, розганяючись із прискоренням, ударно контактує з одним з упорів (стопом електромагніту або сідлом у корпусі). При цьому елементи конструкції ЕМК або беруть участь у передачі імпульсних зусиль, або сприймають і розсіюють енергію ударного імпульсу. Як відзначається в працях [1; 2; 3], динамічний коефіцієнт напруг в елементах ЕМК при цьому може досягати 20 ... 30 одиниць.

Наявність істотних динамічних навантажень, що виникають при функціонуванні ЕМК, призводить до виникнення великої кількості відмов, пов'язаних з руйнуванням елементів конструкції клапанів.

Остання обставина є наслідком ще й того, що при проектних розрахунках на міцність ЕМК часто недостатньо коректно враховується рівень діючих динамічних навантажень. Проведені дослідження показують, що найбільші експлуатаційні зміни в елементах ЕМК виникають як наслідок ударного контактування. Характер контактного впливу елементів і викликаних ним наслідків залежить від типу електромагнітного приводу (ЕМП) клапана.

Розглянемо роботу двох типів клапанів з різними електромагнітними приводами, принципові схеми яких показано на рис. 1.

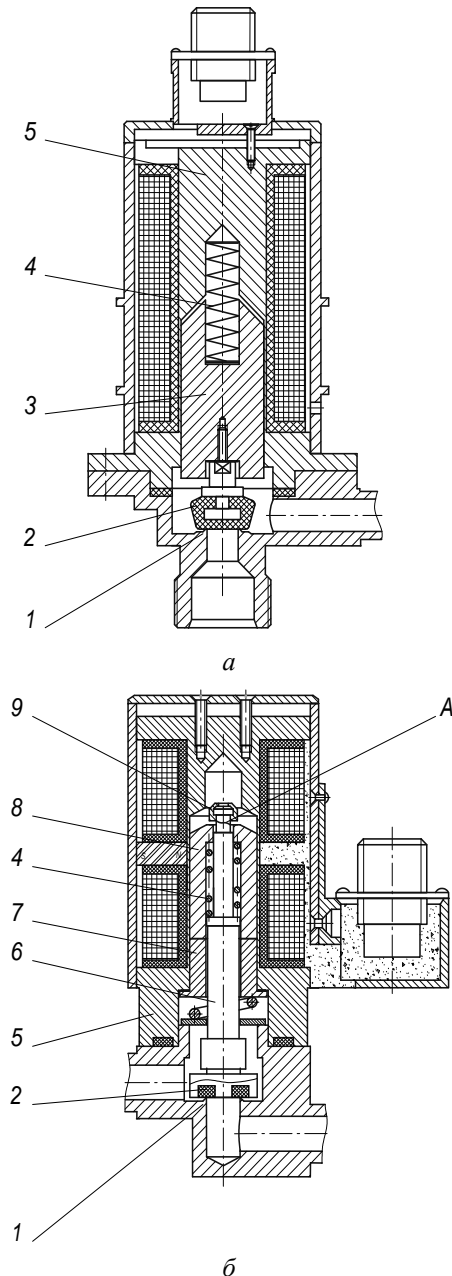


Рис. 1. Схеми клапанів з різними типами електромагнітного привода:
a — клапан з рухомою системою без штока;
б — клапан з рухомою системою зі штоком;
 1 — сідло; 2 — золотник; 3 — якор; 4 — пружина;
 5 — корпус; 6 — шток; 7 — нижній стоп;
 8 — повзун; 9 — стопорна шайба

На рис. 1, *a* показано схему клапана з однопозиційним приводом з нейтральним електромагнітом. Рухома система клапана складається з якоря 3, виконаного у вигляді однієї деталі, і золотника 2. На рис. 1, *б* показано схему ЕМК із двопозиційним поляризованим ЕМП. На штоці 6 установлені стоп 7, повзун 8 і золотник 2.

Зміни, які розвиваються при експлуатації в кожному з розглянутих типів ЕМК, істотно різняться за характером й наслідками.

Розглянемо їх більш докладно.

У клапані з ЕМП без штока (рис. 1, *a*) у процесі функціонування мають місце такі види взаємодії елементів:

I — ударне контактування якоря 3 і стопа 5;

II — ударне контактування золотника 2 і сідла 1;

III — зворотно-поступальне переміщення якоря 3 у розділювальній трубці корпуса 5.

У результаті взаємодії I відбувається наклеп і подальше втомне викришування матеріалу на поверхнях контакту деталей 3 і 5. Наслідки цього процесу: негативна зміна мікрорельєфу контактуючих поверхонь і утворення продуктів зношування.

Взаємодія II викликає аналогічні зміни на поверхні контакту сідла й золотника. При цьому слід зазначити, що в міру збільшення зношування матеріалу ущільнення збільшується заглиблення кромки сідла в ущільнення. Останнє супроводжується збільшенням зазору між якорем і стопом у закритому положенні клапана, що своєю чергою призводить до збільшення мінімальної напруги спрацювання клапана.

Взаємодія III у міру зношування поверхонь тертя може викликати збільшення зусилля, необхідного для переміщення якоря, що також призводить до збільшення мінімальної напруги спрацювання клапана.

Проведені дослідження й накопичений досвід експлуатації показують, що, як би інтенсивно не розвивалися зазначені експлуатаційні зміни в ЕМК даного типу, вони можуть в остаточному підсумку призвести тільки до негативних змін функціональних параметрів клапана, тобто — до параметричних відмов, і не створюють передумов для функціональних відмов, пов'язаних з утворенням залишкових пластичних деформацій в елементах клапана або їх руйнуванням.

У клапанах з ЕМП зі штоком (рис. 1, *б*) при функціонуванні мають місце такі види взаємодії елементів:

IV — ударний контакт повзуна 8 і шайби 9;

V — ударний контакт шайби 9 і голівки штока 6;

VI — ударний контакт повзуна 8 з верхнім стопом корпуса 5;

VII — ударний контакт повзуна 8 з нижнім стопом 7;

VIII — ударний контакт золотника 2 із сідлом 1;

IX — зворотно-поступальне переміщення повзуна 8 у розділювальній трубці корпусу.

У результаті взаємодії IV відбувається наклеп і втомне викрашування поверхонь контакту деталей 8 і 9.

Взаємодія V призводить до виникнення необоротних пластичних деформацій і формозмін деталей 9 і 6.

Результатом взаємодії VI є наклеп і втомне викришування поверхонь контакту повзуна 8 з верхнім стопом корпусу 5.

Наслідком взаємодії VII є виникнення формозмін деталей 7 і 8 в зоні контакту, а також лінійної деформації цих деталей у зоні безпосередньої близькості від поверхні контакту. Останнє приводить до збільшення діаметра якоря й нижнього стопа в зоні контакту (рис. 2) і, як наслідок, до зменшення зазору між якорем і розділювальною трубкою корпусу 5. Коли зазор Δ зменшиться до критичного значення $[\Delta]^{кр}$, відбудеться заклинювання якоря.

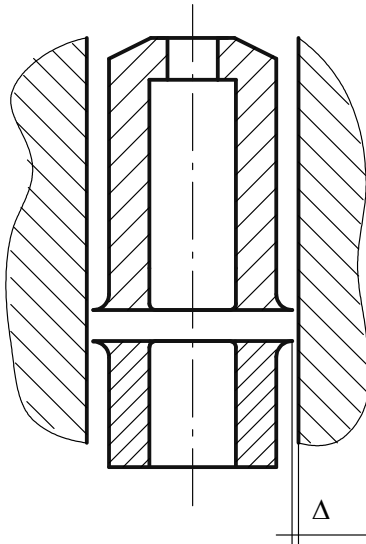


Рис. 2. Зміна форми деталей 7 і 8 (див. рис. 1) у результаті ударного контактування

Взаємодії VIII і IX аналогічні розглянутим раніше наслідкам II і III для клапана з ЕМП без штока.

Відомо, що, залежно від енергії ударного імпульсу й властивостей співударних тіл, зона дії динамічних напруг може охоплювати значну частину деталі, або локалізуватися в безпосередній близькості від поверхні контакту.

Для визначення зони дії й рівнів динамічних навантажень на елементи рухливої системи ЕМП клапана зі штоком було проведено спеціальні ресурсні випробування, у ході яких були зафіксовані випадки руйнування штоків по перетину A (див. рис. 1, б).

Аналіз технічного стану деталей рухливої системи ЕМК після випробувань дав змогу зробити висновок про те, що напрямок імпульсних навантажень і викликані ними деформації локалізу-

ються переважно в безпосередній близькості від зони контакту й призводять до втомного руйнування штоків [4].

80—90 % усіх випадків руйнування металу на практиці відбувається внаслідок втоми, тому що метал зазнає дії циклічних напруг. У зв'язку з цим особливий науковий і практичний інтерес становить розгляд дії циклічних напруг на мікро- і субмікроструктуру сталевого штока з позицій виявлення й оцінювання порушення суцільності (мікроруйнувань), тобто його деструкції. Такий підхід дав змогу оцінити стан сталі за ступенем деструкції, що розвивається в ній, при циклічному навантаженні, тобто фактора, що зумовлює надійність і довговічність сталевого штока й у цілому ЕМК.

Дослідження зруйнованих деталей за допомогою металографічних і растрового електронного мікроскопів дали змогу встановити три стадії втомного руйнування штоків ЕМК, що перебувають під впливом імпульсних циклічних навантажень: 1 — підготовчої, за якої відбувається пластичне деформування в поверхневих шарах штока в міру напрацювання при циклічному навантаженні; 2 — основної, що характеризується зародженням і нагромадженням мікротріщин, а також злиттям деяких з них в одну магістральну тріщину; 3 — завершальної, пов'язаної з інтенсивним розвитком процесів пластичного деформування й стрибкоподібним просуванням утомних тріщин, зменшенням робочого перетину штока, зростанням напруг, що значно перевищують σ_v , що призводить до миттєвого руйнування деталі — долому.

У процесі експлуатації пневмоклапанів з ЕМП їх рухливі й нерухливі деталі зазнають імпульсних ударних навантажень, які призводять до втрати їх працездатності. Згідно з даними дослідного відпрацювання пневмоагрегатів на підприємстві—розроблювачі на частку ПК із ЕМП припадає найбільша кількість повних функціональних відмов (від 16 до 22 % від загальної кількості відмов) [1]. Наразі накопичено велику кількість інформації, що характеризує відмови ЕМК [2]. Однак більша частина цих відмов обумовлена руйнуванням стрижневих елементів—штоків, що реалізують кінематичний зв'язок ЕМП із виконавчим механізмом клапана [3]. Руйнування штоків відбувається по перетину A (див. рис. 1). Аналіз технічного стану деталей ЕМК після випробувань дав змогу зробити висновок про те, що напрямок імпульсних навантажень і викликані ними деформації локалізуються тільки в безпосередній близькості від контакту, які призводять до втомного руйнування [4].

Слід зазначити, що долом займає малу частку часу в загальному процесі втомного руйнування й зв'язаний не з утомою, а з руйнуванням під дією короточасного навантаження, що дорівнює амплітуді циклічного навантаження.

На противагу миттєво поширюваному долому, перша стадія руйнування існує тривалий час. При впливі імпульсних навантажень на шток пружно-пластичне деформування на першій стадії протікає по всьому об'єму порівняно однорідно. Поглинена енергія за цикл навантаження рівномірно розподіляється по перетину приповерхневого шару сталевого штока, що приводить до змін у мікроструктурі сталі: мікротвердість збільшується, скупчення дислокацій інтенсифікується й т.п. При скупченні дислокацій на інтенсивно деформованих ділянках утворюється несутільність, тобто мікротріщини. Ця зародкова мікротріщина також є перешкодою руху дислокацій і при збільшенні циклів випробувань відбувається подальше нагромадження дислокацій (тобто подальша пластична деформація), що призводить до збільшення розмірів мікротріщини. Зародження мікротріщини сприяє зменшенню рівня дальновійних напруг і цим прискорює пластичну деформацію. Таким чином, з одного боку мікротріщини є наслідком пластичної деформації, а з іншого — її причиною.

Друга стадія втомного руйнування характеризується інтенсифікацією процесів виникнення й нагромадження мікротріщин, а також злиттям деяких з них в одну магистральну тріщину. Слід зазначити, що виявити чітку межу між першою й другою стадіями втомного руйнування й експериментально її зафіксувати доволі важко, тому що для цього необхідно зареєструвати появу перших утомних мікротріщин. Особливістю другої стадії втомного руйнування є локалізація цього процесу в найбільш напруженому місці у вершині однієї з множини зароджених утомних мікротріщин.

Висновки

Досвід експлуатації й аналіз результатів ресурсних випробувань показує, що деградаційні процеси в елементах ЕМП клапанів зі штоком (див. рис. 1, б) розвиваються суттєво інтенсивніше й мають більші негативні наслідки, ніж аналогічні деградаційні процеси в клапанах з ЕМП без штока (див. рис. 1, а).

У результаті тривалого впливу циклічних імпульсних навантажень для ЕМК зі штоком мають місце не тільки параметричні відмови, але й випадки функціональних відмов з руйнуванням елементів рухливої частини ЕМП.

Розрахунки показують, що основною причиною є той факт, що величина ударного імпульсу, що припадає на одиницю площі контактуючих деталей в ЕМК зі штоком, у 20 і більше разів перевищує аналогічний показник для ЕМК без штока.

Підвищення рівня безвідмовності ЕМК із двопозиційним поляризованим ЕМП зі штоком при їхньому проектуванні може бути досягнуте або за рахунок введення додаткового демпфірування при контактній взаємодії елементів клапана, або за рахунок збільшення площі контакту.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Чегодаев Д. Е.* Гидро- пневмотопливные агрегаты и их надежность / Д. Е. Чегодаев, О. П. Мулюкин. — Куйбышев : Кн. Изд-во, 1990. — 104 с.
2. *Хильчевский В. В.* Надежность трубопроводной пневмогидроарматуры / В. В. Хильчевский, А. Е. Ситников, В. А. Ананьевский. — М. : Машиностроение, 1989. — 208 с.
3. *Рыкунич Ю. Н.* Обеспечение запасов работоспособности при проектировании пневмоагрегатов систем летательных аппаратов // 36. наук. праць Кіровоградського державного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. — Кіровоград, 2000. — Вип. 7. — С. 103—108.
4. *Рыкунич Ю. Н., Ситников А. Е., Лабунец В. Ф.* Исследование изменения технического состояния элементов пневмоклапанов с электромагнитным приводом // Вестник НТУ Украины «КПИ», сер. Машиностроение. Вып. 42. Т. 1 — Киев, 2002. — С. 174 — 178.
5. *Гуревич Д. Ф.* Расчет и конструирование трубопроводной арматуры / Д. Ф. Гуревич. — Ленинград : Машиностроение, 1969. — 887 с.
6. *Кармугин Б. В.* Современные конструкции малогабаритной пневмоарматуры / Б. В. Кармугин, В. Л. Кисель, А. Г. Лазебник. — К. : Техніка, 1980. — 269 с.

Стаття надійшла до редакції 10.12.09.