

Roman Kroczek, Jarosław Domin

Politechnika Śląska

Wydział Elektryczny

Katedra Mechatroniki

PROJEKT PNEUMATYCZNEGO MODUŁU NAPĘDOWEGO JAKO ZADAJNIKA PRĘDKOŚCI POCZĄTKOWEJ W HYBRYDOWEJ WYRZUTNI ELEKTROMAGNETYCZNEJ

PROJECT OF AN PNEUMATIC DRIVE UNIT AS INITIAL DECELERATOR OF HYBRID ELECTROMAGNETIC LAUNCHER

Streszczenie: W artykule przedstawiono metodykę projektowania pneumatycznego modułu napędowego jako zadajnika prędkości hybrydowej wyrzutni elektromagnetycznej. Zaprezentowano matematyczny model wiążący podstawowe zmienne konstrukcyjne oraz jego wykorzystanie w procesie projektowania modułu napędowego o zadanych parametrach końcowych. Przedstawiono również wyniki badań pomiarowych modułu pneumatycznego oraz dokonano weryfikacji modelu matematycznego.

Abstract: The paper presents the methodology of designing a pneumatic drive unit as initial decelerator of hybrid electromagnetic launcher. The paper presents a mathematical model of binding basic design variables and its use in the design of the drive unit of the given parameters. It also presents the results of measuring the pneumatic module and a verification of the mathematical model.

Słowa kluczowe: wyrzutnia elektromagnetyczna, moduł pneumatyczny, zadajnik prędkości

Keywords: electromagnetic launcher, pneumatic module, initial decelerator

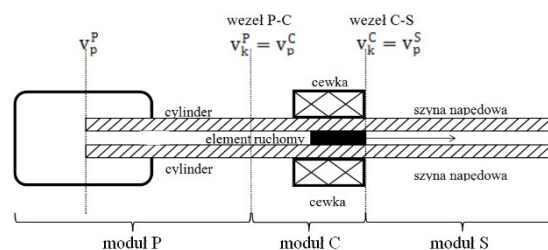
1. Wstęp

1.1 Koncepcja i struktura wyrzutni elektromagnetycznej o napędzie hybrydowym (cewkowo-szynowym ze wspomaganie pneumatycznym)

Wyrzutnia elektromagnetyczna o napędzie hybrydowym, przedstawiona na Rys.1., jest konstrukcją o trzech oddzielnych modułach napędowych połączonych funkcjonalnie w taki sposób, aby umożliwić trójstopniowe rozpędzanie elementu ruchomego. Wyrzutnię elektromagnetyczną o napędzie hybrydowym tworzą:

- pneumatyczny moduł nadawania prędkości początkowej (zwany dalej modułem P),
- elektromagnetyczny moduł napędowy z cewką (zwany dalej modułem C),
- elektromagnetyczny moduł napędowy z szynami (zwany dalej modułem S).

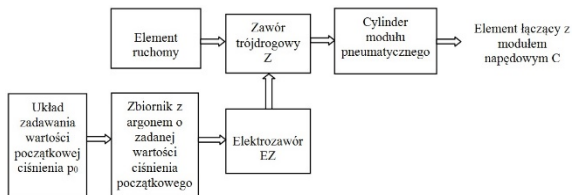
Zadaniem modułu P jest nadanie prędkości początkowej elementu ruchomego przed jego wejściem w obszar oddziaływania kolejnych modułów napędowych [1].



Rys.1. Schemat ideowy wyrzutni elektromagnetycznej o napędzie hybrydowym, gdzie: v_p^P – prędkość początkowa elementu ruchomego (pocisku) dla modułu P, v_k^P – prędkość końcowa elementu ruchomego dla modułu P, v_k^C – prędkość początkowa elementu ruchomego dla modułu C, v_k^C – prędkość końcowa elementu ruchomego dla modułu C, v_p^S – prędkość początkowa elementu ruchomego dla modułu S, v_k^S – prędkość końcowa elementu ruchomego dla modułu S, v_r – prędkość elementu ruchomego,

2. Projekt i badania symulacyjne modelu modułu P

2.1 Schemat ideowy budowy oraz zasada działania modułu P

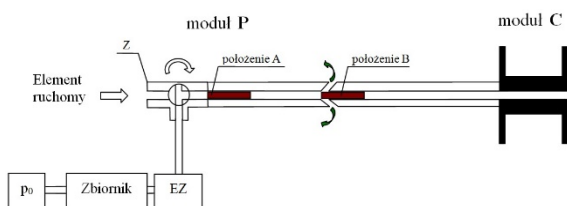


Rys.2. Schemat ideowy modułu P

W pneumatycznym module napędowym możemy wyodrębnić następujące części składowe:

- układ zadawania wartości początkowej ciśnienia p_0 ,
- zbiornik z argonem o objętości V_0 i ciśnieniu równym wartości zadanej p_0 ,
- elektrozawór EZ,
- cylinder,
- zawór trójdrogowy Z sterowany ręcznie.

Na Rys.3. przedstawiono szkic konstrukcyjny połączenia modułu P z kolejnym modulem C.



Rys.3. Szkic konstrukcyjny połączenia modułu P i C

2.2 Model matematyczny modułu pneumatycznego P wiążącego wybrane zmienne konstrukcyjne oraz jego badania symulacyjne

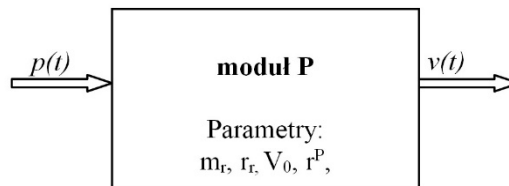
2.2.1 Założenia upraszczające i uwagi wstępne

Przy formułowaniu modelu matematycznego modułu pneumatycznego bazującego na przemianie adiabatycznej, przyjęto następujące założenia upraszczające:

- przemiana gazowa w module pneumatycznym ma charakter adiabatyczny,
- czas przełączania elektrozaworu jest równy 0 (czyli zakłada się natychmiastowe otwarcie oraz zamknięcie zaworu),
- ciśnienie bezwzględne za elementem ruchomym przed otwarciem elektrozaworu jest równe ciśnieniu atmosferycznemu,

- pomija się opór pneumatyczny dla zespołu „elektrozawór-zawór trójdrogowy”,
- objętość wewnętrzna zaworu trójdrogowego jest pomijalnie mała.

Za wielkość wejściową (sterującą) w modelu matematycznym modułu P przyjęto ciśnienie gazu $p(t)$, zaś za wielkość wyjściową – prędkość elementu ruchomego $v(t)$ (Rys.4.).



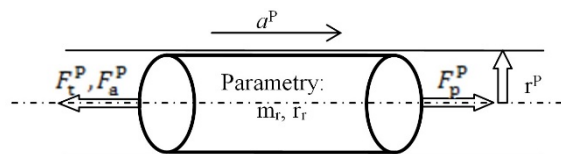
Rys.4. Wielkość: wejściowa i wyjściowa dla modelu modułu P

Model matematyczny wiąże następujące podstawowe zmienne konstrukcyjne:

- m_r – masa elementu ruchomego,
- r_r – promień podstawy elementu ruchomego,
- V_0 – objętość zbiornika argonu,
- r^P – promień wewnętrzny cylindra modułu pneumatycznego.

2.2.2 Model matematyczny, bazujący na metodzie adiabatycznej oraz jego badania symulacyjne

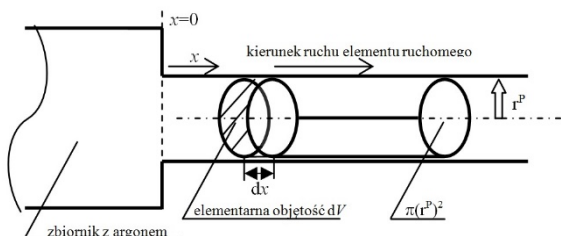
Siły [2,3], działające na element ruchomy znajdujący się wewnątrz modułu pneumatycznego P, przedstawiono na Rys.5.:



Rys.5. Siły działające na element ruchomy gdzie:

- F_p^P – siła parcia argonu na powierzchnię podstawy elementu ruchomego,
- F_t^P – siła tarcia, wynikająca z tarcia powierzchni zewnętrznej elementu ruchomego o cylinder modułu napędowego,
- F_a^P – siła, wynikająca ze zjawiska oporu aerodynamicznego,
- a^P – wartość chwilowa przyspieszenia elementu ruchomego dla modułu P.

Przemieszczanie się elementu ruchomego wewnątrz cylindra napędowego skutkuje zwiększaniem się objętości sprężonego gazu o objętość dV , zależną od aktualnego położenia elementu ruchomego (Rys.6.).



Rys.6. Zmiana objętości sprężonego gazu w trakcie ruchu elementu ruchomego

Zaimplementowano układ trzech równań (wiążących przebiegi czasowe: $v(t)$, $V(t)$ oraz $p(t)$) w środowisku Matlab/Simulink:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{p(t) * \pi r_r^2 - F_a^P - F_t^P}{m_r}, \\ \frac{dV}{dt} = \pi (r^P)^2 * v(t), \\ \frac{dp}{dt} = -\kappa p_0 V_0^\kappa V(t)^{-(\kappa+1)} * \frac{dV}{dt}. \end{cases} \quad (1)$$

2.2.3 Model matematyczny, bazujący na metodzie technicznej wg. Z. Kamińskiego

W celu uwiarygodnienia oraz ewentualnego udokładnienia modelu matematycznego, bazującego na metodzie adiabatycznej, postanowiono wykorzystać dodatkowo do opisu modułu pneumatycznego P metodę techniczną wg. Z.Kamińskiego [4,5,6] oraz wytyczne zawarte w normie ISO 6258 [7] (opis właściwości przepływowych układów pneumatycznych), co wiąże się ze zmianą zależności (1).

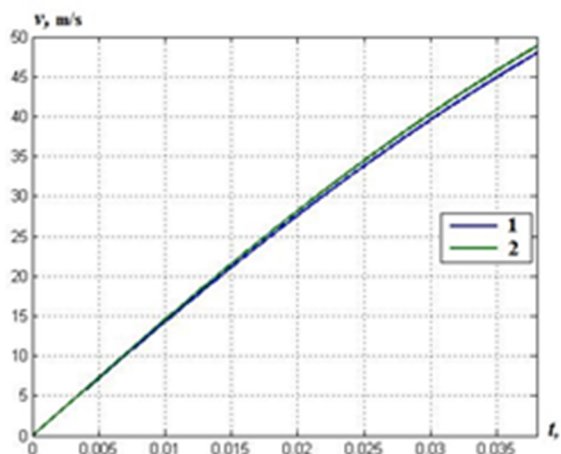
$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} = (\mu A) \frac{\kappa p(t)}{RV(t)} \sqrt{\kappa RT_0 \left(\frac{p(t)}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \varphi_{\max(\sigma)} \varphi(\sigma)}, \\ \frac{dV}{dt} = \pi (r^P)^2 * v(t), \\ \frac{dv}{dt} = \frac{p(t) * \pi r_r^2 - F_a^P - F_t^P}{m_r}. \end{cases} \quad (2)$$

2.2.4 Porównanie modelu bazującego na przemianie adiabatycznej z modelem matematycznym bazującym na metodzie technicznej wg. Z. Kamińskiego

Dla sprawdzenia poprawności obu modeli matematycznych i potwierdzenia ich równoważności, przedstawiono na Rys.7. przykładowy przebieg prędkości $v(t)$ (oznaczony cyfrą 2), uzyskany na podstawie badań symulacyjnych modelu matematycznego oraz przebieg prędkości $v(t)$ (oznaczony cyfrą 1), uzyskany na podstawie badań symulacyjnych modelu matematycznego dla następujących przykładowych wartości wielkości wejściowej:

- $p_0 = 506625$ Pa czyli 5 atm.,
- współczynnika adiabaty dla argonu:
- $\kappa = 1,67$,
- temperatury sprężonego gazu w zbiorniku:
- $T_0 = 293$ K,
- a także następujących wartości podstawowych zmiennych konstrukcyjnych:
- $m_r = 39$ g,
- $r_r = 6$ mm,
- $V_0 = 4,2 * 10^{-4}$ m³,
- $r_p = 6$ mm,

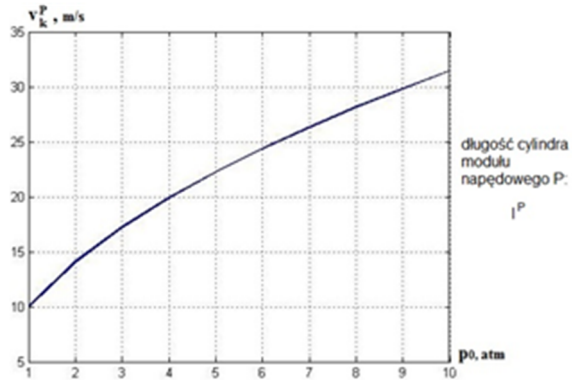
oraz dla przyjętego przedziału symulacji $x \in < 0,1 \text{ m} >$ co odpowiada przedziałowi czasu symulacji $t \in < 0,0.38 \text{ s} >$.



Rys.7. Porównanie przebiegów prędkości v otrzymanych w wyniku badań symulacyjnych modeli matematycznych: bazującego na metodzie wg. Z. Kamińskiego (1), bazującego na metodzie adiabatycznej (2)

Oba modele można z technicznego punktu widzenia uznać za równoważne. Do dalszych analiz i na potrzeby projektu konstrukcji wykorzystany zostanie model, bazujący na metodzie wg. Z. Kamińskiego.

Stąd też najistotniejszą charakterystyką statyczną, którą można otrzymać na podstawie dynamicznego modelu matematycznego modułu pneumatycznego, jest charakterystyka opisująca zależność: „**prędkość końcowa elementu ruchomego** w module pneumatycznym v_k^P - w funkcji **wartości początkowej ciśnienia gazu** (argonu) w zbiorniku p_0 ”: $v_k^P = f(p_0)$.



Rys.8. Charakterystyka statyczna: „prędkość końcowa elementu ruchomego - ciśnienie początkowe” $v_k^P = f(p_0)$ dla różnych wartości początkowych ciśnienia $p_0 \in \langle 1,20 \rangle$ atm. Dla: współczynnika adiabaty: $\kappa = 1,67$, temperatury sprężonego gazu w zbiorniku: $T_0 = 293$ K, wartości podstawowych zmiennych konstrukcyjnych: $m_r=39$ g, $r_r=6$ mm, $V_0=4,2 \cdot 10^{-4}$ atm., $r_p=6$ mm, przy założeniu, że długość cylindra $l^P=0,3$ m

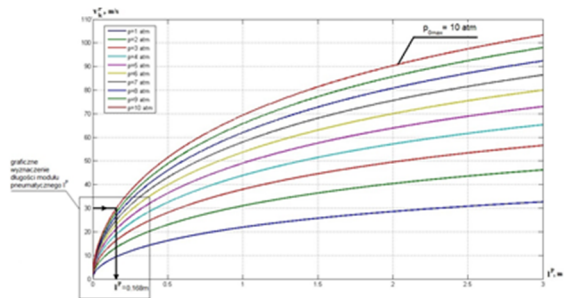
3. PROJEKT MODUŁU NAPĘDOWEGO P

3.1 Wyznaczenie długości cylindra modułu napędowego l^P – obliczenia projektowe

Wyznaczona charakterystyka: „prędkość końcowa elementu ruchomego – długość cylindra modułu P” $v_k^P = f(l^P)$, dla przyjętego ograniczenia:

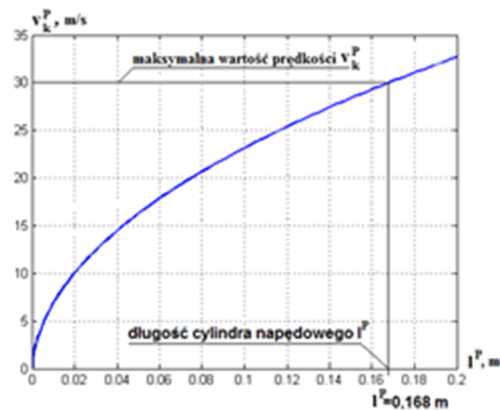
- $p_{0\max}=10$ atm,
- $v_k^P=30$ m/s,
- $F_t^P = 15$ N,
- $F_a^P = 0,5$ N,

została przedstawiona na Rys.9.



Rys.9. Charakterystyka statyczna: „prędkość końcowa elementu ruchomego – długość cylindra modułu P” $v_k^P = f(l^P)$ dla różnych wartości początkowych ciśnienia $p_0 \in \langle 1,10 \rangle$ atm. Dla: współczynnika adiabaty: $\kappa = 1,67$, temperatury sprężonego gazu w zbiorniku: $T_0 = 293$ K, wartości podstawowych zmiennych konstrukcyjnych: $m_r=39$ g, $r_r=6$ mm, $V_0=4,2 \cdot 10^{-4}$ atm., $r_p=6$ mm, wartości siły tarcia: $F_t^P = 15$ N, wartości siły oporu aerodynamicznego: $F_a^P = 0,5$ N.

Na Rys.10. przedstawiono powiększony fragment Rys.9. dla wartości ciśnienia $p_0=10$ atm.



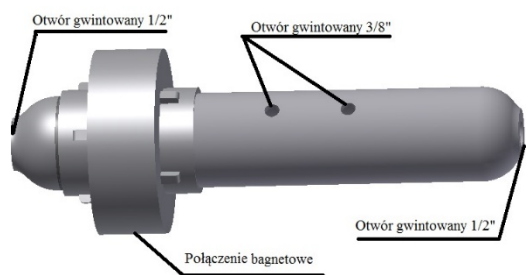
Rys.10. Charakterystyka statyczna: „prędkość końcowa elementu ruchomego – długość cylindra modułu P” $v_k^P = f(l^P)$ dla wartości początkowej ciśnienia $p_0 = 10$ atm. Dla: współczynnika adiabaty: $\kappa = 1,67$, temperatury sprężonego gazu w zbiorniku: $T_0 = 293$ K, wartości podstawowych zmiennych konstrukcyjnych: $m_r=39$ g, $r_r=6$ mm, $V_0=4,2 \cdot 10^{-4}$ atm., $r_p=6$ mm, wartości siły tarcia: $F_t^P = 15$ N, wartości siły oporu aerodynamicznego: $F_a^P = 0,5$ N

Aby uzyskać przykładową prędkość $v_k^P=30$ m/s, długość l^P powinna wynosić **0,17m** (Rys.10.). Taką długość modułu przyjęto w opracowanym w Katedrze Mechatroniki prototypie elektromagnetycznej wyrzutni o napędzie hybrydowym.

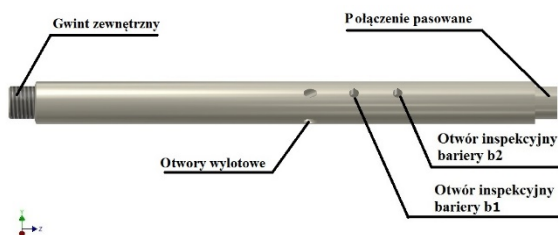
4. KONSTRUKCJA MODUŁU P

4.1 Rozwiązania konstrukcyjne, zastosowane w module pneumatycznym

Do budowy pneumatycznego modułu P wykorzystano ogólnodostępne komponenty: butla, zawory, elektrozawory, manometry oraz czujnik ciśnienia. Ponadto zaprojektowano zbiornik argonu, którego wizualizację przedstawiono na Rys.11., oraz cylinder napędowy, którego wizualizację przedstawiono na Rys.12.



Rys.11. Konstrukcja zbiornika argonu



Rys.12. Konstrukcja cylindra modułu napędowego

4.2 Badania pomiarowe modułu pneumatycznego oraz weryfikacja modelu matematycznego wiążącego zmienne konstrukcyjne: m_r, r_r, v_0, r^P

Dla rozpatrywanego pneumatycznego modułu napędowego P, (wykonanego i zamontowanego na stanowisku pomiarowym), przeprowadzono serię badań pomiarowych, których celem była weryfikacja modeli matematycznych. Badania przeprowadzono dla wartości wielkości wejściowej p_0 zmiennej w zakresie $p_0 \in \{1, 10\}$ atm z krokiem $\Delta p_0 = 1$ atm, dla następujących parametrów układu:

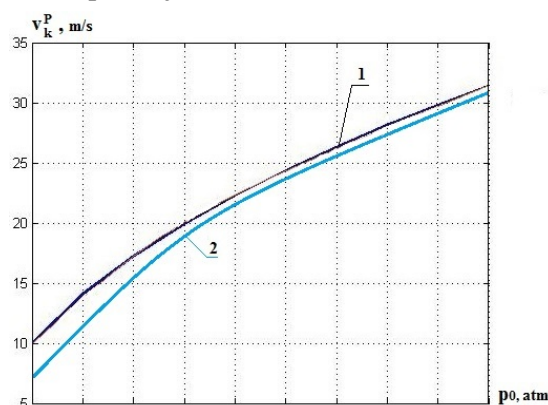
- masa elementu ruchomego: $m_r = 39$ g,
- długość elementu ruchomego: $l_r = 42$ mm,
- promień elementu ruchomego: $r_r = 6$ mm,
- objętość zbiornika argonu: $V_0 = 2.74 \cdot 10^{-4}$ m³,
- promień wewnętrzny cylindra modułu pneumatycznego $r^P = 6.25$ mm,

- wartość początkowa temperatury bezwzględnej argonu w zbiorniku $T_0 = 293$ K,
- pole swobodnego wypływu argonu ze zbiornika do cylindra, $\mu A = \pi(r^P)^2$.

Przyjęto następujące wartości stałych i współczynników charakterystycznych:

- przyspieszenie ziemskie $g = 9.81$ m/s²,
- wartość bezwzględna ciśnienia atmosferycznego $p_1 = 1000000$ Pa,
- wykładnik adiabaty, (dla argonu przyjmuje wartość $\kappa = 1,67$ /),
- stała gazowa, (dla argonu przyjmuje $R = 8,31$ J/mol·K).

Wyniki pomiarów dla wybranej serii pomiarowej w zestawieniu z wynikami otrzymanymi na drodze symulacji komputerowej modelu bazującego na metodzie technicznej Z.Kamińskiego w postaci charakterystyk $v_k^P = f(p_0)$ przedstawiono poniżej:



Rys.13. Porównanie charakterystyk statycznych: „prędkość końcowa elementu ruchomego - ciśnienie początkowe” $v_k^P = f(p_0)$ dla wybranych, stałych wartości początkowej ciśnienia $p_0 \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ atm otrzymanych w wyniku symulacji modelu bazującego na metodzie technicznej Z.Kamińskiego (1) z wynikami, uzyskanymi na drodze pomiarowej (2)

Dla wartości początkowej ciśnienia $p_0 > 5$ atm, różnica pomiędzy wartością zmierzoną prędkości v_k^P , a wartością uzyskaną na drodze symulacji komputerowej modelu matematycznego jest mniejsza niż 10%. Dla wartości początkowej ciśnienia $p_0 < 5$ atm, różnica pomiędzy wartością zmierzoną prędkości v_k^P , a wartością uzyskaną na drodze symulacji komputerowej modelu ma-

tematycznego, zwiększa się wraz ze zmniejszaniem się wartości ciśnienia p_0 i dla skrajnego przypadku $p_0=1\text{atm}$ wynosi 25%.

5. Uwagi końcowe

Mniejsza dokładność modelu matematycznego dla małych wartości ciśnienia p_0 , wynika z uproszczonego sposobu uwzględnienia zjawiska tarcia statycznego powierzchni zewnętrznej elementu ruchomego o cylinder modułu napędowego (przyjęto stałą wartość siły tarcia $F_t^P = 15\text{N}$, podczas gdy w rzeczywistości wartość tej siły zależy od prędkości elementu ruchomego i maleje wraz z jej wzrostem), bezwładności elementu ruchomego oraz nieidealnego dopasowania średnicy zewnętrznej elementu ruchomego do średnicy wewnętrznej cylindra napędowego (kalibracji). Podsumowując, można stwierdzić, że oba utworzone i wykorzystane modele matematyczne modułu P z równą dokładnością opisują układ rzeczywisty.

6. Literatura

[1] Krocze R.: Stanowisko dydaktyczno-laboratoryjnego dla układu wyrzutni elektromagnetycznej

(COILGUN)-projekt, optymalizacja polowa z wykorzystaniem programu FEMM, realizacja praktyczna, Gliwice 2005,

[2] Wellstead P.E., Introduction to Physical System Modelling, Academic Press Ltd, London, 1979, ISBN: 0-12-744380-0,

[3] Resnick R., Halliday D., Walker J.: Podstawy fizyki, PWN, Warszawa, 2011,

[4] Kamiński Z.: Doświadczalno-analityczne wyznaczenie charakterystyk przepływowych oporów pneumatycznych, Archiwum Automatyki i Telemekhaniki, tom VIII, z.3, 1963,

[5] Kamiński Z.: Podstawy teoretyczne dynamiki układów pneumatycznych, Rozprawy naukowe, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok, 2007,

[6] Kamiński Z.: Metody określania właściwości przepływowych elementów pneumatycznych, Hydraulika i Pneumatyka, 5/2007, s. 24-28,

[7] Norma ISO 6258,

Autorzy

Roman Krocze R., krocze.roman@gmail.com, Jarosław Domin, jaroslaw.domin@polsl.pl
Politechnika Śląska
Katedra Mechatroniki
ul. Akademicka 10A
44-100 Gliwice