



DOI: 10.31388/2220-8674-2023-1-5

УДК 629.113

С. В. Попов, к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0003-2381-152X

А. О. Семенов, к.т.н., доц.

ORCID: 0000-0003-3184-6925

Р. Ю. Євменов

ORCID: 0009-0005-8558-4483

Полтавський державний аграрний університет

e-mail: stanislav.popov@pdaa.edu.ua, тел.: 068-642-33-90

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРОПНЕВМОКЛАПАНУ ПНЕВМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ АВТОПОЇЗДУ-ЗЕРНОВОЗУ

Анотація. На даний час електропневмоклапани широко застосовуються у практиці машинобудування для керування стиснутим повітрям пневматичних систем вантажних колісних транспортних засобів, зокрема й тих, що застосовуються для перевезення продукції сільськогосподарського виробництва, наприклад автопоїздів-зерновозів. Певним недоліком існуючих конструкцій є перегрів котушок електропневмоклапанів. Це призводить до втрати їх роботоздатного стану. Виникають збої у перерозподілі робочого середовища. Запропоновано удосконалити існуючий вузол заміною конструкції котушки, збільшенням діаметру сидла та зміною жорсткості пружини. Наведено методики дослідження вузла за визначеними критеріями роботоздатності. Отримано результати експериментальних досліджень оновленої конструкції електропневмоклапану.

Ключові слова: ефективність, роботоздатність, герметичність, потужність, перепускна здатність, час спрацювання, ударна міцність, температурна стійкість

Постановка проблеми. Для сучасного автомобілебудування характерними є тенденції, що спрямовані на створення більш економічних та безпечних систем транспортних засобів, зокрема тих, що задіяні під час транспортування продукції сільськогосподарського виробництва. Пневматична система є однією із найважливіших систем автопоїздів-зерновозів. Особливо актуальним є використання пневматичного типу приводу у складі гальмівної системи вантажівки.

Аналіз останніх досліджень. Як відомо, пневматичні гальмівні системи класифікують за числом робочих контурів-магістралей (одноконтурні, двоконтурні, багатоконтурні системи). На даний час найбільш ефективною є багатоконтурна система (три контури та



більше). Незважаючи на її складність, вона є ефективною та надійною за своєю конструкцією. Саме це зумовило її поширення на великих вантажівках, зокрема, зерновозах, наприклад КрАЗ-6511С4-500 «Караван». Система забезпечує підвищену стійкість, полегшує керування транспортним засобом та його зупинку.

Для керування потоком стиснутого повітря у пневматичних приводах, а також системах пневматичного управління на автотранспортних засобах використовуються електропневмоклапани [1]. До основного недоліку деяких модифікацій слід віднести нагрівання котушок, навіть під час руху автопоїзду. Підвищена температура призводить до виходу виробу із роботоздатного стану. Саме тому у роботі [1] повідомлено про конструктивні зміни, що стосувалися заміни конструкції котушки із електричною платою, діаметра сидла та пружини.

У роботі [2] розглянуто питання підвищення ефективності роботи гальмівної системи. Автором запропоновано методику визначення безпечної відстані поміж транспортними засобами, що рухаються у супутньому напрямку із аналізом можливості використання резервної гальмівної системи.

Дослідження [3] присвячено особливостям відновлення гальмівної системи транспортного засобу, що перебував тривалий термін в експлуатації. Наведено рекомендації з подальшого конструктивного удосконалення та підвищення ефективності технічного обслуговування.

Аналіз світового автомобілебудування засвідчує, що для транспортних засобів категорії N_3 (понад 12 тон) найбільш ефективним є використання гальмівного приводу у поєднанні із електронними керуючими пристроями регулювання [4].

Автори [5] досліджують динамічні характеристики електричного пневмоклапану із підвищеним гідравлічним опором магістралі на вході. Запропоновано удосконалену конструкцію електричного пневмоклапану.

Імітаційний аналіз процесу гальмування, що запобігає перекиданню довгомірних транспортних засобів представлений у роботі [6]. Досліджувалися вироби, що є складовими частинами пневматичних гальм вантажівок. Адекватність моделей була підтверджена даними результатів польових випробувань.

У роботі [7] проведено ґрунтовні дослідження нової конструкції пневматичної підвіски, що використовується у складі вантажівки, з метою створення динамічно збалансованої системи, що здатна протидіяти крену кузова транспортного засобу та забезпечує тривалу стійкість. Результати дослідження засвідчили, що застосування подвійного вирівнювального клапану гарантує краще регулювання



положення кузова у просторі.

Дослідження пневматичної системи рекуперативного гідроприводу здійснено у роботі [8]. Автори здійснили глибокий аналіз наукових робіт у галузі методів рекуперації різних видів енергії в колісних транспортних засобах, рекуперативних пристроїв, гідроприводів, що дозволяють акумулювати та використовувати енергію стисненого повітря. Були отримані залежності впливу часу на кількість стиснутого повітря, тиск і температуру у пневматичному акумуляторі порожнинах пневмоциліндрів.

Під час дослідження за даним тематичним спрямуванням також активно використовується спеціалізоване програмне забезпечення. Зокрема, у статті [9] на платформі MATLAB/Simulink розроблена математична модель аналізу роботи гідропневматичної підвіски вантажівки, що дозволила визначити оптимальне значення швидкості руху.

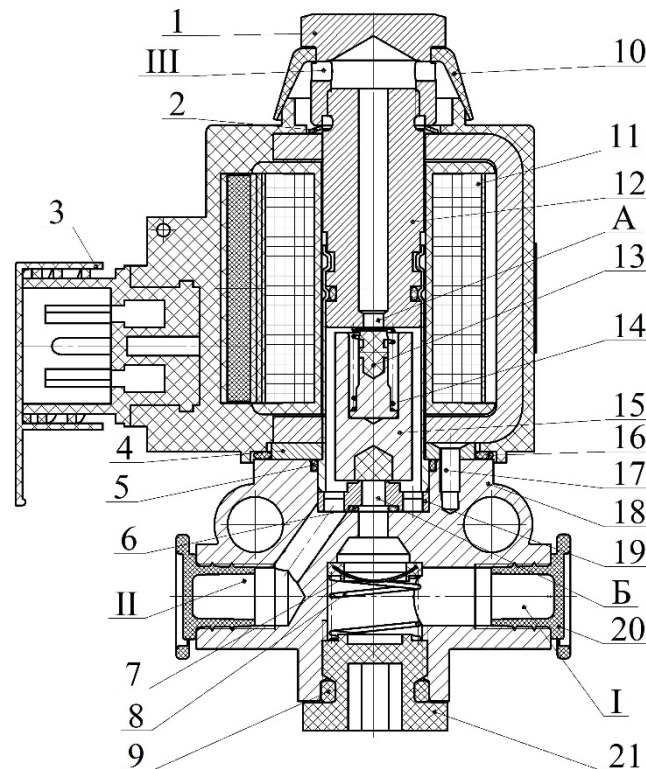
У роботі [10] приділено увагу розробці трьохпозиційного електромагнітного клапану, що використовується у складі пневматичної системи транспортних засобів. Його головною конструктивною особливістю є відсутність синтетичних ущільнювальних матеріалів, гуми, пластику. Металеві поверхні з мікрорельєфом у вигляді кільцевих виступів та западин, що послідовно чергуються, являють собою ущільнювальні поверхні. Запропоноване технічне рішення, на думку авторів, дозволяє суттєво поліпшити основні показники вузла, а саме: цілісність, надійність, довговічність, низька вартість.

Як бачимо, увага науковців усього світу спрямована на постійне поліпшення пневматичних систем вантажних транспортних засобів у цілому, а також їх окремих складових частин.

Формулювання мети статті. Мета роботи полягає у проведенні серії експериментальних досліджень, пов'язаних із дослідженням удосконаленої конструкції електропневмоклапану пневматичної системи, яким обладнуються автопоїзди-зерновози КрАЗ-6511С4-500 «Караван», за визначеними критеріями роботоздатності.

Основна частина. На рисунку 1 наведено загальний вигляд та конструктивну схему удосконаленого електропневмоклапану. Принцип його дії полягає у наступному [1]. Стиснуте повітря з балону подається до входу I. Вихід II з'єднано з магістраллю керування, атмосферним каналом III крізь отвір А та лиски, що наявні на якорі 15. Останній при подачі електричного сигналу на котушку 11 переміщується вгору. При цьому якір 15 долає зусилля, що створюється пружиною 14. У даному випадку ущільнення 13 переміщується вгору. Відбувається закривання отвору А атмосферного виводу 3 та відкривання отвору Б. Здійснюється перепускання стисненого повітря

із входу I у вихід II. При знятті електричного сигналу керування з котушки 11 якір 15 переміщується вниз під дією пружини 14. Своїм ущільненням він закриває отвір Б та відкриває отвір А. Відбувається зупинка перепуску стисненого повітря із I у II вихід. Стиснене повітря з II виходу потрапляє до атмосфери через канал III. Технічна характеристика електропневмоклапану наведена в таблиці 1 [1].



1 – корпус сапуна; 2 – шайба пружинна; 3 – ковпачок; 4 – фланець; 5, 6, 9 – кільце; 7 – фільтр; 8 – пружина; 10 – сапун; 11 – котушка; 12 – гільза; 13 – ущільнення; 14 – пружина; 15 – якір; 16 – кільце; 17 – гвинт; 18 – корпус; 19 – сідло; 20 – пробка транспортна; 21 – заглушка; б – вигляд загальний

Рисунок 1. Електропневмоклапан (конструктивна схема) [1]:

Для дослідження роботоздатності та герметичності електропневмоклапану використовувався лабораторний стенд, зображений на рисунку 2.

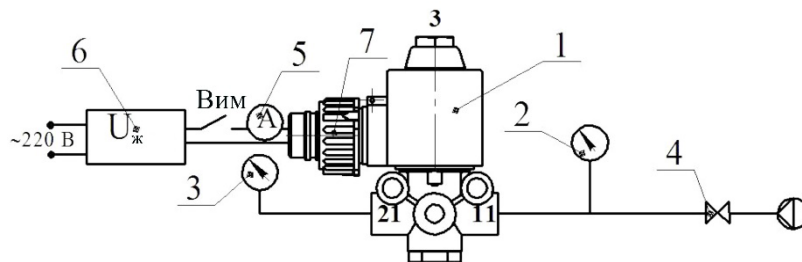
Послідовність випробувань наступна. Відкривався кран 4 та встановлювалася потрібна величина стисненого повітря, яка контролювалася за допомогою манометра 2. Подавалася напруга від 18 В до 30 В на дослідний зразок за допомогою вимикача та джерела живлення 6. При цьому струм на амперметрі 5 повинен мати наступне значення: під час спрацювання клапану в момент втягування якорю 15 (див. рис. 1) не більше 0,7 А; при утриманні якорю після спрацювання клапану до 0,1 А. При цьому повинно відбутися підвищення тиску на

виводі «21», що контролюється манометром 3. Тиск на виводі «21» повинен встановитися рівним до тиску на підводі «11». Це контролюється манометрами 2, 3. Після зняття напруги з клапану повинно відбутися зниження тиску на виводі «21» до нуля та випускання повітря через атмосферний вивід «3». Контроль відбувається за манометром 3. Цикл випробування повторювався не менше трьох разів, після чого кран 4 закривався.

Таблиця 1

Технічна характеристика удосконаленої конструкції електропневмоклапану [1]

№ з.п.	Параметр	Значення
1	Умовний прохід, мм	4
2	Робочий тиск, МПа	0,2...1,05
3	Час спрацювання, с	0,03
4	Струм	DC
5	Напруга, В	24
6	Потужність відкриття, Вт	21,6
7	Потужність утримання, Вт	3
8	Приєднувальна різьба	M10×1-6H 2 отв.
9	Режим роботи (ДСТУ ГОСТ 3940:2007)	S1
10	Габаритні розміри, мм	72×42×108
11	Маса, кг	0,5



1 – дослідний зразок клапану;
2, 3 – технічні манометри; 4 – кран роз'єднувальний; 5 – амперметр;
6 – джерело живлення; 7 – байонетний електричний роз'єм; Вим – вимикач; маркування виводів: «11» – підведення повітря до магістралі, що живить; «21» – вихід повітря до споживачів; «3» – вихід повітря до атмосфери

Рисунок 2. Конструктивна схема лабораторного стенду для дослідження електропневмоклапану

Отже, конструкція є роботоздатною при значеннях тиску 0,03 МПа; 0,85 МПа, 1,05 МПа та напрузі 18...30 В. Витоки повітря на



підводі «11» та відсутності напруги на котушці 11 (див. рис.1) відсутні. Витоки повітря на підводі «11», виводі «21» та поданій напрузі 21 В також були відсутні.

При дослідженнях герметичності відкривався кран 4 та встановлювався тиск повітря 1,05 МПа, що контролювався за манометром 2. Із метою виявлення місць витоків повітря перевірку герметичності здійснювали газовим пухирцевим методом способом обмилювання [11]. Потім дослідження повторювалося, але при значенні тиску 1,5 МПа. Наступним етапом була подача напруга 18 В на клапан за допомогою вимикача. Тиск на виводі «21» встановлювався на рівні 1,05 МПа. Герметичність атмосферного виводу «3» перевірялася також пухирцевим методом способом обмилювання. Допустимі витки не повинні перевищувати 5 см³/хв. Після випробувань напруга знімалася.

Отже, конструкція дослідного зразка є герметичною за зовнішніми стилями під час навантаження надлишковим тиском 1,5 МПа протягом 1 хв.

Номінальну споживану потужність та струм при спрацюванні та утримуванні перевіряли амперметра-вольтметра при мінімальному тискові на підводі «11» та номінальній напрузі 24 В. Струм під час спрацювання клапану при втягуванні якорю не повинен перевищувати 0,9 А тривалістю не більше 1 с, а утримування якорю після спрацювання клапану – до 0,2 А. Номінальна споживана потужність відкриття не повинна перевищувати 21,6 Вт із тривалістю до 1 с, а потужність утримування – до 12 Вт.

Отже, струм при спрацюванні електропневмоклапану в момент втягування якорю при номінальній напрузі 24 В становив 0,78 А, а струм утримування якорю після спрацювання клапану при тому ж значенні номінальної напруги – 0,06 А. Номінальна споживана потужність відкриття становила 18,72 Вт, а утримування 1,44 Вт.

Перепускна здатність визначалася методом вимірювання витрати стиснутого повітря через клапан при абсолютному тискові на виводі «21» не більше 0,15 МПа та перепадах тиску на клапані у межах від 0,01 МПа до 0,02 МПа. Перевірку здійснюємо для ліній: підведення «11» – відведення «21», при поданій на котушку клапану напрузі живлення 24 В; вивід «21» – викид до атмосфери «3» за відсутності напруги. Перепускна здатність визначалася відповідно до методики [12] і повинна бути не меншою, ніж 4.

Отже, витрата повітря через удосконалену конструкцію електропневмоклапану становить $Q = 39$ м³/год. (рис. 3). Перепускна здатність $K_v = 0,33$ м³/год., а умовний прохід $D_v = 4,5$ (рис. 4). Час наповнення ресиверу, що має об'єм 1 л становив 0,66 с ($p_{вих} = 0,9 p_{вх}$, рис.3), а час його випорожнення – 1,7 с ($p_{вих} = 0,1 p_{вх}$, рис.5).

Перевірка часу спрацювання перевірялася методом осцилографування почергово (при мінімальному та максимальному тисках і номінальній напрузі 24 В). За початок відліку часу ввімкнення приймаємо момент подачі напруги на котушку 11 (див. рис. 1). За кінець відліку – момент підвищення тиску на виводі «21» на 90% від значення тиску, що подається до підводу «11». При цьому час спрацювання клапану в номінальному режимі роботи повинен не перевищувати 0,03 с.

На рис. 6 наведено результати досліджень часу спрацювання електропневмоклапану, який склав 0,02 с.

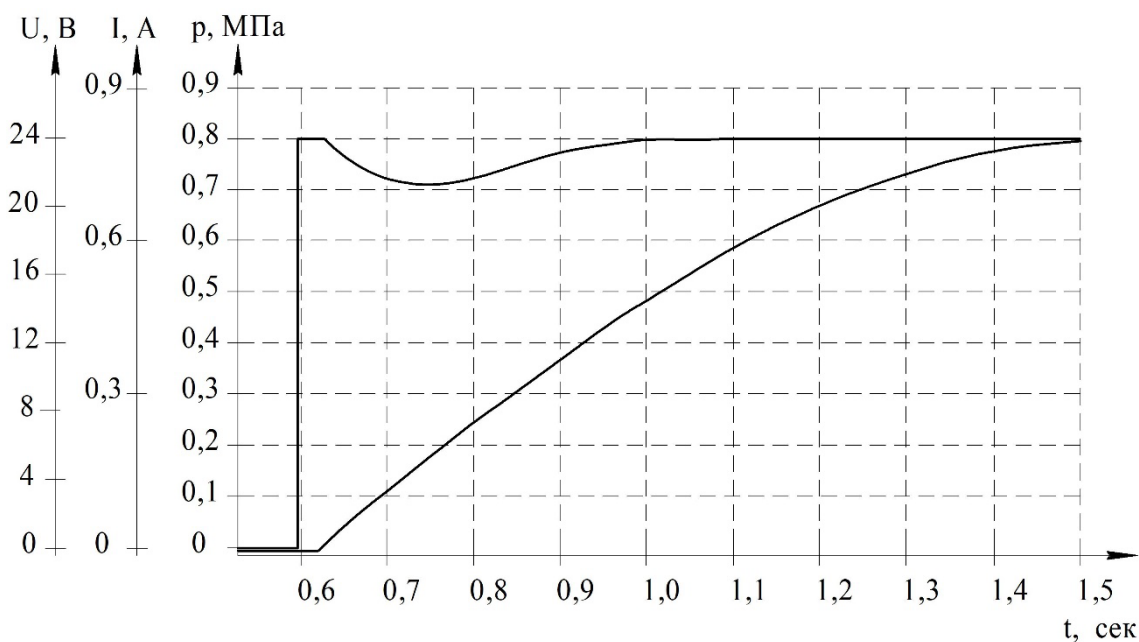


Рисунок 3. Апроксимовані графічні залежності $U=f(t)$, $I=f(t)$, $p=f(t)$ при дослідженні перепускної здатності

Дослідження на ударну міцність відбувалося на ударному стенді TIRA SHOCK 4110, на якому електропневмоклапан закріплювався у робочому положенні та випробувався у неробочому стані із прискоренням $150 \pm 30 \text{ м/с}^2$ та довжиною імпульсу 1-20 с. Тривалість випробувань $1 \cdot 10^4$ ударів. Після проведення 50% обсягу випробувань вузол повертали у вертикальній площині на кут 90° відносно до початкового положення. Після випробувань клапан оглядали та перевіряли на роботоздатність, а також герметичність.

Експерименти засвідчили, що дослідний зразок зберігає роботоздатність після впливу ударних навантажень із прискоренням 15g у кількості 10000 ударів. При поданій напрузі на котушку електропневмоклапан зберіг свою герметичність. За відсутності напруги на котушці наявні витоки стиснутого повітря 2 мл/хв.

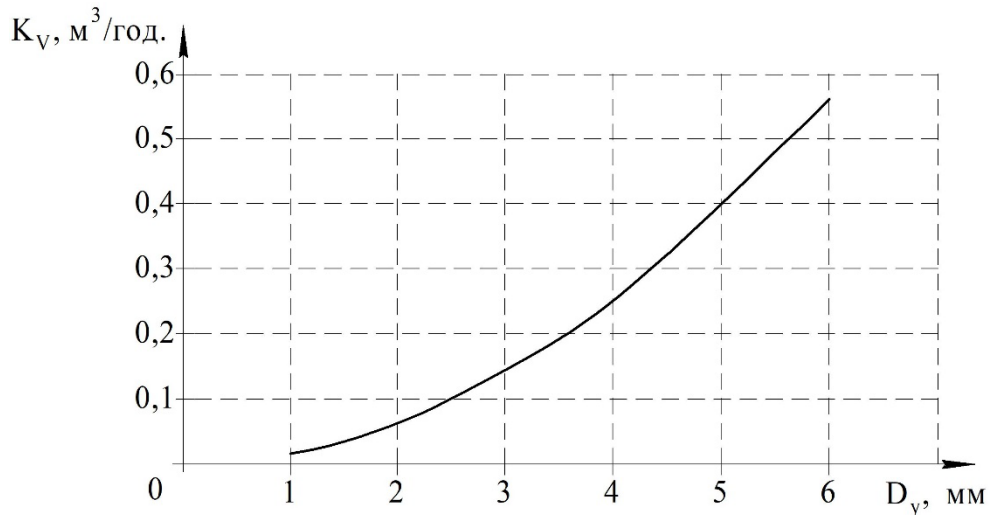


Рисунок 4. Графік залежності перепускнуї здатності від умовного проходу $K_v = f(D_v)$

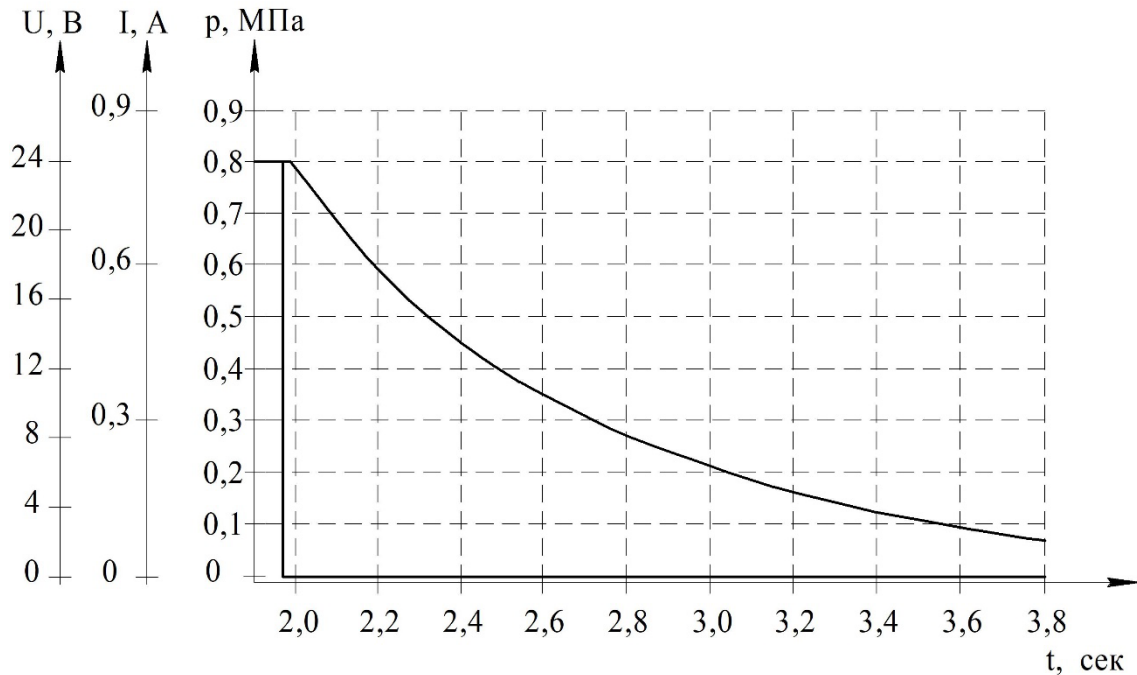


Рисунок 5. Апроксимовані графічні залежності $U=f(t)$, $I=f(t)$, $p=f(t)$ при дослідженні ресивера

Для дослідження надійності (безвідмовності) удосконаленої конструкції електропневмоклапану було застосовано лабораторний стенд, наведений на рис. 7.

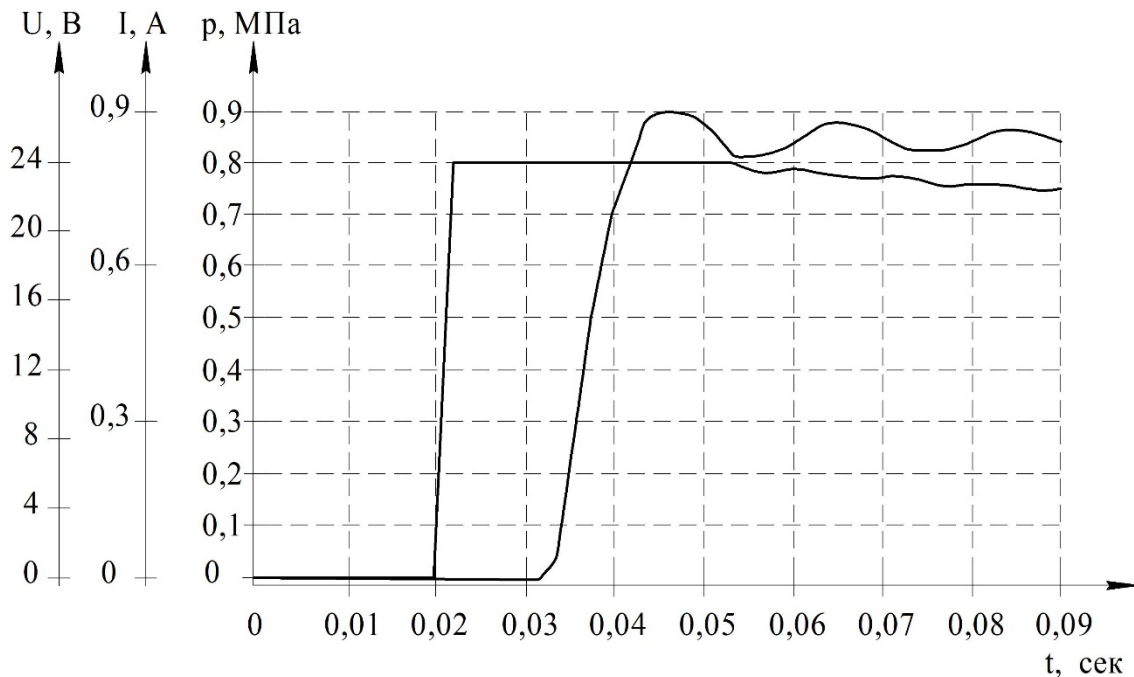
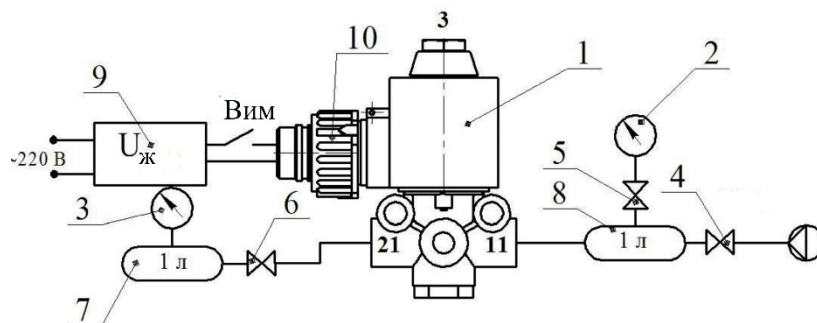


Рисунок 6. Апроксимовані графічні залежності $U=f(t)$, $I=f(t)$, $p=f(t)$ при дослідженні часу спрацювання електропневмоклапану



1 – дослідний зразок клапану; 2, 3 – технічні манометри; 4, 5, 6 – кран роз'єднувальний; 7, 8 – ємності із об'ємом 1 л; 9 – джерело живлення; Вим – вимикач; 10 – електричний штекерний різьбовий роз'єм; маркування виводів: «11» – підведення повітря до магістралі, що живить; «21» – вихід повітря до споживачів; «3» – вихід повітря до атмосфери

Рисунок 7. Конструктивна схема лабораторного стенду для дослідження надійності (безвідмовності) електропневмоклапану:

Під час досліджень було проведено $2,5 \cdot 10^6$ увімкнень із частотою 120 ± 10 увімкнень за хвилину за повторно-короткочасного режиму роботи S3 із тривалістю увімкнень ТУ 50% при підведеному тисковій стиснутого повітря 0,85 МПа та номінальній напрузі 24 В. Після завершення напрацювання $1 \cdot 10^6$; $1,5 \cdot 10^6$; $2,0 \cdot 10^6$; $2,5 \cdot 10^6$ була проведена перевірка, що засвідчила цілковиту роботоздатність та герметичності удосконаленої конструкції електропневмоклапану.



Дослідження на температурну стійкість здійснювалось у неробочому стані за допомогою кліматичної камери TBV-1000, що була попередньо нагрітою (охолодженою) до зазначеної температури. Електропневмоклапан витримували протягом 2 год. за температури -60°C до -55°C та, не виймаючи з камери випробували на роботоздатність та герметичність. Витрата стиснутого повітря до 0,025 л/хв. є припустимою. Також відбувалася витримка дослідного зразка протягом 2 год. за температури $+55^{\circ}\text{C}$ до $+50^{\circ}\text{C}$ та, не виймаючи з камери, випробували на роботоздатність та герметичність. Витрата стиснутого повітря у випадку нагрівання – до 0,005 л/хв. є припустимою. Після перебування клапану в камері у неробочому стані протягом 2 год. при температурі $+90^{\circ}\text{C}$ до $+95^{\circ}\text{C}$ досліджували також на роботоздатність.

Отримані наступні результати випробувань температурної стійкості:

- за температур -55°C , $+55^{\circ}\text{C}$ клапан виявив цілковиту роботоздатність при тисках 0,03 МПа, 0,85 МПа при напрузі 18...30 В, причому витіки були відсутні;

- за температур -60°C , $+95^{\circ}\text{C}$ клапан зберігає роботоздатність після перебування у неробочому стані.

Визначення температури електропневмоклапану здійснювали за тривалого номінального режиму S1 за ДСТУ ГОСТ 3940:2007 із тривалістю постійного навантаження 7 год. при значенні напруги 27 В при температурі оточуючого середовища 25°C . По завершенню випробувань клапан досліджувався на роботоздатність, а також герметичність. Величину нагрівання котушки 11 (див. рис. 1) та корпусу клапану визначали за допомогою мультиметру із термопарою.

Отже, практичне значення усталеної температури корпусу клапану під час роботи за тривалим режимом не перевищило 40°C .

Висновки. Таким чином, серія проведених експериментальних досліджень удосконаленої конструкції електропневмоклапану (на роботоздатність, герметичність, номінальну споживану потужність та струм при спрацюванні та утримуванні, перепускна здатність, час спрацювання, ударну міцність, надійність (безвідмовність), температурну стійкість, а також перевірку робочої температури) засвідчила, що отримані результати не перевищують допустимих значень. Робоча температура удосконаленої конструкції клапану зменшилася до 40°C , час наповнення 1 л ресивера склав 0,66 с, а потужність утримання зменшилася більше, ніж у 3 рази. Як результат, матимемо паливну економічність та зменшення шкідливих викидів до атмосфери. Перспективи подальших досліджень полягають у проведенні серії випробувань щодо ступеня захисту, який забезпечується оболонкою, а також опору та міцності ізоляції



електропневмоклапану.

Список використаних джерел

1. Аліпа О. В., Денисенко А. Г., Попова Ю. О., Попов С. В. Модернізація конструкції електропневмоклапану пневматичної системи зерновозів-автопоїздів КрАЗ. *Техніка та технології в агропромисловому виробництві*: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., м. Полтава, ПДАУ, 7-8 жовтня 2021 р. Полтава, 2021. С. 11–13.
2. Босенко Є. І. Методика визначення безпечної відстані поміж двома попутними транспортними засобами. *Автомобільний транспорт*. 2011. №29. С. 239–243.
3. Gnitko S., Vasyliiev Ie., Popov S. Designing an improved structure of the tool for repairing the brake pipe connectors in vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. №1/1 (109). P. 20–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.224912>
4. Ld I., Gu M. Expert System for Detecting and Diagnosing Car Engine Brake Failure Fault using Dynamic Control System (DCS). *Journal of Applied & Computational Mathematics*, 2016. 05 (01). <https://doi.org/10.4172/2168-9679.1000281>
5. Бойко В. С., Конох В. И. Повышение стабильности срабатывания электропневмоклапана с усилением в системе с увеличенным гидравлическим сопротивлением на входе. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2013. №3 (100). С. 90–95.
6. Chen Y., Zhang Z., Neighborgall C., Ahmadian M. When is it too late to brake? *Vehicle System Dynamics*. 2022. <https://doi.org/10.1080/00423114.2022.2144386>
7. Chen Y. Modeling, Control, and Design Study of Balanced Pneumatic Suspension for Improved Roll Stability in Heavy Trucks. 2017. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25216.38405>
8. Katrakilidis K., Posmetev V.I., Nikonov V., Posmetev V.V. Investigation of the pneumatic system of recuperative hydraulic drive of a timber truck. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science 595 (1): 012062*. 2020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012062>
9. Hung T.T., Long L.X., Van Tuan N., Tan H.A., Truyen V.T. Pavement-Friendly Performance Analysis of an Agricultural Truck with Two Types of Hydro-Pneumatic Suspension Struts. *Advances in Engineering Research and Application*. 2023. Pp. 780–789. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22200-9_82
10. Nefed'ev A.I., Sharonov G.I., Ilyina I.E. Three-position solenoid valve for pneumatic systems of trucks. Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_228
11. ГОСТ 24054-80. Вироби машинобудування та



приладобудування. Методи випробувань на герметичність. Загальні вимоги. [Чинний від 1987-01-01]. URL: https://dnaop.com/html/74413/doc-ГОСТ_24054-80 (дата звернення 01.03.2023).

12. ДСТУ 2268-93. Пневмоприводи. Методи вимірювань параметрів. [Чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 1996. 12 с.

Стаття надійшла до редакції 03.03.2023 р.

S. Popov, A. Semenov
Poltava State Agrarian University

EXPERIMENTAL STUDY OF THE IMPROVED DESIGN OF THE ELECTROPNEUMATIC VALVE OF THE PNEUMATIC SYSTEM OF THE TRAIN-GRAIN TRUCK

Summary

Currently, electropneumatic valves are widely used in mechanical engineering. They are designed to control the compressed air of the pneumatic systems of wheeled goods vehicles. They include road trains-grain trucks for the transportation of agricultural products. A certain disadvantage of existing designs is overheating of electropneumatic valve coils. This leads to the loss of their working condition. There are failures in the redistribution of the working environment. It is proposed to improve the existing node. For this, the design of the coil was replaced, the diameter of the seat and the stiffness of the spring were increased. The methods of node research according to the defined performance criteria are given. The results of experimental studies of the updated electropneumatic valve design were obtained.

Design schemes of laboratory stands have been developed. They made it possible to investigate performance, tightness, nominal power consumption, electric current during activation and retention, throughput by measuring the flow of compressed air, activation time, impact strength, reliability (failure), temperature resistance, operating temperature values.

Approximate graphical dependencies based on the results of experimental studies are obtained. They provided an opportunity to more clearly understand the impact of individual factors on the performance of the electropneumovalve. Experimental data proved the absence of air leaks at the terminals. The construction is hermetic. The tripping current was 0.78 A. The anchor holding current after tripping was 0.06 A. The air flow rate was 39 m³/h. Conditional pass - 4.5. Filling and emptying of the receiver takes place in 0.66 s and 1.7 s, respectively. The operating time of the improved design is 0.22 s. Impact strength and temperature resistance are ensured. The value of the operating temperature of the electric pneumatic valve did not exceed 40°C.

Key words: efficiency, performance, tightness, power, throughput, operating time, impact strength, temperature resistance