

УДК 519.718

Н.В. СЕСПЕДЕС ГАРСІЯ\*

## ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ПНЕВМАТИЧНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КЛАПАНІВ

\*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

**Анотація.** Стаття присвячена аналізу стану проблеми визначення залишкового ресурсу пневматичних електромагнітних клапанів (ПЕК). Пневматичні електромагнітні клапани використовуються у багатьох галузях промисловості як цивільного, так і критичного призначення, тому розрахунки залишкового ресурсу мають велике значення для прогнозування термінів експлуатації ПЕК. У статті проаналізовані основні галузі використання, зазначено коло науковців, які займаються різними питаннями відносно пневматичних електромагнітних клапанів, у тому числі і питаннями збільшення ресурсу ПЕК. Встановлено, що строк служби пневматичних електромагнітних клапанів залежить від ступеня та кількості навантажень, тривалості використання, наявності первинних дефектів, стійкості до різних зовнішніх впливів, таких як температура, вологість та корозія. Досліджено, що розрахунки залишкового ресурсу ПЕК базуються на проведенні лабораторних випробувань на руйнацію та витривалість, що дозволяє розробляти рекомендації для збільшення експлуатаційного ресурсу ПЕК. Але ці підходи не враховують випадкову природу деградаційних процесів. Тому більш ефективним методом розрахунку залишкового ресурсу пневматичних електромагнітних клапанів є ймовірно-фізичний метод з ДМ-розподілом деградаційного ресурсу. Відповідно до однієї з методик ДСТУ 8646:2016, маючи дані про кількість циклів роботи клапанів, при яких відмови відсутні, та дані про кількість циклів роботи клапанів, при якій настає критичне руйнування, проведено розрахунок залишкового ресурсу ПЕК. Розрахунок залишкового ресурсу пневматичних електромагнітних клапанів ймовірно-фізичним методом дав результати, співмірні з реальними даними експлуатації. На прогнозування та оцінку залишкового ресурсу пневматичних електромагнітних клапанів також суттєво впливають якість виготовлення, оптимізація конструктивних особливостей, своєчасна та якісна статистика дефектів ПЕК.

**Ключові слова:** залишковий ресурс пневматичних електромагнітних клапанів, ймовірно-фізичний підхід, ДМ-розподіл відмов, прогнозування подовження ресурсу.

**Abstract.** The article is devoted to the analysis of the state of the problem of determining the residual resource of pneumatic electromagnetic valves (PEV). Such valves are used in many branches of industry, both for civil and critical purposes, and therefore, the calculation of the residual resource is of great importance for predicting their service life. The article analyzes the main areas of application and indicates a circle of scientists who deal with various issues related to pneumatic electromagnetic valves, including the problems of increasing the PEV resource. It has been established that the service life of PEV depends on the degree and number of loads, the duration of use, the presence of primary defects, and resistance to various external influences such as temperature, humidity, and corrosion. It has been investigated that the calculations of the residual life of PEV are based on conducting laboratory tests for destruction and durability, which allows for the development of recommendations for increasing the operational life of PEV. However, these approaches do not take into account the random nature of degradation processes. Therefore, a more effective method of calculating the residual life of pneumatic electromagnetic valves is the probabilistic physical method with DM-distribution of the degradation resource. According to one of the methods of DSTU 8646:2016, having data on the number of valve operation cycles in which there are no failures and data on the number of valve operation cycles in which critical destruction occurs, the calculation of the residual resource of PEV was carried out. Using for that the probabilistic-physical method gave results commensurate with real operating data. The quality of manufacturing, optimization of design features, and timely and high-quality statistics of PEV defects also significantly affect the forecasting and assessment of the remaining service life of pneumatic electromagnetic valves.

**Keywords:** residual life of pneumatic electromagnetic valves, probabilistic-physical approach, DM-distribution of failures, prediction of life extension.

DOI: 10.34121/1028-9763-2024-3-4-132-138

## 1. Вступ

Пневматичні електромагнітні клапани (ПЕК) мають широке використання у багатьох галузях промисловості, сферах діяльності та інженерних системах. Це і автоматизація процесів, і використання у системах контролю тиску і потоку повітря, газів, води тощо, у системах подачі палива, у системах обладнання авіакосмічної техніки, у гальмівних системах. Згідно з останніми звітами, світовий ринок пневматичних електромагнітних клапанів оцінюється у кілька мільярдів доларів і продовжує зростати зі швидкістю приблизно 5–7 % на рік. Найвищий попит на клапани спостерігається в Європі та Азії через високий рівень промислової автоматизації в цих регіонах. У останні роки підвищився інтерес до клапанів із поліпшеною енергоефективністю та інтеграцією в системи інтернету речей (IoT). Електромагнітні клапани забезпечують точне та швидке керування потоками. Ці клапани мають довгий термін служби і високу стійкість до зносу. Клапани з поліпшеною енергоефективністю дозволяють зменшити енергоспоживання.

Пневматичні електромагнітні клапани є незамінними в багатьох галузях завдяки своїм унікальним характеристикам, тому прогнозування та визначення залишкового ресурсу подовження терміну експлуатації має велике значення для промисловості.

*Мета статті* — дослідження новітніх методів визначення залишкового ресурсу пневматичних електромагнітних клапанів, аналіз можливості використання ймовірно-фізичних методів прогнозування та подовження терміну експлуатації.

## 2. Стан проблеми та аналіз останніх досліджень

Пневматичні електромагнітні клапани (ПЕК) використовуються в різних галузях промисловості та сферах діяльності. Основними сферами їх використання є:

### *Промисловість*

Автоматизація виробничих процесів: включення і виключення подачі повітря для різних виконавчих механізмів, таких як пневматичні циліндри і двигуни.

Контроль тиску і потоку повітря: використовуються в системах контролю для підтримки потрібного тиску і потоку у трубопроводах.

Пакувальні машини: забезпечують точне управління пневматичними компонентами для пакування продуктів.

### *Автомобільна промисловість*

Гальмівні системи: у деяких системах, особливо в комерційних транспортних засобах.

Системи пневматичних підвісок: регулюють висоту і жорсткість підвіски для забезпечення комфортного водіння.

### *Медицина*

*Медичне обладнання:* Контроль подачі газів у системах вентиляції легень на іншому медичному обладнанні.

### *Водопостачання і водовідведення*

Контроль подачі води: використовуються для управління подачею води в різних системах водопостачання та очищення води.

## *Харчова промисловість*

Обробка продуктів харчування: контролюють подачу повітря в різних машинах для обробки харчових продуктів, таких як змішувачі, дозатори, пакувальники.

## *Енергетика*

Системи подачі палива і повітря: у котлах і турбінах для точного регулювання подачі повітря і палива.

## *Авіаційна промисловість*

Системи керування повітрям: контроль і регулювання тиску повітря в різних системах літака.

## *Транспорт*

Залізничний транспорт: контроль пневматичних систем гальмування і інших виконавчих механізмів.

## *Наукові дослідження*

Лабораторні установки: використовуються для точного управління подачею повітря або інших газів в експериментальних установках.

Пневматичні електромагнітні клапани завдяки своїй надійності та точності забезпечують ефективне управління пневматичними системами, що робить їх незамінними в багатьох сферах.

Прогнозування надійності та гарантоздатності пневматичних електромагнітних клапанів є важливим аспектом для забезпечення їх довготривалої та безвідмовної роботи. Це питання активно досліджується в наукових колах та індустріальних лабораторіях. Основні напрями досліджень включають:

1. Аналіз відмов і їх причин:
  - Збір та аналіз даних про відмови: вивчаються реальні випадки відмов клапанів в умовах експлуатації.
  - Визначення основних факторів, що впливають на надійність: розглядаються різні умови експлуатації, матеріали, якість виготовлення та зовнішні впливи.
2. Моделювання надійності:
  - Статистичні методи: використання методів математичної статистики для побудови моделей на основі зібраних даних про відмови.
  - Методи Монте-Карло: імітаційне моделювання для прогнозування ймовірності відмов.
  - Моделювання за допомогою машинного навчання: використання алгоритмів машинного навчання для виявлення закономірностей і побудови прогнозних моделей надійності.
3. Тестування та експериментальні дослідження:
  - Лабораторні випробування: проведення тестів на зносостійкість, витривалість та стійкість до різних умов експлуатації.
  - Умови прискореного старіння: використання методів, які прискорюють процеси зносу, щоб швидше отримати дані про можливі відмови.
4. Прогнозування залишкового ресурсу:
  - Застосування математичних моделей для оцінки залишкового ресурсу на основі зібраних даних.
  - Використання методів машинного навчання для підвищення точності прогнозів.
5. Інженерні підходи до підвищення надійності:

- Оптимізація конструкції: зміна конструктивних особливостей клапанів для зменшення ймовірності відмов.
- Покращення матеріалів: використання більш витривалих і зносостійких матеріалів.
- Підвищення якості виготовлення: застосування більш жорстких методів контролю якості під час виробництва.

6. Прогнозування на основі моніторингу стану:

- Використання сенсорів для моніторингу: встановлення датчиків для постійного відстеження стану клапанів (температура, тиск, вібрація).
- Методи аналізу вібрації та акустичної емісії: використання даних вібраційного і акустичного моніторингу для прогнозування відмов.

7. Системи управління технічним обслуговуванням:

- Прогнозне обслуговування: застосування методів прогнозування для планування технічного обслуговування до настання відмов.
- Системи автоматизованого моніторингу: використання інтернету речей (IoT) для збору та аналізу даних про стан клапанів у реальному часі.
- Оптимізація графіків технічного обслуговування для мінімізації простоїв і витрат.

Дослідження в цій області дозволяють не лише зрозуміти причини і механізми відмов пневматичних електромагнітних клапанів, а й розробити ефективні методи для їх прогнозування та запобігання. Це сприяє підвищенню надійності та ефективності роботи обладнання, де вони застосовуються.

Світовою тенденцією в розвитку сучасних пневматичних електромагнітних клапанів є розширення функціональних можливостей та необхідність суттєвого підвищення їх ресурсу.

У галузі дослідження прогнозування надійності пневматичних електромагнітних клапанів працюють науковці як в Україні, так і в інших країнах світу.

Наукові принципи проєктування, типи та визначення загальних параметрів електромагнітних клапанів (ЕМК) викладені у роботах Гуревича Д.Ф., Кіселя В.Л., Кармугіна Б.В., J. Dixon, A. Пржиалковського [1]. Так, Гуревич Д.Ф. у своїх роботах про електромагнітні клапани детально описує конструкції, принципи роботи та застосування трубопровідної арматури з автоматичним управлінням. Він розглядає класифікацію та область застосування електромагнітних приводів, блочні та герметичні приводи, а також специфіку використання різних типів клапанів у гідравлічних і пневматичних системах [1]. Основна увага приділяється підбору і розрахунку параметрів для забезпечення надійної роботи систем. В. Кісель у своїх роботах про ЕМК, окрім конструкції, принципів роботи, використання, детально розглядає різні типи електромагнітних клапанів, включаючи їх класифікацію за матеріалом (латунні, нержавіючі, алюмінієві з анодним покриттям, пластикові з PPS) і типом виконання (нормально закриті, нормально відкриті). Роботи J. Dixon також присвячені опису принципів роботи, типів та застосування електромагнітних клапанів. Він розглядає функціонування електромагнітних напрямних клапанів, які використовуються для контролю напрямку потоку рідин у гідравлічних і пневматичних системах [1]. Основні типи — це соленоїдні, пілотні та пропорційні клапани. Ці клапани знаходять застосування у промисловій автоматизації, мобільному обладнанні, системах керування процесами та автомобільних системах, забезпечуючи точне регулювання руху і продуктивності.

Розробкам моделей накоплення руйнувань у задачах довговічності присвячені роботи Переверзева Е.С. Математичні моделі функціонування клапанів з електромагнітним приводом у цілому описані в роботах Кіселя В.Л. Із фізико-математичними дослідженнями динамічного руйнування конструкційних матеріалів при надінтенсивних ударних навантаженнях можна ознайомитись у роботах Хорева І.Є. [1].

Група науковців із Національного авіаційного університету України — Зайончковський Г.Й., Ситніков О.Є., Рикуніч Ю.М., Барилюк Є.І. та ін. — працюють над прогнозуванням технічного стану та подовження ресурсу електромагнітних клапанів для виробів авіакосмічної техніки. Також вони проводять стендові моделювання експлуатаційних змін в ЕМК, експериментальні дослідження атомної міцності стержневих елементів електромагнітних клапанів, розробку шляхів забезпечення запасів працездатності ЕМК на етапах проектування. Деякі роботи присвячені питанню збільшення ресурсу та підвищення експлуатаційної надійності малогабаритних пневматичних клапанів [1].

### 3. Постановка задачі

Дослідження у сфері подовження ресурсу пневматичних електромагнітних клапанів пов'язані з проведенням лабораторних випробувань на руйнацію та витривалість. Дослідження витривалості пневматичних електромагнітних клапанів з виявленими пошкодженнями під час випробувань дозволяють детально розібратися у процесах утворення та розвитку дефектів. За цими даними розробляють певні рекомендації для збільшення експлуатаційного ресурсу пневматичних електромагнітних клапанів. Але ці методи не враховують імовірнісність (випадковість) процесів деградації та руйнування.

Пневматичні електромагнітні клапани (ПЕК) отримали широке застосування, наприклад, у системах обладнання авіакосмічної техніки завдяки низькому рівню енергоспоживання, необхідного для їх тривалої роботи. Вони використовуються для захисту пневмосистем від надлишкового тиску, регулювання витрат робочого середовища (рідин, газів, повітря), зниження тиску та підтримання його на необхідному рівні, а також для контролю над потоками робочого середовища [1]. Однією з характеристик функціонування пневматичних електромагнітних клапанів є циклічний режим роботи з ударним контактом між рухомими і нерухомими частинами системи. Це призводить до того, що в зоні контакту деталі клапана піддаються впливу інтенсивних динамічних навантажень, що призводить до значних динамічних напружень у матеріалі цих деталей. Такий тип навантаження сприяє виникненню різних процесів втомі в частинах конструкції клапана, що істотно знижує його термін служби [2].

Сучасні дослідження визначення залишкового ресурсу різних типів механічних об'єктів показують, що найбільш ефективними є ймовірно-фізичні методи. Ці методи враховують динаміку зміни визначального параметра та надають достовірні дані при оцінці виробів, показують справжність природи руйнування та деградації, що дає можливість прогнозувати час досягнення їх граничних (критичних) значень [3].

### 4. Ймовірно-фізичний метод розрахунку залишкового ресурсу

Своєчасний контроль стану пневматичних електромагнітних клапанів, розрахунок залишкового ресурсу дозволяють виявити й усунути потенційні проблеми до того, як вони призведуть до збоїв у роботі системи. Відповідно до однієї з методик ДСТУ 8646:2016, маючи дані про кількість циклів роботи клапанів, при якій відмови відсутні, та дані про кількість циклів роботи клапанів, при якій настає критичне руйнування, можна розрахувати залишковий ресурс цих клапанів та використовувати їх ще певний час.

*Приклад розрахунку залишкового ресурсу пневматичних електромагнітних клапанів за вхідними даними з експлуатації в авіакосмічній техніці*

Розрахувати середній залишковий ресурс  $\pi(\tau)$  пневматичного електромагнітного клапана (ПЕК) у кількості  $N=1$  шт. з довірчою вірогідністю  $q=0,95$  на момент напрацювання, рівного  $\tau=30\ 000$  циклів (відмови, руйнування відсутні). За статистичними даними з експлуатації ПЕК руйнування відбуваються у діапазоні від 40 000 до 600 000 циклів роботи.

## Рішення

Середній залишковий ресурс  $\pi(\tau)$  пневматичного електромагнітного клапана проводимо згідно з методикою ДСТУ 8646. За апіорною інформацією, основними процесами руйнування ПЕК, що викликають відмови, є знос і малоциклова втома (контактна і об'ємна). Тому як теоретичну модель розподілу ресурсу пневматичного електромагнітного клапана приймаємо *DM*-розподіл [3].

Відповідно до рекомендацій ДСТУ 8646 відносно механічних об'єктів, приймають оцінку коефіцієнта варіації  $\tilde{\nu} = 0,5$  та верхнього значення коефіцієнта варіації  $\bar{\nu} = 0,7$ .

1. Обчислюємо нижню межу емпіричної вірогідності відсутності відмови за результатами випробувань (експлуатації) [3] за формулою

$$\underline{P}(t_u) = \left( \frac{1-q}{2} \right)^{1/N} = 0,025.$$

2. Використовуючи таблицю Б.1 Додатка Б ДСТУ 8646, визначаємо квантиль нормального розподілу  $U_P$ , що відповідає вірогідності  $\underline{P} = 0,025$  та  $\bar{\nu} = 0,7$ .

$$U_P = -1,96.$$

3. Визначаємо поправочний коефіцієнт  $K_1(\underline{P}, \bar{\nu})$  за значеннями  $\underline{P} = 0,025$  і  $\bar{\nu} = 0,7$  з табл. Б.2 Додатка Б ДСТУ 8646 або відповідно до рекомендацій ДСТУ 8646 обчислюємо за формулою, де  $U_P = -1,96$ .

$$K_1(\underline{P}, \bar{\nu}) = \left( 1 + \frac{\bar{\nu}^2 U_P^2}{2} + \bar{\nu} U_P \sqrt{1 + \frac{\bar{\nu}^2 U_P^2}{4}} \right) = 0,277.$$

4. Визначаємо поправочний коефіцієнт  $K_2(q, \tilde{\nu})$ , використовуючи табл. Б.3 Додатка Б ДСТУ 8646 ( $q = 0,95$ ;  $\tilde{\nu} = 0,5$ ), або, відповідно до рекомендацій ДСТУ 8646, обчислюємо за формулою, де  $U_q = 1,645$  (табл. Б.1):

$$K_2(q, \tilde{\nu}) = \left( 1 + \frac{\tilde{\nu}^2 U_q^2}{2} + \tilde{\nu} U_q \sqrt{1 + \frac{\tilde{\nu}^2 U_q^2}{4}} \right) = 2,2276.$$

5. Обчислюємо оцінку параметра масштабу *DM*-розподілу так:

$$\tilde{\mu} = t_u \cdot K_1(\underline{P}, \bar{\nu}) \cdot K_2(q, \tilde{\nu}) = 30000 \cdot 0,2774 \cdot 2,2276 = 18538 \text{ циклів.}$$

6. Обчислюємо середній залишковий ресурс, використовуючи формулу з ДСТУ 8646:

$$\tilde{\pi}(\tau) = \frac{\left[ \tilde{\mu} \left( 1 + \frac{\tilde{\nu}^2}{2} \right) - \tau \right] \Phi \left( \frac{\tilde{\mu} - \tau}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} \tau}} \right) + \frac{\tilde{\mu} \tilde{\nu}^2}{2} e^{2\tilde{\nu}^2} \Phi \left( -\frac{\tilde{\mu} + \tau}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} \tau}} \right) + \frac{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} \tau}}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau - \tilde{\mu})^2}{2\tilde{\nu}^2 \tilde{\mu} \tau}}}{\Phi \left( \frac{\tilde{\mu} - \tau}{\tilde{\nu} \sqrt{\tilde{\mu} \tau}} \right)} = 9383 \text{ циклів.}$$

Розрахунок залишкового ресурсу пневматичних електромагнітних клапанів імовірно-фізичним методом дав результат у 9 383 цикли додаткової експлуатації ПЕК. Згідно зі статистичними даними, руйнівні відмови наступають після 40 000 циклів експлуатації

(30 000+9 383=39 383 цикли). Результат розрахунку співпадає з реальними даними відмов, тому наведений підхід можна рекомендувати для розрахунків та прогнозування залишкового ресурсу пневматичних електромагнітних клапанів.

## 5. Висновки

Пневматичні електромагнітні клапани використовуються в багатьох галузях промисловості у системах управління потоками повітря, газів та інших параметрів середовища. Стан ПЕК обумовлений ступенем та кількістю навантажень, тривалістю використання, наявністю первинних дефектів, стійкістю до різних зовнішніх впливів (температура, вологість, корозія), якістю матеріалу, з якого їх виготовляють. Ці фактори значно впливають на строк служби ПЕК. Тому питанням підвищення якості виготовлення, оптимізації конструктивних особливостей, якісному моніторингу дефектів, прогнозування та оцінці залишкового ресурсу приділяється багато уваги.

Приклад розрахунку залишкового ресурсу ймовірно-фізичним методом, використовуючи дані про кількість циклів роботи пневматичних електромагнітних клапанів, показав результат, співмірний зі статистичними даними експлуатації. Метод оцінки, наведений у роботі, можна застосовувати у розрахунках залишкового ресурсу різних видів пневматичних електромагнітних клапанів. Використання методу з *DM*-розподілом відмов, який враховує випадковість (невизначеність) у процесах руйнування та деградації, дозволяє прогнозувати довговічність і точно оцінювати залишковий ресурс. Також метод сприяє скороченню витрат на експлуатацію, зменшенню витрат на обслуговування та ремонт.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Барилюк Є.І. Підвищення ресурсу пневматичних електромагнітних клапанів шляхом введення демпфірування в рухому систему електромагнітного приводу клапана: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. Київ, 2016. 217 с.
2. Рикуніч Ю.М., Зайончковський Г.Й., Кучер О.Г., Ситніков О.Є. Прогнозування втомленості елементів конструкції електромагнітних клапанів при циклічному та імпульсному навантаженнях. *Вісник Сум ДУ*. 2003. № 13 (59). С. 38–47.
3. ДСТУ 8646:2016. Надійність техніки. Оцінювання та прогнозування залишкового ресурсу (терміни служби) технічних систем. URL: [http://www.immsp.kiev.ua/activity/Napriam%20Standarty/Standart\\_Zalyshkovij\\_resurs.pdf](http://www.immsp.kiev.ua/activity/Napriam%20Standarty/Standart_Zalyshkovij_resurs.pdf).

*Стаття надійшла до редакції 26.08.2024*