

УДК 629.114-592

Є.М. Гецовіч<sup>1</sup>, І.В. Рогозін<sup>2</sup><sup>1</sup>Харківський національний автомобільний університет, Харків<sup>2</sup>Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПНЕВМАТИЧНОГО ПРИВОДУ РОБОЧОЇ ГАЛЬМІВНОЇ СИСТЕМИ З ЗАХИСНИМ ПРИСТРОЄМ

Запропонована математична модель пневматичного приводу робочої гальмівної системи (РГС) з захисним пристроєм засобу рухомості (ЗР). Дослідженій вплив площі прохідного перетину пошкодження трубопроводу, через яку відбувається витік повітря на ділянці між гальмівним краном і гальмівною камерою, на тиск в пневматичному приводі РГС ЗР. Розрахована гранична величина площі прохідного перетину пошкодження, при якому відбувається критичне падіння тиску повітря в РГС ЗР та виникає необхідність у відключенні несправного контуру.

**Ключові слова:** математична модель, пневматичний привід, площа прохідного перетину пошкодження, засіб рухомості.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Безпеці дорожнього руху завжди приділяється велика увага як в нашій країні, так і за кордоном. Відомо, що РГС, зокрема її привід, виключно важлива для забезпечення безпеки руху ЗР й особливо ЗР засобів наземного забезпечення дій авіації (ЗНЗДА). Вихід її з ладу (пошкодження герметичності) може привести до втрати управління ЗР ЗНЗДА і, як правило, до дорожньо-транспортної пригоди або авіаційної пригоди (інциденту).

Пошкодження герметичності пневматичного приводу РГС, застосованого на більшості ЗР, як відомо, призводить до того, що гальмівна камера, а значимо й колісний гальмівний механізм РГС у цілому, працюватиме зі зниженою ефективністю, а стисле повітря з ресивера виходитиме в атмосферу, знижуючи тиск в ньому, а отже, і ефективність роботи справних контурів пневмопривода.

Тому виключення можливості витіку стислого повітря з несправної (не герметичної) ділянки пневматичного приводу РГС ЗР, яке досягло критичної величини пошкодження є актуальним завданням.

**Аналіз останніх публікацій.** Виключенню виходу з ладу пневматичного приводу РГС ЗР та дослідженню процесів, що відбуваються в ньому при виникненні пошкодження, завжди приділялася велика увага [1, 3, 4]. Разом з тим вдосконалювалися способи та засоби проведення досліджень. Широке поширення на вантажних ЗР одержала так звана «камазовська» гальмівна система, яка передбачає поєднання робочої та запасної гальмівних систем. Запасна гальмівна система блокує задні колеса ЗР якщо тиск повітря в пневмоприводі нижче за встановленим порогом. При цьому подальший рух ЗР неможливий.

У теперішній час в конструкції пневмопривода контуру середнього моста РГС автомобіля КРАЗ-6322, застосовується перепускний двохмагістральний клапан 15 (рис. 1) та прискорювальний клапан 7. У разі виходу з ладу (пошкодження герметичності) контуру заднього і середнього моста, прискорювальний клапан 7 спрацьовує від тиску, підведеного від верхньої секції гальмівного крана (приводу переднього контуру).

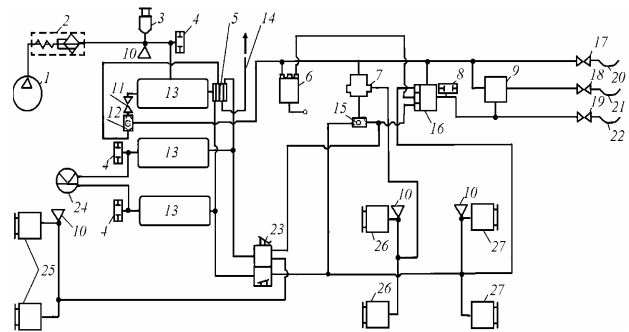


Рис. 1. Принципова схема пневмопривода РГС КраЗ-6322: 1 – компресор; 2 – вологомасловідділювач з регулятором тиску; 3 – пристрій проти замерзання; 4 – датчик зниження тиску; 5 – клапан захисний чотирьохконтурний; 6 – кран гальмівної ручного управління; 7 – клапан прискорювальний; 8 – датчик сигналу гальмування; 9 – клапан управління гальмівною системою причепа з двухпроводним приводом; 10 – клапан контрольного виводу; 11, 17, 18, 19 – кран роз'єднувачальний; 12, 15 – клапан перепускний двохмагістральний; 13 – ресивер; 14 – трубопровід підведення повітря до допоміжної гальмівної системи та додаткового устаткування; 16 – клапан управління гальмівною системою причепа з однопроводним приводом; 20 – головка сполучна «Палм» червоного кольору; 21 – головка сполучна типу «А»; 23 – головка сполучна «Палм» блакитного кольору; 23 – кран гальмівний двохсекційний; 24 – манометр двохстрілочний; 25 – гальмівна камера переднього моста; 26 – гальмівна камера середнього моста; 27 – гальмівна камера заднього моста

Проте, проблему витрати (витоку) стислого повітря з пошкодженого трубопроводу, а отже й ресивера, надана конструкція не вирішує.

**Метою дослідження** є математичне моделювання пневматичного приводу РГС із запобіжником, що спрацює за перепадом тиску на ділянці між гальмівним краном і гальмівною камерою під час порушення її герметичності.

### Виклад основного матеріалу

Під час роботи пневматичного приводу РГС з запобіжником (рис. 2) його клапан 6 в початковому стані постійно відкритий під дією сили тиску повітря в об'ємі  $V_{11}$ , підведеному з ресивера. Робота саме пневматичного приводу РГС, як відомо, відбувається за три періоди. За аналогією, процес роботи справної РГС з запобіжником також можна розділити на три періоди:

**Перший (підготовчий) період** – наповнення трубопроводів 9, 11, 8 (рис. 2, а), простору перед діафрагмами гальмівної камери 12 та запобіжного пристрою 7 (об'єм  $V_{12}$ ) до початку руху штока гальмівної камери, тобто до того моменту, коли тиск в порожнині гальмівної камери 12 стане здатним подолати всі сили опору (пружин і тертя в гальмівному механізмі). Одночасно повітря проходить через дросель 4 і заповнює об'єм  $V_{21}$  запобіжного пристрою 7. Перший період, по суті, – процес наповнення порожнини постійного об'єму. Він включає час відкриття гальмівного крана. Цей час звичайно малий й, через порівняно малу довжину повітряних комунікацій, в цій схемі воно без особливої погрішності може не враховуватися. Крім того, воно, до певної міри, перекривається часом розповсюдження повітряної хвилі, оскільки процес порушення сталого стану починається у момент відкриття гальмівного крана.

**Другий період (наповнення гальмівної камери)** – продовжується від початку руху штока гальмівної камери 12 до того моменту, поки буде вибраний хід її штока (коли гальмівні колодки притиснуться до гальмівного барабана). Другий період, по суті, – процес наповнення порожнини змінного об'єму.

**Третій період (завершальний)** – від моменту зупинки штока гальмівної камери 12 до вирівнювання тиску в системі (у ресивері, трубопроводах, гальмівній камері, порожнини запобіжного пристрою 7 (об'ємах  $V_{12}$  і  $V_{21}$ )). Третій період, як і перший, – процес наповнення порожнини постійного об'єму.

У разі виникнення пошкодження герметичності системи, наприклад, в косинці 10 (рис. 2, б), можна припустити, що періоди роботи системи будуть порушені або ж вони взагалі не будуть реалізовані. Діафрагма 3 запобіжного пристрою, з урахуванням

його конструктивного виконання, при виникненні стійкого перепаду тиску між виходом з гальмівного крана і входом в гальмівну камеру (порогове значення якого лежить поблизу  $\Delta p_{\text{пор}} = 0,05 \text{ МПа}$  [3]) зрушити шток 5 у бік порожнини низького тиску (об'єм  $V_{12}$ ) зачинивши клапан 6.

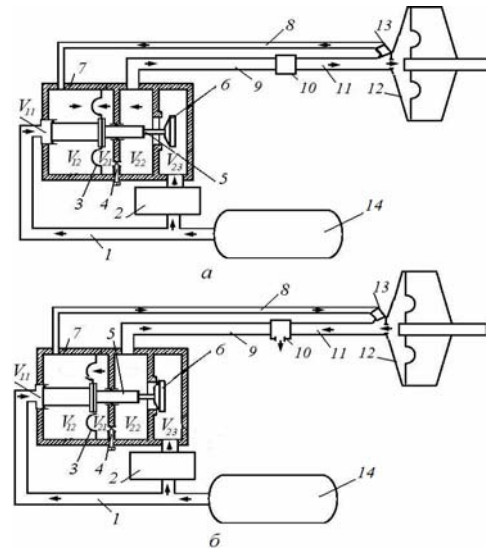


Рис. 2. Схема роботи пневмопривода з запобіжним пристроєм: 1 – трубопровід підведення повітря від ресивера; 2 – гальмівний кран; 3 – діафрагма; 4 – регульований дросель; 5 – шток; 6 – клапан; 7 – корпус запобіжного пристрою; 8 – трубопровід зворотного зв'язку; 9, 11 – трубопроводи підведення повітря до гальмівної камери; 10 – сполучний косинець (місце можливого витоку повітря); 12 – гальмівна камера; 13 – сполучний трійник; 14 – ресивер

**1. Розрахунок підготовчого періоду роботи пневматичного приводу.** Завдання розрахунку підготовчого періоду це визначення залежності зміни тиску повітря під діафрагмою гальмівної камери за даних початкових умов (зокрема конструктивних постійних) від часу до початку її переміщення  $p_{d0}$  яке може бути обчислене з рівняння:

$$p_{d0} = \frac{\sum P_{\text{пр}0}}{f_d}, \quad (1)$$

де  $\sum P_{\text{пр}0}$  – сума всіх початкових сил опору (протитиску пружин, тертя та ін.), Н;  $f_d$  – площа діафрагми гальмівної камери,  $\text{м}^2$ .

Розі'ємо весь пневмопривод з запобіжним пристроєм на ділянки, згідно схеми рис. 1:

- ділянка I – трубопроводах 9, 11 і порожнина гальмівної камери 12;
- ділянка II – трубопровід 8 і порожнина перед діафрагмою запобіжного пристрою 7 (об'єм  $V_{12}$ );
- ділянка III – місце витоку повітря – сполучний косинець 10.

Приймемо наступні допущення:

- гальмівний кран відкривається миттєво;
- температура навколишнього середовища ( $T = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $300\text{ }^{\circ}\text{K}$ )), деталей пневмопривода з запобіжним пристроєм та повітря в ньому залишаються постійними під час роботи через швидкоплинність досліджуваного процесу;
- для спрощення розрахунку вважаємо, через швидкоплинність процесу, що повітря витікає з порожнини (об'єм  $V_{22}$ ) запобіжного пристрою, тобто до об'єму ресиверу 14 входять об'єми трубопроводу 1, клапана гальмівного крана 2, а також об'єми порожнин  $V_{22}$   $V_{23}$ .

Виходячи з того, що надана пневматична система має великі гідравлічні втрати (за рахунок довжини, діаметру трубопроводу), а між сумарним коефіцієнтом втрат і показником політропи процесу перебігу повітря існує певна залежність [2], можна вважати, що процес буде близький до адіабатичного [1]. Тому при вирішенні рівнянь приймаємо  $n = k$ .

Для визначення зміни тиску у вказаних ділянках необхідно:

1. Визначити початкову (попередню) масу повітря, кг:

$$m_{i,n-1} = \rho_{i,n-1} \cdot V_i; \quad (2)$$

де  $i$  – номер ділянки;  $V_i$  – об'єм повітря у відповідних ділянках,  $\text{м}^3$ ;  $\rho_{i,n-1}$  – початкова (попередня) густина повітря (при початковому тиску) при заданій температурі у відповідних ділянках,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $n$  – кількість обчислень (номер обчислення).

Залежність густини повітря  $\rho$  від тиску  $p$  при температурі ( $T = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $300\text{ }^{\circ}\text{K}$ )) за даними [5] можна зобразити у вигляді графіка (рис. 3), побудованого за формулою:

$$\rho_{i,n} = 1,188 \cdot p_{i,n} - 8 \cdot 10^{-3}. \quad (3)$$

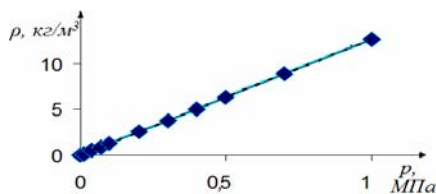


Рис. 3. Апроксимуючий графік залежності густини повітря від тиску (при температурі  $T=300\text{ }^{\circ}\text{K}$ )

2. Визначити миттєву витрату повітря (втрата маси повітря під час витоку його з ресивера і заповнення пневмопривода з запобіжним пристроєм або приросту маси повітря при заповненні системи) з урахуванням режиму течії повітря.

Режим течії повітря для кожної ділянки можна визначити за відношенням тиску:

$I$  ділянка – відношення тиску  $p_1$  в наповнюваній ємкості  $V_1$  до тиску в ємкості (ресивері), звідки відбувається витік  $p_0$ ;

$II$  ділянка – відношення тиску  $p_2$  у запобіжному пристрої до тиску  $p_1$  у ємкості  $V_1$  (гальмівної камері) звідки відбувається витік;

$III$  ділянка – відношення тиску  $p_a$  у атмосфері до тиску  $p_3$  у ємкості (трубопроводах  $9$  і  $11$ ), звідки відбувається витік.

Відношення тиску визначається за формулою:

$$\sigma_i = \frac{p_{i,n}}{\bar{p}_{i,n}}, \quad (4)$$

де  $p_{i,n}$  – тиск повітря в ділянці яка заповнюється, МПа;  $\bar{p}_{i,n}$  – тиск повітря в ділянці витоку, МПа.

В формулі (4) початкові значення тиску  $p_{1,n-1} = p_{2,n-1} = p_{3,n-1}$  приймаються рівними атмосферному. Початкове значення тиску  $p_{0,n-1}$  приймається рівним заданому тиску повітря в ресивері.

Тиск  $p_{3,n}$  визначається з подібності трикутників на графіку (рис. 4), що дозволяє показати зміну тиску в трубопроводі ділянки  $I$  залежно від його довжини та місця пошкодження:

$$p_{3,n-1} = \frac{(p_{0,n-1} - p_{1,n-1}) \cdot (L_{\text{Тр}1} - L_3)}{L_{\text{Тр}1}} + p_{1,n-1}, \quad (5)$$

де  $p_{3,n-1}$  – тиск в трубопроводах  $9$ ,  $11$  на ділянці  $III$ , МПа;  $L_{\text{Тр}1}$  – загальна довжина трубопроводу на ділянці  $I$ , м;  $L_3$  – довжина до місця пошкодження (витоку повітря), м.

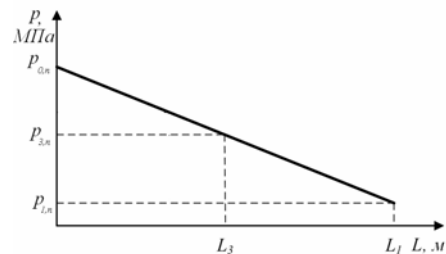


Рис. 4. Лінеаризований графік розподілу тиску в пошкодженому трубопроводі пневмопривода

Під час наповнення системи  $\sigma$  мінятиметься, оскільки змінюватиметься тиск повітря  $p_{i,n}$ . Критичне відношення тиску  $\sigma^*$  тобто коли режим закінчення міняється, визначається за формулою [1, 2]:

$$\sigma^* = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,5282, \quad (6)$$

де  $k = 1,4$  – показник адіабати.

Як відомо, розрізняються наступні режими наповнення:

– надкритичний режим, при дотриманні умови  $0 < \sigma < \sigma^*$  до досягнення в ділянці системи, яка заповнюється, критичного тиску  $p^* = \sigma^* \cdot p_{1,n}$  (з (4), (6));

– підкритичний режим, при  $\sigma^* < \sigma < 1$  та, від-

повідно, тиску в системі зверху критичного.

На початку процесу наповнення проходить в надкритичному режимі. Тому витрата повітря постійна (критична) і для його визначення скористаємося рівнянням [1]:

$$G_{*i,n} = K \cdot \mu_i \cdot f_i \cdot \frac{P_{i,n}}{\sqrt{R \cdot T_p}} \cdot \varphi(\sigma_*), \quad (7)$$

де

$$K = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot k}{k-1}} = 8,283 \frac{M^{1/2}}{c}; \quad \varphi(\sigma_*) = \sqrt{\frac{2}{\sigma_*^k - \sigma_*^k}};$$

$G_{*i,n}$  – критична витрата повітря на  $i$ -ої ділянці, кгс/с;  $\mu_i$  – коефіцієнт витрати на  $i$ -тої ділянці;  $f_i$  – площа прохідного перетину на  $i$ -тої ділянці,  $m^2$ ;  $R$  – універсальна газова постійна (для повітря  $R = 29,27$  кгс·м/кгс·°К);  $T_p$  – температура повітря в ресивері, °К;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $m/c^2$ .

При перевищенні критичного тиску в наповнюваній порожнині, процес переходить в підкритичний й витрата повітря визначається за виразом [1]:

$$G_{i,n} = K \cdot \mu_i \cdot f_i \cdot \frac{P_{i,n}}{\sqrt{R \cdot T_p}} \cdot \varphi(\sigma_{i,n}); \quad (8)$$

$$\varphi(\sigma_{i,n}) = \sqrt{\frac{2}{\sigma_{i,n}^k - \sigma_{i,n}^k}} \quad (9)$$

де  $G_{i,n}$  – витрата повітря на  $i$ -тої ділянці, кгс/с.

У рівняннях (7) і (8) площа прохідного перетину  $f_i$  ділянки  $I$  визначається з урахуванням різниці перетинів трубопроводу 9 і 11 (рис. 1) за формулою [1]:

$$f_i = \frac{f_{тр9} \cdot f_{тр11}}{\sqrt{f_{тр9}^2 - f_{тр11}^2}} \quad (10)$$

де  $f_{тр9}$  – площа прохідного перетину трубопроводу 9, визначається за його діаметром,  $m^2$ ;  $f_{тр11}$  – площа прохідного перетину трубопроводу 11, визначається за його діаметром,  $m^2$ .

Для ділянки II  $f_2$  визначається – за внутрішнім діаметром з'єднання трійника 13 трубопроводу 8 (але не більше площі прохідного перетину  $f_1$ ), а для ділянки III  $f_3$  – за діаметром отвору (пошкодження) сполучного косинця 10 (імітатор пошкодження).

Коефіцієнт витрати  $\mu_i$  можна визначити [2]:

$$\mu_i = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi_i}}, \quad (11)$$

де  $\sum \xi_i$  – сума коефіцієнтів втрат в місцевих опорах на  $i$ -тої ділянці.

Для визначення  $\xi_i$  можна використовувати формулу [1]:

$$\xi_i = \frac{\lambda_i \cdot L_i}{2 \cdot d_i}, \quad (12)$$

де  $\lambda_i$  – коефіцієнт тертя повітря під час його руху по трубопроводу на  $i$ -тої ділянці (залежить від числа Рейнольдса (визначається за таблицею [1]));  $L_i$  – довжина  $i$ -тої ділянці трубопроводу, м;  $d_i$  – внутрішній діаметр на  $i$ -тої ділянці, м.

Таким чином, коефіцієнт витрати на  $I$ -ої ділянці визначається як:

$$\mu_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi_{вх,тр1} + \xi_{тр1} + \xi_{вх,ГК}}}, \quad (13)$$

де  $\xi_{вх,тр1}$  – втрати в місцевому опорі на вході повітря в трубопровід 9 на  $I$ -ої ділянці ([2]  $\xi_{вх,тр1} = 1$ );  $\xi_{тр1}$  – втрати в місцевому опорі трубопроводу на  $I$ -ої ділянці визначаються за (12);  $\xi_{вх,ГК}$  – втрати в місцевому опорі при вході в порожнину гальмівної камери 12 ([2]  $\xi_{вх,ГК} = 1$ ).

$$\mu_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi_{тр2} + \zeta_y + \xi_{вх,лр}}}, \quad (14)$$

де  $\xi_{тр2}$  – втрати в місцевому опорі трубопроводу 8 на II-ої ділянці, визначаються за (12);  $\zeta_y$  – втрати на опір трійника 13 (поворот на 180°) в місці приєднання гальмівної камери 12 на II-ої ділянці ([2]  $\zeta_y = 0,24$ );  $\xi_{вх,лр}$  – втрати в місцевому опорі при вході в порожнину запобіжного пристрою 7 ([2]  $\xi_{вх,лр} = 1$ ).

$$\mu_3 = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi_{вт}}}, \quad (15)$$

де  $\xi_{вт}$  – втрати в місцевому опорі сполучного косинця 10 при його пошкодженні (отворі  $d_3$ ), визначаються за (12).

Для визначення миттєвої витрати повітря, тобто маси повітря, що приходить (витікає), в даний момент часу, можна скористатися формулами:

$$G_{Mi} = \frac{G_{*i} \cdot \Delta t}{g} \quad \text{або} \quad G_{Mi} = \frac{G_i \cdot \Delta t}{g}, \quad (16)$$

де  $G_{Mi}$  – миттєва витрата повітря на  $i$ -тої ділянці, кг;  $\Delta t$  – проміжок часу (інтервал вимірювання), с.

3. Обчислити поточне значення тиску повітря в ділянці II, визначивши масу та густину повітря:

$$\begin{cases} m_{2,n} = m_{2,n-1} + G_{M2} & \text{при } p_{2,n-1} \leq p_{0,n-1}; \\ m_{2,n} = m_{2,n-1} - G_{M2} & \text{при } p_{2,n-1} > p_{0,n-1}, \end{cases} \quad (17)$$

де  $m_{2,n}$  – поточна маса повітря в ділянці II, кг.

Поточне значення густини повітря в ділянці II можна отримати, перетворюючи (2):

$$\rho_{2,n} = \frac{m_{2,n}}{V_2}, \quad (18)$$

де  $\rho_{2,n}$  – поточна густина повітря в ділянці II,  $кг/м^3$ .

Поточне значення тиску повітря  $p_{2,n}$  у ділянці II, можна отримати, перетворюючи (3):

$$p_{2,n} = \frac{p_{2,n} + 8 \cdot 10^{-3}}{1,188} \quad (19)$$

4. Обчислити поточне значення тиску повітря в ділянці I, визначивши масу і густину повітря:

$$m_{1,n} = m_{1,n-1} + G_{M1} - G_{M2} - G_{M3} \quad (20)$$

де  $m_{1,n}$  – поточне значення маси повітря в ділянці I, кг.

Поточне значення густини та тиску повітря в ділянці I можна визначити за аналогію з виразами (18) і (19), відповідно як:

$$\rho_{1,n} = \frac{m_{1,n}}{V_1}; \quad (21)$$

$$p_{1,n} = \frac{\rho_{1,n} + 8 \cdot 10^{-3}}{1,188}, \quad (22)$$

де  $\rho_{1,n}$  – поточна густина повітря в ділянці I, кг/м<sup>3</sup>;  $p_{1,n}$  – поточний тиск повітря, в ділянці I, МПа.

5. Обчислити поточне значення тиску повітря в об'ємі  $V_{21}$  запобіжного пристрою 7, визначивши масу та густину повітря:

$$\begin{cases} m_{21,n} = m_{21,n-1} + G_{M21} & \text{при } p_{21,n-1} \leq p_{0,n-1}; \\ m_{21,n} = m_{21,n-1} - G_{M21} & \text{при } p_{21,n-1} > p_{0,n-1}, \end{cases} \quad (23)$$

де  $m_{21,n}$  – поточна маса повітря в об'ємі  $V_{21}$  запобіжного пристрою, кг;  $m_{21,n-1}$  – попереднє значення маси повітря в об'ємі  $V_{21}$  запобіжного пристрою, кг

Поточне значення густини повітря в об'ємі  $V_{21}$  запобіжного пристрою можна отримати, перетворюючи (2):

$$\rho_{21,n} = \frac{m_{21,n}}{V_{21}}, \quad (24)$$

де  $\rho_{21,n}$  – поточна густина повітря в об'ємі  $V_{21}$  запобіжного пристрою, кг/м<sup>3</sup>.

Поточне значення тиску повітря  $p_{21,n}$  у об'ємі  $V_{21}$  запобіжного пристрою можна отримати, перетворюючи (3):

$$p_{21,n} = \frac{p_{21,n} + 8 \cdot 10^{-3}}{1,188}. \quad (25)$$

6. Обчислити поточне значення тиску повітря в ресивері, визначивши масу та густину повітря:

$$m_{0,n} = m_{0,n-1} - G_{M1} - G_{M2} - G_{M3} - G_{M21}, \quad (26)$$

де  $m_{0,n}$  – поточна маса повітря в ресивері, кг.

Якщо компресор працює формула (26) перетворюється:

$$m_{0,n} = m_{0,n-1} + G_{MK} - G_{M1} - G_{M2} - G_{M3} - G_{M21}, \quad (27)$$

де  $G_{MK}$  – миттєва подача повітря компресором [6], кг

Поточне значення густини і тиску повітря в ресивері можна визначити за аналогією з формулами (18) та (19), відповідно:

$$\rho_{0,n} = \frac{m_{0,n}}{V_{0,n}}; \quad (28)$$

$$p_{0,n} = \frac{\rho_{0,n} + 8 \cdot 10^{-3}}{1,188}, \quad (29)$$

де  $\rho_{0,n}$  – поточна густина повітря в ресивері, кг/м<sup>3</sup>;  $p_{0,n}$  – поточний тиск повітря в ресивері, МПа.

Надані рівняння вирішуються методом чисельної інтеграції.

**2. Розрахунок другого періоду роботи пневматичного приводу.** Досягши рівності  $p_{d,0} = p_{1,n}$  починається другий період.

Переміщення штока діафрагми гальмівної камери викликає збільшення об'єму гальмівної камери. Для визначення його зміни залежно від тиску в гальмівній камері можна скористатися формулою:

$$V_1(p_{1,n}) = V_{01} + f_d \cdot x_{шт}; \quad (30)$$

$$x_{шт} = \frac{f_d \cdot (p_{1,n} - p_{0d})}{C},$$

де  $x_{шт}$  – переміщення штока, м;  $C$  – коефіцієнт жорсткості пружин (у гальмівної камері та колодках), Н/м;  $V_{01}$  – об'єм повітря на ділянці I до початку переміщення штока гальмівної камери, м<sup>3</sup>.

Решта параметрів при розрахунку другого періоду визначається за аналогією з рівняннями (2) – (29), які були використані при обчисленнях в попередньому періоді.

**3. Розрахунок третього періоду роботи пневматичного приводу.** Досягши рівності  $x_{шт} = x_k$  ( $x_k$  – величина максимального ходу штока гальмівної камери) шток гальмівної камери зупиняється – відповідно припиняється зміна об'єму. Розпочинається третій період, в якому, як було вказано вище, всі процеси проходять за аналогією з першим періодом.

**4. Розрахунок різниці сил в запобіжному пристрою в залежності від перепаду тиску.** З урахуванням наданих вище формул можна визначити силу тиску на діафрагму 3 та шток 5 запобіжного пристрою з боку об'єму  $V_{12}$ :

$$P_{12,n} = p_{0,n} \cdot \frac{\pi \cdot d_{12}^2}{4} + \frac{p_{2,n} \cdot \pi \cdot (d_d^2 - d_{12}^2)}{4}, \quad (31)$$

де  $P_{12,n}$  – сила тиску на діафрагму та шток запобіжного пристрою з боку об'єму  $V_{12}$ , Н;  $d_{12}$  – діаметр штока запобіжного пристрою з боку об'єму  $V_{12}$ , м.

Протидіючу силу тиску на діафрагму 3 і шток 5 запобіжного пристрою з боку об'єму  $V_{21}$  можна визначити за рівнянням:

$$P_{21,n} = p_{0,n} \cdot \frac{\pi \cdot d_{21}^2}{4} + \frac{p_{21,n} \cdot \pi \cdot (d_d^2 - d_{21}^2)}{4}, \quad (32)$$

де  $P_{21}$  – сила тиску на діафрагму і шток запобіжного пристрою з боку об'єму  $V_{21}$ , Н;  $d_{21}$  – діаметр штока запобіжного пристрою з боку об'єму  $V_{21}$ , м.

Таким чином, різниця сил тиску між виходом з запобіжного пристрою 7 та входом до гальмівної камери 12 можна визначити як:

$$\Delta P_n = P_{21,n} - P_{12,n}, \quad (33)$$

де  $\Delta P_n$  – різниця сил тиску між виходом з запобіжного пристрою та входом до гальмівної камери, Н.

Величину перепаду тиску між виходом з запобіжного пристрою 7 та входом в гальмівну камеру 12 можна визначити за формулою:

$$\Delta p_{\text{пор}} = \Delta P_n \div \frac{\pi}{4} \cdot \left( d_d^2 - \left( \frac{d_{21} + d_{12}}{2} \right)^2 \right). \quad (34)$$

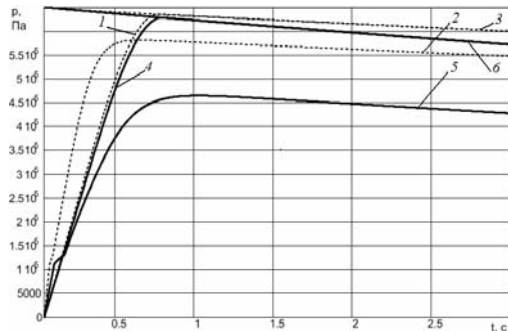


Рис. 5. Залежність тиску в об'ємі  $V_{21}$ , гальмівної камері, запобіжному пристрою від часу: 1, 2, 3 – площа перетину пошкодження трубопроводу  $1,96 \times 10^{-5} \text{ м}^2$ ; 5, 6, 7 – площа перетину пошкодження трубопроводу  $2,38 \times 10^{-5} \text{ м}^2$

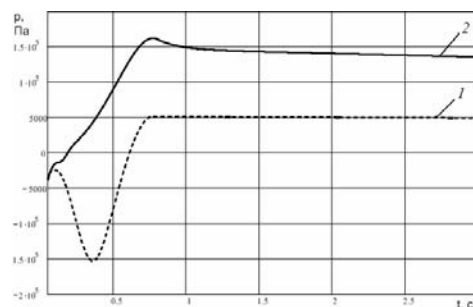


Рис. 6. Залежність перепаду тиску між об'ємами  $V_{21}$  та  $V_{12}$  запобіжного пристрою від часу: 1 – площа перетину пошкодження трубопроводу  $1,96 \times 10^{-5} \text{ м}^2$ ; 2 – площа перетину пошкодження трубопроводу  $2,38 \times 10^{-5} \text{ м}^2$

Підставивши значення до вище наданих формул, які відповідають конструктивним параметрам РГС ЗР, з урахуванням пошкодження трубопроводу площею перетину  $1,96 \times 10^{-5} \text{ м}^2$  та  $2,38 \times 10^{-5} \text{ м}^2$ , були побудовані графіки (рис. 5, 6). Таким чином запропонована математична модель відповідає проведеному експерименту [3].

## Висновки

В результаті дослідження підтверджена доцільність включення в пневматичний привід пристрою, що відключає пошкоджену ділянку приводу. Сигналом на спрацювання такого пристрою може служити динамічний перепад тиску на його діафрагмі, порогове значення якого складає  $0,05 \text{ МПа}$ .

## Список літератури

1. Герц Е.В. Расчет пневмоприводов: справочное пособие / Е.В. Герц, Г.В. Крейнин. – М.: Машиностроение, 1975. – 272 с.
2. Бежанов Б.Н. Пневматические системы автоматизации технологических процессов / Б.Н. Бежанов. – М.: Машгиз, 1963. – 288 с.
3. Гецович Е.М. Влияние площади проходного сечения повреждения на давление в пневматическом приводе рабочей тормозной системы / Е.М. Гецович, И.В. Рогозин, В.В. Сидоров // Системи навігації, управління та зв'язку. – К.: ЦНДІ НУ, 2008. – Вип. 3 (7). – С. 76-79.
4. Рогозин И.В. Математическая модель экстренного одноразового торможения АТС / И.В. Рогозин // Механіка та машинобудування. – Х.: АНВШУ, НТУ «ХПІ», 2004. – 170 с.
5. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Физматгиз, 1961 – 708 с.
6. Гуревич П.В. Пневматический тормозной привод автотранспортных средств: учебник для вузов / П.В. Гуревич, Р.А. Меламуд. – М.: Транспорт, 1988. – 224 с.

Надійшла до редколегії 27.03.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.А. Подрігалю, Харківський національний автомобільний університет, Харків.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПРИВОДА РАБОЧЕЙ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ С ЗАЩИТНЫМ УСТРОЙСТВОМ

Е.М. Гецович, И.В. Рогозин

Предложена математическая модель пневматического привода рабочей тормозной системы (РТС) с защитным устройством средства движения (СД). Исследовано влияние площади проходного пересечения повреждения трубопровода, через которую происходит исток воздуха на участке между тормозным краном и тормозной камерой, на давление в пневматическом приводе РТС СД. Рассчитана предельная величина площади проходного пересечения повреждения, при котором происходит критическое падение давления воздуха в РТС СД и возникает необходимость в отключении неисправного контура.

**Ключевые слова:** математическая модель, пневматический привод, площадь проходного пересечения повреждения, средство движения.

## MATHEMATICAL MODEL OF PNEUMATIC DRIVE WORKING BRAKE SYSTEM WITH A PROTECTIVE DEVICE

E.M. Getsovich, I.V. Rogozin

The mathematical model of pneumatic occasion of the working brake system (WBS) is offered with the protective device of mean of mobile (ZR). To probed influencing of area of the communicating crossing of damage of pipeline, through which a source of air is on an area between a brake faucet and brake chamber, on pressure in the pneumatic occasion of WBS ZR. The maximum size of area of the communicating crossing of damage at which the critical falling of pressure of air is in WBS ZR and there is a necessity for disconnecting defective a contour is expected.

**Keywords:** mathematical model, pneumatic drive, area of the communicating crossing of damage, mean of mobile.