

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

РИКУНІЧ ЮРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 621.646:629.735.03

**ПРОГНОЗУВАННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ МАЛОГАБАРИТНИХ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КЛАПАНІВ В СИСТЕМАХ
АВІАКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ**

Спеціальність: 05.02.02 – машинознавство

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі гідрогазових систем Національного авіаційного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор

Зайончковський Геннадій Йосипович,

Національний авіаційний університет,
завідувач кафедри гідрогазових систем

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Струтинський Василь Борисович,

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри конструювання верстатів та машин

доктор технічних наук, професор

Панченко Анатолій Іванович,

Таврійський державний агротехнологічний університет,
завідувач кафедри мобільних енергетичних засобів

Захист дисертації відбудеться “25” квітня 2017 р. о 15⁰⁰ годин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.11 у Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корпус №1, ауд. 214.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці ім. Г.І Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий “___” _____ 2017 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор



Майборода В.С.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток сучасної авіаційної і космічної техніки (АКТ) вимагає суттєвого скорочення термінів розробки і впровадження нових виробів, що відповідають підвищеним вимогам до їх надійності та безвідмовності. Ці вимоги є особливо важливими при розробці малогабаритних електромагнітних клапанів (ЕМК) систем обладнання АКТ, оскільки традиційні шляхи розробки ЕМК дозволяють прослідкувати за змінами технічного стану і функціональних параметрів лише в процесі тривалих експериментальних досліджень, що потребують додаткових часових та фінансових витрат. Саме тому нові підходи до розробки ЕМК повинні базуватися на науково обґрунтованих методах визначення запасів працездатності клапанів та врахуванні можливих експлуатаційних змін їх технічного стану ще на етапі проектування.

Розгляд даної проблематики був предметом досліджень багатьох авторів таких, як Р. Барлоу, В.В. Болотін, Дж. Сандлер, С.В. Серенсон, В.Б. Струтинський, А.І. Панченко, Є.С. Переверзєв, Д.Є. Чегодаєв та інших вітчизняних і зарубіжних вчених. З робіт, присвячених питанням прогнозування експлуатаційних змін технічного стану ЕМК систем обладнання АКТ, слід відзначити роботи Г.Й. Зайончковського й О.Є. Ситнікова.

Проте в даних роботах вдосконалення конструкцій ЕМК здійснювалось в процесі дослідно-промислової експлуатації ЕМК. Це не дозволяло в повній мірі виявити експлуатаційні фактори, що впливають на зародження й розвиток деградаційних змін в конструктивних елементах і вузлах клапана, визначати елементи конструкції клапана, які лімітують його ресурс, своєчасно впроваджувати заходи щодо вдосконалювання конструкції клапана.

Вдосконалення методичних підходів до визначення запасів працездатності малогабаритних ЕМК під час проектування дає можливість реалізувати значну частину заходів щодо вдосконалення конструкції клапана і забезпечення вимог до його надійності й безвідмовності ще на стадії розробки проектної документації. Як наслідок, істотно скорочується час проектування сучасних малогабаритних ЕМК систем обладнання АКТ і з'являється можливість підвищити ефективність дослідно-конструкторських робіт (ДКР).

Саме тому підвищення ефективності дослідно-конструкторських робіт та вдосконалення конструкції ЕМК, яким присвячена дана робота, являє собою актуальну науково-технічну проблему.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі гідрогазових систем Національного авіаційного університету (НАУ) у відповідності з Державною комплексною програмою розвитку авіаційної промисловості України до 2010 року, затвердженою постановою Кабінету Міністрів України від 12 грудня 2001 р. №1665-25 (держбюджетна НДР НАУ №5/07.02.04 «Дослідження систем і елементів гідроприводу і гідропневмоавтоматики», 2012–2015 рр.) та Концепцією реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року, затвердженою розпорядженням Кабінету Міністрів України №238-р від 30 березня 2011 р. (НДР КЦКБА: «Експериментальне дослідження меж і запасів працездатності клапанів з електромагнітним приводом», номер державної реєстрації 0106U011814, 2006 р.; «Розробка шляхів забезпечення запасів працездатності електромагнітних клапанів під час проектування», номер державної реєстрації 0108U005044, 2011 р.).

Мета та задачі досліджень. Метою роботи є прогнозування працездатності малогабаритних ЕМК в системах АКТ на етапі проектування із врахуванням впливу експлуатаційних навантажень на процеси деградації основних елементів клапанів, які регламентують їх запаси працездатності.

Для досягнення зазначеної мети потрібно розв'язати такі **задачі**:

1. На основі дослідження вимог до експлуатаційної надійності електромагнітних клапанів

систем обладнання АКТ визначити параметричні запаси їх працездатності.

2. Розробити алгоритм і математичні моделі прогнозування працездатності малогабаритних ЕМК і їх конструктивних елементів, що ґрунтуються на стохастичному моделюванні та прогнозуванні розвитку деградаційних процесів в вузлах і елементах ЕМК під дією експлуатаційних навантажень.

3. Дослідити вплив ресурсних навантажень на зміну функціональних параметрів електромагнітних клапанів.

4. Встановити утомну міцність стрижневих елементів ЕМК, працюючих в умовах ударних циклічних навантажень.

5. Визначити елементи конструкції ЕМК та відповідні експлуатаційні впливи, що обмежують ресурс виробів.

6. Розробити і впровадити у виробництво інженерну методику визначення запасів працездатності малогабаритних ЕМК систем обладнання АКТ на етапі проектування та надати рекомендації щодо конструктивного удосконалення окремих виробів ЕМК.

Об'єкт досліджень – процеси зміни технічного стану ЕМК систем обладнання АКТ, які протікають під дією експлуатаційних навантажень на протязі відпрацювання регламентного ресурсу, заданого на етапі проектування.

Предмет досліджень – електромагнітні малогабаритні клапани систем АКТ та основні елементи клапанів, які визначають запаси їх працездатності.

Методи досліджень. В процесі проведення теоретичних досліджень були використані методи теорії надійності, математичної статистики, теорії випадкових функцій, теорії міцності, регресивного аналізу, методи математичного моделювання та прогнозування. При проведенні експериментальних досліджень використовувалися основні положення теорії експериментів і теорії помилок, неруйнівні методи контролю і дефектоскопії, а при обробці експериментальних даних – методи обробки даних і математичної статистики.

Достовірність наукових припущень, положень, висновків і рекомендацій обумовлена коректним використанням фундаментальних законів опору матеріалів, механіки рідини і газу, теорії зношування при задовільному збігу результатів теоретичних і експериментальних досліджень, оброблених з використанням методів теорії ймовірності і математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна полягає в:

- подальшому розвитку наукових основ визначення параметричних запасів працездатності малогабаритних ЕМК і запасів міцності їх конструктивних елементів, що ґрунтуються на стохастичних моделях зміни технічного стану вузлів і конструктивних елементів ЕМК та їх функціональних параметрів під дією експлуатаційних навантажень. В тому числі *вперше розроблено* методи прогнозування підвищення запасів працездатності малогабаритних ЕМК, які полягають у застосуванні математичних залежностей для визначення запасів міцності «критичних» елементів конструкції ЕМК з використанням енергетичних критеріїв; математичних залежностей для визначення параметричних запасів працездатності малогабаритних ЕМК з використанням стохастичних моделей «неперевищення» функціональними параметрами клапана їх нормованих значень під час виробітку встановлених ресурсів;

- визначенні особливостей розвитку деградаційних процесів у вузлах і конструктивних елементах малогабаритних ЕМК, в тому числі особливостей розвитку процесів втоми конструкційного матеріалу в стрижневих елементах ЕМК з двопозиційним штовхаюче-втягуєчим (ДШВ) приводом та процесів деградації гумового ущільнення;

- вперше для різних конструкційних матеріалів отримано експериментальні залежності кількості циклів напрацювання стрижневих елементів приводу ДШВ до відмови від питомої кінетичної енергії переміщення рухомої системи ЕМК, в яких пов'язуються показники безвідмовності з конструктивними параметрами клапана, що проектується.

Практичне значення одержаних результатів. Практичну цінність роботи становлять:

- інженерна методика визначення запасів працездатності малогабаритних ЕМК під час проектування (стандарт підприємства СТУ КЦКБА–273:2012 «Методика розрахунку запасів працездатності електромагнітних клапанів при проектуванні»);

- рекомендації щодо удосконалення конструкції окремих типів ЕМК розробки ПАТ «Київське центральне конструкторське бюро арматуробудування»;

- деклараційний патент України на корисну модель № 4156 від 17.01.2005 р. і патент України на корисну модель №17984 від 03.05.2006 р.

Особистий внесок здобувача. Основні положення теоретичних досліджень, розробка програми спеціальних експериментальних ресурсних випробувань ЕМК та аналіз їх результатів, а також розробка основних положень методики визначення запасів працездатності малогабаритних ЕМК на етапі проектування (стандарту підприємства) виконані безпосередньо здобувачем. Розробка мети і задач досліджень та їх обґрунтування виконано спільно з науковим керівником. Спеціальні ресурсні випробування клапанів проведено штатними працівниками відділу надійності ПАТ «Київське центральне конструкторське бюро арматуробудування» під безпосереднім керівництвом здобувача.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні результати роботи доповідалися та обговорювалися на таких науково-технічних конференціях та семінарах: VIII, IX, X, XI, XII, XIII, XIV, XV і XVI Міжнародних НТК Асоціації спеціалістів промислової гідравліки і пневматики «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Кременчук, 2008 р.; м. Мелітополь, 2007 р., 2010 р., 2014 р.; м. Львів, 2009 р.; м. Донецьк, 2011 р.; м. Чернігів, 2012 р.; м. Одеса, 2013 р., м. Суми, 2015 р.); XII, XIII, XIV, XV, XVI, XVII, XVIII, XIX, XX і XXI Міжнародних науково-практичних конференціях «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (м. Київ, 2006 р., 2008 р., 2010 р., 2013 р., 2015 р., 2016 р.; м. Черкаси, 2012 р.; м. Луганськ, 2007 р.; м. Вінниця, 2011 р., м. Кіровоград, 2014 р.); XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Прогрессивная техника и технология – 2012» (м. Севастополь, 2012 р.); V і VI Всесвітніх конгресах «Авіація у XXI столітті» – «Безпека в авіації та космічні технології» (м. Київ, 2012 р., 2014 р.); засіданнях технічної ради ПАТ «Київське центральне конструкторське бюро арматуробудування» (2007 – 2016 рр.).

Результати роботи впроваджено на ПАТ «Київське центральне конструкторське бюро арматуробудування» та ПАТ «Івано-Франківський арматурний завод».

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи відображено в 23 публікаціях, в тому числі: в 10 статтях у провідних фахових виданнях України (4 з них включені до міжнародних наукометричних баз), в 2 статтях, виданих у закордонних виданнях, в 9 тезах доповідей в збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій та конгресів; отримано 2 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається з переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів основної частини, загальних висновків, списку використаних джерел, що містять 201 найменувань, і додатків.

Загальний обсяг дисертації складає 204 сторінок машинописного тексту, в тому числі 106 ілюстрацій, 17 таблиць за текстом, список використаних джерел на 19 сторінках, 2 додатків на 4 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, визначено мету, сформовано задачі досліджень, визначено об'єкт та предмет досліджень, викладено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, подано відомості про апробацію, публікацію і структуру дисертації.

У першому розділі представлено опис малогабаритних ЕМК та їх елементів, що застосовуються в системах обладнання сучасної АКТ. Проведено аналіз досягнутого рівня їх надійності і безвідмовності. Наведено відомості про основні види відмов малогабаритних ЕМК, які показують, що питома кількість функціональних відмов ЕМК, викликаних у більшості випадків руйнуванням конструктивних елементів клапанів, складає 25%, а питома кількість параметричних відмов – 75%.

Зроблено огляд літературних джерел з визначення запасів працездатності виробів АКТ. Відзначено, що визначення запасів працездатності малогабаритних ЕМК систем обладнання АКТ на етапі проектування повинно ґрунтуватися на достовірному прогнозуванні експлуатаційних змін технічного стану проєктованих виробів під час відпрацювання ресурсу. Методи прогнозування, засновані на фізичних моделях розвитку деградаційних процесів в конструктивних елементах ЕМК (причинні методи), ефективніші за традиційні методи, засновані тільки на статистичному підході – аналізі аналізу наявних відмов і несправностей. Зроблено висновок, що, попри відносно велику кількість публікацій з вказаної проблематики, окремі важливі аспекти проблеми визначення запасів працездатності ЕМК на етапі проектування залишаються нерозкритими і вимагають подальших досліджень.

Надано обґрунтування мети і задач досліджень.

У другому розділі наведено результати теоретичних розробок, спрямованих на подальший розвиток теоретичних основ визначення запасів працездатності малогабаритних ЕМК з урахуванням особливостей їх експлуатаційних навантажень.

Проаналізовано вимоги, що обумовлені «Технічним завданням» (ТЗ) або «Технічними умовами» (ТУ) до проєктованих ЕМК. Їх аналіз показує, що серед вимог до проєктованого ЕМК важливе місце займають вимоги до експлуатаційної надійності виробу та забезпечення його необхідного ресурсу. Так, для забезпечення вимог до експлуатаційної надійності ЕМК необхідно, перш за все, забезпечити із заданою ймовірністю (для малогабаритних ЕМК систем обладнання авіакосмічної техніки – 0,999 ... 0,9999) відсутність руйнування конструктивних елементів клапана під дією експлуатаційних навантажень протягом встановленого ресурсу, так як таке руйнування зазвичай призводить до повної відмови клапана. Крім того, вимогами до їхньої експлуатаційної надійності ЕМК встановлюються також певні обмеження до можливої зміни їх функціональних параметрів, що можуть відбуватися унаслідок різноманітних деградаційних процесів в елементах та вузлах клапана під дією експлуатаційних навантажень (зносу, наклепу, зміни форми конструктивних елементів тощо) в процесі відпрацювання встановлених ресурсів.

Обґрунтовано висновок, що для забезпечення необхідних запасів працездатності ЕМК на етапі проектування необхідно вирішувати дві пов'язані між собою задачі: визначення запасів утомної міцності конструктивних елементів клапана, що проєктується, і визначення параметричних запасів працездатності ЕМК. Вирішення цих задач потребує подальшого розвитку моделювання деградаційних процесів, що мають місце в елементах і вузлах ЕМК в процесі відпрацювання ресу-

ресу. Запропоновано алгоритм визначення запасів працездатності малогабаритних ЕМК на етапі проектування (рис. 1).

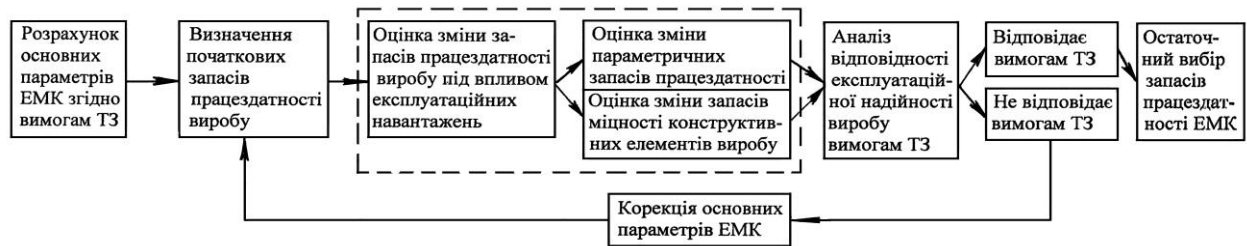


Рис. 1. Алгоритм визначення запасів працездатності ЕМК на етапі проектування

На основі прогнозування можливих експлуатаційних змін технічного стану і вихідних функціональних параметрів ЕМК в процесі відпрацювання ресурсу були розвинуті *теоретичні основи визначення запасів працездатності клапана на етапі його проектування*.

Розглядалися два аспекти цієї проблеми: визначення параметричних запасів працездатності ЕМК і визначення запасів міцності їх «критичних» конструктивних елементів.

Розробка теоретичних основ проводилася на прикладі визначення запасів працездатності ЕМК (рис. 2).

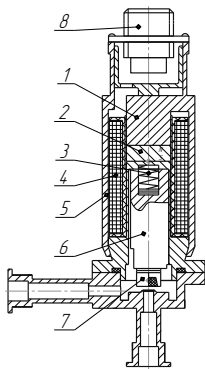


Рис. 2. Принципова схема ЕМК з двопозиційним поляризованим електромагнітним приводом типу ДВ – двопозиційний втягуючий поляризований: 1–стоп; 2–постійний магніт; 3–пружина; 4–обмотка; 5–магнітопровід; 6–якір; 7– золотник; 8 – штепсельне рознімання

Критичним елементом клапанів цього типу, що лімітує ресурс виробу, є стрижневі елементи рухомої частини електромагнітного приводу: відмова клапана після певної кількості спрацьовувань у більшості випадків настає внаслідок руйнування шийки штока 3 під дією ударного циклічного навантаження розтягування.

Показано, що процес накопичення ушкоджень від втоми в елементах ЕМК з приводом типу ДШВ, які зазнають значних динамічних циклічних навантажень, безпосередньо пов'язаний з величиною питомої кінетичної енергії переміщення рухомої системи приводу.

Показано, що процес накопичення ушкоджень від втоми в елементах ЕМК з приводом типу ДШВ, які зазнають значних динамічних циклічних навантажень, безпосередньо пов'язаний з величиною питомої кінетичної енергії переміщення рухомої системи приводу $E_k^{PC} = \frac{mV_{сеп}^2 k_v}{2 S_{min}}$, де m – маса рухомої системи приводу; $V_{сеп}$ – середня швидкість переміщення рухомої системи клапана під час його відкриття; k_v – коефіцієнт швидкості, що враховує відмінність швидкості переміщення стрижневого елемента (штока) клапана в момент удару о стопорну шайбу від середньої швидкості переміщення стрижневого елемента під час відкриття клапана; S_{min} – мінімальна площа поперечного перерізу стрижневого елемента.

Залежність напрацювання клапана до відмови $(T_0)_{\min} = f(E_k^{\text{PC}})$, що отримана з використанням результатів випробувань виробів-аналогів, характеризує гранично допустимий рівень питомої кінетичної енергії переміщення рухомої системи електромагнітного приводу клапана, перевищення якого може призвести до руйнування штока від втоми. Умову працездатності ЕМК, що проектується, можна представити через питому кінетичну енергію рухомої системи приводу у вигляді $E_k^{\text{PC}}(1 - K_{\text{роз}})n < E_{\text{кр}}^{\Sigma}$, де E_k^{PC} – питома кінетична енергія рухомої системи електромагнітного приводу клапана; $K_{\text{роз}}$ – коефіцієнт розсіювання, який залежить від кінематичної схеми рухомої частини ЕМП клапана і наявності в ньому спеціального демпферного елемента; n – число циклів спрацювання; $E_{\text{кр}}^{\Sigma}$ – критичний рівень сумарної питомої кінетичної енергії рухомої частини клапана, яка переходить у потенціальну енергію деформації конструктивного матеріалу штока і призводить до руйнування його шийки.

Визначався запас міцності стрижневих елементів (штоків) ЕМК за критерієм питомої енергії рухомої системи ЕМП клапана η_E як співвідношення $\eta_E = \frac{[E_k^{\text{PC}}]_{n_p}}{(E_k^{\text{PC}})_0}$, де $[E_k^{\text{PC}}]_{n_p}$ – критичний рівень питомої кінетичної енергії рухомої системи ЕМП клапана, що відповідає кількості циклів його спрацювання n_p до руйнування стрижневого елемента; $(E_k^{\text{PC}})_0$ – питома кінетична енергія рухомої частини ЕМП нового клапана після його виготовлення.

Отримано наступну аналітичну залежність для визначення запасів міцності штоків ЕМК:

$$\eta_E = k_{\chi}(1,414[u]^{T3} \cdot v_{E_{k0}} + 1), \quad (1)$$

де k_{χ} – коефіцієнт, що враховує відміну закону розподілу величини $(E_k^{\text{PC}})_{n_p}$ від нормального; $[u]$ – квантиль нормального розподілу, нормованого за ТЗ; $v_{E_{k0}}$ – коефіцієнт варіації параметра $(E_k^{\text{PC}})_0$ в початковому перетині процесу. Для визначення рівня питомої кінетичної енергії переміщення рухомої системи нового ЕМК, за яким забезпечується потрібна імовірність неруйнування стрижневого елемента (штока) клапана під час виробітку ресурсу, рекомендується використовувати отриману нами залежність:

$$(E_k^{\text{PC}})_0 = \frac{[E_k^{\text{PC}}]_{n_p}}{k_{\chi}(1,414[u]^{T3} \cdot v_{E_{k0}} + 1)}. \quad (2)$$

Визначення параметричних запасів працездатності ЕМК. Під коефіцієнтом запасу працездатності клапана за y_i -м функціональним параметром (ФП) $\eta_{y_i}(t)$ розуміють співвідношення між нормованим за ТЗ значенням y_i -го ФП $[y_i]^{T3}$ і його реалізацією $\hat{y}_i(t)$ у момент напрацювання t , тобто $\eta_{y_i}(t) = \frac{[y_i]_{\text{в}}^{T3}}{\hat{y}_i(t)}$ у разі обмеження ФП зверху або $\eta_{y_i}(t) = \frac{\hat{y}_i(t)}{[y_i]_{\text{н}}^{T3}}$ у разі обмеження ФП знизу.

На етапі проектування ЕМК необхідно визначити такі значення запасів працездатності за його вихідними функціональними параметрами $\Delta y_{i0}^{3П}(t_0)$ та відповідні коефіцієнти запасу працездатності $\eta_{y_{i0}}(t_0)$, що забезпечили б протягом усього періоду експлуатації клапана перебування ФП у межах допустимої області із заданою ймовірністю $[P_{y_i}]^{T3}$.

Визначення параметричних запасів працездатності ЕМК за їх основними функціональними параметрами будується на ймовірнісних оцінках можливості виходу ФП клапана за доступні межі в будь-який довільний момент експлуатації. Були прийняті наступні припущення:

- зміна ФП $y_i(t)$ клапана протягом періоду його експлуатації являє собою випадковий процес із нормальним розподілом;
- зміна детермінованої основи (математичного очікування) y_i -го ФП $m_y(t)$ може бути представлена монотонно-зростаючою (чи монотонно-спадною) степеневою функцією від напрацювання t $m_y(t) = m_y(t_0) + ct^\alpha$, або, в залежності від кількості циклів спрацьовування n

$$m_{y_{in}}(n_{б.ц}) = m_{y_{i0}} + kn^\beta,$$

де c і k – коефіцієнти, що визначають швидкість зміни математичного очікування $m_y(t)$ для y_i -го ФП відповідно від напрацювання t або циклів спрацьовування клапана n ; α , β – відповідні коефіцієнти степеневої функції.

У разі обмеження y_i -го ФП клапана зверху (або знизу) оцінка імовірності безвідмовної роботи ЕМК за змінами їх ФП може бути одержана з «рівняння зв'язку»:

$$P_{y_i}(t, n) = F(u_{y_i});$$

$$u_{y_i} = \frac{[y_i]_B^{T3} - m_{y_{in}}}{\hat{S}_{y_{in}}} = \frac{[y_i]_B^{T3} - m_{y_{in}}}{m_{y_{in}} v_{y_{in}}}, \text{ якщо } y_i \leq [y_i]_B^{T3}, \text{ або } u_{y_i} = \frac{\bar{y}_{i_n} - [y_i]_H^{T3}}{\hat{S}_{y_{in}}} = \frac{\bar{y}_{i_n} - [y_i]_H^{T3}}{\bar{y}_{y_n} v_{y_{in}}},$$

$$\text{якщо } y_i \geq [y_i]_H^{T3},$$

де $F(u_{y_i})$ – знак функції нормованого нормального розподілу; u_{y_i} – квантиль розподілу y_i параметра; $m_{y_{in}}$, $\hat{S}_{y_{in}}$ та $v_{y_{in}}$ – вибіркові оцінки математичного очікування, середнього квадратичного відхилення та коефіцієнта варіації y_i -го ФП клапана після n циклів відпрацювання.

Одержано наступні аналітичні вирази для визначення запасів параметричної працездатності клапана за його y_i -го ФП для початкового технічного стану виробу:

$$\text{– у разі обмеження } y_i \text{-го ФП зверху } \eta_{y_{i0}} = 1 + [u_{y_i}]^{T3} (v_{y_{i0}} + \Delta v_{y_{in}}) + \frac{[y_i]_B^{T3} (m_{y_{in}} - m_{y_{i0}})}{m_{y_{i0}} m_{y_{in}}};$$

$$\text{– у разі обмеження } y_i \text{-го ФП знизу } \eta_{y_{i0}} = \frac{1}{1 - [u_{y_i}]^{T3} \cdot v_{y_{in}}} + \frac{k_{y_i} n_{б.ц}^\beta}{[y_i]_H^{T3}}.$$

Для обґрунтування енергетичних критеріїв втрати працездатності проведено математичне моделювання малогабаритних електромагнітних клапанів. Запропонована динамічна модель ущільнення клапана пружно текучого тіла (рис. 3 а).

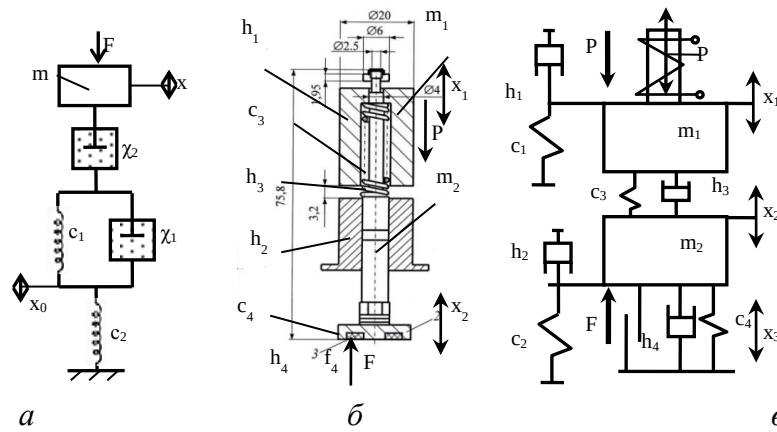


Рис. 3 Динамічна модель гумового ущільнення як пружно текучого тіла (а), конструктивна схема рухомих мас клапана (б) та динамічна модель клапана (в)

На основі динамічної моделі виведено диференціальне рівняння яке визначає взаємодію золотника з гумовим сидлом.

$$\frac{x_1 m}{c_2} \frac{d^4 x}{dt^4} + \left(1 + \frac{x_1}{x_2} + \frac{c_1}{c_2}\right) \frac{d^3 x}{dt^3} + \left[\frac{x_1}{c_2} c_0 + \frac{c_1}{x_2} m + \chi_1\right] \frac{d^2 x}{dt^2} + \left[\left(1 + \frac{x_1}{x_2} + \frac{c_1}{c_2}\right) c_0\right] \frac{dx}{dt} + c_0 x = K_0 F_0(t)$$

Розв'язок диференціального рівняння (рис. 4а) порівняно із експериментальними даними (рис. 4б).

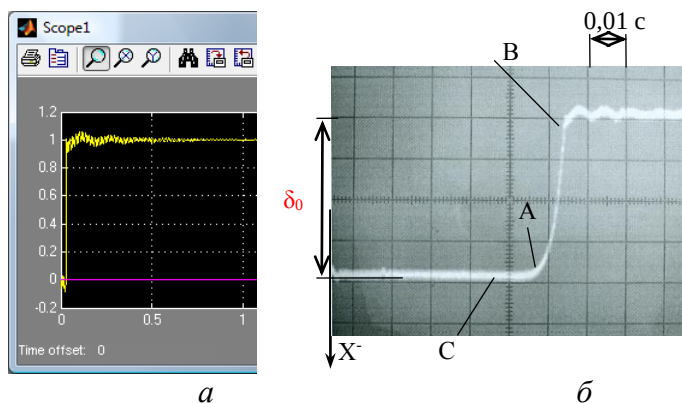


Рис. 4. Результати моделювання переміщення золотника при його взаємодії із гумовим сидлом (а) та експериментально визначене переміщення золотника (б)

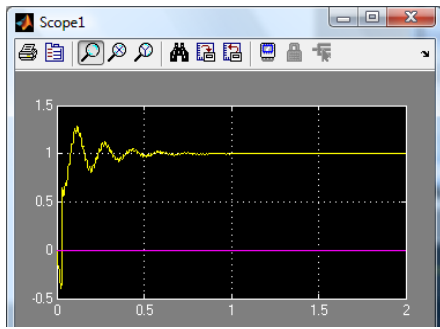
творення системи рівнянь одержано операторні залежності, які пов'язують переміщення рухомих деталей клапана із динамічною дією електромагніта.

$$X_1(s) = \frac{K_p}{(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)} \cdot \frac{K_1(1 + \tau_1 s) \cdot K_2(1 + \tau_2 s)}{\left[T_2^2 s^2 + 2\xi_2 T_2 s + 1 - K_F \frac{T_3^2 s^2 + T_4 s}{T_5^2 s^2 + T_6 s + 1} \right]} P(s)$$

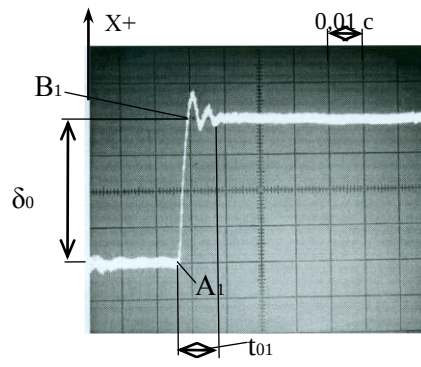
$$X_2(s) = \frac{K_p}{(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1)} \cdot \frac{K_2(1 + \tau_2 s)}{\left[T_2^2 s^2 + 2\xi_2 T_2 s + 1 - K_F \frac{T_3^2 s^2 + T_4 s}{T_5^2 s^2 + T_6 s + 1} \right] - K_1(1 + \tau_1 s)} P(s)$$

На основі наведених співвідношень розраховані переміщення деталей клапана при вмиканні електромагніту.

Перевірка достовірності розрахунків здійснена порівнянням розрахункового перехідного процесу клапана (рис.5а) із експериментальними даними (рис. 5 б).



а

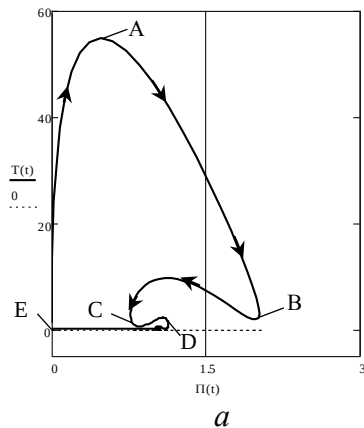


б

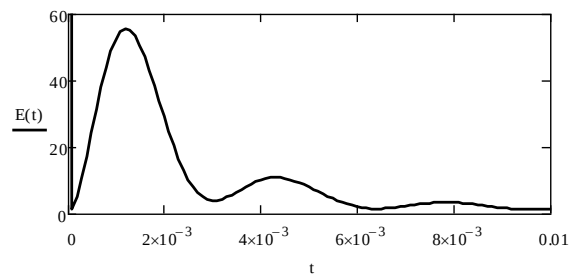
Рис. 5. Порівняння результатів розрахунку переміщення клапана (а) із експериментальними даними (б)

З використанням розробленої моделі визначені енергетичні параметри клапана при його відкритті. Зокрема встановлена взаємозалежність кінетичної та потенціальної енергії рухомих мас деталей клапана та зміни в часі повної енергії (рис. 6).

В результаті дослідження енергетичних процесів у динамічній системі клапана встановлено, що енергетичні критерії прогнозування працездатності малогабаритних електромагнітних клапанів базуються на аналізі кінетичної енергії, яка є визначальною характеристикою процесу відкриття клапана.



а



б

Рис. 6. Взаємозалежність кінетичної та потенціальної енергії динамічної системи клапана (а) та розрахункові зміни в часі повної енергії динамічної системи клапана (б)

У третьому розділі представлено результати спеціальних експериментальних випробувань ресурсних можливостей ЕМК різних типів.

Було виконано два види експериментальних досліджень:

- ресурсні випробування ЕМК з електромагнітними приводами типу ОВ (однопозиційний втягуючий нейтральний), ДВ (двопозиційний втягуючий поляризований) і ДШВ;
- спеціальні експериментальні дослідження впливу ударних циклічних навантажень на утомну міцність елементів конструкції ЕМК з приводом типу ДШВ.

Виявлено особливості експлуатаційних навантажень і основних деградаційних процесів, що призводять до суттєвих змін технічного стану клапанів з електромагнітним приводом систем об'єднання АКТ і визначають їхні ресурсні можливості. Обґрунтовано висновок, що характер основних експлуатаційних навантажень, що діють на елементи і вузли ЕМК, визначаються імпульсним переміщенням рухомої системи приводу клапана в його корпусі.

В ЕМП з приводами типу ОВ і ДВ зонами контактної взаємодії деталей є торцеві поверхні якоря й поверхні стопів. Деградація вихідного стану деталей відбувається в результаті ударного кон-

такту цих поверхонь і тертя циліндричних поверхонь якоря й розділювальної трубки.

В ЕМК з приводами типу ДШВ, на додаток до раніше згаданого, мають місце ударні контакти на поверхнях якоря і стопорної шайби, а також на поверхні стопорної шайби й нижньої торцевої поверхні голівки штока. Ця конструкційна особливість приводу ДШВ істотно обмежує величину площадок контакту вищезгаданих деталей. У силу цієї обставини конструкційний матеріал деталей у цих зонах зазнає високих динамічних напружень.

З урахуванням згаданих причин зміни технічного стану ЕМК даних типів під дією ресурсних навантажень призводять до якісно різних наслідків:

- в ЕМК із приводами ОВ і ДВ зміни технічного стану, як правило, завершуються параметричними відмовами, тобто виражаються в погіршенні якості функціонування виробу без припинення останнього;

- в ЕМК з приводами ДШВ зміни технічного стану при певному напрацюванні завершуються руйнуванням стрижневого елемента – штока, тобто повним припиненням функціонування виробу.

Експериментальним шляхом визначено характер зміни основних функціональних параметрів клапанів розглянутих типів від кількості циклів напрацювання. Одержано відповідні експериментальні залежності математичного очікування і дисперсії зміни параметрів ЕМК від кількості циклів напрацювання, які покладено в основу розробки методів визначення запасів працездатності малогабаритних ЕМК. Встановлено, що для ЕМК з приводом типу ДШВ в процесі виробітку ресурсу має місце певне зменшення напруги $U_{\text{відкр}}$ і часу $t_{\text{відкр}}$ відкриття клапану, певне збільшення напруги $U_{\text{закр}}$ і часу $t_{\text{закр}}$ закриття і суттєве зменшення ходу $x_{\text{зол}}$ золотника клапана (рис. 6) за рахунок зміни положення повзуна відносно шайби і штока унаслідок виробітку кільцевої канавки на торцевій поверхні повзуна та пластичної деформації деталей клапана (в першу чергу шийки штока). При зменшенні величини $x_{\text{зол}}$ до критичної (0,1 мм) має місце руйнування шийки штока.

Для практичної реалізації розробленої методики визначення запасів утомної міцності стрижневих елементів (штоків) ЕМК з приводом типу ДШВ отримано експериментальні залежності кількості циклів напрацювання до руйнування штока ЕМК від рівня питомої енергії переміщення рухомої системи приводу для різних матеріалів: 08Х18Н10Т (рис. 7), ВТ1-0, АК4-1.

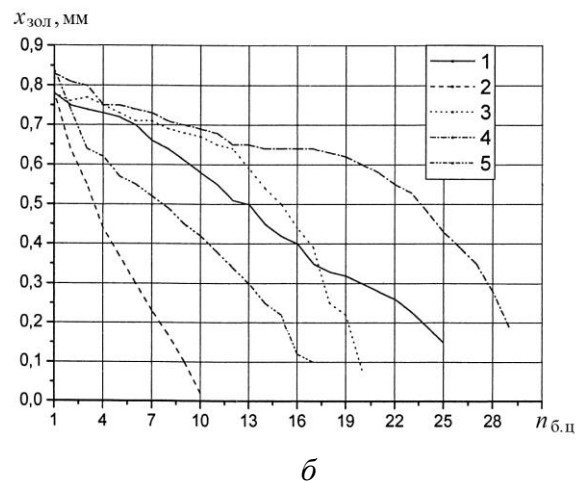
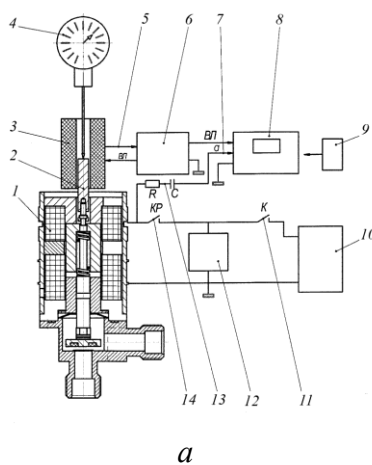


Рис. 7. Схема установки для реєстрації параметрів переміщення рухомої системи електромагнітного приводу ЕМК (а) та залежності зміни ходу золотника п'яти зразків ЕМК з приводом типу ДШВ від кількості блок-циклів напрацювання (1 блок-цикл = 20000 циклів)

За даними досліджень середня швидкість C_t зміни математичного очікування даного функціонального параметра із напрацюванням n для кожного з виробів становить: УФ 96046-006 – $C_t = (1,4 \cdot 10^{-5})$ мс/цикл; УФ 96104-004 – $C_t = (2,24 \cdot 10^{-6})$ мс/цикл; УФ 96181-006 – $C_t = (6,29 \cdot 10^{-6})$ мс/цикл. Коефіцієнт варіації даного функціонального параметра для цих типів клапанів в середньому складає $V_t = 0,168$.

Математичне очікування зміни ходу золотника $x_{\text{зол}}$ з напрацюванням представлено функцією виду:

$$x_{\text{зол}_n} \cong x_{\text{зол}_0} + c_{x_{\text{зол}}} n^{\beta_{x_{\text{зол}}}}$$

Одержані рівняння регресії змін математичного очікування функціональних параметрів ЕМК типу УФ 96104 у вигляді поліномів другого порядку $m_t = t_0 + 4,92 \cdot 10^{-6} n - 3,93 \cdot 10^{-12} n^2$.

Встановлені закономірності зміни параметрів від числа циклів спрацювань (рис. 8).

Випробуванням піддавалися дослідні зразки ЕМК розробки КЦКБА: клапан УФ 96239-006 з ЕМП УФ 098090 – 13 шт.; клапан УФ 90070М-006 з ЕМП УФ 098186 – 5 шт.; клапан УФ 90085-004 з ЕМП УФ 098216 – 3 шт.; клапан УФ 96414-010 з ЕМП УФ 098190 – 3 шт.

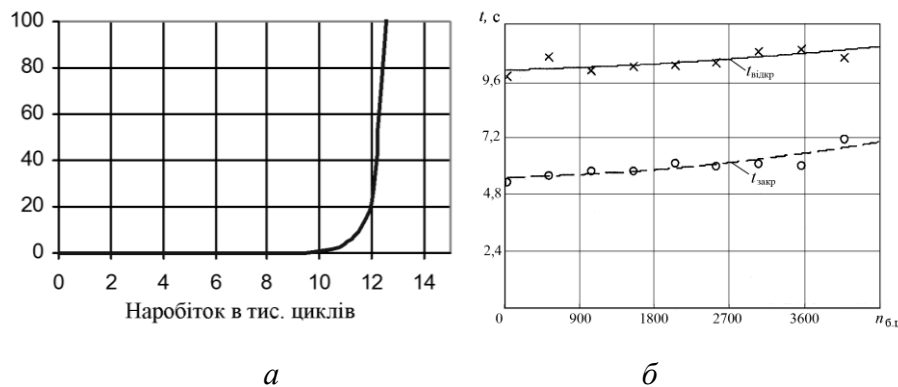


Рис. 8. Залежність величини протічки робочого середовища через затвор клапана від напрацювання (а) та залежність часу відкриття і часу закриття клапана від кількості циклів напрацювання (б)

Встановлені основні характеристики працездатності клапана (рис.9).

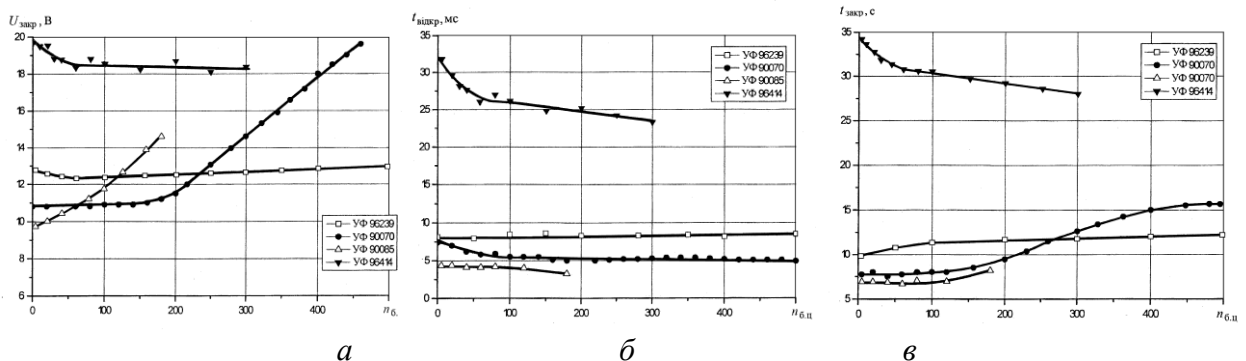


Рис. 9. Зміна математичного очікування мінімальної напруги закриття клапана з напрацюванням (а), зміна математичного очікування часу відкриття клапана (б) та зміна математичного очікування часу закриття клапана (в)

Встановлено, що період нормальної експлуатації малогабаритних ЕМК складає: для ЕМК з приводами типу ОВ (ОШ) – понад $3,6 \cdot 10^6$ циклів спрацьовувань; для ЕМК з приводами типу ДВ (ДШ) – понад $3,6 \cdot 10^6$ циклів спрацьовувань; для ЕМК з приводами типу ДШВ – не більше, ніж $2 \cdot 10^4$ циклів спрацьовувань. Експериментально підтверджено, що в першому наближенні зміни функціональних параметрів клапанів з достатнім для інженерної практики наближенням можуть бути апроксимовані степеневою або лінійною функціями.

В четвертому розділі викладені результати дослідження процесів зношування гумового ущільнення в запірному вузлі клапана. Показано, що основною причиною втрати працездатності малогабаритних електромагнітних клапанів є зношування або деградація поверхні гумового ущільнення. Досліджено стан поверхні ущільнення на різних стадіях його життєвого циклу. Встановлені характеристики і можливі дефекти поверхні нового ущільнення (рис. 10).

В результаті вивчення зразків з використанням мікроскопу встановлено, що на обробленій гумовій поверхні наявні окремі ізольовані мікрodefekти, раковини і мікронерівності. Мікрораковини і тверді частинки, шаржовані в гумову поверхню, мають розміри $0,005 \dots 0,08$ мм.

Встановлено, що оброблена гумова поверхня безпосередньо після обробки має відхилення мікрогеометрії, які характеризуються параметром $0,1 < Ra \leq 0,4$. Хвилястість поверхні складає $0,1 \dots 0,15$ мм. Найбільш інформативною характеристикою мікропрофіля є опорна поверхня (рис. 10в).

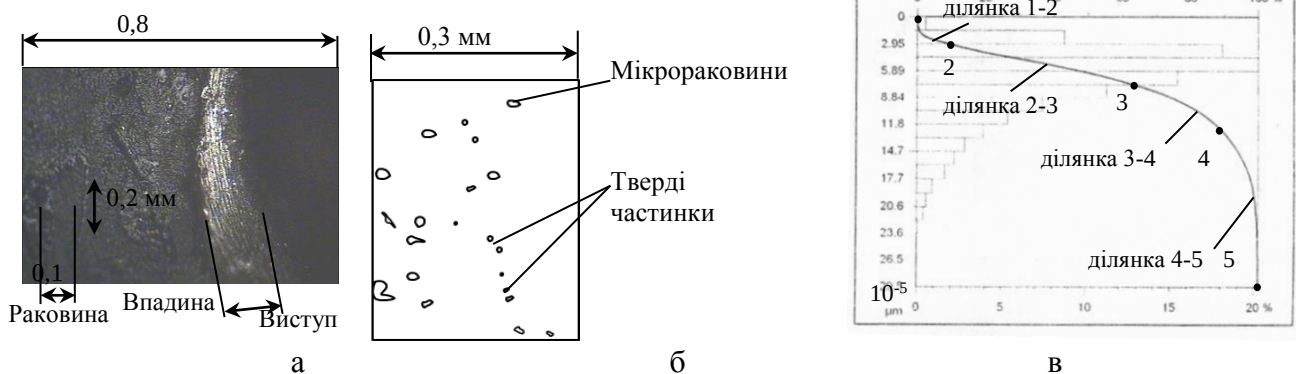


Рис.10. Локальні дефекти гумової поверхні, які виникають при порушенні технологічного процесу обробки гуми (а), геометричні розміри дефектів (б) та опорна поверхня мікропрофілю гумового ущільнення, визначена апаратурним методом безпосередньо після обробки (в).

Виконано аналіз опорної поверхні. Встановлено, що ділянка 1-2 характеризується наявністю ізольованих мікровиступів. Вона має незначну величину і не спричинює суттєвого впливу на експлуатаційну надійність та працездатність клапана. Основною за впливом є ділянка 2-3, яка є ділянкою пропорційного росту опорної поверхні. Розмір по висоті даної ділянки $0,2 \dots 0,5$ мкм. Вона займає близько 60% опорної поверхні. Дана ділянка кривої опорної поверхні характеризує міцність і працездатність ущільнення і може використовуватись як діагностичний параметр. Вона служить для прогнозування працездатності електромагнітних клапанів на етапі проектування. Ділянка 2-3 кривої є практично лінійною. Її характерним параметром є середній кут нахилу кривої (тангенс кута нахилу) ϵ . Даний параметр обрано в якості діагностичного для прогнозування працездатності гумо-металевого ущільнення в окремих точках запірного вузла.

Інші дві ділянки 3-4 та 4-5 знаходяться на нелінійних частинах кривої. Ділянка 3-4 характеризує пороутворення на поверхні ущільнення. Вона визначає необхідний тиск на золотник клапана

та силу деформації пружини. Довжина ділянки зменшується при правильному технологічному процесі виготовлення гумової поверхні, зокрема при шліфувальній операції та доводці. Дана ділянка є основним місцем шаржування твердих частинок в гумову поверхню. На даній ділянці локалізуються початкові процеси деструкції, утворюються «зародки» деструктивних змін гумової поверхні, які в подальшому призводять до втрати працездатності запірного вузла ущільнення.

Останньою є ділянка 4-5 – ділянка окремих западин. Вона займає близько 10% загальної висоти опорної поверхні. Як правило, западини на даній ділянці зарощуються в процесі експлуатації. Визначено закономірності зношування та деградації поверхні гумового ущільнення (рис.11).

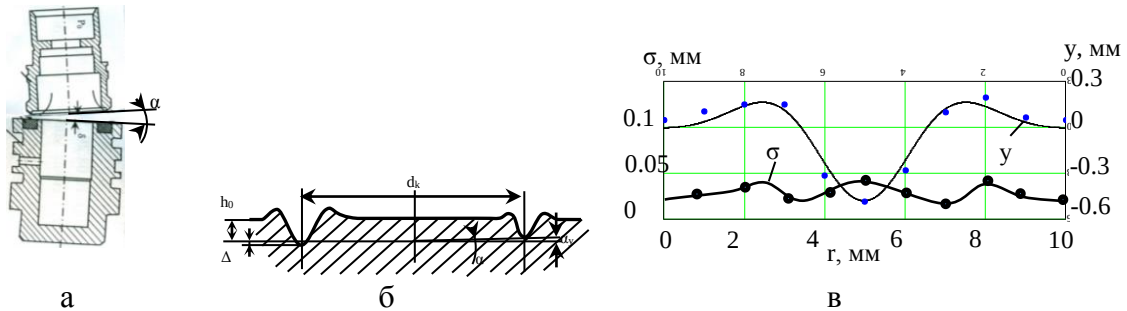


Рис. 11. Схема перекосу золотника відносно гумового сидла (а) та утворення канавки (б), математичне сподівання та середньо-квадратичне відхилення профіля канавки на поверхні гумового ущільнення при відпрацюванні 60% ресурсу електромагнітного клапана (в).

Встановлено, що на гумовій поверхні утворюється канавка глибиною 0,1..0,6 мм. Виміряно профіль канавки та запропонована математична модель для опису форми канавки у вигляді

$$Y(x) = a_m e^{-\alpha x^2} \cos(\tau x).$$

Доведено, що наявність канавки мало впливає на показники працездатності ущільнення. Втрата працездатності є наслідком деградації поверхні канавки в локальній області (рис.12).

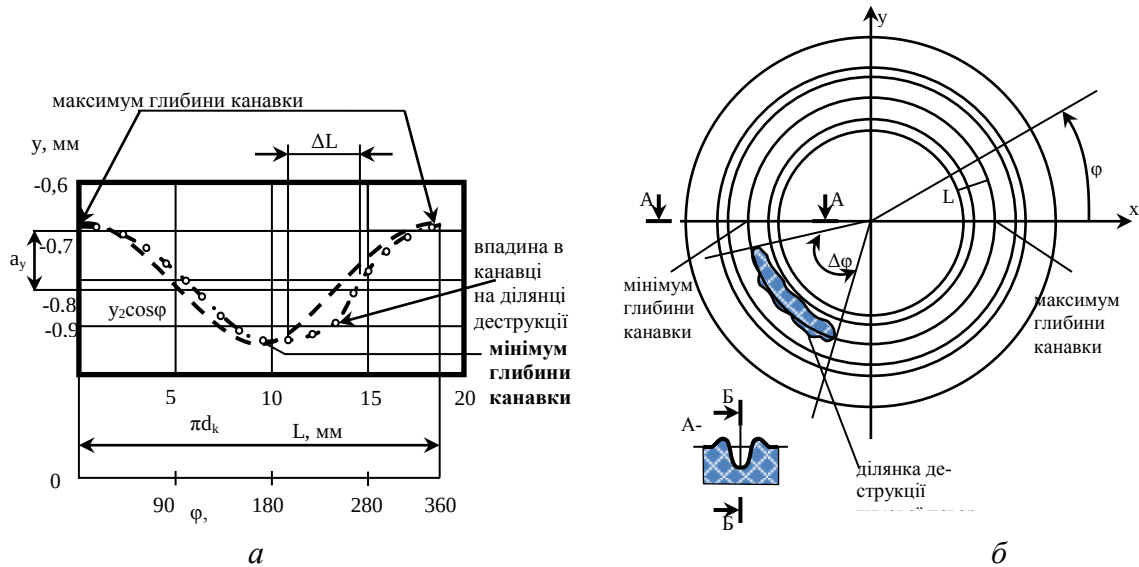


Рис. 12. Результати експериментальних вимірів глибини канавки в залежності від полярного кута φ (а) та експериментально визначене розташування області деградації гумової поверхні по периметру канавки (б)

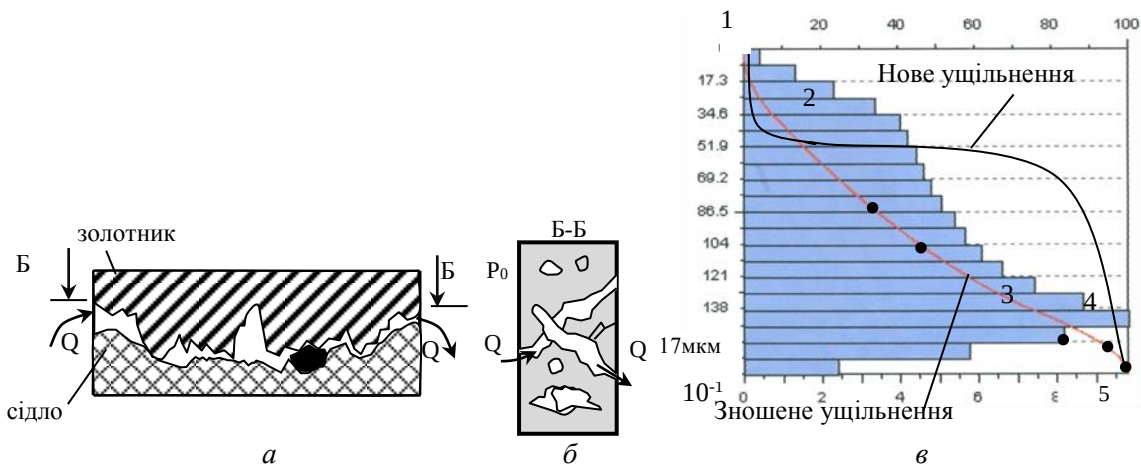


Рис. 13. Механізм утворення радіальних каналів на ділянці деструкції гумової поверхні (а, б) та опорна поверхня мікропрофіля зношеного гумового ущільнення на ділянці деструкції (в)

Здійснено порівняльний аналіз опорних поверхонь нового (див. рис. 10 в) та деградованого (рис. 13) сідла. Встановлено, що на ділянці 1-2 внаслідок деструкції поверхні збільшується число ізольованих мікровиступів. Тому, в порівнянні із аналогічною ділянкою нового ущільнення, ділянка 1-2 суттєво збільшується (з 5..7% до 15..30%). Причиною цього є розпушування поверхневого шару гуми. Число ізольованих мікровиступів спочатку росте з постійною швидкістю, а потім з ростом частоти появи мікровиступів швидкість стабілізується (в кінці ділянки 1-2). Протяжність наступної ділянки (ділянка 2-3) суттєво зменшується в порівнянні з аналогічною ділянкою нової поверхні. Протяжність ділянки складає близько 60%, але вона зміщується вглиб гумової поверхні в порівнянні з ділянкою нової поверхні. Ділянки 3-4- і 5-6 різко зменшуються і не є суттєвими.

Деструкція гумової поверхні і пов'язане з нею зниження працездатності клапана зумовлює порушення герметичності ущільнення. Визначення герметичності проведене експериментальним методом. Використані результати вимірів падіння тиску в ресивері, який з'єднано з атмосферою через клапан з деградованим ущільненням (рис. 14, а).

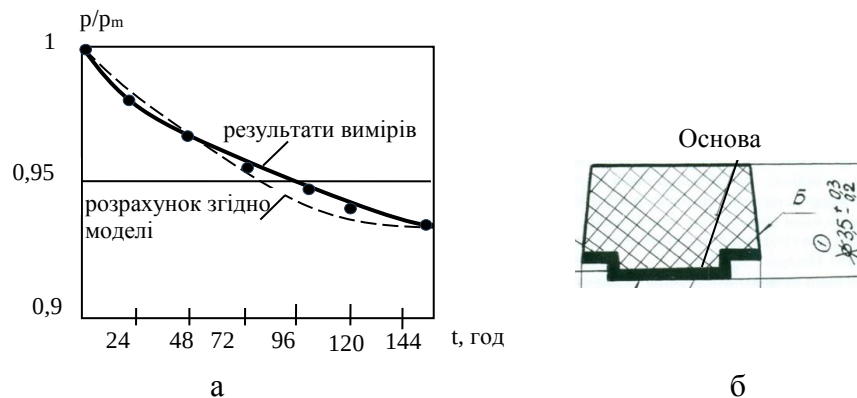


Рис. 14. Експериментальна та розрахункова залежності падіння тиску в ресивері W_1 , визначені для клапана, який втратив герметичність (а) та пропозиції по захисту гумової поверхні від деградації (б)

Прийнята лінійна характеристика витоків через клапан:

$$Q = K \frac{S \Delta p}{\mu l}, \quad \text{або в загальному вигляді} \quad Q = q \Delta p,$$

де q – проникність ущільнення в області деструкції.

На основі експериментальних вимірів, проникність описана степеневою функцією виду:

$$q(t) = \sum_{m=0}^M c_m t^m.$$

Звідси визначено час деструкції ущільнення.

На основі результатів проведених досліджень розроблено стандарт підприємства СТУ-273:2012 КЦКБА «Методика розрахунку запасів працездатності електромагнітних клапанів при проектуванні». Впровадження результатів виконаних досліджень проводилось в КЦКБА шляхом:

- удосконалення процесу розробки нових зразків ЕМК для систем обладнання АКТ;
- розробки низки конкретних науково обґрунтованих рекомендацій щодо удосконалення конструкції окремих зразків ЕМК.

Рекомендації щодо удосконалення конструкції окремих типів ЕМК розробки КЦКБА захищено патентами України на корисну модель № 4156 від 17.01.2005 р. і № 17984 від 03.05.2006 р.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті виконаних експериментально-теоретичних досліджень отримали подальший розвиток наукові основи визначення запасів працездатності малогабаритних ЕМК систем обладнання АКТ на етапі проектування, що ґрунтуються на стохастичних моделях зміни технічного стану вузлів й конструктивних елементів ЕМК і їх функціональних параметрів під дією експлуатаційних навантажень. Їх впровадження під час розробки нових ЕМК для систем обладнання сучасних АКТ забезпечує виконання вимог до їх надійності й практичної безвідмовності протягом усього періоду нормальної експлуатації.

Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Обґрунтовано висновок, що для забезпечення необхідних запасів працездатності ЕМК на етапі проектування необхідно вирішувати дві пов'язані між собою задачі: визначення запасів утомної міцності конструктивних елементів клапана, що проектується, і визначення параметричних запасів працездатності ЕМК. Вирішення цих задач потребує подальшого розвитку моделювання деградаційних процесів, що мають місце в елементах і вузлах ЕМК в процесі відпрацювання ресурсу.

2. Вперше розроблені алгоритм і математичні моделі визначення параметричних запасів працездатності малогабаритних ЕМК і запасів міцності їхніх «критичних» елементів, що ґрунтуються на стохастичному моделюванні та прогнозуванні розвитку деградаційних процесів в вузлах і елементах ЕМК під дією експлуатаційних навантажень, в тому числі:

- математичні залежності для визначення параметричних запасів працездатності малогабаритних ЕМК з використанням стохастичних моделей «неперевищення» функціональними параметрами клапана їх нормованих значень під час напружування встановлених ресурсів;
- математичні залежності для визначення запасів міцності «критичних» елементів конструкції клапана з використанням енергетичних критеріїв.

3. Для різних типів малогабаритних ЕМК систем обладнання АКТ вперше отримано експериментальні залежності математичного очікування і дисперсії для оцінки зміни функціональних параметрів клапанів залежно від кількості циклів спрацьовування, що їх

рекомендовано для використання в якості характеристики виробів-аналогів, при визначенні запасів працездатності малогабаритних ЕМК, що проектується.

4. Експериментальним шляхом визначено особливості розвитку деградаційних процесів у вузлах і конструктивних елементах малогабаритних ЕМК, в тому числі особливості розвитку процесів утоми конструкційного матеріалу в стрижневих елементах ЕМК з приводом типу ДШВ; отримано уточнену емпіричну залежність кількості циклів напруження стрижневих елементів приводу ДШВ до відмови від питомої кінетичної енергії переміщення його рухомої системи, в якій пов'язуються показники безвідмовності з конструктивними параметрами клапана, що проектується.

5. Доведено можливість підвищення безвідмовності ЕМК з приводом типу ДШВ за рахунок реалізації таких конструктивних заходів, як:

- удосконалення геометрії деталей і вузлів клапана з метою збільшення площі контакту, зниження впливу концентраторів напруження;
- застосування конструкційних матеріалів, більш стійких до впливу циклічних ударних навантажень.

6. Розроблено науково обґрунтовані рекомендації щодо удосконалення конструкції окремих типів ЕМК розробки ПАТ «Київське центральне конструкторське бюро арматуробудування», які лягли в основу стандарту підприємства СТУ КЦКБА–273:2012 «Методика розрахунку запасів працездатності електромагнітних клапанів при проектуванні» та були захищені деклараційним патентом України на корисну модель № 4156 від 17.01.2005 р. і патентом України на корисну модель № 17984 від 03.05.2006 р.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Рыкуніч Ю.Н. Исследование изменения технического состояния элементов пневмоклапанов с электромагнитным приводом / Ю.Н.Рыкуніч, А.Е.Ситніков, В.Ф.Лабунец, Я.Б.Федоричко // Вестник НТУУ «КПІ», Машиностроение, 2002, №42, том 1. – С. 173-178. *Здобувачем виконано аналіз результатів експериментальних досліджень технічного стану ЕМК.*

2. Рыкуніч Ю.Н. Выбор коэффициентов запаса прочности при проектировании пневмоклапанов с электромагнитным приводом / Ю.Н. Рыкуніч // Вісник НТТУ «Київський політехнічний інститут», Машиностроение. - 2002. - №42, том 2. - С. 39-42.

3. Рыкуніч Ю.Н. Выбор запасов работоспособности проектируемых электромагнитных клапанов с использованием энергетических критериев / Ю.Н.Рыкуніч, А.Е.Ситніков // Промислова гідравліка і пневматика. – 2006. – № 1 (11). – С. 43–46. *Здобувачем розроблено рекомендації щодо визначення запасів працездатності ЕМК.*

4. Рыкуніч Ю.М. Визначення параметричних запасів працездатності електромагнітних клапанів / Ю.М.Рыкуніч, О.Є.Ситніков, Г.Й.Зайончковський // Промислова гідравліка і пневматика. - 2011. - №4 (34). – С. 50-54. *Здобувачем розроблено основні наукові положення визначення параметричних запасів працездатності ЕМК.*

5. Рыкуніч Ю.М. Експериментальні дослідження втомної міцності стрижневих елементів пневматичних клапанів з двопозиційним електромагнітним приводом / Ю.М. Рыкуніч // Промислова гідравліка і пневматика. - 2012. - №3 (37). – С. 55-59.

6. *Рикуніч Ю.М.* Визначення запасів працездатності малогабаритних електромагнітних клапанів / Ю.М. Рикуніч // Промислова гідравліка і пневматика. - 2012. - №2 (36). – С. 85-91.

7. *Рикуніч Ю.М.* Експериментальні дослідження зміни технічного стану малогабаритних пневмоклапанів з двопозиційним поляризованим електромагнітним приводом під дією експлуатаційних навантажень / Ю.М. Рикуніч, Л.В. Ананьєвська, О.Є. Ситніков, Я.Б. Федоричко, Г.Й. Зайончковський, Є.І. Барилюк // Проблеми тертя та зношування. – 2013. – № 2 (61). – С. 105-115. (фахове видання, що входить до міжнародних науко-метричних баз Index Copernicus, РІНЦ, EBSO, Word Cat, Google Scholar). *Здобувачем зроблено узагальнені висновки щодо процесів зміни технічного стану малогабаритних ЕМК розробки КЦКБА під дією експлуатаційних навантажень.*

8. *Рыкунич Ю.Н.* Исследование по энергетическим критериям запасов работоспособности поляризованных двухпозиционных электромагнитных клапанов двигательных установок / Ю.Н. Рыкунич, А.Е. Ситников, Л.Г. Александров, Е.И. Барилюк, Г.Й. Зайончковский // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». Космонавтика и ракетостроение. – 2013. – №4 (20). – С. 61-67. (зарубіжне фахове видання, що входить до міжнародної науко-метричної бази РІНЦ). *Здобувачем отримані результати дослідження щодо визначення запасів працездатності стрижневих елементів ЕМК від рівня питомої кінетичної енергії.*

9. *Rykunich Yu. M.* Deformation and fracture of the bar system of a pneumatic electromagnetic valve under cyclic impact loading / Yu. M. Rykunich, O. E. Sytnikov, V. V. Astanin, E. I. Barylyuk, G. I. Zaionchkovs'kyi // Strength of Material, Vol. 46. No. 3, May, 2014. – Springer Science+Business Media, New York. – P. 350-359. (зарубіжне фахове видання, що входить до міжнародної науко-метричної бази Scopus). *Здобувачем обґрунтовано рекомендації щодо визначення запасів утомної міцності стрижневих елементів ЕМК.*

10. *Рикуніч Ю.М.* Визначення запасів працездатності пневматичних електромагнітних клапанів / Ю.М. Рикуніч // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – №1 (1044). – С. 110 – 120. – ISSN: 2078-774X (фахове видання, що входить на міжнародної науково-метричної бази, Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)).

11. *Рыкунич Ю.Н.* Увеличение ресурса и повышение эксплуатационной надежности малогабаритных пневматических клапанов с двухпозиционным поляризованным электромагнитным приводом / Ю.Н. Рыкунич, Я.Б. Федоричко, Г.И. Зайончковский, Е.И. Барилюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 3 (1112). – С. 30-36. *Здобувачем розроблено рекомендації щодо забезпечення ресурсу ЕМК і підвищення їх експлуатаційної надійності за рахунок вибору науково обґрунтованих запасів працездатності.*

12. *Зайончковський Г.Й.* Визначення ресурсу стрижневих елементів малогабаритних пневматичних клапанів з двопозиційним поляризованим електромагнітним приводом / Г.Й. Зайончковський, Є.І. Барилюк, Ю.М. Рикуніч, Я.Б. Федоричко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. – Х.: НТУ «ХПІ». 2016. – №20 (1192). – ISSN 2411-3441. – С. 20-28. (фахове видання, що входить на міжнародних науково-метричних баз Thomson Reuters, Google Scholar, Scientific Indexing Services (Texas, USA), Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)). *Здобувачем було проведено дослідження щодо визначення ресурсу малогабаритних пневматичних ЕМК.*

13. *Деклараційний патент на корисну модель 4156 Україна, 7 F16K1/00. Електромагнітний клапан* / Рикуніч Ю.М., Ситніков О.Є., Кисіль В.Л., Федоричко Я.Б.; КІЦБА. – № 2004021061; Заявл. 13.02.2004; Опубл. 17.01.2005, Бюл. № 1. – 2 с.
14. *Патент на корисну модель 17984 Україна, МПК (2006) F16K 31/00. Електромагнітний клапан* / Ситніков О.Є., Кисіль В.Л., Федоричко Я.Б., Рикуніч Ю.М.; КІЦБА. – № u200604886; Заявл. 03.05.2006; Опубл. 16.10.2006. Бюл. № 10. – 3 с.
15. *Rikunich U.N. Methodological aspects of performance reserves choice of small solenoid valves* // U.N. Rikunich, A.E. Sitnikov, E.I. Barilyuk, H.I. Zayonchkovskiy // *Proceedings. The Fifth World Congress «Aviation in the XXI-st Century». «Safety in Aviation and Space Technologies», September 25-27, 2012, Kyiv, Ukraine. Volume 1.* – P. 1.1.33-1.1.36.
16. *Рикуніч Ю.Н. Определение запасов работоспособности малогабаритных электромагнитных клапанов авиакосмической техники* / Ю.Н.Рикуніч, А.Е.Ситников, Г.Й.Зайончковський // Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки»: тези доп., м. Харків, 18-19 квітня 2012 р. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т ім. М.Є.Жуковського «Харк. авіа, ін-т», 2012. – С. 39.
17. *Рикуніч Ю.М. Визначення запасів працездатності малогабаритних електромагнітних клапанів* / Ю.М. Рикуніч // *Матеріали XVII Міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці», м. Черкаси, 17-20 квітня 2012 р.* – С. 79.
18. *Рыкунич Ю.Н. Обеспечение усталостной прочности стержневых элементов электромагнитного привода пневматических клапанов* / Ю.Н.Рыкунич, А.Е.Сытников, Я.Б.Федоричко, Г.Й.Зайончковский // XIII международная научно-техническая конференция «Прогрессивная техника и технология – 2012». Тезисы докладов. Часть 2. – Севастополь, 11-15 июня 2012 г. – С. 51.
19. *Рикуніч Ю.М. Визначення запасів працездатності малогабаритних електромагнітних клапанів на етапі проектування* / Ю.М.Рикуніч // XIII Міжн. науково-технічна конференція «Промислова гідравліка і пневматика». Матеріали конференції. – Чернігів, 19-20.09.2012 р. – С. 16.
20. *Рикуніч Ю.М. Визначення запасів працездатності малогабаритних електромагнітних клапанів* / Ю.М.Рикуніч // XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Промислова гідравліка і пневматика». Матеріали конференції. – Одеса, 18-19 вересня 2013 р. – С. 17.
21. *Рикуніч Ю.М. Визначення запасів працездатності малогабаритних електромагнітних клапанів систем обладнання авіакосмічної техніки на етапі проектування* / Ю.М.Рикуніч // XV Міжнародна науково-технічна конференція «Промислова гідравліка і пневматика». Матеріали конференції. – Мелітополь, 17-19 вересня 2014 р. – С. 60.
22. *Рикуніч Ю.М. Теоретичні основи визначення запасів міцностної працездатності конструктивних елементів малогабаритних електромагнітних клапанів* / Рикуніч Ю.М. // XIX Міжнародна науково-технічна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Матеріали конференції. – Кіровоград, 21-24 травня 2014 р. – С. 107.
23. *Rikunich Y.N. Increasing small electromagnetic valves reliability and service life* / Y.N. Rikunich, Y.B. Fedorichko, E.I. Barilyuk, G.I. Zayonchkovskiy // *Proceedings. The Sixth World Congress «Avi-*

ation in the XXI-st Century». «Safety in Aviation and Space Technologies», September 23-25, 2014, Kyiv, Ukraine. Volume 1. – P. 1.6.30-1.6.34.

АНОТАЦІЯ

Рикуніч Ю. М. Прогнозування працездатності малогабаритних електромагнітних клапанів в системах авіакосмічної техніки. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.02 – машинознавство. – Київ, 2017.

Дисертація присвячена розробці наукових основ і практичних рекомендацій з визначення запасів працездатності малогабаритних пневматичних електромагнітних клапанів (ЕМК) на етапі проектування.

Запропоновано алгоритм вибору запасів працездатності ЕМК, який включає в собі вирішення двох взаємопов'язаних між собою задач: вибір параметричних запасів працездатності ЕМК і вибір запасів утомної міцності критичних елементів ЕМК, що лімітують їх ресурс. Отримано аналітичні вирази для визначення запасів працездатності ЕМК на етапі проектування.

Експериментальним шляхом визначено характер та інтенсивність змін технічного стану та основних структурних і функціональних параметрів ЕМК в процесі напрацювання ресурсу, в тому числі особливості розвитку процесів утоми конструкційного матеріалу в стрижневих елементах ЕМК з двопозиційним поляризованим електромагнітним приводом. Використання енергетичних критеріїв накопичення мікродеформацій у конструктивному матеріалі дало можливість отримати аналітичні залежності для обрання втомної міцності стрижневих елементів ЕМК. Для різних конструкційних матеріалів отримано емпіричні залежності кількості циклів напрацювання стрижневих елементів ЕМК до відмови від питомої кінетичної енергії переміщення його рухомої системи.

В результаті виконаних експериментально-теоретичних досліджень отримали подальший розвиток наукові основи визначення запасів працездатності малогабаритних ЕМК систем обладнання АКТ на етапі проектування, що ґрунтуються на стохастичних моделях зміни технічного стану вузлів й конструктивних елементів ЕМК і їх функціональних параметрів під дією експлуатаційних навантажень. Їх впровадження під час розробки нових ЕМК для систем обладнання сучасних АКТ забезпечує виконання вимог до їх надійності й практичної безвідмовності протягом усього періоду нормальної експлуатації.

На основі результатів проведених експериментально-теоретичних досліджень розроблено стандарт підприємства СТУ КЦКБА–273:2012 «Методика розрахунку запасів працездатності електромагнітних клапанів при проектуванні».

Основні результати досліджень впроваджено в практику проектування ЕМК в ПАТ «Київське центральне конструкторське бюро арматуробудування».

Ключові слова: електромагнітний клапан, запас працездатності, технічний стан, деградаційні процеси, надійність, ресурс.

АННОТАЦИЯ

Рыкунич Ю. Н. Прогнозирование работоспособности малогабаритных электромагнитных клапанов в системах авиакосмической техники. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.02 – машиноведение. – Киев, 2017.

Диссертация посвящена разработке научных основ и практических рекомендаций по выбору запасов работоспособности малогабаритных пневматических электромагнитных клапанов (ЭМК) на этапе проектирования.

Приведена классификация малогабаритных ЭМК, которые применяются в системах оборудования авиакосмической техники.

Обоснован вывод, что для обеспечения необходимых запасов работоспособности ЭМК на этапе проектирования необходимо решать две, связанные между собой задачи: определение запасов усталостной прочности конструктивных элементов проектируемого клапана, и определение параметрических запасов работоспособности ЭМК. Решение этих задач требует дальнейшего развития моделирования деградационных процессов, имеющих место в элементах и узлах ЭМК в процессе отработки ресурса.

Получены аналитические зависимости для выбора параметрических запасов работоспособности ЭМК на этапе эскизного проектирования с использованием стохастических моделей «непревышения» функциональными параметрами клапана их нормированных значений в процессе выработки ресурса. На основе использования энергетических критериев накопления микродеформаций в конструкционном материале получены аналитические зависимости выбора запасов усталостной прочности стержневых элементов ЭМК с двухпозиционным поляризованным электромагнитным приводом.

Экспериментальным путем определены характер и интенсивность изменений технического состояния, а также основных структурных и функциональных параметров ЭМК в процессе выработки ресурса, в том числе особенности развития процессов усталости конструкционного материала в стержневых элементах ЭМК с двухпозиционным поляризованным электромагнитным приводом. Для разных конструкционных материалов получены эмпирические зависимости числа циклов срабатывания ЭМК до разрушения их стержневых элементов от удельной кинетической энергии подвижной системы клапана. Для разных типов малогабаритных ЭМК систем оборудования АКТ получены экспериментальные зависимости математического ожидания и дисперсии для оценки изменения функциональных параметров клапанов от количества циклов срабатывания.

Доказана возможность повышения безотказности ЭМК с двухпозиционным толкающе-втягивающим приводом за счет реализации таких конструктивных мер, как совершенствование геометрии деталей и узлов клапана с целью увеличения площади контакта, снижение влияния концентраторов напряжения, а также применением конструкционных материалов, более устойчивых к воздействию циклических ударных нагрузок.

В результате выполненных экспериментально-теоретических исследований получили дальнейшее развитие научные основы определения запасов работоспособности малогабаритных ЭМК на этапе проектирования, которые основываются на стохастических моделях изменения технического состояния узлов и конструктивных элементов ЭМК и их функциональных параметров под действием эксплуатационных нагрузок в процессе выработки ресурса.

Основные результаты исследований внедрены в практику проектирования ЭМК в ПАО «Киевское центральное конструкторское бюро арматуростроения» (КЦКБА) в виде стандарта предприятия СТУ-273:2012 “Методика расчета запасов работоспособности электромагнитных клапанов при проектировании”, а также рекомендаций по усовершенствованию конструктивного исполнения отдельных типов ЭМК разработки КЦКБА.

Ключевые слова: электромагнитный клапан, запас работоспособности, техническое состояние, деградационные процессы, надежность, ресурс.

ANNOTATION

Rykunich Iu. M. Efficiency prediction of the small electromagnetic valves in aerospace systems. – Manuscript.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.02.02 – engineering science. – Kyiv, 2017.

The dissertation is devoted to the development of scientific base and practical recommendations on the determination of serviceability reserve of the compact-sized pneumatic electromagnetic valves (EMV) at the design stage.

The classification of small-size EMV which are used in aerospace equipment systems is provided.

The algorithm for determining serviceability reserve of the electromagnetic valves is presented. It includes solutions for the two interconnected tasks: determination of the parametric operating limits and determination of the fatigue strength range of the critical elements in the electromagnetic valves, which limit their normal operation. The analytic formulas for defining the serviceability reserve of the EMV at the design stage were obtained.

The character and intensity of technical condition and main structural and functional parameters change of the EMV during operation were experimentally determined. The peculiarities of the fatigue process development in the material of electromagnetic valves rod elements with the two positioned polarized electromagnetic drive were defined. For the several constructional materials the empirical dependences were obtained for the number of EMV operational cycles before the destruction of rod elements, depending on the kinetic energy of the valve moving parts.

As a result of the conducted experimental and theoretical work the scientific theory of the efficiency of the compact-sized EMV for aerospace systems was further developed. The findings are based on the stochastic models of technical condition change of EMV units and elements, and their functional parameters under operational load. Implementation of these models at the design stage of the new electromagnetic valves for modern aerospace systems allows meeting the requirements of reliability and failure-free performance during the period of normal operation.

Based on the results of conducted research enterprise standard STU-273:2012 «Method of the serviceability calculation for the electromagnetic valves at the design stage» was created.

Main findings of the conducted research were implemented in the design process of the EMV at Public Joint Stock Company «Kyiv Central Design Bureau of Valves».

Keywords: electromagnetic valve, serviceability reserve, technical condition, degradation processes, reliability, resource.