

Г.Й. ЗАЙОНЧКОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., НАУ, Київ;
Я.Б. ФЕДОРІЧКО, інж., ПАТ «КЦКБА», Київ

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ЗМІН ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МАЛОГАБАРИТНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КЛАПАНІВ

Розроблено математичні моделі експлуатаційних змін технічного стану малогабаритних електромагнітних пневматичних клапанів з використанням стохастичної теорії накопичення пошкоджень в елементах і вузлах клапана в процесі відпрацювання ресурсу. На прикладі клапана з електромагнітним поляризованим двопозиційним приводом розглянуто застосування розроблених моделей для визначення ресурсних можливостей клапана на етапі його проектування.

Ключові слова: електромагнітний клапан, стохастична модель, експлуатаційні зміни, технічний стан, руйнування, відмова, ресурс, критичний елемент.

Вступ. Накопичений досвід розробки і експлуатації малогабаритних електромагнітних клапанів (ЕМК) для систем обладнання виробів авіакосмічної техніки [1] показує, що особливостями їх функціонування є:

- циклічність спрацювання;
- імпульсний характер переміщення і контактування рухомої системи клапана з нерухомими елементами конструкції під час спрацювання.

Останнє призводить до того, що в зоні контактування елементи конструкції клапана зазнають впливу динамічних навантажень великої інтенсивності, внаслідок яких в матеріалі деталей виникають значні динамічні напруження. Це сприяє розвитку різних процесів утомленості та зношування в елементах і вузлах клапана, що призводить до їх руйнування після певного напрацювання в експлуатації. У більшості випадків ресурс клапана визначається міцністю його критичних елементів, що зазнають значних експлуатаційних навантажень.

Визначення ресурсних можливостей ЕМК зазвичай проводиться на підставі результатів стендових випробувань. Такий спосіб встановлення і обґрунтування ресурсу клапанів є дуже затратним і тривалим за часом, а у зв'язку зі значним збільшенням необхідних ресурсів клапанів для сучасної авіакосмічної техніки дуже актуальною стає задача зменшення обсягів стендових ресурсних випробувань за рахунок впровадження науково обґрунтованих методик прогнозування ресурсних можливостей клапанів на етапі проектування за результатами аналізу експлуатаційних змін технічного стану клапанів-аналогів і прискорених ресурсних випробувань клапанів, що проектуються. Однією з таких методик є *метод прогнозування ресурсу ЕМК* на підставі математичного моделювання можливих змін його технічного стану під дією експлуатаційних навантажень в процесі вироблення ресурсу та виявлення критичних елементів конструкції клапана, що лімітують його ресурсні можливості.

Аналіз останніх досліджень. Питанням експлуатаційної надійності малогабаритних ЕМК та аналізу змін їх технічного стану під час експлуатації за останній час приділяється достатньо велика увага [2 – 8]. В роботах [1 – 3] дано аналіз досягнутого рівня експлуатаційної надійності малогабаритних ЕМК з електромагнітним приводом (ЕМП) та типових відмов клапанів, що мають місце в процесі виробітку ресурсу. В роботі [4] розглянуто питання прогнозування можливих змін функціональних параметрів ЕМК в експлуатації. Робота [5] присвячена особливостям застосування метода прикінцевих елементів для визначення напруженого стану деталей конструкції ЕМК з двопозиційним електромагнітним приводом під час його закриття та відкриття. Значна увага приділена питанням вибору запасів працездатності пневматичних ЕМК [6 – 8], авторами розроблено інженерні методики визначення запасів працездатності малогабаритних пневматичних клапанів на етапі проектування. В той же час потребують подальшого розвитку наукові основи математичного моделювання процесів зміни технічного стану ЕМК під дією експлуатаційних навантажень під час вироблення ресурсу.

Враховуючи викладене вище, актуальною є розробка універсальної математичної моделі для оцінки можливих змін технічного стану критичних елементів конструкції малогабаритних ЕМК, що лімітують їх ресурс.

Постановка задачі. Для оцінки ресурсних можливостей ЕМК, що проектується, розглядається *задача розробки математичної моделі експлуатаційних змін технічного стану ЕМК з використанням стохастичної теорії накопичення пошкоджень в елементах і вузлах клапана в процесі вироблення ресурсу.* Для їх розробки була використана основана на *центральної граничній теоремі* ймовірна модель підсумовування пошкоджень в елементах авіаційних двигунів, описана в роботі *А.М. Ветрова і О.Г. Кучера* [9].

Математична модель експлуатаційних змін технічного стану ЕМК. В її основу було покладено ймовірнісну модель накопичення пошкоджень в конструктивних елементах і вузлах ЕМК.

Найявний досвід розробки і експлуатації малогабаритних ЕМК, які використовуються в авіакосмічній техніці, дозволяє зробити висновок, що експлуатаційні зміни в елементах і вузлах ЕМК під час вироблення ресурсу пов'язані з накопиченням невідновних пластичних деформацій, розвитком процесів утомленості, зносу, наклепу та іншими необоротними змінами технічного стану елементів і вузлів клапана. На розвиток цих процесів, в свою чергу, впливають зовнішні випадкові фактори – зміни умов роботи та параметрів навантаження деталей ЕМК в процесі експлуатації.

Слід відзначити, що під час дії кожного одиночного випадкового чи регулярного навантаження в матеріалі деталей клапана відбувається елементарний акт накопичення невідновних деформацій (прирошення пошкоджень), величина і характер якого є випадковою функцією механічних характеристик матеріалу, величин напружень, числа циклів спрацьовування та інших фак-

торів. Процес накопичення пошкоджень в ЕМК у цьому випадку можна розглядати як результат підсумовування великого числа рівномірно малих мікрострибків елементарних пошкоджень.

Позначимо через B_i величину пошкоджень в i -му елементарному циклі спрацьовування клапана. Тоді за n циклів спрацьовування величина накопичених пошкоджень (накопичена пошкоджуваність) B_n^Σ виразиться сумою

$$B_n^\Sigma = \sum_{i=1}^n B_i. \quad (1)$$

У виразі (1) величини n , B_i і B_n^Σ випадкові. За деякий період часу, коли n досить велике, у силу центральної граничної теореми і зроблених припущень про ймовірнісний характер навантажень, накопичена пошкоджуваність B_n^Σ збігається до нормального розподілу. Такий процес накопичення пошкоджень в елементах і вузлах ЕМК можна розглядати як випадковий процес з незалежними прирощеннями, побудований за типом *марковської послідовності*.

Відзначимо, що для оцінки накопичення пошкоджень в конструктивних елементах і вузлах ЕМК можна розглядати зміну основних вихідних параметрів клапана, або непрямих параметрів, які достатньо добре відтворюють характер основних фізичних процесів накопичення пошкоджень в елементах конструкції ЕМК. Наприклад, зміну ходу золотника клапана з двопозиційним електромагнітним приводом в процесі експлуатації [4]. У цьому випадку характеристики випадкового процесу накопичення пошкоджень також можуть бути визначені, досліджені і прогнозовані стохастичними методами.

Оцінку накопичення пошкоджень в конструктивних елементах і вузлах ЕМК під час експлуатації можна також проводити аналогічним чином і у випадку, коли за *елементарну пошкоджуваність* прийняти *феноменологічну пошкоджуваність* (відносну довговічність, відносну деформацію тощо) за один елементарний цикл дії навантаження (під час одиничного спрацьовування клапана). Число циклів у цьому випадку є величиною детермінованою, що за відомої середньої тривалості циклу характеризує також і час навантаження.

Накопичення пошкоджень в деталях ЕМК в процесі експлуатації призводить до втомного руйнування *критичної деталі* клапана [2]. В якості критеріїв втомного руйнування деталей технічних виробів в інженерних розрахунках широко використовуються *деформаційні* [2, 9, 10] та *енергетичні* [6, 8] *критерії*. Їх відмінність полягає в тому, що в першому випадку накопичення пошкоджень від утоми обумовлене процесами, пов'язаними з циклічним деформуванням, а в другому – з накопиченням енергії руйнування матеріалу конструктивних елементів клапана.

Використання деформаційних критеріїв втомного руйнування дозволяє більш ґрунтовно підійти до гіпотези підсумовування пошкоджень від утоми. Найбільш сприйнятливою для оцінки ресурсних можливостей ЕМК є *лінійна*

гіпотеза підсумовування пошкоджень, відповідно до якої сума пошкоджень B_i , які в цьому випадку є відносними довговічностями, дорівнює одиниці:

$$\sum_{i=1}^n B_i = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i(\sigma_i, \alpha_\tau)} = 1,$$

де n_i – число циклів напрацювання клапана за напруженням σ_i ; N_i – довговічність для цього ж рівня напруження у випадку стаціонарного навантаження; α_τ – параметр, що характеризує статистичне розсіювання властивостей міцності матеріалу конструктивного елемента (деталі) клапана.

Слід відзначити, що у кожному окремому циклі навантаження випадкова величина пошкоджуваності може приймати різні значення, обумовлені різною інтенсивністю силових впливів та стохастичним розсіюванням властивостей матеріалу конструктивного елемента клапана. Проте під час кожного спрацювання клапана в процесі навантаження є відома частка регулярності. *Чим вища якість матеріалу елемента та конструкції клапану, тим менший має бути розкид характеристик та діючих навантажень в кожному циклі, а з цим і менше розсіювання пошкоджуваностей.* Це дозволяє припустити, що ці випадкові величини елементарних пошкоджуваностей та сумарні пошкоджуваності, що накопичуються в деталях ЕМК, підкоряються одному і тому самому закону розподілу. Тоді можна вважати, що для стохастично незалежних пошкоджуваностей за цикл описаний процес є однорідним випадковим процесом з незалежними прирощеннями.

Імовірнісні характеристики закону розподілу пошкоджуваностей в деталях ЕМК можна визначити за допомогою усереднення ймовірнісних характеристик за n циклів навантаження.

Відзначимо два типи випадкових процесів (послідовностей), що мають місце під час вироблення ресурсу ЕМК і які будуть розглядатися надалі. Це, по-перше, вихідний процес виникнення елементарних пошкоджуваностей в конструктивних елементах (деталях) клапана

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

і породжений ним процес накопичення пошкоджень, тобто процес формування в конструктивних елементах клапана накопиченої пошкоженості

$$B^\Sigma(t_1) = B'(t_1), B^\Sigma(t_2) = B'(t_1) + B'(t_2), \dots, B^\Sigma(t_n) = \sum_{i=1}^n B'(t_i)$$

Перший з цих процесів можна також називати *прирощенням процесу накопичення пошкоджень*, оскільки

$$B^\Sigma(t_i) - B^\Sigma(t_{i-1}) = B'(t_i), \quad i = \overline{1, n}.$$

Таким чином, для процесу накопичення пошкоджень в конструктивних елементах клапана за n циклів навантаження можна записати співвідношення

$$B^\Sigma(t_n) = \sum_{i=1}^n B^\Sigma(t_i) - B^\Sigma(t_{i-1}) = \sum_{i=1}^n B'(t_i), \quad B^\Sigma(t_0) = 0, \quad (2)$$

де $B'(t)$ і $B^\Sigma(t)$ – випадкові процеси елементарних пошкоджуваностей та накопиченої пошкодженості.

У випадку, коли замість процесів розглядають випадкові послідовності, співвідношення (2) приймає вигляд

$$B_n^\Sigma = \sum_{i=1}^n B'_i, \quad (3)$$

де B'_i і B_n^Σ – випадкові величини пошкоджуваності за цикл і накопиченої пошкодженості.

Використовуючи гіпотезу лінійного підсумовування пошкоджень, маємо

$$B^\Sigma(t) = \int_0^t B'(t) dt.$$

З фізичної точки зору процес $B'(t)$ являє собою миттєву швидкість зміни пошкоджуваності конструктивного елемента клапана. Для процесів (2) і послідовностей (3) цей процес є середньою лінійною швидкістю зміни пошкоджуваності в конструктивному елементі клапана за цикл. Надалі штрих у позначенні величини B'_i буде опускатися; для пошкоджуваності за цикл прийнято позначення B_i чи B_j , а для накопиченої пошкодженості – B_n^Σ .

У розглянутій вище моделі (3) накопичена пошкодженість є сумою великого числа незалежних випадкових величин, що характеризують елементарні пошкоджуваності, які у своїй сукупності підпорядковані єдиному закону розподілу $F_n(B)$, що не обов'язково повинен мати нормальний характер. До таких послідовностей відносяться процеси пошкоджуваності з сильним перемішуванням. При цьому накопичена сума, відповідно до центральної граничної теореми, задовільно апроксимується нормальним розподілом. Для оцінки числових характеристик пошкоджуваності за n циклів, якщо відомі значення елементарних пошкоджуваностей за кожен цикл навантаження, можна скористатися відомими формулами для оцінки математичного очікування та вибіркової дисперсії [11]: $m = M[B]$; $S^2 = D[B] = M[(B - m)^2]$.

Приймаючи припущення, що закон розподілу накопичених пошкоджуваностей близький до нормального (це потім знайшло своє підтвердження за результатами обробки експериментальних даних ресурсних випробувань ЕМК), було розроблено імовірнісні моделі підсумовування як незалежних, так і залежних випадкових пошкоджуваностей в конструктивних елементах і вузлах клапана.

Слід зазначити, що в загальному випадку між пошкодженнями в i та j циклах можуть існувати кореляційні зв'язки, які можуть суттєво впливати на характер зміни імовірнісних характеристик накопиченої в конструктивному елементі клапана пошкоджуваності та інших характеристик міцнісної надійності ЕМК. Природу цих зв'язків можна встановити шляхом аналізу впливу

кожної з випадкових складових σ, α_r, n функції пошкоджуваності. При цьому кожен з вихідних параметрів можна умовно зобразити у вигляді суми двох незалежних складових, з яких одна відображає залежність, а друга – незалежність між пошкодженнями елемента клапана в i та j циклах. У першому випадку пошкоджуваності B_i і B_j за цими параметрами є залежними, у другому – незалежними випадковими величинами. Так, наприклад, параметр, що визначає ймовірнісні властивості конструкційного матеріалу елемента (деталі) клапана можна цілком віднести до першої групи, тому що ймовірнісні характеристики міцності конструкційного матеріалу обумовлені його внутрішньою структурою і, частково, особливостями конструкції деталі і не залежать від номера циклу. А параметри експлуатаційного навантаження більш відносяться до другої групи, виходячи з того, що на параметри навантаження впливає цілий ряд незалежних випадкових факторів.

Розглянемо феноменологічну модель накопичення пошкоджуваностей в критичному елементі клапана, у якій випадковий процес побудований за типом *марковської послідовності* із залежними прирощеннями

$$B_n^\Sigma = \sum_{i=1}^n B_i,$$

де B_i – випадкова елементарна пошкоджуваність конструктивного елемента клапана в i -ому циклі.

Величину кореляційного зв'язку між пошкоджуваностями в i -му і j -му циклах, а також інші ймовірнісні характеристики пошкоджуваності конструктивного елемента клапана за цикл, можна оцінити за допомогою відомих статистичних методів [11]. Тільки в цьому випадку у виразах для моментних характеристик слід враховувати фактори чи складові факторів, що встановлюють кореляційні зв'язки між пошкоджуваностями i -го та j -го циклів шляхом введення параметра $k_{B_i B_j} = M[B_i, B_j]$ – кореляційного моменту між B_i і B_j .

Вважаючи, що елементарні пошкоджуваності критичного конструктивного елемента клапана за цикл є залежними випадковими величинами, можна записати для числових характеристик накопиченої пошкоджуваності наступні співвідношення:

$$m_n = \sum_{i=1}^n m_i; \quad S_n^2 = \sum_{i=1}^n S_i^2 + 2 \sum_{i < j} r_{ij} S_i S_j, \quad (4)$$

де $m_i, S_i, (i = \overline{1, n})$ – математичні очікування і середні квадратичні відхилення пошкоджуваностей в i -ому циклі; $r_{ij} = k_{B_i B_j} / S_i S_j$ – коефіцієнт кореляції випадкових величин B_i і B_j .

Розглянемо випадок, коли випадкові величини пошкоджуваностей за цикл B_i у своїй сукупності підпорядковані єдиному закону розподілу ймові-

рностей $F_n(B)$. У загальному випадку вигляд цього закону може бути довільним з кінцевими значеннями математичного очікування m та дисперсії S^2 . Проте для досить великого n , відповідно до центральної граничної теореми, закон розподілу суми слабо залежних випадкових пошкодженостей буде близьким до нормального.

Якщо між усіма пошкоджувачами B_i і B_j , ($i, j = \overline{1, n}$, $i \neq j$) існує зв'язок з постійним коефіцієнтом кореляції $r_{ij} = r$, то вирази (4) набудуть вигляду

$$m_n = \sum_{i=1}^n m_i = nm; \quad S_n^2 = \sum_{i=1}^n S_i^2 + 2 \sum_{i < j} r_{ij} S_i S_j = S_n^2 (1 + (n-1)r).$$

Щільність і функція розподілу накопиченої пошкоджуваності в критичному конструктивному елементі клапана у цьому випадку будуть дорівнювати

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

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

Крім імовірнісних характеристик пошкоджуваності можна визначити і імовірнісні характеристики надійності критичного конструктивного елемента клапана, зокрема, імовірнісні характеристики числа циклів до його руйнування. Так, для заданого граничного ступеня пошкоджуваності критичного конструктивного елемента клапана B_0^Σ імовірність того, що випадкова величина числа циклів N до появи відмови клапана унаслідок втомного руйнування менша n , буде дорівнювати ймовірності перевищення накопиченою пошкоджуваністю B_n^Σ припустимого рівня B_0^Σ :

$$P(N < n) = P(B_n^\Sigma > B_0^\Sigma) = \int_{B_0^\Sigma}^{\infty} f_{B_n^\Sigma} (B_n^\Sigma) dB_n^\Sigma = 1 - \Phi \left(\frac{B_0^\Sigma - nm}{S\sqrt{n(1+(n-1)r)}} \right).$$

Аналогічно визначається й імовірність неруйнування конструктивного елемента клапана:

$$P_{\text{неруйн}} = P(B_n^\Sigma < B_0^\Sigma) = \int_{-\infty}^{B_0^\Sigma} f_{B_n^\Sigma} (B_n^\Sigma) dB_n^\Sigma = 1 - P_{\text{руйн}}.$$

Щільність розподілу чисел циклів до руйнування деталі клапана $f_N(n)$ знаходиться диференціюванням виразу для $dF_N(n)$

$$f_N(n) = \frac{dF_N(n)}{dn} = \frac{1}{\sqrt{2\pi nS^2}} \frac{B_0^\Sigma + nm}{2n} \exp\left(-\frac{(B_0^\Sigma - nm)^2}{2nS^2}\right).$$

Вирази для математичного очікування, дисперсії і коефіцієнта варіації чисел циклів до досягнення критичного стану (руйнування) конструктивного елемента клапана мають вигляд

$$m_{\text{кр}} = \int_0^\infty n f_N(n) dn = \frac{B_0^\Sigma}{m} + \frac{S^2}{2m^2}; \quad S_{\text{кр}}^2 = \frac{B_0^\Sigma S^2}{m^3} + \frac{5}{4} \frac{S^4}{m^4};$$

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

Якщо відомі функції і щільності розподілу чисел циклів до руйнування критичного конструктивного елемента клапана, то можна також визначити інтенсивність відмов ЕМК унаслідок втомного руйнування за формулою

$$\lambda_N(n) = \frac{f_N(n)}{1 - F_N(n)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi nS^2}} \frac{B_0^\Sigma + nm}{2n} \exp\left(-\frac{(B_0^\Sigma - nm)^2}{2nS^2}\right)}{\Phi\left(\frac{B_0^\Sigma - nm}{\sqrt{n}S}\right)}.$$

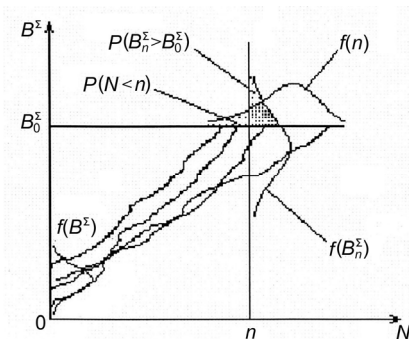


Рис. 1 – Модель підсумовування пошкоджуваностей за $r \approx 0$.

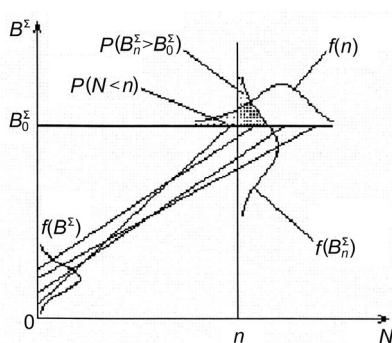


Рис. 2 – Модель підсумовування пошкоджуваностей за $r = 1$.

На рис. 1 і 2 зображено моделі підсумовування пошкоджуваностей для незалежних ($r \ll 1$) і залежних ($r = 1$) випадкових пошкоджуваностей конструктивного елемента клапана за цикл.

Визначення ресурсу клапана на підставі аналізу наявних випадкових процесів пошкоджуваності його критичного елемента. На підставі запропонованих моделей накопичення пошкоджуваностей в елементах ЕМК роз-

роблено методику визначення ресурсних можливостей проектного клапана на прикладі ЕМК з поляризованим двопозиційним електромагнітним приводом (рис. 3).

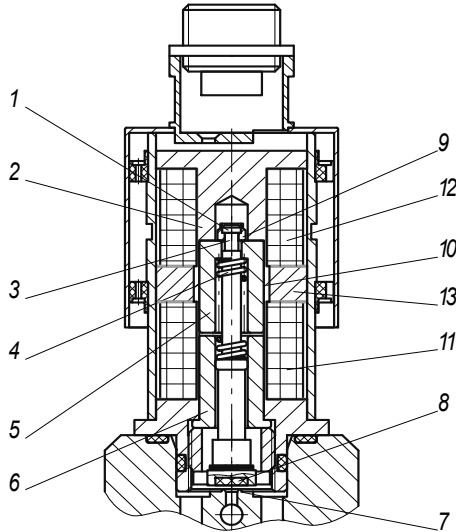


Рис. 3 – Конструктивна схема клапана з поляризованим двопозиційним електромагнітним приводом:

1 – голівка штока; 2 – корпус електромагніта; 3 – шток; 4 – буферна пружина; 5 – повзун (якір); 6 – нижній стоп; 7 – сідло; 8 – золотник; 9 – стопорна шайба; 10 – розподільна трубка; 11 – обмотка закриття; 12 – обмотка відкриття; 13 – постійний магніт.

У відкритому положенні золотник 8 утримується біля верхнього стопа корпусу електромагніта 2 силою магнітного потоку постійного магніту 13.

При подачі керуючого сигналу $U_{\text{закр}}$ на закриття клапана струм в обмотці 11 створює силу притягання в робочому зазорі між повзуном 5 і нижнім стопом 6 і ослаблює магнітний потік постійного магніту 13. Під дією цих сил повзун з рухомою частиною клапана переміститься до нижнього стопа. Але, внаслідок того, що величина ходу золотника менша за величину робочого зазору, золотник сяде на сідло 7, а повзун, продовжуючи переміщення, стисне буферну пружину 4 на величину зусилля герметизації, утворивши деякий зазор зі стопорною шайбою 9. Тепер робочий зазор між повзуном і верхнім стопом збільшився, а між повзуном і нижнім стопом зменшився; магнітний потік постійного магніту перекладається до нижнього стопа, і при знятті сигналу $U_{\text{закр}}$ рухома частина клапана буде утримувати у нижньому (закритому) положенні золотник 8 притиснутим до сідла 7.

При подачі керуючого сигналу $U_{\text{відкр}}$ на відкриття клапана струм в обмотці 12 створює силу притягання в робочому зазорі між повзуном 5 і верх-

нім стопом корпусу електромагніта 2 і ослаблює магнітний потік постійного магніту 13. Під дією цих сил повзун, вдаряючи по стопорній шайбі 9, переміститься до верхнього стопа і «відірве» таким чином золотник від сідла. Через те, що робочий зазор між повзуном і верхнім стопом зменшився, а між повзуном і нижнім стопом збільшився, магнітний потік постійного магніту перекладається до верхнього стопа, і при знятті сигналу $U_{\text{відкр}}$ рухома частина клапана буде утримуватися у верхньому (відкритому) положенні.

Таким чином, при відкритті клапана (переміщенні рухомої його частини від сідла) відбуваються наступні руйнівні процеси:

- ударне циклічне контактування повзуна 5 і шайби 9, що призводить до викришування внаслідок утоми торцевих поверхонь контакту і зміни відносного положення деталей 5 і 9;

- циклічне прикладення розподіленого імпульсного зусилля, нормального до площини контакту шайби і головки штока, що призводить до зміни форми деталей 9 і 3 внаслідок накопичення однобічних пластичних деформацій, зміни взаємного положення деталей та накопичення мікропошкоджень у матеріалі шийки штока 3;

- ударне циклічне контактування повзуна 5 і верхнього стопа 2, що призводить до деградації макрорельєфу поверхонь контакту деталей 5 і 2.

При закритті клапана (переміщенні рухомої його частини до сідла) відбуваються два ударних циклічних контактування:

- золотника 8 і сідла 7, що призводить до деградації макрорельєфу поверхонь ущільнення на золотнику;

- повзуна 5 і нижнього стопа 6, що призводить до деградації торцевих поверхонь контакту деталей 5 і 6.

Крім того, в процесі зворотного-поступального переміщення рухомої частини клапана має місце процес зносу циліндричних поверхонь повзуна 5 і розподільної трубки 10. Внаслідок цього відбувається поступова деградація мікрорельєфу поверхонь тертя і збільшення сил тертя.

Для детального вивчення зазначених процесів, які відбуваються під час циклічного імпульсного спрацьовування клапанів, були проведені спеціальні ресурсні випробування (до повної відмови) клапанів вибраного типу. В процесі випробувань періодично, через кожні 20 тис. циклів спрацьовування, що складала один блок-цикл, контролювалися основні функціональні параметри клапана (напруга $U_{\text{відкр}}$ і час $t_{\text{відкр}}$ відкриття клапана, напруга $U_{\text{закр}}$ і час $t_{\text{закр}}$ його закриття), проводився мікрообмір деталей клапана і визначався хід золотника $x_{\text{зол}}$. Були зроблені фотографії деталей клапанів після відмови, а також проведені дослідження поверхонь контактів та місць руйнування шийки штока.

Виявлені зміни технічного стану клапана призводять до відповідних змін його функціональних параметрів: має місце незначне зменшення напруги $U_{\text{відкр}}$ і часу $t_{\text{відкр}}$ відкриття клапана, незначне збільшення напруги $U_{\text{закр}}$ і часу $t_{\text{закр}}$ його закриття, а також суттєве зменшення ходу золотника $x_{\text{зол}}$.

На рис. 4 наведені залежності зміни ходу золотника $x_{\text{зол}}$ для п'яти клапанів, що проходили ресурсні випробування, від кількості блок-циклів спрацювання $n_{\text{б.ц}}$.

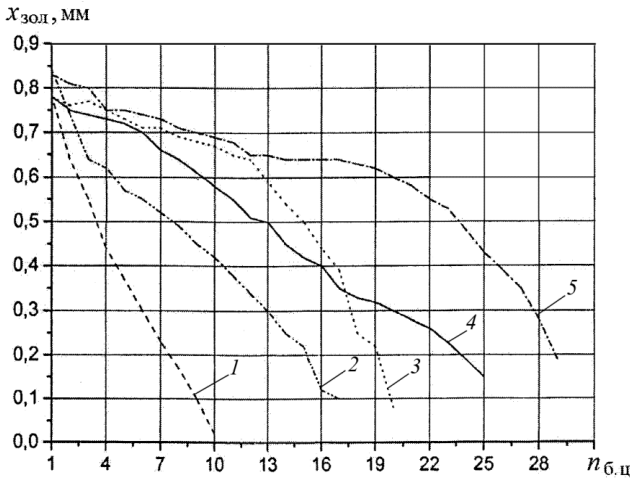


Рис. 4 – Залежність ходу золотника від кількості блок-циклів напрацювання (1 блок-цикл дорівнює 20000 циклів) для п'яти клапанів: 1, 2, 3, 4, 5 – номери клапанів.

Аналіз наведених залежностей показує, що в процесі напрацювання ресурсу суттєво зменшується величина $x_{\text{зол}}$ за рахунок зміни положення повзуна 5 відносно шайби 9 і штока 3 внаслідок виробки кільцевої канавки на торцевій поверхні повзуна (c'') та пластичної деформації деталей 3 і 9 на величину c' (рис. 5): $\Delta x_{\text{зол}} = c' + c''$, а також збільшується довжина камери під буферну пружину 4, що призводить до зменшення встановлювального і робочого зусилля пружини.

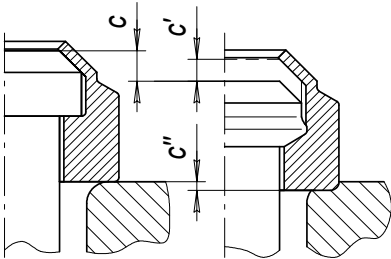


Рис. 5 – Зміна форми головки штока і стопорної шайби в процесі напрацювання ресурсу клапана.

Наявність циклічних імпульсних динамічних напружень у матеріалі штока призводить (при певній кількості спрацювання N) до руйнування шийки штока внаслідок втоми. Результати ресурсних випробувань, а також досвід експлуатації показують, що величина N перебуває у відносно великому діапазоні (від 200 до 600 тис. циклів).

Наведений аналіз результатів ресурсних досліджень і моделювання експлуатаційних напружень в елементах

клапану [5] показує, що критичним параметром функціонування клапану з двопозиційним електромагнітним приводом є хід золотника $x_{зол}$, а елементом, що лімітує ресурсні можливості клапану – шток (після певного числа спрацьовувань має місце руйнування шийки штока).

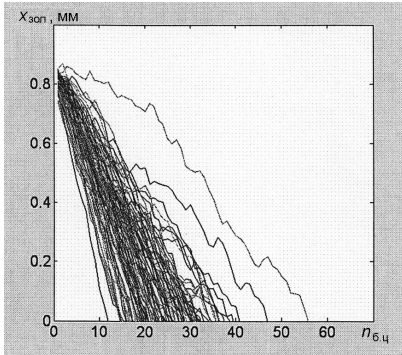


Рис. 6 – Характеристики процесу пошкоджуваності штока клапана (зміна величини ходу золотника клапана з напрацюванням).

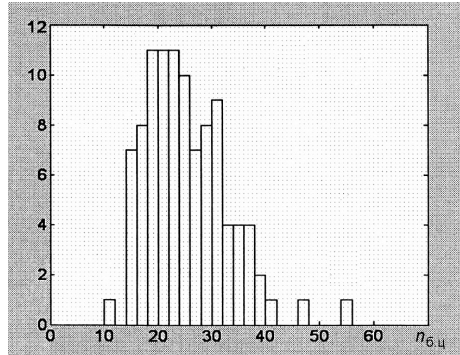


Рис. 7 – Гістограма емпіричного розподілу числа відмов клапана унаслідок руйнування шийки штока від числа блок-циклів напрацювання.

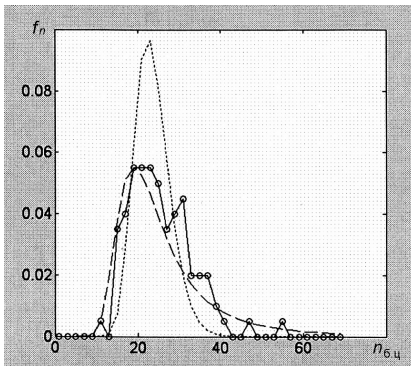


Рис. 8 – Щільність розподілу чисел блок-циклів напрацювання клапана до руйнування шийки штока.

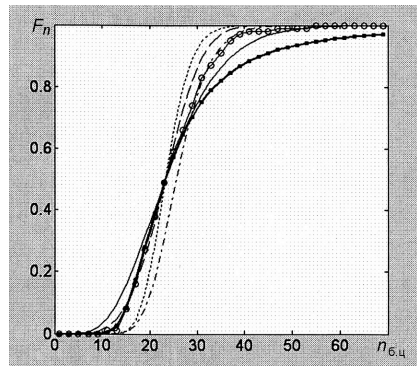


Рис. 9 – Функції розподілу чисел блок-циклів напрацювання клапана до руйнування шийки штока.

Узагальнення досвіду експлуатації ЕМК з поляризованим двопозиційним електромагнітним приводом і результатів проведення спеціальних ресурсних досліджень дозволяють зробити висновок, що в якості узагальненого інтегрованого параметру, зміна якого відображає процеси накопичення пошкоджуваностей в елементах і вузлах клапану, можна використовувати хід золотника $x_{зол}$. Це дозволило провести оцінку ресурсних можливостей клапанів даного типу, використовуючи розроблені математичні моделі зміни технічного стану ЕМК в процесі виробітку ресурсу.

На першому етапі, на основі відомих методів статистичного аналізу, визначалися основні характеристики процесу пошкоджуваності клапана (зміни ходу золотника з напрацюванням клапана): математичне очікування, дисперсія та коефіцієнт кореляції між пошкоджуваностями блок-циклів, визначався також вид закону розподілу пошкоджуваності за 1 блок-цикл, кореляційна функція процесу пошкоджуваності та його граничне значення.

На другому етапі на основі цієї інформації проводилося моделювання процесів виникнення і накопичення пошкоджуваностей (величин B_i і B_n^Σ) до перетину останнім процесом граничних значень сумарної пошкоджуваності B_0^Σ та визначення характеристик надійності клапана – числа циклів (блок-циклів) напрацювання клапана до руйнування, на основі яких будуються гістограми та розраховуються числові та імовірнісні характеристики ресурсу критичної деталі клапана.

На рис. 6 наведено змодельовані характеристики процесу пошкоджуваності штока клапана, що характеризувалися зміною величини ходу золотника клапана $x_{\text{зол}}$ в залежності від блок-циклів напрацювання $n_{\text{б.ц}}$. На рис. 7 – гістограма емпіричного розподілу числа відмов клапана унаслідок руйнування шийки штока від числа блок-циклів напрацювання, на рис. 8 – емпірична щільність розподілу чисел циклів до руйнування шийки штока, а на рис. 9 – функції емпіричного розподілу чисел циклів до руйнування шийки штока.

Отримані залежності дозволяють з необхідною ймовірністю визначити ресурсні можливості клапана на етапі проектування за результатами ресурсних випробувань дослідних зразків або досвіду експлуатації клапанів-аналогів.

На основі результатів проведених досліджень розроблено стандарт підприємства СТУ КЦКБА-252 «Методика прогнозування технічного стану електромагнітних клапанів з приводом ДШВ (двопозиційний штовхаюче-втягуючий) на етапі проектування», який впроваджено в ПАТ «Київське центральне конструкторське бюро арматуробудування».

Перспективи подальших досліджень. Автори вважають перспективними напрямки досліджень, пов'язані зі створенням алгоритмів оцінки технічного стану ЕМК на підставі регулярного оперативного контролю основних функціональних параметрів клапанів в процесі експлуатації.

Висновки. Узагальнюючи результати проведених досліджень можна зробити наступні висновки.

Розроблено математичні моделі експлуатаційних змін технічного стану ЕМК з використанням стохастичної теорії накопичення пошкоджуваностей в елементах і вузлах ЕМК в процесі відпрацювання, в тому числі:

- ймовірнісна модель підсумовування незалежних випадкових пошкоджуваностей в елементах і вузлах клапана;
- ймовірнісна модель підсумовування залежних випадкових пошкоджуваностей в елементах і вузлах клапана.

Отримано математичні залежності для визначення математичного очі-

кування і дисперсії накопиченої пошкоджуваності в елементах і вузлах клапана, а також щільності і функції розподілу накопиченої пошкоджуваності для різних можливих значень коефіцієнта кореляції.

Отримано математичні залежності для визначення математичного очікування, дисперсії і коефіцієнта варіації чисел циклів до досягнення критичного стану (руйнування) конструктивного елемента клапана, які рекомендовано використовувати для оцінки імовірнісних характеристик надійності й довговічності ЕМК.

Розглянуті ймовірнісні моделі підсумовування математичні моделі пошкоджень в елементах клапана складають теоретичну основу розробленої методики прогнозування ресурсу пневматичних клапанів з електромагнітним приводом, яку покладено в основу стандарту підприємства СТУ КЦКБА-252 «Методика прогнозування технічного стану електромагнітних клапанів з приводом ДШВ на етапі проектування», впровадженого в ПАТ «Київське центральне конструкторське бюро арматуробудування».

Список літератури: 1. Хильчевский В.В., Ситников А.Е., Ананьевский В.А. Надежность трубопроводной пневмо- гидроарматуры. – М.: Машиностроение, 1989. – 208 с. 2. Ситников А.Е. Отказы электромагнитных клапанов // Вестник Национального технического университета Украины “Киевский политехнический институт”. Машиностроение. – Вып. № 42. – Т. 2. – К.: НТУУ “КПИ”, 2002. – С. 46 – 49. 3. Ситников А.Е. Анализ и стохастическая оценка изменение технического состояния электромагнитных клапанов при эксплуатации // Вибрации в технике и технологиях, 2003, № 2 (28) – С. 82 – 86. 4. Ситников А.Е., Федоричко Я.Б., Кучер А.Г., Зайончковский Г.И., Сухоруков А.Ю. Прогнозирование изменения функциональных параметров клапанов с электромагнитным приводом при выработке ресурса // Промислова гідравліка і пневматика. – 2004. – №3 (5). – С. 10 – 22. 5. Рыкуніч Ю.М., Ситніков О.С., Федоричко Я.Б., Кучер О.Г., Зайончковський Г.І., Харитон В.В., Чердовських Я.І. Аналіз напруженого стану робочих елементів пневматичних клапанів з електромагнітним приводом // Промислова гідравліка і пневматика. – 2005. – № 4 (10). – С. 55 – 62. 6. Рыкуніч Ю.Н., Ситніков А.Е. Выбор запасов работоспособности проектируемых электромагнитных клапанов с использованием энергетических критериев // Промислова гідравліка і пневматика. – 2006. – № 1 (11). – С. 43 – 46. 7. Рыкуніч Ю.М. Визначення запасів працездатності малогабаритних електромагнітних клапанів / Ю.М. Рыкуніч // Промислова гідравліка і пневматика. – 2012. – №2 (36). – С. 85-91. 8. Рыкуніч Ю.Н., Ситніков А.Е., Александров Л.Г., Барилук Е.И., Зайончковский Г.И. Исследование по энергетическим критериям запасов работоспособности поляризованных двухпозиционных электромагнитных клапанов двигателях // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. – 2013. – №4 (20). – С. 61 – 67. 9. Ветров А.Н., Кучер А.Г. Вероятностные методы оценки остаточного ресурса конструктивных элементов ГТД в эксплуатации. // Проблемы прочности, 1989, №8. – С. 70 – 76. 10. Рыжов Э.В., Колесников Ю.В., Суслов А.Г. Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках. – К: Наукова думка, 1982. – 172 с. 11. Венцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа. 2001. – 575 с.

Надійшла до редколегії 17.01.2014

УДК 621.646.4

Математичне моделювання експлуатаційних змін технічного стану малогабаритних електромагнітних клапанів / Г. І. Зайончковський, Я. Б. Федоричко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – № 6 (1049). – С. 67 – 81. Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2222-0631.

Разработаны математические модели эксплуатационных изменений технического состояния малогабаритных электромагнитных пневматических клапанов с использованием стохастиче-

ской теории накопления повреждений в элементах и узлах клапана в процессе отработки ресурса. На примере клапана с электромагнитным поляризованным двухпозиционным приводом рассмотрено применение разработанных моделей для определения ресурсных возможностей клапана на этапе его проектирования.

Ключевые слова: электромагнитный клапан, стохастическая модель, эксплуатационные изменения, техническое состояние, разрушение, отказ, ресурс, критический элемент.

UDC 621.646.4

Mathematical modeling of operational changes of the technical state of small-size electromagnetic pneumatic valves / G. I. Zaionchkovskiy, Ya. B. Fedorychko // Bulletin of National Technical University «KhPI.» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. – № 6 (1049). – pp. 67 – 81. Bibliog.: 11 titles. – ISSN 2222-0631.

Mathematical models of small-size electromagnetic pneumatic valve technical state operational changes were developed using the stochastic theory of damage accumulation in the elements and units of a valve in the process of the resource exploitation. A valve with electromagnetic polarized two-position drive was used to demonstrate application of the developed models for definition of the resource possibilities of a valve at the designing phase.

Key words: electromagnetic valve, stochastic model, operational changes operational changing, technical state, destruction, rejection, resource, critical element.

УДК 681.526

Ю.С. КОЗЬМИН, канд. техн. наук, науч. сотр., ИСМА НАНУ, Харьков

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Рассматриваются вопросы управления процессами выращивания скнтилляционных кристаллов. Кристаллизатор, как объект управления, представляется системой с распределенными параметрами. В качестве физической модели рассмотрен стержень с одномерным распределением физических свойств и температурных полей. Получена система уравнений в пространстве состояний. Построен алгоритм управления температурным полем объекта при перемещении кристаллизатора внутри установки. Приведены способы стабилизации температуры в заданной точке пространства при перемещении объекта. Полученные методики служат тестовыми для изучения процессов управления объектами на основе более сложных физических моделей.

Ключевые слова: система с распределенными параметрами, управление, стабилизация, температурное поле.

Введение. Скнтилляционные кристаллы получили большое распространение при использовании в качестве детекторов ионизирующего излучения. Для совершенствования и интенсификации технологического процесса выращивания скнтилляционных кристаллов необходимо понимание процессов, происходящих в рабочем объеме. В то же время, физические поля, возникающие в ампуле, можно оценить только косвенно. В этом случае только математическое моделирование позволяет технологам целенаправленно