

УДК 621.646.986

- Моргалюк О. Л.** студент 4 курсу факультету ракетно-космічної техніки Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: morhaliuk@gmail.com;
- Лоян А. В.** канд. техн. наук, с.н.с кафедри 402 Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: a.loyan@khai.edu;
- Титов М. Ю.** канд. техн. наук, інженер кафедри 402 Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

## ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО КЛАПАНА

*Проведено розрахунок магнітної системи електромагнітного клапана. Експериментально підтверджена коректність розрахункової моделі. За допомогою факторного експерименту досліджено вплив зміни товщин стінок окремих елементів конструкції на час відкриття клапану. Побудована математична модель, яка описує залежність часу відкриття клапану від значення геометричних параметрів окремих елементів конструкції. На основі отриманої моделі проведена оптимізація конструкції, внаслідок чого зменшено час відкриття клапану. Крім того розглянуто можливість зменшення маси клапана.*

**Ключові слова:** електромагнітний клапан, оптимізація, факторний експеримент.

### Вступ

Електромагнітний клапан (ЕМК) – електромеханічний пристрій, який використовується для перекриття/відкриття потоку робочого тіла (рідини чи газу) трубопроводом. В основі роботи ЕМК лежить соленоїдна котушка, при подачі струму на яку осердя втягується всередину, і залежно від виконання (нормально закритий або відкритий) відкриває або закриває пропускний отвір.

В лабораторії ХАІ активно ведуться розробки ЕМК для систем збереження та подачі робочого тіла в електрореактивних русійних установках.

Розроблюваний клапан має наступні характеристики:

- тип – нормально закритий;
- номінальна напруга –  $27_{-5}^{+4}$  В;
- мінімальна напруга утримання – 7 В;
- перепад тиску до 70 атм.

Метою даної роботи є збільшення швидкості спрацювання ЕМК за рахунок оптимізації конструкції.

### 1. Постановка задачі

Ця робота є продовженням роботи [1], в якій приведена схема клапана, принцип його роботи та основні характеристики. Представлено опис чисельної моделі магнітної системи клапана – магнітних властивостей елементів, сил, діючих на рухомі елементи клапана, закон електроживлення. Де результатами розрахунку є закони зміни сили притягання якоря до статора з часом, переміщення якоря з часом.

В даній роботі передбачається виконати наступні задачі:

- дослідити кінцево-елементну модель ЕМК та підібрати оптимальні параметри сітки кінцевих елементів;

- зрівняти дані отримані чисельним розрахунком та експериментально, для перевірки достовірності моделі ЕМК;

- дослідити вплив геометричних параметрів на час відкриття клапану, та визначити параметри, що мають значний вплив;

- провести факторний експеримент на основі визначених параметрів та побудувати математичну модель, що описує залежність часу відкриття клапану від геометричних параметрів;

- оптимізувати математичну модель та визначити такі значення геометричних параметрів, при яких час відкриття клапану мінімальний.

### 2. Дослідження сітки кінцево-елементної моделі ЕМК

Чисельний розрахунок ЕМК виконується в пакеті для чисельного моделювання ANSYS Maxwell. В процесі розрахунку розрахункова область розбивається та окремі елементи, сукупність цих елементів називають сіткою кінцевих елементів.

При послідовному зменшенні розміру елементів сітки розрахункове значення часу спрацювання сходиться до деякого стабільного значення, яке майже не змінюється при подальшому подрібненню сітки (рис. 1). З іншого боку, очевидно, що при подрібненні сітки кількість елементів збільшується і зростає час затриваний на розрахунок (рис. 1). Тому необхідно

підібрати сітку, яка задовольнить як точність так і час затрачуваний на розрахунок.

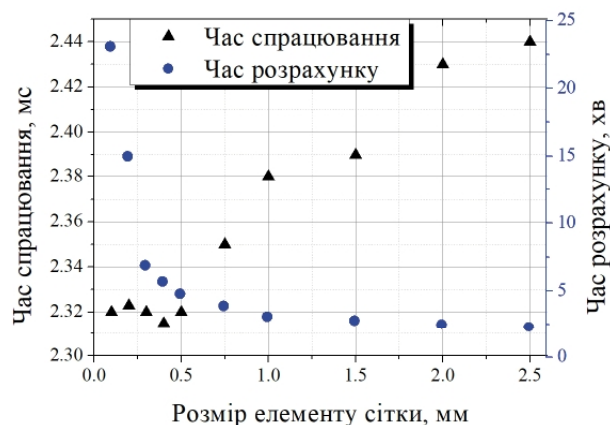
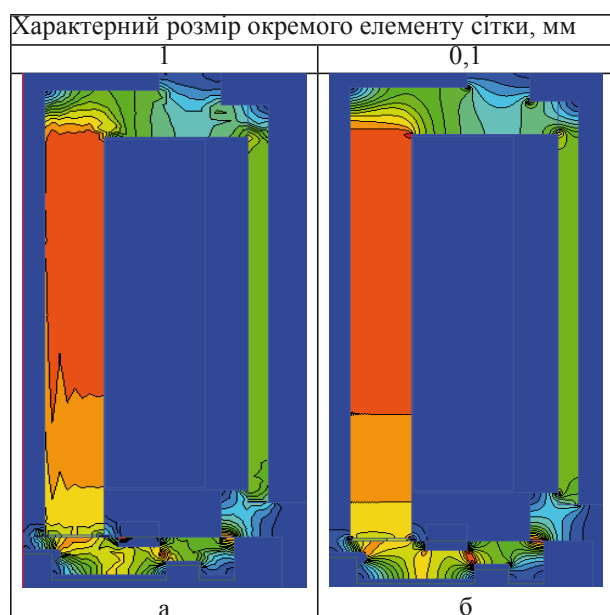


Рис. 1. Залежність часу спрацювання та часу розрахунку від розміру елемента сітки

Про якість моделі також свідчить розподіл індуктивності магнітного поля. Як бачимо (табл. 1а), при сітці з розміром елемента 1 мм, спостерігаються нерівномірні перепади індуктивності, ізолінії не плавні, мають різкі переломи, піки, що не характерно для розподілу магнітного поля. При зменшенні розміру сітки до 0,1 мм (табл. 1б) ізолінії вирівнюються, стають плавними, що відповідає природі магнітного поля. Проте, як бачимо з рис. 1 при такому розмірі сітки значно зростає час, затрачуваний на розрахунок.

Таблиця 1. Розподіл індуктивності магнітного поля при різних розмірах елементів сітки



Варто взяти до уваги також те, що для елементів складної конфігурації, або в областях де відбуваються динамічні процеси бажано мати досить дрібну сітку, оскільки в цих областях

порівняно високий градієнт магнітного поля. Тому для всіх елементів клапана крім якоря та області його переміщення для наступних розрахунків розмір елементів сітки прийнято рівний 0,2 мм, а для якоря та області в якій він переміщується – 0,05 мм.

### 3. Верифікація

Проведено верифікацію моделі шляхом порівняння значень сили магнітного притягання якоря до статора отриманих експериментальним та розрахунковим методами.

Експеримент проводився наступним чином. До якоря реальної конструкції по черзі підвищувалися вантажі різної маси, як показано на рис. 2. Для імітації закритого стану клапана використовувалася прокладка, товщиною рівній величині ходу якоря. Якір встановлювався по центру за допомогою центральної втулки. На соленоїд подавався струм достатньої сили для утримання вантажу в підвішеному стані. Потім сила струму поступово зменшувалась, до моменту, коли магнітна сила притягання ставала меншою ніж вага підвішеного тягарця і він відривався. В цей час фіксувалися значення струму для кожного з тягарців. Аналогічний процес було змодельовано за допомогою створеної кінцево-елементної моделі.

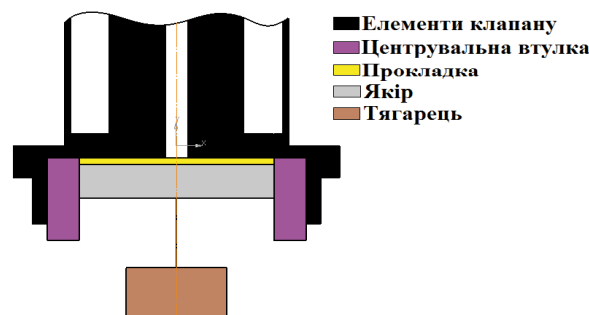


Рис. 2. Схема експерименту

Результати отримані експериментальним та розрахунковим способами приведені на рис. 3.

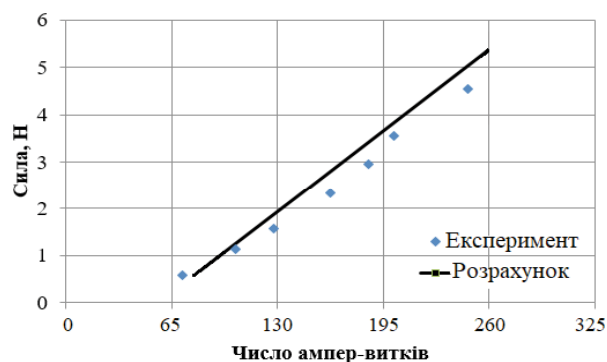


Рис. 3. Залежності максимального значення магнітної сили в закритому стані від числа ампер-витків, отримані експериментально і теоретично

Максимальна різниця ними складає 10%, ця похибка є допустимою, вона пов'язана з неможливістю ідеального відтворення реального об'єкту в моделі, внаслідок наступних факторів:

- невизначеність властивостей матеріалів, спричинена тим, що в реальних металах завжди наявна деяка кількість домішок, певні дефекти структури, внаслідок чого характеристики окремих зразків дещо відрізняються від ідеальних, що використовуються в кінцево-елементній моделі;

- *розрахункова похибка*, викликана переходом від нескінченно малих до скінченних величин кінцевих елементів;

- *шорсткість поверхні* не дозволяє досягти ідеального контакту між елементами конструкції, в той час як в кінцево-елементній моделі контакт вважається ідеальним;

- *похибка вимірювання*.

#### 4. Дослідження впливу геометричних параметрів на характеристики ЕМК

В роботах [1, 2] виявлено можливості покращення характеристик клапана. По-перше, деякі геометричні параметри мають оптимальне значення з точки зору максимуму швидкості спрацювання клапана. По-друге, більшість елементів магнітної системи не знаходиться в стані магнітного насичення, що дозволяє знизити масу клапана за рахунок зменшення товщин елементів конструкції.

Зрозуміло, що різні параметри мають різний ступінь впливу на характеристики клапана. Для визначення значимих та відсіювання мало-значущих параметрів, проведено розрахунки магнітної системи клапана зі зміною окремо кожного з параметрів, указаних на рис. 4.

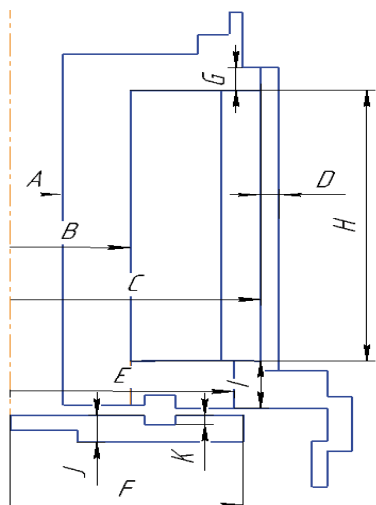


Рис. 4. Основні геометричні параметри ЕМК

Параметри варіювалися на двох рівнях. Результати розрахунків приведені на рис. 5. Зна-

чушими вибрано ті параметри, зміна яких на 10% призводить до зміни часу відкриття клапану більше ніж на 7%, такими є 3 параметри:

- зовнішній діаметр осердя (B);
- діаметр, який визначає ширину повітряного зазору (E);
- діаметр якоря (F).

Варто відмітити, що параметр H, який відображає довжину клапану, порівняно слабо впливає на час спрацювання. Це дає можливість зменшити габарити і масу клапана.

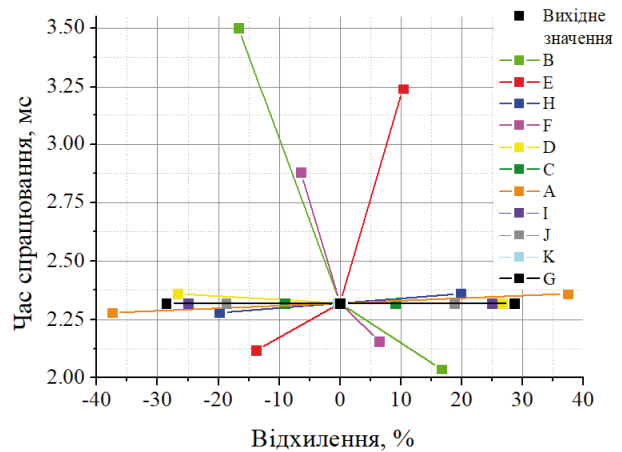


Рис. 5. Вплив геометричних параметрів на час спрацювання

Як видно з рис. 6 на масу впливають практично всі вибрані параметри. Крім того при збільшенні B, F час спрацювання зменшується, а маса – збільшується, тому необхідно визначити оптимальні значення цих параметрів, які задовольняють нас за часом і за масою.

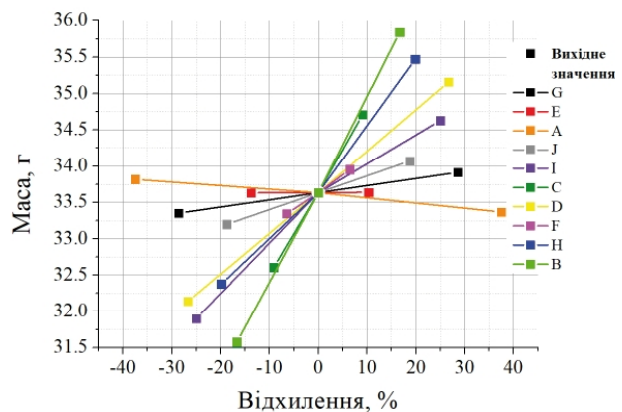


Рис. 6. Вплив геометричних параметрів на масу

Для визначення оптимальних значень параметрів B, E, F, які забезпечують мінімальний час відкриття клапану, за допомогою факторного експерименту, побудована математична модель, яка описує залежність часу спрацювання від значень цих параметрів.

### 5. Факторний експеримент

Для проведення факторного експерименту вибрано ортогональний центральний композиційний план другого порядку. Перевагою цього плану є те, що він дозволяє зменшити кількість дослідів необхідних для побудови математичної моделі. Так, для плану другого порядку необхідно варіювати параметри як мінімум на трьох рівнях, тоді при трьох факторах (В, Е, F) необхідно виконати  $p^k = 3^2 = 27$  дослідів, де  $p$  – число рівнів варіювання;  $k$  – число факторів. Композиційний план дозволяє зменшити число дослідів шляхом використання спеціальним чином підібраних «зоряних точок», вони забезпечують ортогональність плану.

Загальна кількість дослідів центральних ортогональних композиційних планів визначається наступною формулою:

$$N = N_1 + 2k + n_0, \quad (1)$$

де  $N_1$  – число дослідів у ядрі плану ( $N_1 = 2^k$ , якщо ядром плану є повний факторний експеримент);

$2k$  – число зоряних точок;

$k$  – число факторів;

$n_0$  – число дослідів у центрі плану.

Таким чином було проведено  $2^3 + 2 \cdot 3 + 1 = 15$  дослідів.

В результаті отримано наступний поліном другого порядку:

$$t = 2.115 - 0.474X_1 + 0.508X_2 - 0.497X_3 - 0.018X_1X_2 + 0.023X_1X_3 - 0.505X_2X_3 + 0.262X_1^2 + 0.237X_2^2 + 0.196X_3^2 \quad (2)$$

де  $t$  – час відкриття клапану;

$X_1$  – параметр В;

$X_2$  – параметр Е;

$X_3$  – параметр F.

Максимальна розбіжність між значеннями часу відкриття клапану отриманими з використанням поліному та кінцево-елементної моделі складає 10%. Середнє арифметичне значення розбіжності, за 15 дослідів, складає 4.3%. Отриманої точності достатньо для оптимізації.

Оптимізація була проведена в програмі MATLAB за допомогою генетичного алгоритму. При реалізації пошуку генетичний алгоритм обробляє одночасно декілька точок області визначення функції, а не переходить від точки до точки як в традиційних методах. Тому він є ефективним в задачах, де треба знайти глобальний оптимум.

Таким чином, визначено оптимальні значення геометричних параметрів. Час відкриття клапана з оптимальною конструкцією становить 1,87 мс, що на 20% менше ніж клапана-прототипа.

### Висновки

В роботі представлено результати дослідження зміни часу відкриття електромагнітного клапану зі зміною товщин стінок його елементів. Встановлено геометричні параметри, які найбільшим чином впливають на час відкриття клапану. Була проведена оптимізація конструкції магнітної системи клапану, в результаті якої час спрацювання зменшено на 20%.

### Література

1. Титов М. Ю. Расчет электромагнитного клапана средствами численного моделирования [Текст] / М. Ю. Титов, А. В. Лоян, Е. И. Ищенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 7 (142). – С. 90 – 95.
2. Моргалюк О. Л. Расчет магнитной системы электромагнитного клапана [Текст] / О. Л. Моргалюк, М. Ю. Титов, А. В. Лоян // Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ'2017: матеріали Всеукр. наук.-техн. конф., Харків, 31 жовт. – 3 листоп. 2017 р. – X., 2017. – С. 230.
3. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов [Текст] / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М.: София: Техника, 1980. – 304 с.
4. ANSYS Maxwell V16 Training Manual - Lecture 3: Static Magnetic Solvers [Електронний ресурс] / Режим доступа : [http://ansoft-maxwell.parod.ru/en/Maxwell\\_v16\\_L03\\_Static\\_Magnetic\\_Solvers.pdf](http://ansoft-maxwell.parod.ru/en/Maxwell_v16_L03_Static_Magnetic_Solvers.pdf). – 01.06.2017 г.

Надійшла до редакції 26.07.2018



**О. Л. Моргалюк, М. Ю. Титов, А. В. Лоян. Оптимизация конструкции электромагнитного клапана**

*Проведен расчет магнитной системы электромагнитного клапана. Экспериментально подтверждена корректность расчетной модели. С помощью факторного эксперимента исследовано влияние изменения толщин стенок отдельных элементов конструкции на время открытия клапана. Построена математическая модель, описывающая зависимость времени открытия клапана от значения геометрических параметров элементов конструкции. На основе полученной модели проведена оптимизация конструкции, в следствии чего уменьшено время открытия клапана. Кроме того, рассмотрена возможность уменьшения массы клапана.*

**Ключевые слова:** электромагнитный клапан, оптимизация, факторный эксперимент.

**O. L. Morhaliuk, M. Yu. Titov, A. V. Loyan. Solenoid valve design optimisation**

*The paper represents the results of the solenoid valve optimization as well as steps, taken to complete the task, which are described below. The magnetic system of the solenoid valve was calculated by means of electromagnetic field simulation software – ANSYS Maxwell. An optimal element size of the finite element grid, which ensures the necessary accuracy and a satisfactory calculation time was selected.*

*To confirm the correctness of the finite element model, an experiment with a real solenoid valve was performed, in which the magnetic attraction force of the armature to the stator was determined. Obtained experimental data were compared with the data calculated on the finite element model. The maximum difference between these data is 10%, which is permissible in this case due to different types of errors. In this way the validity of the computational model of the solenoid valve is proved.*

*By performing calculations, each time changing value of separate geometrical parameter, the influence of each individual parameter on the duration of the valve opening time is determined. Identified significant and weakly significant parameters. As weakly significant parameters were chosen such, that change of 10% leads to a change in valve opening time less than 7%. These parameters were neglected for further calculations. Respectively, as significant parameters were chosen such, that change in 10% leads to a change in valve opening time more than 7%. Significant parameters was used to carry out a factor experiment according to the orthogonal central compositional plan of the second order, with the help of which obtained a polynomial of the second degree, which describes the dependence of the valve opening time on the value of each of the chosen geometric parameters.*

*By determining the optimum of the obtained polynomial, the values of the geometric parameters, which ensure the minimum value of the valve opening time, are determined. As a result, the valve opening time reduced by twenty percent. In addition, the possibility of reducing the weight of the valve by reducing the wall thickness of the elements of the structure is considered.*

**Key words:** solenoid valve, optimization, factorial experiment.

**References**

1. Titov M. Yu. Raschet e'lektromagnitnogo klapana sredstvami chislennogo modelirovaniya [Tekst] / M. Yu. Titov, A. V. Loyan, E. I. Ishhenko // Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. – 2017. – № 7 (142). – S. 90 – 95.

2. Morgalyuk O. L. Raschet magnitnoj sistemy e'lektromagnitnogo klapana [Tekst] / O. L. Morgalyuk, M. Yu. Titov, A. V. Loyan // Intehrovani kompiuterni tekhnolohii v mashynobuduvanni IKTM2017: materialy Vseukr.nauk.-tekhn.

konf., Kharkiv, 31 zhovt.– 3 lystop. 2017 r. – Kh., 2017. – S. 230.

3. Novik F. S. Optimizaciya processov tekhnologii metallov metodami planirovaniya eksperimentov [Tekst] / F. S. Novik, YA. B. Arsov. – M.: Sofiya: Tekhnika, 1980. – 304 s.

4. ANSYS Maxwell V16 Training Manual - Lecture 3: Static Magnetic Solvers. Available at: [http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell\\_v16\\_L03\\_Static\\_Magnetic\\_Solvers.pdf](http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell_v16_L03_Static_Magnetic_Solvers.pdf) (accessed 01.06.2017).