



Рикуніч Ю. М.,  
Зайончковський Г. Й.

## ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ КЛАПАНІВ З ДВОПОЗИЦІЙНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПРИВОДОМ

*В статті представлено аналіз результатів ресурсних випробувань клапанів з двопозиційним електромагнітним приводом, що широко застосовуються у виробках авіаційної та космічної техніки. Виявлено критичний елемент рухомої частини клапана — шток, що лімітує ресурс виробу. Розроблено методичку прогнозування ресурсу клапанів, яка базується на використанні ймовірнісної моделі накопичення пошкоджувальностей в елементах клапана.*

**Ключові слова:** клапан, двопозиційний електромагнітний привод, пошкоджуваність, конструкційний матеріал, шток, прогнозування ресурсу.

### 1. Вступ

Розвиток сучасної авіаційної і космічної техніки (АКТ) вимагає суттєвого скорочення термінів розробки і впровадження нових виробів АКТ, що відповідають підвищеним вимогам до їх надійності і безвідмовності. Повною мірою ці вимоги відносяться до розробки електромагнітних клапанів (ЕМК) систем обладнання АКТ. Проте традиційні шляхи розробки ЕМК залишаються недостатньо ефективними й вже не відповідають вимогам часу. Потрібно впровадження нових, більш ефективних підходів до їх розробки. Один з таких підходів складається у використанні науково обґрунтованих методів визначення ресурсу клапанів на підставі прогнозування можливих експлуатаційних змін технічного стану ЕМК на етапі проектування. Це дозволяє ще на стадії ескізного проектування:

- виявляти ті експлуатаційні впливи на працездатність і надійність клапанів, для визначення яких при традиційному підході потрібно проведення довготривалих і витратних ресурсних випробувань;
- виявити експлуатаційні фактори та їхні рівні, що найсуттєвіше впливають на зародження й розвиток деградаційних змін в конструктивних елементах і вузлах клапана;
- визначити елементи конструкції клапана, що лімітують його ресурс;
- своєчасно розробити конкретні заходи щодо вдосконалення конструкції клапана й забезпечення необхідного рівня його надійності й безвідмовності під час експлуатації.

Таким чином можна зробити висновок, що використання науково обґрунтованих методів визначення ресурсу ЕМК систем обладнання АКТ під час проектування дає можливість реалізовувати значну частину заходів щодо вдосконалення конструкції клапана і забезпечення вимог до його надійності і безвідмовності ще на стадії розробки проектної документації. Це дозволяє істотно скоротити час і підвищувати ефективність дослідно-конструкторських робіт по розробці сучасних ЕМК систем обладнання АКТ. Цим обґрунтовується актуальність проведення даних досліджень.

### 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Серед ЕМК, що широко використовуються в системах обладнання АКТ, заслуговують на увагу клапани з двопозиційним електромагнітним приводом завдяки низькому рівні енергії, яка необхідна для їх тривалої експлуатації [1]. Однією з особливостей роботи таких клапанів є циклічність спрацьовування при ударному характері контактування рухомої і нерухомої систем [2].

В процесі функціонування клапана частина його елементів багаторазово піддається дії інтенсивних ударних навантажень. Це призводить до того, що в зоні контактування деталі клапана зазнають динамічних навантажень великої інтенсивності, внаслідок яких в матеріалі деталей виникають значні динамічні напруження. Такий характер навантаження сприяє розвитку різних процесів утомленості в елементах конструкції клапана і значно зменшує його ресурс. Характерними відмовами таких електромагнітних клапанів (ЕМК) в експлуатації є руйнування від утомленості стрижневих елементів — штоків, що реалізують кінематичний зв'язок електромагнітного приводу із виконавчим механізмом клапана [3].

Питанням визначення і прогнозування ресурсу пневматичних клапанів з двопозиційним 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. Проте розширення застосування клапанів з електромагнітним приводом у виробках авіаційної техніки, що мають значні ресурси, а також у виробках космічної техніки багаторазового використання вказує на актуальність цієї проблеми.

Накопичений досвід розробки і експлуатації ЕМК систем обладнання АКТ, що експлуатаційні зміни в елементах і вузлах ЕМК під час виробітку ресурсу пов'язані з накопиченням невідновних пластичних деформацій, розвитком процесів утомленості, зносу, наклепу та іншими необоротними змінами технічного стану елементів і вузлів ЕМК [2–7]. На розвиток цих процесів, в свою чергу, впливають зовнішні випадкові фактори — зміни умов роботи та параметрів навантаження деталей клапанів в процесі експлуатації. Враховуючи ймовірнісний

характер зміни технічного стану ЕМК під час експлуатації можна зробити висновок щодо доцільності використання ймовірнісного підходу для прогнозування ресурсу ЕМК при їх проектуванні [8, 9].

Метою проведених досліджень біла розробка наукових основ визначення ресурсу ЕМК з двопозиційним електромагнітним приводом на основі прогнозування зміни технічного стану клапанів під впливом експлуатаційних навантажень.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні основні задачі:

1. Провести аналіз фізичних процесів і відповідних змін технічного стану та основних функціональних параметрів клапанів з двопозиційним електромагнітним приводом, які відбуваються під впливом експлуатаційних навантажень внаслідок ударної контактної взаємодії рухомої частини клапана з нерухомими елементами його конструкції.

2. Визначити можливості використання ймовірнісних моделей підсумовування пошкоджень в елементах і вузлах ЕМК для прогнозування зміни технічного стану і функціональних параметрів клапана в процесі виробітку ресурсу.

3. Розробити методіку оцінювання ймовірнісних характеристик вироблення клапаном встановленого ресурсу (ймовірності відмови  $P_{\text{відм}}$  клапана та її інтенсивності  $\lambda_{\text{відм}}$  в залежності від кількості циклів спрацювання  $n$  тощо).

Під час проведення досліджень для побудови ймовірнісних моделей визначення накопиченої пошкодженості в елементах ЕМК використовувалися засновані на центральній граничній теоремі ймовірнісні моделі підсумовування пошкоджень в технічних виробках під час виробітку ресурсу, основні положення яких розроблені в роботах Л. П. Лозицького, А. М. Ветрова, О. Г. Кучера [10–12] і розвинуті стосовно оцінки ресурсних можливостей ЕМК в публікаціях [13, 14].

Для практичної реалізації наукових результатів ставилася задача розробки інженерної методіки прогнозування ресурсу ЕМК на етапі проектування. Її впровадження дозволить значно скоротити обсяг необхідних ресурсних випробувань клапанів для отримання ймовірнісних характеристик виробітку ними встановленого ресурсу.

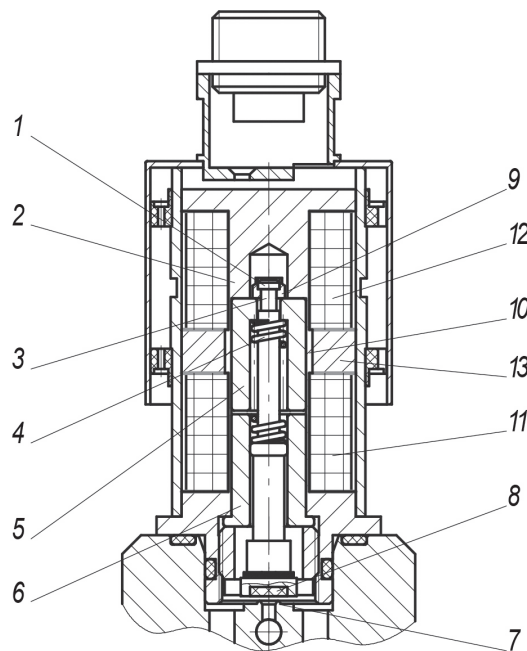
### 3. Результати досліджень

Об'єктом досліджень був вибраний пневмоклапан з двопозиційним поляризованим електромагнітним приводом, розроблений ПАТ «Київське центральне конструкторське бюро арматуробудування» (КЦКБА). Конструктивна схема клапана наведена на рис. 1.

Клапан працює таким чином. 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.



**Рис. 1.** Конструктивна схема клапана з двопозиційним поляризованим електромагнітним приводом: 1 — головка штока; 2 — корпус електромагніта; 3 — шийка штока; 4 — буферна пружина; 5 — повзун (акір); 6 — нижній стоп; 7 — сідло; 8 — золотник; 9 — стопорна шайба; 10 — трубка розподільна; 11 — обмотка закриття; 12 — обмотка відкриття; 13 — постійний магніт

При подачі керуючого сигналу  $U_{\text{відкр}}$  на відкриття клапана струм в обмотці 12 створює силу притягання в робочому зазорі між повзуном 5 і верхнім 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 клапан потребує електричну енергію тільки в момент його відкриття або закриття, є дуже економічним, що зумовило його широке використання у виробках космічної техніки.

Для отримання вихідних даних для прогнозування ресурсу ЕМК даного типу у КЦКБА були проведені спеціальні ресурсні випробування до повної відмови дослідних зразків.

В процесі випробувань періодично, через кожні 20 тис. циклів спрацювання, 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  $x_{зол}$ . Були зроблені фотографії деталей клапанів після відмови, а також проведені дослідження поверхонь контактів та місць руйнування шийки штока 3.

За результатами отриманих експериментальних даних були побудовані залежності зміни функціональних параметрів клапана і ходу його золотника від кількості блок-циклів спрацювання ( $n_{б.ц} = 20000n$ ).

Результати ресурсних випробувань показали, що повна відмова клапана має місце унаслідок утомного руйнування шийки штока (рис. 2) або його не відкриття при зменшенні ходу золотника  $x_{зол}$  з номінального 0,9 мм до критичного 0,1 мм. В процесі виробітку ресурсу з напрацюванням має місце незначне зменшення напруги  $U_{відкр}$  і часу  $t_{відкр}$  відкриття клапана, незначне збільшення напруги  $U_{закр}$  і часу  $t_{закр}$  закриття та суттєве зменшення ходу золотника  $x_{зол}$  (рис. 3) за рахунок виробітку кільцевої канавки на торцевій поверхні повзуна (рис. 4), виробітку кільцевої канавки на поверхні гумового ущільнення золотника (рис. 5) та пластичної деформації деталей рухомої системи клапана (перш за все подовження шийки штока).

Для оцінки ресурсних можливостей ЕМК, що проєктуються, на підставі результатів випробувань дослідних зразків клапана розроблено математичні моделі експлуатаційних змін технічного стану ЕМК з використанням стохастичної теорії накопичення пошкоджуваностей в елементах і вузлах клапана в процесі відпрацювання ресурсу. Для їх розробки була використана основана на центральній граничній теоремі ймовірнісна модель підсумовування пошкоджень, описана в роботах [11, 12].

З фізичної точки зору процес пошкоджуваності в матеріалі деталей клапана пов'язаний з накопиченням невідновних однібічних пластичних деформацій, розвитком процесів утомленості, зносу, наклепу та іншими необоротними змінами структури матеріалу. На розвиток цих процесів пошкоджуваності, в свою чергу, впливають зовнішні випадкові фактори — коливання умов роботи та змінність параметрів навантаження деталей в процесі експлуатації. При кожному впливі навантаження (випадковому чи регулярному) відбувається елементарний акт накопичення в матеріалі невідновних деформацій (прирощення пошкоджуваності), величина і характер якого є випадковою функцією механічних характеристик матеріалу, величин напружень, числа циклів та інших факторів. Процес накопичення пошкоджень у цьому випадку розглядається як результат статистичного підсумовування великого числа рівномірно малих мікрострибків елементарних незалежних пошкоджуваностей. Тоді за  $n$  циклів величина накопиченої пошкоджуваності  $B_n^\Sigma$  визначиться сумою  $B_n^\Sigma = \sum_{i=1}^n B_i$ , де  $B_i$  — величина пошкоджуваності

в  $i$ -му елементарному циклі. За деякий період часу, коли  $n$  досить велике, за центральною граничною теоремою і зробленими припущеннями про характер навантажень, накопичена пошкоджуваність  $B_n^\Sigma$  збігається до нормального розподілу. Такий процес накопичення пошкоджуваностей можна розглядати як випадковий процес з незалежними прирощеннями, побудований за типом марковської послідовності.

В якості процесу накопичення пошкоджуваностей можна розглядати і непрямі параметри, що достатньо добре відтворюють характер зміни основних фізичних процесів пошкоджуваності матеріалу деталей, такі як,



Рис. 2. Руйнування шийки штока від утоми (матеріал — сталь 08Х18Н10)

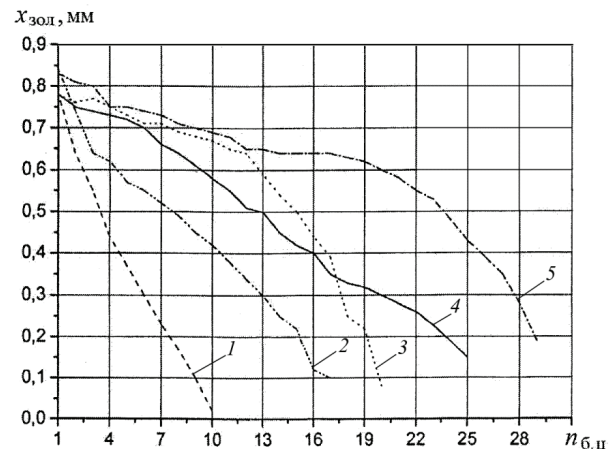


Рис. 3. Залежності зміни ходу золотника п'яти зразків ЕМК з двопозиційним поляризованим електромагнітним приводом від кількості блок-циклів напрацювання (1 блок-цикл = 20000 циклів): 1, 2, 3, 4, 5 — номери дослідних зразків клапана

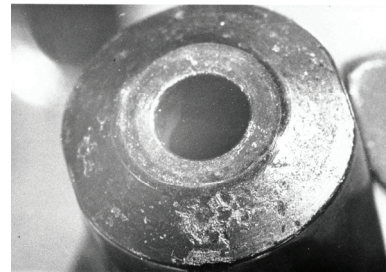


Рис. 4. Пошкодження верхньої торцевої поверхні повзуна під впливом циклічних ударних навантажень під час відкриття клапана (вдавлювання поверхні по місцю контакту зі стопорною шайбою і викришування поверхні по місцю контакту з верхнім стопом)

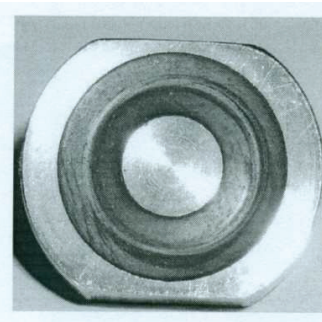


Рис. 5. Канавка на гумовій поверхні гумового ущільнення, що утворилася під впливом експлуатаційних навантажень під час закриття клапана

наприклад, хід золотника  $x_{30л}$  ЕМК з двопозиційним електромагнітним приводом. У цьому випадку характеристики випадкового процесу накопичення пошкоджувальностей можуть бути визначені, досліджені і прогнозовані статистичними методами.

Досліджуються два випадкових процеси (послідовності): вихідний породжуючий процес пошкоджуваності клапана  $B'(t_1), B'(t_2), \dots, B'(t_n)$  і породжений ним процес накопиченої пошкоджуваності  $B(t_1) = B'(t_1), B(t_2) = B'(t_1) + B'(t_2), \dots, B(t_n) = \sum_{i=1}^n B'(t_i)$ . Перший процес

при деяких припущеннях розглядається як однорідний випадковий стаціонарний процес, а другий — як випадковий нестационарний процес.

Оцінку накопиченої пошкоджуваності деталей клапану в умовах випробувань чи реальної експлуатації рекомендовано також проводити за аналогічною схемою і у випадку, коли за елементарну пошкоджуваність прийняти феноменологічну пошкоджуваність (відносну довговічність, відносну деформацію тощо) за один елементарний цикл навантаження деталі. Застосування деформаційних критеріїв втомленого руйнування дозволяє використовувати гіпотезу підсумовування пошкоджуваностей від утомленості, в тому числі лінійну гіпотезу підсумовування пошкоджуваностей.

Приймаючи припущення, що закон розподілу накопичених пошкоджуваностей близький до нормального, що потім найшло своє підтвердження за результатами обробки експериментальних даних, було розроблено імовірнісні моделі підсумовування як незалежних, так і залежних випадкових пошкоджуваностей в елементах і вузлах клапана. З використанням цих моделей отримано математичні залежності для визначення математичного очікування  $m_n$  і дисперсії  $S_n^2$  накопиченої пошкоджуваності в елементах і вузлах клапана, а також щільності  $f_{B_n^\Sigma}(B_n^\Sigma)$  і функції розподілу  $F_{B_n^\Sigma}(B_n^\Sigma)$  накопиченої пошкоджуваності для різних можливих значень коефіцієнта кореляції  $r$ :

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

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

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

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

Крім імовірнісних характеристик пошкоджуваності можна визначити і імовірнісні характеристики надійності деталі (конструктивного елемента) клапана, зокрема, імовірнісні характеристики числа циклів до граничного стану (руйнування) деталі. Для необоротних процесів умову руйнування можна записати у вигляді  $B_n^\Sigma > B_0^\Sigma$ , де  $B_0^\Sigma$  — граничний (критичний) рівень пошкоджуваності деталі. Тоді, за заданому граничному ступені пошкоджуваності  $B_0^\Sigma$ , імовірність числа циклів до руйнування деталі клапана буде дорівнювати ймовірності

перевищення накопиченою пошкоджуваністю  $B_n^\Sigma$  гранично припустимого рівня  $B_0^\Sigma$ :

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

Аналогічно визначається й імовірність неруйнування деталі клапана:

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

Щільність розподілу чисел циклів до руйнування деталі клапана знаходиться диференціюванням виразу (5)

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

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

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

$$v_{кр} = \frac{S_{кр}}{m_{кр}} = \frac{S}{\sqrt{m}} \sqrt{\frac{B_0^\Sigma + \frac{5}{4} \frac{S^2}{m}}{B_0^\Sigma + \frac{S^2}{2m}}}. \quad (8)$$

Якщо відомі функції і щільності розподілу чисел циклів до руйнування критичної деталі клапана (5), (7), то можна також визначити інтенсивність відмов ЕМК унаслідок втомного руйнування за формулою

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

На рис. 6 і 7 зображено моделі підсумовування пошкоджуваностей для залежних випадкових пошкоджуваностей за цикл. На рис. 6 приведено траєкторії зміни накопиченої пошкоджуваності у разі незначної кореляційної залежності між пошкоджуваностями  $r \ll 1$ , а на рис. 7 — у разі повного кореляційного зв'язку ( $r = 1$ ).

На підставі запропонованих моделей накопичення пошкоджуваностей в елементах ЕМК розроблено методику визначення ресурсних можливостей проектного клапана на прикладі ЕМК з двопозиційним електромагнітним приводом типу ДШВ (рис. 1). Приведений аналіз результатів ресурсних досліджень і моделювання експлуатаційних напружень в елементах клапану показує, що критичним параметром функціонування клапану з двопозиційним електромагнітним приводом

є хід золотника  $x_{зол}$ , а елементом, що лімітує ресурсні можливості клапана – шийка штока. За результатами проведених ресурсних випробувань було визначено основні характеристики процесу «пошкоджуваності» клапана (зміни ходу золотника з напрацюванням клапана): математичне очікування, дисперсія та коефіцієнт кореляції між «пошкоджуваностями» блок-циклів, а також вид закону розподілу «пошкоджуваності» за 1 блок-цикл (1 блок-цикл дорівнював 20 000 спрацювань клапана), кореляційна функція процесу пошкоджуваності та його граничне значення. На основі цієї інформації проводилося моделювання процесів виникнення і накопичення пошкоджуваностей (величин  $B_i$  і  $B_n^z$ ) до перетину останнім процесом граничних значень сумарної пошкоджуваності  $B_0^z$  та визначення характеристик надійності клапана – числа циклів (блок-циклів  $n_{б.ц}$ ) напрацювання клапана до руйнування, на основі яких були побудовані гістограми та розраховані числові та ймовірнісні характеристики ресурсу критичної деталі клапана (рис. 8 – рис. 10). Отримані залежності дозволяють з необхідною ймовірністю визначити ресурсні можливості клапана на етапі проектування за результатами ресурсних випробувань дослідних зразків або досвіду експлуатації клапанів-аналогів.

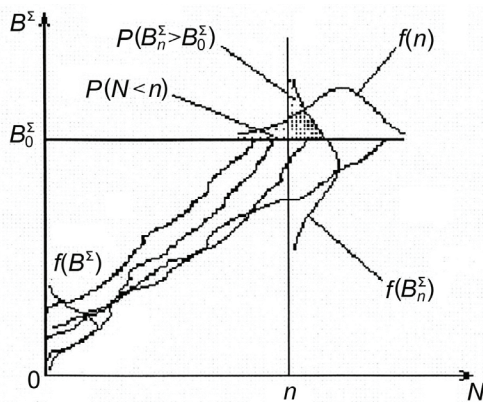


Рис. 6. Модель підсумовування пошкоджуваностей за  $r \approx 0$

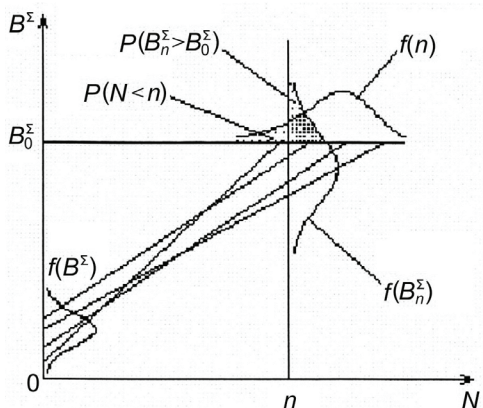


Рис. 7. Модель підсумовування пошкоджуваностей за  $r = 1$

Таким чином розроблені ймовірнісні моделі підсумовування пошкоджень в елементах клапана складають теоретичну основу запропонованої методики прогнозування ресурсу малогабаритних ЕМК. Її використання на етапі проектування дозволяє значно скоротити обсяги необхідних ресурсних випробувань клапанів для от-

римання ймовірнісних характеристик виробітку клапаном встановленого ресурсу (ймовірності відмови  $P_{відм}$  клапана, її інтенсивності  $\lambda_{відм}$  тощо в залежності від кількості циклів спрацювання  $n$ ).

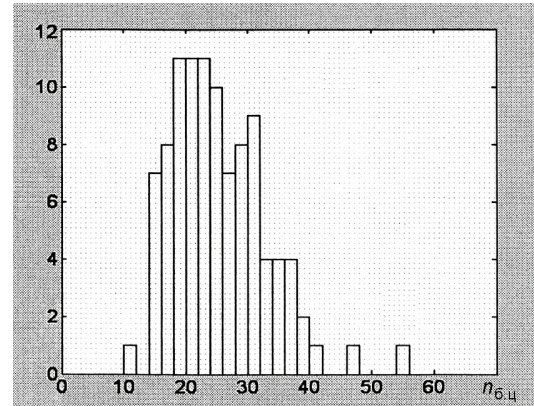


Рис. 8. Гістограма емпіричного розподілу числа відмов клапана унаслідок руйнування шийки штока від числа блок-циклів напрацювання

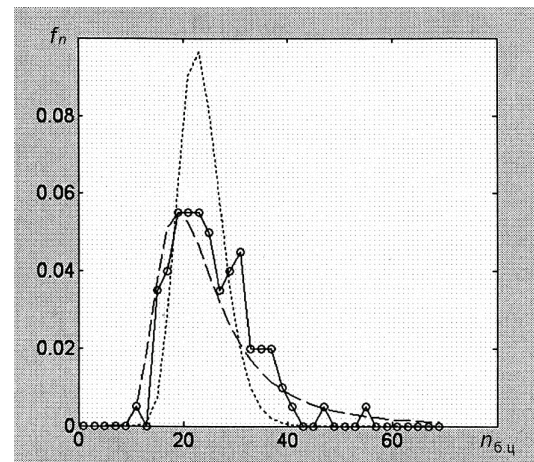


Рис. 9. Щільність розподілу чисел блок-циклів напрацювання клапана до руйнування шийки штока

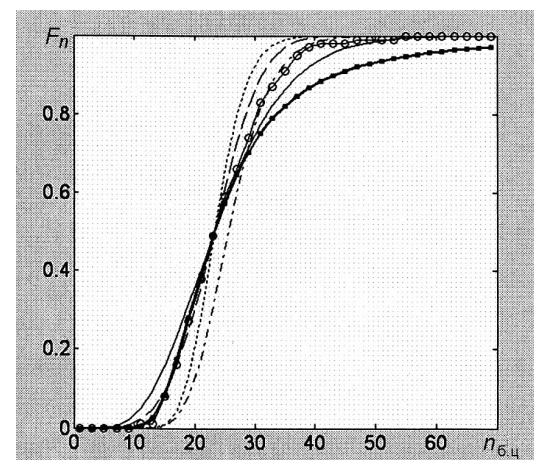


Рис. 10. Функції розподілу чисел блок-циклів напрацювання клапана до руйнування шийки штока

#### 4. Висновки

1. Експериментально підтверджено, що критичним елементом, що лімітує ресурс клапанів з двопозиційним

электромагнитным приводом є стрижневий елемент (шток) рухомої системи клапана.

2. Виявлено основні деградаційні процеси, що виникають в деталях і вузлах клапанів з двопозиційним електромагнітним приводом від час виробітку ресурсу під впливом експлуатаційних навантажень.

3. Розроблена методика прогнозування ресурсу пневматичних клапанів з електромагнітним приводом, яка ґрунтується на використанні імовірнісних моделей підсумовування пошкоджень в елементах клапана.

4. Застосування на етапі проектування розробленої методики дозволить значно скоротити обсяг необхідних ресурсних випробувань клапанів для отримання імовірнісних характеристик виробітку клапаном встановленого ресурсу.

5. Запропонований метод прогнозування ресурсу клапанів з електромагнітним приводом може бути поширений на інші виробі авіакосмічної техніки, що мають аналогічний характер експлуатаційних навантажень.

### Література

- Кармугин, Б. В. Современные конструкции малогабаритной пневмоарматуры [Текст] / Б. В. Кармугин, В. Л. Кисель, Б. В. Лабезник. — К.: Техника, 1980. — 296 с.
- Хильчевский, В. В. Надежность трубопроводной арматуры [Текст] / В. В. Хильчевский, А. Е. Ситников, В. А. Ананьевский. — М.: Машиностроение, 1989. — 208 с.
- Ситников, А. Е. Отказы электромагнитных клапанов [Текст] / В. Е. Ситников // Вестник НТУУ (КПИ), Машиностроение, 2002, № 42 (59), Том 2. — К.: НТУУ «КПИ», 2002. — С. 46–49.
- Рыкунич, Ю. Н. Изменение технического состояния контактирующих деталей электромагнитных клапанов при эксплуатации [Текст] / Ю. Н. Рыкунич, А. Е. Ситников, Г. И. Зайончковский, В. Ф. Лабунец // Вибрации в технике и технологиях. — 2003, № 3 (59). — С. 46–52.
- Рыкунич, Ю. Н. Эксплуатационные изменения функциональных свойств электромагнитных клапанов, обусловленные циклическим срабатываем электромагнитного привода [Текст] / Ю. Н. Рыкунич, А. Е. Ситников, Я. Б. Федоричко, Е. И. Барилук, Г. И. Зайончковский // Промислова гідраліка і пневматика. — 2010. — № 4 (30). — С. 53–57.
- Park, J. Evaluation of an energy based approach and a critical plane approach for predicting constant amplitude multiaxial fatigue life [Текст] / J. Park, D. Nelson // Int. J. Fatigue. — 2000. — 22, No. 1. — P. 23–39.
- Bavillet, A. A volumetric energy based high cycle multiaxial fatigue criterion [Текст] / A. Bavillet, T. Palin-Lac, S. Lasserre // Int. J. Fatigue. — 2003. — 25, No. 8. — P. 755–769.
- Сырицин, Т. А. Эксплуатация и надежность гидро- и пневмоприводов [Текст] / Т. А. Сырицин. — М.: Машиностроение, 1990. — 247 с.
- Чегодаев, Д. Е. Гидропневмотопливные агрегаты и их надежность [Текст] / Д. Е. Чегодаев, О. П. Мулюков. — Куйбышев: Кн. изд-во, 1990. — 104 с.
- Ветров, А. Н. Вероятностные методы оценки остаточного ресурса конструктивных элементов ГТД в эксплуатации [Текст] / А. Н. Ветров, А. Г. Кучер // Проблемы прочности, 1989, № 8. — С. 70–76.
- Кучер, А. Г. Модель вероятностного суммирования повреждений при различных законах распределения повреждаемостей за полетный цикл [Текст] / А. Г. Кучер // Надежность и долговечность деталей и узлов авиационной техники: Сб. науч. трудов. — К.: КИИГА, 1986. — С. 41–44.
- Лозицкий, Л. П. Стохастическая модель накопления повреждений в элементах конструкций авиадвигателей [Текст] / Л. П. Лозицкий, А. Н. Ветров, А. Г. Кучер // Надежность и долговечность машин и сооружений: Межведомств. республ. сб. науч. трудов. — К.: Наукова думка, 1982. — Вып. 2. — С. 7–10.
- Ситников, О. Е. Оцінювання і прогнозування ресурсу пневматичних клапанів з електромагнітним приводом [Текст] / О. Е. Ситников, О. Г. Кучер, Г. Й. Зайончковський, Я. Б. Федоричко // Промислова гідраліка і пневматика, 2003, № 2. — С. 7–23.
- Ситников, О. Е. Прогнозування ресурсних можливостей малогабаритних пневматичних клапанів з електромагнітним приводом під час проектування [Текст] / О. Е. Ситников, Г. Й. Зайончковський // Промислова гідраліка і пневматика, 2009, № 3 (25). — С. 65–70.

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА КЛАПАНОВ С ДВУХПОЗИЦИОННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРИВОДОМ

В статье представлен анализ результатов ресурсных испытаний клапанов с двухпозиционным электромагнитным приводом, которые широко применяются в изделиях авиационной и космической техники. Определен критический элемент подвижной системы клапана — шток, который лимитирует ресурс изделия. Разработана методика прогнозирования ресурса клапанов, которая базируется на использовании вероятностной модели накопления повреждений в элементах клапана.

**Ключевые слова:** клапан, двухпозиционный электромагнитный привод, повреждение, конструкционный материал, шток, прогнозирование ресурса.

*Рыкунич Юрий Николаевич, генеральный директор, ПАТ «Київське центральне конструкторське бюро арматуробудування», e-mail: office@kckba.kiev.ua.*

*Зайончковський Геннадій Йосипович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри гідрогазових систем, Національний авіаційний університет, e-mail: evgenia\_zay@mail.ru.*

*Рыкунич Юрий Николаевич, генеральный директор, ПАО «Киевское центральное конструкторское бюро арматуростроения». Зайончковский Геннадий Иосифович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидрогазовых систем, Национальный авиационный университет.*

*Rikunich Yuriy, PJSC «Kiev central design bureau of valves», e-mail: office@kckba.kiev.ua. Zayonchkovskiy Gennadii, National Aviation University, e-mail: evgenia\_zay@mail.ru*