

**Визначення режимів оброблення.**

Чеканку впадин шліців проводимо за один прохід на дві одночасно оброблювані впадини шліців. Не слід використовувати зворотний хід як робочий хід, тому що повторні проходи у протилежних напрямках можуть призвести до зайвого деформування поверхневого шару, крім того, робочий профіль роликів призначений для роботи тільки в один бік. Швидкість не впливає на якість оброблення та знаходиться в межах 30...150 м/хв. Приймали  $V = 120$  м/хв. Подачу під час обкатування призначають не більше як 0,1...0,5 мм/об. Приймали  $S=0,15$  мм/об. При розрахунковій довжині шліца  $L_p = \ell_d + \ell_{вх} = 94 + 3 = 97$  мм, основний час на чеканку впадин шліців у кількості  $Z=22$  шт становить  $T_{очн} = 8,9$  хв.

**Висновок.** У результаті використання запропонованого у роботі пристрою для віброзміцнення впадин зубців та шліців підвищується якість обробленої поверхні деталі, підвищується мікротвердість і втомна міцність поверхневого шару деталі та збільшується її експлуатаційна довговічність.

**Список використаних джерел**

1. Андрианов А. М. Прогрессивные методы технологии машиностроения / А. М. Андрианов. – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с.
2. Мальцев В. М. Пристосування для наклепування деталей / В. М. Мальцев, В. П. Киніч. – К. : Техніка, 1986. – 90 с.
3. Скловський А. С. Пристосування і інструменти верстатників-новаторів / А. С. Скловський, Г. А. Андрощук. – К. : Техніка, 1986. – 110 с.

УДК 621.891:621.646

**Є.І. Барилюк**, асистент**Г.Й. Зайончковський**, д-р техн. наук

Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

**ЗМЕНШЕННЯ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ІНТЕНСИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ЗНОШУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ МАЛОГАБАРИТНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ КЛАПАНІВ****Е.И. Барилюк**, ассистент**Г.И. Зайончковский**, д-р техн. наук

Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

**УМЕНЬШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК И ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ИЗНОСА ЭЛЕМЕНТОВ МАЛОГАБАРИТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КЛАПАНОВ****Yevhen Baryliuk**, assistant**Hennadii Zaionchkovskiy**, Doctor of Technical Sciences

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

**DECREASING DYNAMIC LOADS AND WEAR INTENSITY OF ELEMENTS OF COMPACT-SIZED ELECTROMAGNETIC VALVES**

*Показано, що одним з ефективних шляхів зменшення динамічних навантажень та інтенсивності процесів зношування елементів малогабаритних електромагнітних клапанів є введення штучного демпфірування в рухомій частині електромагнітного привода клапана. Наведено результати розрахунків напружень в елементах затвора клапана типу «метал – метал» при його закритті за відсутністю та за наявністю спеціального демпфувального елемента в рухомій частині електромагнітного привода. Експериментально підтверджено зменшення інтенсивності процесів зношування елементів затвора клапана за рахунок введення штучного демпфірування.*

**Ключові слова:** електромагнітний клапан, динамічні навантаження, затвор, демпфувальний елемент, зношування, ресурс.

*Показано, что одним из эффективных путей уменьшения динамических нагрузок и интенсивности процессов износа элементов малогабаритных электромагнитных клапанов есть введение штучного демпфирования в подви-*

жної частини електромагнітного привода клапана. Приведені результати розрахунків напружень в елементах затвора клапана типу «металл – металл» при його закритті при відсутності і при наявності демпфуючого елемента в подвижній частині електромагнітного привода. Експериментально підтверджено зменшення інтенсивності процесів износу елементів затвора клапана за рахунок введення штучного демпфування.

**Ключевые слова:** електромагнітний клапан, динамічні навантаження, затвор, демпфуючий елемент, износ, ресурс.

*This article shows, that one of the effective ways for reducing dynamic loads and decreasing the intensiveness of small-sized solenoid valve elements wear is implementation of damping in the valve moving assembly. The article gives results of tension calculation in the valve metal-to-metal sealing elements. It was experimentally proven that there is a decrease of wear intensiveness in valve sealing elements due to the influence of damping.*

**Key words:** solenoid valve, dynamic loads, breechblock, damping element, slider, service life.

**Постановка проблеми.** Малогабаритні електромагнітні клапани (ЕМК) знайшли широке використання в системах обладнання виробів авіакосмічної техніки, автомобілебудування, інших галузях господарства завдяки низькому рівню енергії, необхідній для забезпечення їх тривалої експлуатації.

Окреме місце в номенклатурі малогабаритних ЕМК посідають клапани з запірним вузлом типу «метал – метал», які використовуються в системах з агресивним робочим середовищем або в умовах підвищених температур, які не прийнятні для запірних вузлів з гумовими ущільненнями. Особливістю роботи таких клапанів є циклічність спрацьовування при ударному характері контактування металевого затвора із сідлом. Через підвищену швидкість у процесі функціонування клапана елементи його запірного вузла багаторазово піддаються дії інтенсивних ударних навантажень. Це приводить до того, що у зоні контактування деталі клапана зазнають динамічних навантажень великої інтенсивності, внаслідок яких у матеріалі деталей виникають значні динамічні напруження. Такий характер навантаження сприяє розвитку різних процесів утомленості та зношування в елементах запірного вузла клапана і значно зменшує його надійність і ресурс [1]. Це обумовлює актуальність досліджень, направлених на зменшення динамічних навантажень та інтенсивності процесів зношування елементів запірного вузла таких клапанів, збільшуючи таким чином їх ресурс.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз літературних джерел показує, що існує декілька підходів до демпфування ударних процесів в ущільнюючій парі запірно-регулювальної арматури.

Одним із методів демпфування є використання полімерного золотника, який, крім функції герметизації, виконує роль демпфера. Здатність гуми та полімерів до високоеластичної деформації є головною відмінною особливістю, яка дозволяє широко використовувати гуму як конструкційний матеріал для ущільнень [2]. Однак у разі зміни температури герметизуюча здатність гумових ущільнень зазвичай змінюється, оскільки із пониженням температури гума та полімери частково або повністю втрачають еластичність. Також у деяких клапанах як демпфер використовується метод дроселювання рідини у спеціальній камері. Як робоче тіло дроселя може виступати як середовище, що перепускає клапан, так і спеціально додана до конструкції клапана рідина [3]. Однак таке рішення має конструктивні недоліки через ускладнення конструкції. Додавання до конструкції плунжера з камерою гідравлічного демпфера збільшує масу клапана, а наявність гідравлічної рідини, внаслідок зміни температури навколишнього середовища чи нагрівання рідини у процесі роботи, призводить до зміни її в'язкості. Як результат – суттєво змінюється час закриття клапана. Крім того, наявність гідравлічного демпфера збільшує ще і час відкриття клапана, тому така конструкція не є універсальною.

Деякі автори [4; 5] вважають ефективним шляхом подолання вищезазначених негативних явищ введенням до конструкції рухомої системи клапана пружного елемента. Згідно з [6] для багатократного зниження величин максимальних ударних навантажень при тарелі клапана рекомендовано використовувати еластичний елемент, який розміщено між сідлом і корпусом клапана. Найчастіше демпфування досягалось завдяки введенню в конструкцію елемента з меншою, ніж у сідла та золотника, жорсткістю [7]. Однак такий

підхід має обмеження по максимальному ступеню демпфування, оскільки деформація пружного елемента повинна бути пружною.

**Невирішені частини проблеми.** Наявні рекомендації щодо використання демпфірування в ЕМК показують, що ефективним методом вирішення проблеми створення конструкцій ЕМК з високими характеристиками дисипації кінетичної енергії рухомої системи клапана є використання додаткових демпферів, які сприймають на себе значну частину енергії удару при спрацьовуванні ЕМК, зменшуючи кількість розсіяної в деталях арматури енергії. Тим не менш, попри багаторічні дослідження явища демпфірування в запірно-регулювальній арматурі, недостатньо вивченим залишається питання про фізичні властивості демпфірувальних матеріалів; потребують подальшого розвитку математичні моделі роботи ЕМК з урахуванням демпфірування; на початковому етапі знаходиться розвиток методів оптимального проектування конструкцій ЕМК з урахуванням демпфірування.

**Метою дослідження** є виявлення впливу штучного демпфірування в рухомій частині електромагнітного привода ЕМК з жорстким ущільненням у запірному вузлі типу «метал – метал» на величину динамічних навантажень елементів запірного вузла та інтенсивність процесів їх зношування. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались такі завдання:

1. Розрахувати напруження в елементах запірного вузла ЕМК під дією динамічних ударних навантажень, що виникають під час закриття клапана, за відсутності та наявності демпфірувального елемента в рухомій частині електромагнітного привода ЕМК.
2. Провести спеціальні ресурсні випробування ЕМК з металевим запірним вузлом для оцінювання впливу штучного демпфірування на процеси зношування затвора та сідла клапана.
3. Розробити рекомендації щодо підвищення ресурсу та експлуатаційної надійності малогабаритних клапанів із затворами типу «метал – метал».

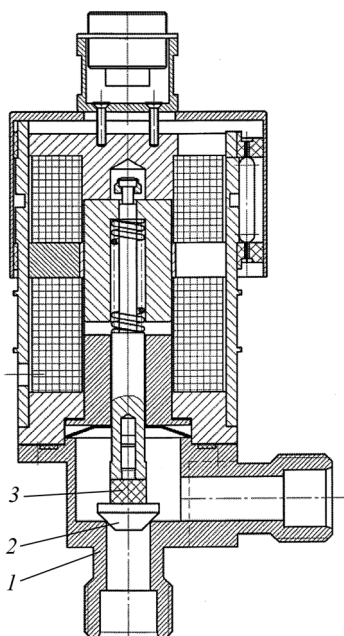


Рис. 1. Конструктивна схема експериментального зразка клапана з жорстким ущільненням запірного вузла типу «метал – метал»:

1 – сталевий затвор; 2 – сталевий корпус з сідлом; 3 – демпфірувальний елемент

**Виклад основного матеріалу.** Як об'єкт досліджень було вибрано експериментальний зразок малогабаритного пневматичного клапана з поляризованим двопозиційним електромагнітним приводом, який має запірний вузол з жорстким ущільненням типу «метал – метал» (рис. 1).

*Аналіз напруженого стану елементів запірного вузла клапана.* Під час проектування ЕМК обов'язково проводяться розрахунки напруженого стану його конструктивних елементів і виявляються «слабкі» місця конструкції виробу, що лімітують його ресурс. Для перекривних клапанів із жорстким запірним вузлом такими «слабкими елементами» є елементи запірного вузла типу «метал – метал».

Найбільш ефективним методом для таких розрахунків є метод кінцевих елементів (МКЕ), застосування якого для малогабаритних ЕМК має свої особливості [8]. Слід зазначити, що за допомогою МКЕ знайшла свій успішний розв'язок велика кількість досить складних у своїй постановці та важливих для сучасної науки прикладних задач. Перевагами цього методу є: простота формулювання основних принципів методу, ясність фізичної інтерпретації, свобода розміщення вузлових

точок, симетрія матриць жорсткості елементів та систем рівнянь, широке розповсюдження автоматизованих систем інженерних розрахунків на основі МКЕ [9].

Розв'язок задач за МКЕ включає в себе таку послідовність окремих підзадач:

- побудова функціонала;
- розділення системи на кінцеві елементи (КЕ) та вибір координатних функцій;
- побудова матриць жорсткості;
- побудова канонічних рівнянь;
- розв'язок канонічних рівнянь (визначення степенів свободи системи);
- визначення компонентів напружено-деформованого стану (НДС) (переміщення, напруження) по області КЕ.

Для побудови розподілу напружень в елементах запірному вузла ЕМК під час їх контактної взаємодії під час закриття клапана, а також визначення зон із залишковими пластичними деформаціями (зони з потенційною небезпекою виникнення тріщин) була розроблена кінцевоелементна модель клапана, процес створення якої складався з таких основних етапів:

- побудова наближеної параметричної тривимірної моделі робочих елементів клапана;
- визначення граничних умов;
- кінцевоелементне розбиття;
- визначення контактних зон та присвоєння їм відповідного статусу;
- постановка та визначення динамічних характеристик складових елементів моделі.

Для реалізації вищезазначених етапів створення кінцевоелементної розрахункової моделі було розроблено програми, написані на мові програмування APDL (Ansys Parametric Dialog Language) системи кінцевоелементного аналізу ANSYS [10; 11; 12]. Ці програми повністю автоматизують процес розрахунку НДС елементів клапана від введення вхідних даних до отримання необхідних числових результатів.

Щоб візуально показати деформаційну картину поверхонь ущільнення, було проведено чисельне моделювання тривимірних моделей зразків у програмному пакеті Ansys. Розрахункову сітку зразків елементів запірному вузла клапана з матеріалу 08X18H10T показано на рис. 2. Результати розрахунків наведено на рис. 3.

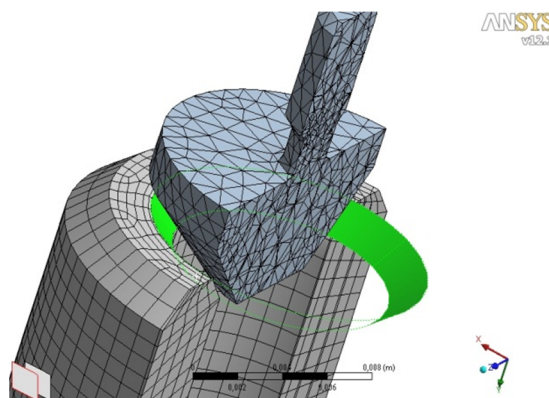


Рис. 2. Розрахункова сітка та зона контакту в запірному вузлі клапана

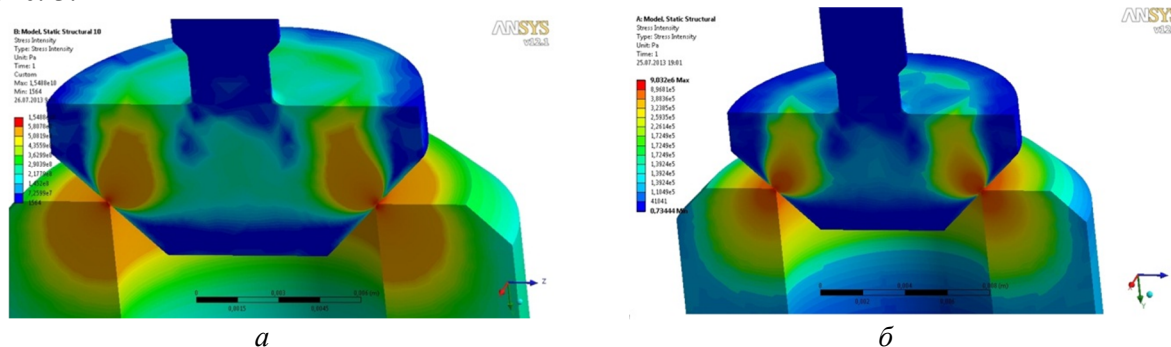


Рис. 3. Визначення напружень в елементах запірному вузлі клапана з ущільненням типу «метал – метал» за відсутності (а) та за наявності (б) демпфрувального елемента в кінематичній схемі електромагнітного привода клапана

Аналіз отриманих результатів показує, що найбільші напруження під час закриття клапана з жорстким запірним вузлом виникають по площині контакту сталевого затвора з сідлом, що є частиною сталевого корпусу. Це призводить до появи кільцевої виробітки (поглиблення) на поверхні сталевого затвора (рис. 4). Величина цього поглиблення збільшується з ростом напрацювання клапана у процесі експлуатації, що призводить до зменшення зусилля ущільнення та втомного руйнування матеріалу затвора та сідла.

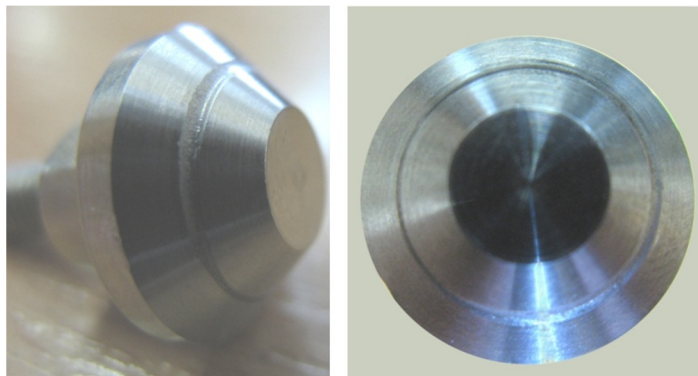


Рис. 4. Фотографії затвора клапана зі сталі 08X18H10T після напрацювання 3·10<sup>5</sup> циклів

Ефективним засобом зменшення динамічних навантажень в елементах ЕМК є введення демпферного елемента в кінематичній схемі електромагнітного привода клапана. Під час пошуку шляхів для підвищення надійності та ресурсу запірної арматури було встановлено, що ефективним методом є розсіювання кінетичної енергії рухомої системи клапана, що забезпечується використанням у конструкції клапана демпфувального елемента. Про ефективність цього методу говорять дослідження угорських учених [7], які випробували чотири типи силіконових матеріалів для демпферного пристрою.

Проведені ресурсні випробування клапанів без демпфера та з демпфером у кінематичній схемі електромагнітного привода ЕМК підтвердили результати розрахунків, виконаних із застосуванням МКЕ. У ході експерименту зразки з нержавіючої сталі 08X18H10T напрацьовували певну кількість циклів «відкрито-закрито». Через регулярні інтервали часу замірявся витік газу через клапан у закритому положенні. Результати замірів показали, що величина витіку збільшується з напрацюванням (рис. 5).

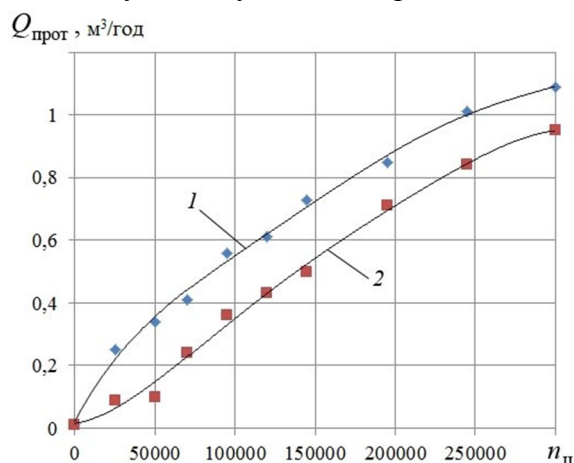


Рис. 5. Залежність збільшення витіку газу через клапан у закритому положенні від його наробітку:  
1 – без демпфера; 2 – з демпфером

Експериментальні дослідження показали, що застосування демпфувального елемента в кінематичній схемі електромагнітного привода клапана приводить до зменшення кінетичної енергії контактної взаємодії елементів клапана, зменшення напружень у

конструкційному матеріалі деталей клапана (рис. 3, *a*) і зменшення витоку газу в клапані із жорстким запірним вузлом у закритому положенні (рис. 5).

Було встановлено також, що демпфірування дозволяє зменшити швидкість зносу деталей запірної вузла клапана – затвора та сідла. Про це свідчить швидкість зміни витоку газу в ущільненні клапана із збільшенням кількості напрацьованих циклів (рис. 5). Вид отриманих експериментальних залежностей свідчить про позитивний вплив демпфівального елемента на ресурс клапана.

Проведені дослідження мікронерівностей поверхні зразків підтверджують зменшення деформації ущільнюючих поверхонь золотника та сідла клапана (рис. 6).

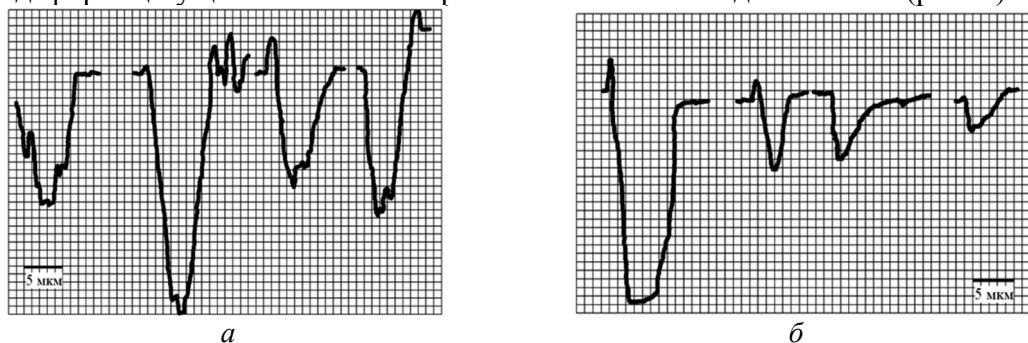


Рис. 6. Профілограма поверхні контакту елементів запірної вузла клапана після напрацювання 300 тис. циклів: *a* – без демпфування, *б* – з демпфером

**Висновки.** Узагальнення результатів проведених досліджень технічного стану елементів і вузлів ЕМК з двопозиційним електромагнітним приводом дозволяють зробити такі висновки:

1. Розроблено кінцевоелементну модель розрахунків напружень у деталях малогабаритного ЕМК з двопозиційним поляризованим електромагнітним приводом, яка враховує особливості його конструктивного виконання.

2. З використанням методу кінцевих елементів проведено розрахунки напруженого стану деталей запірної вузла клапана з жорстким ущільненням типу «метал – метал» під час його закриття.

3. Для зменшення напружень у затворі й сідлі ЕМК, зносу деталей запірної вузла клапана з жорстким ущільненням типу «метал – метал» та витоку газу через запірний вузол у закритому положенні клапана рекомендується застосування демпфівального елемента в кінематичній схемі електромагнітного привода ЕМК.

Ефективність застосування демпфівального елемента в кінематичній схемі електромагнітного привода ЕМК підтверджена експериментально.

#### Список використаних джерел

1. *Изменение* технического состояния контактирующих деталей электромагнитных клапанов при эксплуатации / Ю. Н. Рыкунин, А. Е. Ситников, Г. Й. Зайончковский, В. Ф. Лабунец // *Вибрации в технике и технологиях*. – 2003. – № 3(59). – С. 46–52.

2. *Кармугин Б. В.* Современные конструкции малогабаритной пневмоарматуры / Б. В. Кармугин, В. Л. Кисель, А. Г. Лазебник ; под общ. ред. Б. В. Кармугина. – К. : Техника, 1980. – 295 с.

3. *Zaionchkovskiy G.* Ways to improve the reliability and operating life of small-size electromagnetic valve / G. Zaionchkovskiy, E. Barilyuk, Yu. Golovko // *Proceedings of the National Aviation University*. – 2015. – № 1(62). – P. 36–41.

4. *Долотов А. М.* Исследование динамических явлений, возникающих в конических парах с упругим седлом : дис. ... канд. техн. наук : спец. 01.02.06 / А. М. Долотов. – Львов, 1981. – 187 с.

5. *Рутковский А. Ю.* Динамические испытания кольцевых канатных виброизоляторов / А. Ю. Рутковский, Д. В. Мулов // *Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета*. – 2010. – Вып. 30. – С. 43–52.

6. Абдюкова Р. Я. Моделирование удара тарели клапана бурового насоса при ее посадке на седло / Р. Я. Абдюкова, Н. Я. Багаудинов, А. Н. Зотов // Нефтегазовое дело. – 2012. – № 2. – С. 52–67.

7. Molnar Szabolcs. Damping of dynamic effects with elastomers in instrumented impact testing / Szabolcs Molnar, Akos Bezeredi, Gyorgy Voros, Bela Pukanszky // International Journal of Fracture. – 2001. – Volume 109. – P. 153–168.

8. Метод конечных элементов : учеб. пособие для вузов / под ред. П. М. Варвака. – К. : Вища школа, 1981. – 176 с.

9. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов : пер. с англ. / Л. Сегерлинд. – М. : МИР, 1979. – 392 с.

10. Басов К. А. ANSYS в примерах и задачах / К. А. Басов ; под общ. ред. Д. Г. Красковского. – М. : Компьютер Пресс, 2002. – 224 с.

11. Аналіз напруженого стану робочих елементів пневматичних клапанів з електромагнітним приводом / Ю. М. Рикуніч, О. Є. Ситніков, Я. Б. Федоричко та ін. // Промислова гідроліка і пневматика. – 2005. – № 4 (10). – С. 55–62.

12. Барилюк Є. І. Визначення напруженого стану робочих елементів малогабаритних клапанів з електромагнітним приводом / Є. І. Барилюк, Я. Б. Федоричко, Г. Й. Зайончковський // Промислова гідроліка та пневматика. – 2014. – № 3(45). – С. 23–34.