

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ МАЛОГАБАРИТНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КЛАПАНІВ

***Анотація.** В статті доводиться необхідність обирати при розробці електромагнітних клапанів потрібних запасів працездатності за функціональними параметрами для забезпечення заданого рівня безвідмовності. Проведено оцінку залежності швидкості деградації золотника та сідла малогабаритного електромагнітного пневмоклапана з жорстким ущільненням. Показано вплив явища демпфування на швидкість зношування елементів рухомої частини електромагнітного малогабаритного пневмоклапана. Візуалізація процесів, що відбуваються в клапані виконані теоретичні розрахунки в середовищі Ansys методом кінцевих елементів. Для підтвердження отриманих теоретичних результатів проведені експериментальні дослідження впливу рівня демпфування на швидкість зношування рухомих елементів ЕМК.*

***Ключові слова:** Електромагнітний клапан, ущільнення, демпфування, зношування, деградація*

Постановка проблеми

Пневматичні клапани з електромагнітним приводом (ЕМП), надалі – електромагнітні клапани (ЕМК), призначені для управління потоком робочого середовища в системах космічних та повітряних літальних апаратів (КЛА). ЕМК широко використовуються в системах орієнтації і стабілізації, в системах управління двигунів малої тяги, в інших системах ЛА. У системах КЛА виділяється група клапанів з двохпозиційним штовхаюче-втягуючим поляризованим електромагнітним приводом (ДТВ) [1]. Перевагою цієї групи є підвищена швидкодія: час відкриття та закриття становить в середньому 8...12 мс. Така швидкодія призводить до інтенсивних ударних навантажень, втомних деформацій та руйнувань деталей. Характерними відмовами таких ЕМК в експлуатації є руйнування стрижневих елементів (штоків), запірною вузла, стопорних шайб, інших деталей [2, 3]. Одним з шляхів підвищення ресурсу є зменшення ударних навантажень за рахунок використання явища демпфування. Заданий нормативною документацією рівень безвідмовності ЕМК з приводом типу ДТВ можна забезпечити вибором запасів працездатності на етапі його проектування.

Враховуючи вищевикладене, а також те, що розробка нових систем ЛА вимагає підвищених вимог до безвідмовності мету цієї роботи слід вважати досить актуальною.

Аналіз літературних джерел

Аналіз інформації про відмови цих виробів дає підставу припустити, що висока швидкодія ЕМК та кількість повних функціональних відмов пов'язані між собою. Висока швидкодія породжує високий рівень динамічних напружень, через що на поверхнях та в матеріалі деталей відбуваються деградаційні процеси. Конструктивна особливість ЕМК з приводом ДТВ така, що виконавче зусилля передається через елементи з малою площею контакту, що збільшує динамічні напруження при спрацьовуванні клапана, і отже, ймовірність відмови.

Мета роботи

Метою роботи є оцінка залежності швидкості деградації золотника та сідла малогабаритного електромагнітного пневмоклапана з жорстким ущільненням. Результатом високої швидкодії ЕМК є ударний принцип дії, що призводить до високих динамічних навантажень на ущільнювальну пару. Удар запірною елемента об сідло клапана створює значне зусилля, пропорційне масі та швидкості переміщення якоря і штока і зворотно пропорційне тривалості удару. У клапанах з металевим ущільненням це призводить до значного зниження ресурсу клапана [4].

У зв'язку з цим актуальним є подолання втомного руйнування елементів рухомої системи клапана протягом періоду його нормальної експлуатації, заданого технічним завданням.

Подібного можна досягти вибором запасів працездатності на етапі проектування та встановлення впливу демпфірування на перекривний вузол електромагнітного клапана.

Визначення запасів працездатності клапана за його функціональними параметрами

Особливість поставленого завдання полягає в тому, що його рішення знаходиться на стику двох науково-технічних проблем: теорії механічного удару та теорії втомної довговічності. Кожна з них досить широко висвітлена в науково-технічній літературі. Проте спроба скористатися результатами цих робіт для отримання аналітичного рішення поставленого завдання стосовно до ЕМК розглянутого типу зустрічає істотні труднощі.

Справа в тому, що при вивченні механічного удару, як правило, розглядають різні аспекти одиночних ударів, а у вивченні втомної довговічності передбачається безударний характер навантаження. При цьому робота електромагнітного клапана з приводом ДТВ характеризується великою кількістю циклів спрацювання, кожен з яких супроводжується ударними навантаженнями. З урахуванням згаданих обставин, було обрано емпіричний шлях вирішення поставленого завдання на підставі результатів ресурсних випробувань клапанів з приводом типу ДТВ. Як об'єкт експериментальних досліджень було обрано пневматичний поляризований двопозиційний електромагнітний клапан, який використовується в руховій установці КЛА. Його конструктивна схема та форма керуючих сигналів наведена на Рис. Рис. 1.

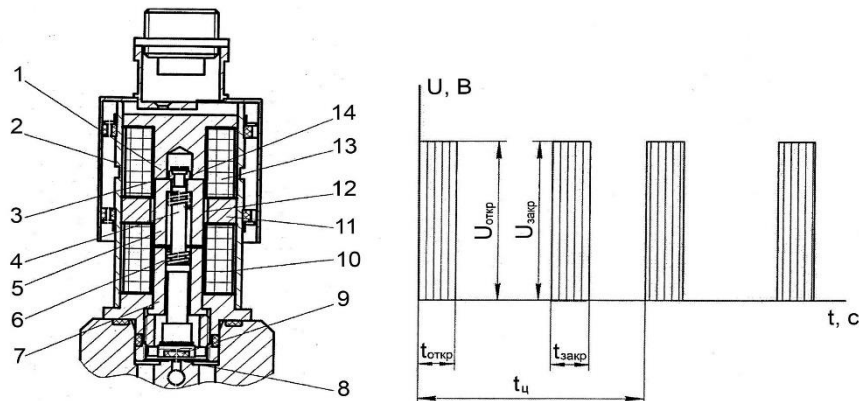


Рис. 1 а – конструктивна схема клапана: 1 – верхній стоп; 2 – корпус клапана; 3 – шийка штока; 4 – шток; 5 – повзун (якір); 6 – пружина; 7 – нижній стоп; 8 – сідли; 9 – золотник з гумовою вставкою; 10 – нижня обмотка; 11 – постійний магніт; 12 – трубка розділова; 13 – верхня обмотка; 14 – шайба стопорна; б – форма керуючих електричних імпульсів

Встановлено, що для ЕМК з приводом ДШВ в процесі наробітку ресурсу має місце зміна його функціональних параметрів: зменшення напруги відкриття $U_{\text{відкр}}$, часу відкриття $t_{\text{відкр}}$ клапана, зменшення напруги $U_{\text{закр}}$ та часу $t_{\text{закр}}$ закриття клапана, а також суттєве зменшення ходу золотника $x_{\text{зол}}$. При зменшенні величини $x_{\text{зол}}$ від 0,8 мм до критичної (0,1мм) має місце відмова клапана. Можна констатувати, що швидкість деградаційних процесів в елементах рухомої системи приводу клапана пов'язана з величиною кінетичної енергії переміщення контактуючих деталей, яка переходить в енергію деформації штока. Накопичення таких мікродеформацій призводить до руйнування штока та повної відмови клапана (Рис. 2).

У процесі випробувань періодично, через кожні 20 тис. циклів спрацювання контролювалися основні функціональні параметри клапанів (напруга відкриття $U_{\text{відкр}}$, час відкриття $t_{\text{відкр}}$, напруга закриття $U_{\text{закр}}$, час закриття $t_{\text{закр}}$) та визначався хід золотника $x_{\text{зол}}$. Отримані експериментальні дані дозволяють чітко говорити про зміну основних функціональних параметрів клапана при наробітку ресурсу (див. Рис. 3).

Можна визначити рівень питомої кінетичної енергії рухомої системи клапана E_k^{PC} , який переходить в потенційну енергію деформації матеріалу штока та призводить до його руйнування. Умову працездатності проектованого виробу можна зобразити у вигляді: $E_t \leq [E_t]$ або $[E_t] - E_t = Z > 0$, де $[E_t]$ – допустимий рівень питомої кінетичної енергії РС клапана,

який відповідає заданому напрацюванню t^{T3} ; E_t – питома кінетична енергія РС проєктованого виробу $E_t = \frac{mv^2}{2} / S$, де m – маса рухомої системи ЭМП; $v = \frac{h}{\tau_{PC}}$ – середня швидкість переміщення; S – мінімальна площа поперечного перерізу стрижневого елемента.



Рис. 2 – Руйнування елементів клапана

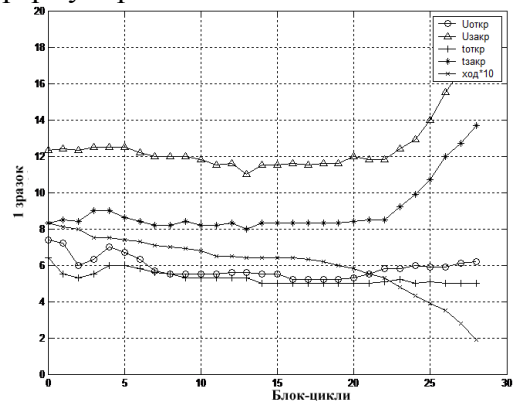


Рис. 3 – Залежності зміни функціональних параметрів дослідного зразка клапана від кількості блок-циклів спрацьовування

Співставлення величин питомої кінетичної енергії переміщення рухомої системи ЕМК E_k^{PC} з їх наробітком до відмови T_0 виявило, що останній змінюється в залежності від E_k^{PC} . Запас працездатності ЕМК за питомою кінетичною енергією рухомої системи приводу клапана буде визначатись як $n = \frac{[E_t]}{E_t}$.

Визначення напруження в ущільненні клапана методом кінцевих елементів

В першому наближенні рухому систему клапана можна представити як одновісну систему з одним рухомих тілом, рух якої буде описуватися рівнянням:

$$C(x + x_n) + R_{ем} + F_{тр} + F_d = M \frac{d^2x}{dt^2},$$

де M — маса рухомої системи (РС) клапана, $\frac{d^2x}{dt^2}$ — прискорення РС клапана, C — коефіцієнт жорсткості основної зворотної пружини, $R_{ем}$ — сила тяги електромагніта, $F_{тр}$ — сила тертя в розділовій трубці.

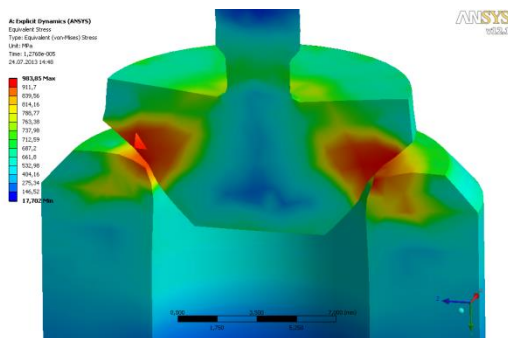


Рис. 4 – Напруження в ущільнюючих елементах ЕМК

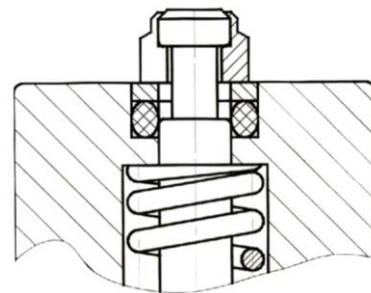


Рис. 5 – Схема установки демпфуючого елемента

Візуалізація деформаційної картини поверхонь ущільнення з матеріалу 08X18H10T була проведено у програмному пакеті Ansys. Напруження в матеріалі ущільнюючих елементів клапана показано на Рис. 4. В місцях контактної взаємодії сідала з ущільнювачем виникає кільцевий виробіток в межах зони найбільших напружень. Таким чином, критичними

елементами є ущільнюючі поверхні золотника та сідла в моментзакриття, що підтверджується проведеними ресурсними експериментальними дослідженнями.

Зменшення динамічних навантажень демпфуванням

Ефективним методом є розсіювання кінетичної енергії рухомої системи клапана використанням в конструкції клапана демпферного елемента. Цю деформацію можна зменшити, якщо ввести пружний елемент, згідно [4]. У ролі такого демпфера виступало кільце з гуми товщиною 1 мм (Рис. 5).

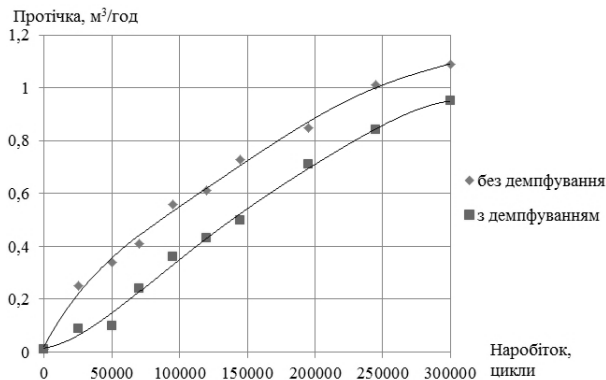


Рис. 6 – Залежність росту протічки від наявності демпфуючого елемента в ЕМК

Демпфірування дозволяє зменшити швидкість зносу золотника та сідла. Про це свідчить швидкість зміни протічки в ущільненні клапана з ростом числа напрацьованих циклів (Рис. 6). Проведені дослідження мікронерівностей поверхні зразків підтверджують зменшення деформації ущільнюючих поверхонь золотника та сідла клапана (Рис. 7).

Висновки

Існує кореляційна залежність між напрацюванням клапана до руйнування його стрижневого елемента та величиною питомої кінетичної енергії рухомої системи ЕМК. Використовуючи експериментальні дані було розроблено метод визначення запасів працездатності клапана за його функціональними параметрами, який впроваджено у ПАТ «Київське центральне конструкторське бюро арматуробудування» в практику проектування малогабаритних ЕМК. Для зменшення інтенсивності циклічних ударних навантажень на елементи клапана рекомендується використовувати демпфуючий пристрій в кінематичному ланцюзі рухомої системи електромагнітного приводу клапана.

Список використаних джерел

1. Кармугин, Б.В. *Современные конструкции малогабаритной пневмоарматуры* / Кармугин Б.В., Кисель В.Л., Лазебник А.Г. / – К.: Техніка, 1980. – 295 с. [Karmugin B.V., Kisel V.L., Lazebnik A.G. / – K.: Tehnika, 1980. – 295 s.] (in Russian).
2. Хильчевский, В.В. *Надежность трубопроводной пневмо- гидроарматуры*. / Хильчевский В.В., Ситников А.Е., Ананьевский В.А. / – М.: Машиностроение, 1989. – 208 с. [Hil'chevskij V.V., Sitnikov A.E., Anan'evskij V.A. / – M.: Mashinostroenie, 1989. – 208 s.] (in Russian).
3. Szabolcs, Molnar. *Damping of dynamic effects with elastomers in instrumented impact testing* / Szabolcs Molnar, Akos Bezeredi, Gyorgy Voros, Bela Pukanszky / International Journal of Fracture, Volume 109, 2001, pages 153-168 (in English).
4. Гордиенко, Н.А. *Некоторые проблемы локальной долговечности при длительном циклическом разрушении* / Гордиенко Н.А., Дырда В.И., Шолин М.К. / Геотехническая механика. — 2003. — Вып. 46. — С. 36-41. [Gordienko N.A., Dyrda V.I., Sholin M.K. Nekotorye problemy lokal'noj dolgovechnosti pri dlitel'nom ciklicheskom razrushenii // Geotekhnicheskaja mehanika. — 2003. — Vyp. 46. — S. 36-41.] (in Russian)

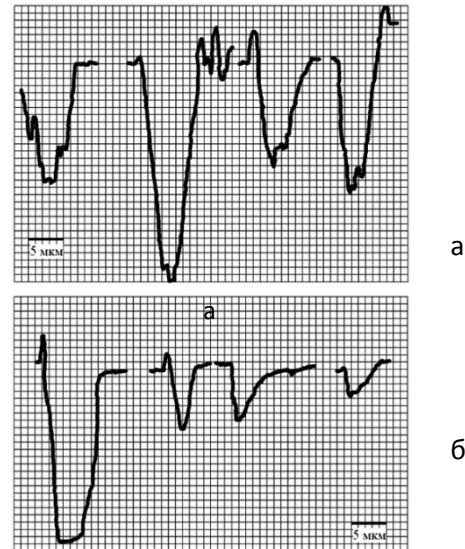


Рис. 7 – Профілограма поверхні контакту після напрацювання 300 тис. циклів: