

## Model analityczny pneumatycznego układu hamulca pojazdu szynowego

W pracy przedstawiono ogólne możliwości budowy modeli pneumatycznego układu hamulca pojazdu szynowego, wykorzystywanych do celów diagnostycznych. Zaprezentowano model analityczny pneumatycznego układu hamulcowego dla fazy napelniania. Model ten poddano weryfikacji eksperymentalnej dla dwóch konfiguracji zaworu rozrządczego. Porównano przebiegi czasowe ciśnień w zbiorniku pomocniczym i sterującym.

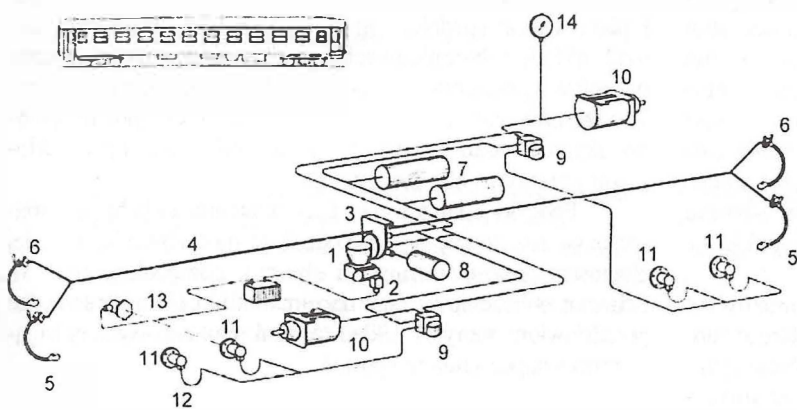
Artykuł powstał w wyniku realizacji projektu badawczego KBN nr 5T12C06324 pt. "Badanie i modelowanie układów hamulcowych w pojazdach szynowych".

### 1. Wprowadzenie

Układ hamulcowy należy do najważniejszych układów każdego pojazdu szynowego, a jego poprawne funkcjonowanie jest warunkiem dopuszczenia pojazdu do ruchu (spełnienie obowiązujących przepisów bezpieczeństwa ruchu).

Hamulec pojazdu szynowego jest złożonym układem składającym się co najmniej i najczęściej z części pneumatycznej i mechanicznej. Część pneumatyczna pełni funkcje sterujące hamulcem oraz dostarcza energii niezbędnej do uruchomienia części mechanicznej, która oddziałując bezpośrednio na zestawy kołowe powoduje hamowanie pojazdu.

Schemat zamieszczony na rys.1 przedstawia podzespoły należące do części pneumatycznej układu hamulcowego wagonu osobowego typu 111A oraz urządzeń dodatkowych, zmieniających ciśnienia w cylindrach hamulcowych zależnie od prędkości jazdy.



Rys. 1. Schemat układu sterowania hamulcem wagonu osobowego typu 111A [4]: 1 – zawór rozrządczy, 2 – zmieniacz hamowności, 3 – wspomnik zaworu rozrządczego, 4 – przewód główny, 5 – sprzęgi hamulcowe, 6 – kurki końcowe, 7 – zbiorniki pomocnicze o pojemności 100 i 125 dm<sup>3</sup>, 8 – zbiornik sterujący 15 dm<sup>3</sup>, 9 – zawory urządzeń przeciwpoślizgowych, 10 – cylinder hamulcowy, 11 – czujniki urządzeń przeciwpoślizgowych, 12 – przewody elastyczne, 13 – czujnik prędkości obrotowej zmieniacza hamowności, 14 – manometr ciśnienia w cylindrze

Skomplikowana budowa hamulca pojazdu szynowego powoduje, że niezbędne jest istnienie systemu oceny stanu technicznego tego układu, systemu, który dysponuje niezbędnymi środkami technicznymi i ludzkimi. Trzeba przy tym zaznaczyć, że podczas eksploatacji pojazdów szynowych następuje, w sposób nieunikniony, pogorszenie własności użytkowych szeregu elementów układu - ich zużycie i uszkodzenia. Wszystko to stanowi istotne utrudnienie w budowie automatycznych systemów oceny stanu technicznego hamulca. Naturalną tendencją w obecnych czasach jest bowiem eliminowanie lub ograniczanie do niezbędnego minimum roli człowieka w procesie badania i oceny stanu technicznego obiektów technicznych. W każdym systemie oceny, jeśli występuje człowiek, to stanowi on subiektywny i najczęściej najbardziej zawodny jego element.

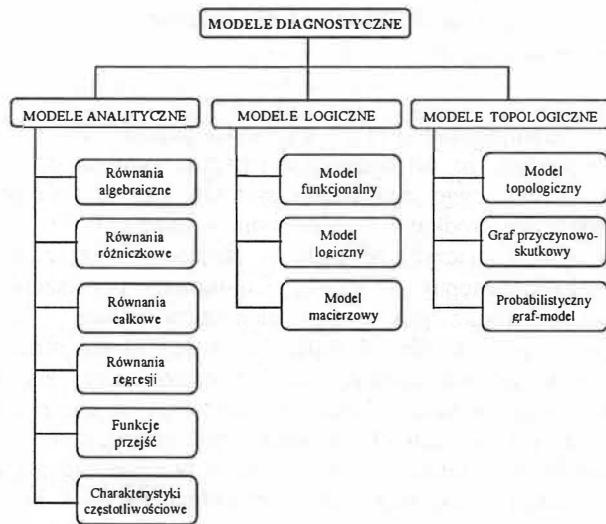
Budowa automatycznych systemów oceny stanu technicznego, w tym przypadku hamulca pojazdu szynowego, wymaga dogłębnego poznania wszystkich zjawisk, jakie zachodzą w tym obiekcie, a także przedstawienie ich na pewnym poziomie abstrakcji – w postaci modelu.

### 2. Modelowanie układów hamulcowych pojazdów szynowych

Podstawowym warunkiem budowy modeli układów hamulcowych jest zgromadzenie odpowiedniej ilości informacji o zachowaniu się tego obiektu technicznego. Może się to odbywać na drodze eksperymentalnej, w procesie eksploatacji lub na drodze teoretycznej. W wielu przypadkach wykorzystanie pierwszej z tych dróg jest utrudnione, zwłaszcza gdy chodzi o nowe, projektowane układy.

Dlatego należy poszukiwać takiego sposobu przedstawienia wszystkich zjawisk zachodzących w układzie hamulcowym pojazdu szynowego, które pozwolą na jak najlepsze przedstawienie współzależności pomiędzy parametrami diagnostycznymi z jednej strony a parametrami struktury wewnętrznej poszczególnych elementów z drugiej. Te ostatnie parametry mogą posiadać różne wartości, nie tylko na skutek destrukcyjnych procesów zużycia i uszkodzeń, lecz także i możliwych błędów popełnionych w procesie produkcji lub napraw. W procesie analizy tego rodzaju współzależności można z powodzeniem wykorzystać modele diagnostyczne (rys. 2), do których zalicza się trzy podstawowe grupy modeli [5]:

- modele analityczne,
- modele logiczne,
- modele topologiczne.



Rys.2. Klasyfikacja modeli diagnostycznych obiektów technicznych [5]

### 2.1. Model analityczny – uwagi ogólne

Modele analityczne przedstawiają obiekt w formie zbioru zależności analitycznych. Ich budowa najczęściej jest bardzo trudna ze względu na niewystarczający stan wiedzy w danej dziedzinie, konieczność przyjmowania szeregu założeń upraszczających czy też stosowania empirycznych współczynników. W obecnej dobie na szczęście znika jeszcze jedno utrudnienie związane z pracochłonnością obliczeń, które poprzednio ograniczało szerokie wykorzystanie tego rodzaju modeli. Obecnie można szeroko korzystać ze specjalistycznych komputerowych pakietów obliczeniowych.

Zalety modelu analitycznego takie, jak możliwość jego wielokrotnego wykorzystania, łatwość i szybkość modyfikacji, a co za tym idzie niskie koszty jego użycia sprawiają, że w pracy podjęto próbę budowy modelu analitycznego układu pneumatycznego hamulca pojazdu szynowego dla różnych faz jego funkcjonowania.

Układ pneumatyczny steruje procesem hamowania i od poprawności jego działania w znacznej mierze zależy prawidłowa praca hamulca pojazdu szynowego. Model analityczny powinien opisywać każdą z trzech podstawowych faz działania tego układu, tzn.:

- napelnianie,
- hamowanie,
- odhamowanie.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki uzyskane przy pomocy diagnostycznego modelu analitycznego dla fazy napelniania układu pneumatycznego hamulca pojazdu szynowego.

### 2.2. Model analityczny dla fazy napelniania układu hamulcowego

Faza napelniania przygotowuje układ hamulcowy do spełniania przewidzianych dla niego funkcji użytkowych. Obejmuje ona proces napelniania zbiorników: pomocniczego i sterującego powietrzem z przewodu głównego pojazdu szynowego, w którym panuje stabilne ciśnienie 0,5 MPa. Schemat połączeń dla tej fazy działania układu hamulcowego przedstawia rys. 3

Przebieg poszczególnych faz działania układu pneumatycznego hamulca pojazdu szynowego zależy w znacznej mierze od procesów przejściowych zachodzących w poszczególnych elementach i obwodach układu. Przez procesy przejściowe rozumie się w tym przypadku czasowe zmiany ciśnienia powietrza. Stosowane w wysokociśnieniowych pneumatycznych układach hamulcowych elementy takie jak zawory, silowniki, przewody oraz elementy połączeniowe przedstawiać można podczas ich matematycznego modelowania, przy użyciu:

- oporu pneumatycznego,
- pojemności skupionej.

Dlatego też nawet bardzo złożone pneumatyczne układy hamulcowe można z dużą dokładnością modelować jako połączenie odpowiednio połączonych wyidealizowanych elementów w postaci oporów miejscowych i pojemności skupionych.

Opracowanie matematycznego modelu dynamiki pneumatycznych układów hamulcowych sprowadza się do opisu zjawisk przepływu powietrza przez elementy układu, procesów napelniania i opróżniania komór o stałej lub zmiennej objętości oraz opisu stanów otwarcia i zamknięcia elementów sterujących przepływem czynnika roboczego. Podstawowym problemem w modelowaniu pneumatycznych układów hamulcowych jest opis masowego natężenia przepływu przez opór miejscowy. W pracach [2] i [3] przyjęto, że natężenie przepływu powietrza przez opór miejscowy określić można z wystarczającą dokładnością przy założeniu przepływu adiabaticznego.

Podczas analizowanej fazy działania układu pneumatycznego napelniane są równocześnie dwa zbiorniki o stałej objętości: zbiornik sterujący i zbiornik pomocniczy (rys. 3). Schemat obliczeniowy fazy napelniania układu hamulcowego przedstawiono na rys.4. Układ równań różniczkowych opisujący proces napelniania ma postać:

$$\begin{aligned}
 \frac{V_1}{\kappa RT} \frac{dp_1}{dt} &= (\mu A)_1 \cdot v_{kr} \cdot 0.654 \frac{P_0}{RT} \frac{P_0 - P_1}{1.13 P_0 - P_1} - (\mu A)_2 \cdot v_{kr} \cdot 0.654 \frac{P_1}{RT} \frac{P_1 - P_2}{1.13 P_1 - P_2} \cdot v \\
 \frac{V_2}{\kappa RT} \frac{dp_2}{dt} &= (\mu A)_2 \cdot v_{kr} \cdot 0.654 \frac{P_1}{RT} \frac{P_1 - P_2}{1.13 P_1 - P_2} - (\mu A)_3 \cdot v_{kr} \cdot 0.654 \frac{P_2}{RT} \frac{P_2 - P_3}{1.13 P_2 - P_3} - \\
 &+ (\mu A)_4 \cdot v_{kr} \cdot 0.654 \frac{P_2}{RT} \frac{P_2 - P_4}{1.13 P_2 - P_4} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\frac{V_3 dp_3}{\kappa RT dt} = (\mu A)_3 \cdot v_{kr} \cdot 0.654 \frac{p_2}{RT} \frac{p_2 - p_3}{1.13 p_2 - p_3}$$

$$\frac{V_4 dp_4}{\kappa RT dt} = (\mu A)_4 \cdot v_{kr} \cdot 0.654 \frac{p_2}{RT} \frac{p_2 - p_4}{1.13 p_2 - p_4}$$

gdzie:

$p_0 + p_4$  - ciśnienia w układzie jak na rys. 4

$V_1 + V_4$  - objętości przewodów i zbiorników,

$\mu$  - współczynnik wydatku,

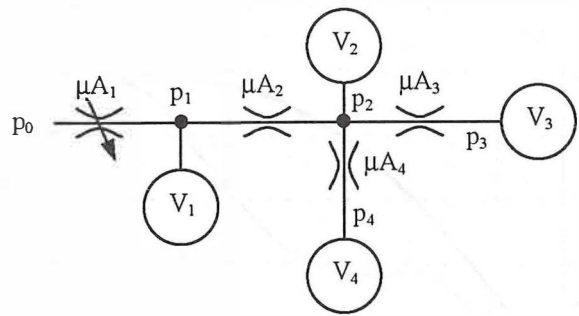
$A$  - poprzeczny przekrój kanału oporu miejscowego,

$v_{kr}$  - prędkość krytyczna, dla powietrza  $v_{kr} = \sqrt{\kappa RT}$ ,

$\kappa$  - wykładnik adiabaty, dla powietrza  $\kappa = 1.4$ ,

$R$  - stała gazowa, dla powietrza  $R = 287 \frac{J}{kg \cdot K}$ ,

$T$  - temperatura bezwzględna powietrza [K].



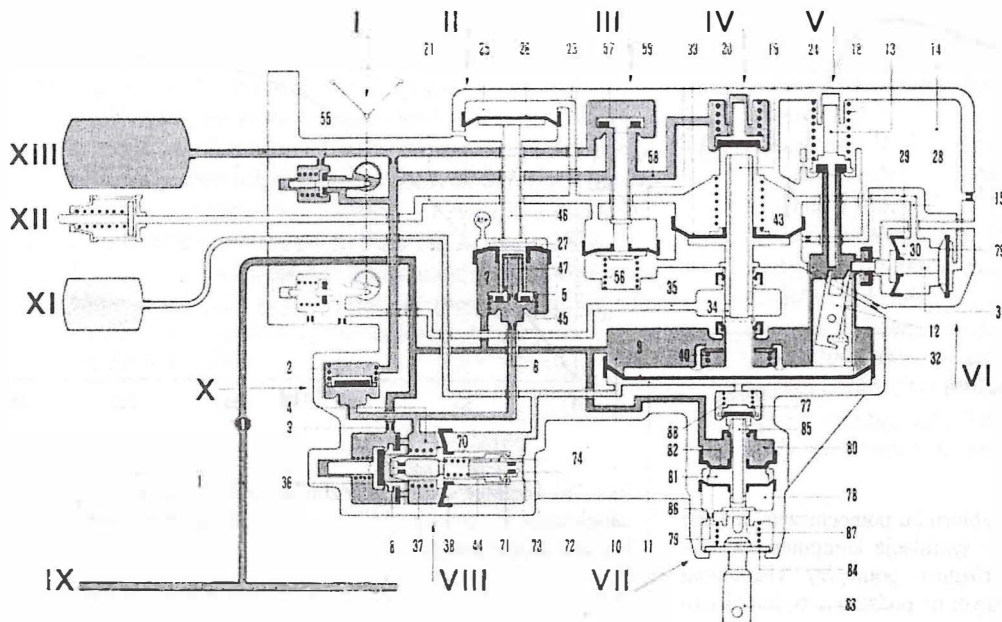
Rys. 4. Schemat obliczeniowy fazy napełniania układu hamulcowego:  $V_1$  - objętość przewodu głównego,  $V_2$  - objętość komór zaworze rozrządczym,  $V_3$  - objętość zbiornika sterującego,  $V_4$  - objętość zbiornika pomocniczego,  $p_0$  - ciśnienie w przewodzie głównym

### 3. Podsumowanie

Przedstawiony fragment modelu analitycznego umożliwia symulacje i analizowanie procesów przejściowych w układach pneumatycznych hamulca pojazdów szywnych. Może on być z powodzeniem wykorzystany w praktyce m.in. do oceny wpływu parametrów konstrukcyjnych układu na przebieg procesu hamowania. Model ten może być także użyty do badania zależności pomiędzy niezdatnościami elementów układu pneumatycznego hamulca, pojawiającymi się podczas eksploatacji, a parametrami diagnostycznymi tego układu.

Ilościowa

ocena różnic pomiędzy wynikami badań eksperymentalnych i symulacyjnych pokazuje, że model analityczny z zadowalającą dokładnością może opisywać procesy przejściowe zachodzące w układzie pneumatycznym hamulca pojazdu szywnego.

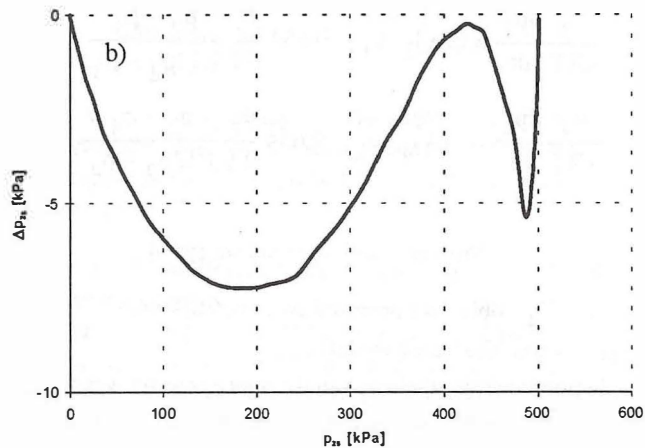
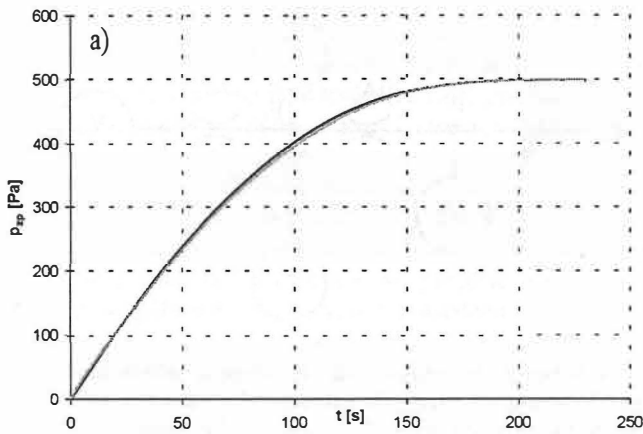


Rys. 3. Schemat połączeń między podzespołami układu pneumatycznego hamulca z zaworem rozrządczym typu Oerlikon EST3e w fazie napełniania [7]: I - kurek przestawczy T-O, II - zaworek zamykający, III - zaworek najmniejszego ciśnienia, IV - zawór sterujący, V - przyspieszacz, VI - zaworek ograniczający, VII - odłączniac samoczynny, VIII - zaworek napełniający, IX - przewód główny, X - zaworek zwrotny, XI - zbiornik sterujący, XII - cylinder hamulcowy, XIII - zbiornik pomocniczy

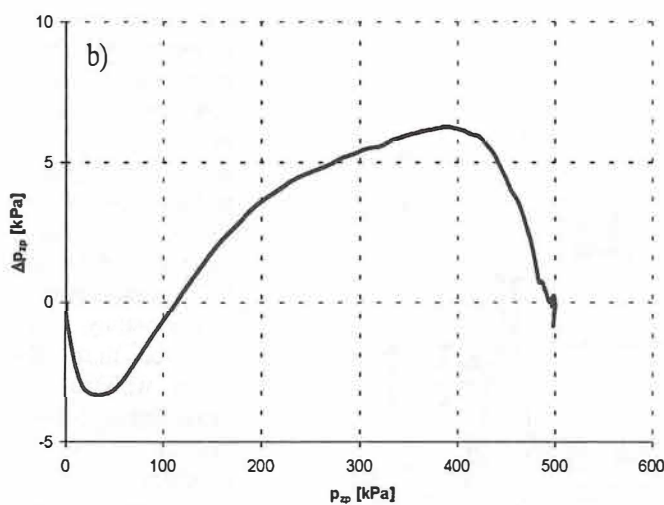
Model analityczny zjawisk w fazie napełniania poddano weryfikacji eksperymentalnej dla dwóch konfiguracji zaworu rozrządczego:

- zawór przystosowany do pracy z 12" silownikiem (cylidrem) hamulcowym,
- zawór przystosowany do pracy z 16" silownikiem.

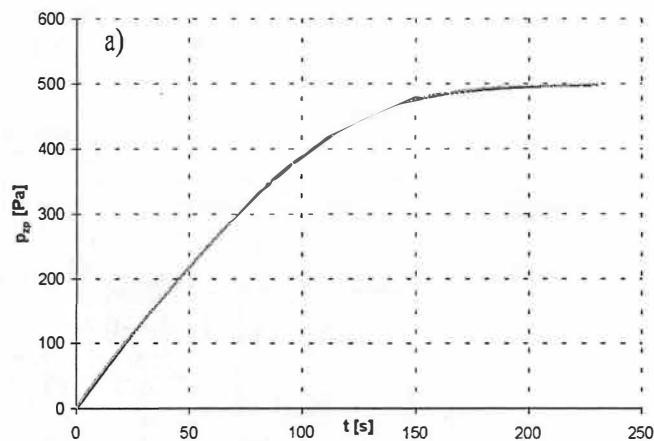
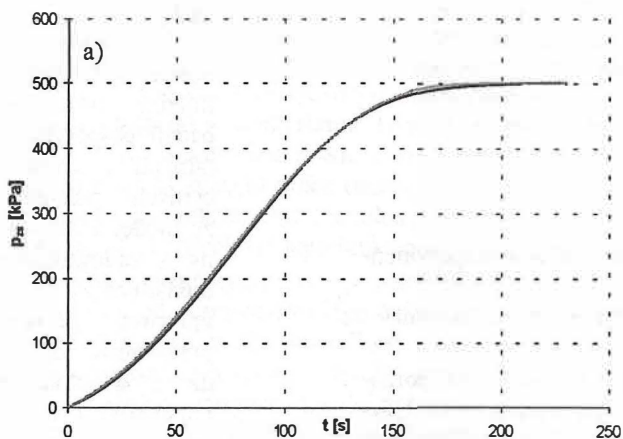
Obliczenia przeprowadzone przy użyciu układu równań (1) pozwoliły na sporządzenie przebiegów czasowych ciśnień w zbiorniku pomocniczym i sterującym. Uzyskane rezultaty porównano z wynikami badań eksperymentalnych. Przebiegi czasowe ciśnień w zbiorniku pomocniczym i sterującym przedstawiono na rys. 5÷8.



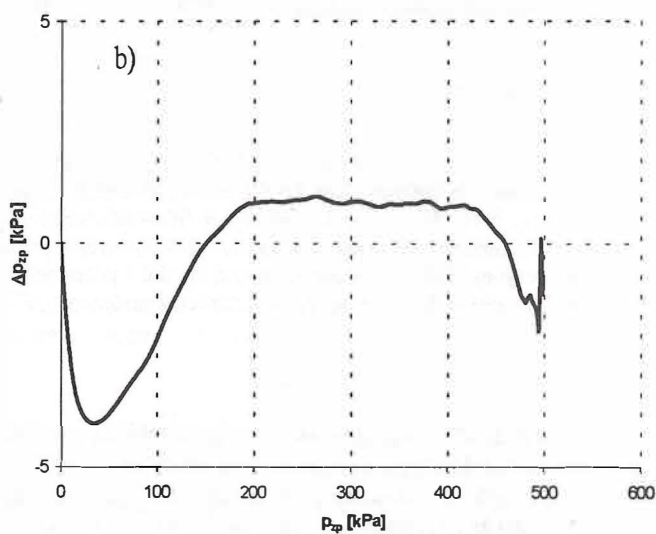
Rys. 6. a) Przebieg ciśnienia w zbiorniku sterującym w fazie napełniania dla cylindra 12<sup>o</sup>: 1 – symulacja komputerowa, 2 – badania eksperymentalne, b) różnica pomiędzy ciśnieniem w zbiorniku sterującym uzyskanym na podstawie badań eksperymentalnych oraz symulacji komputerowej



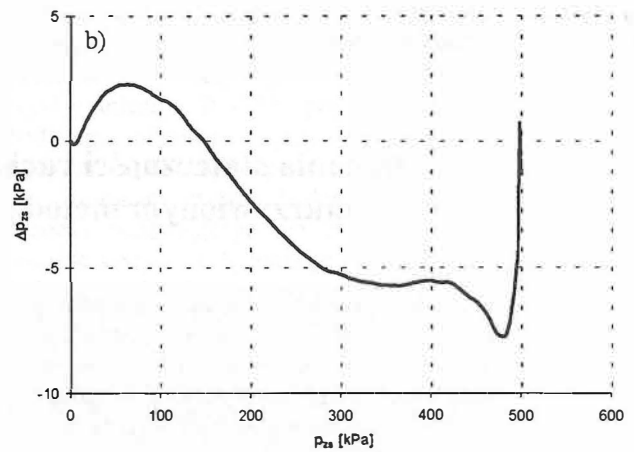
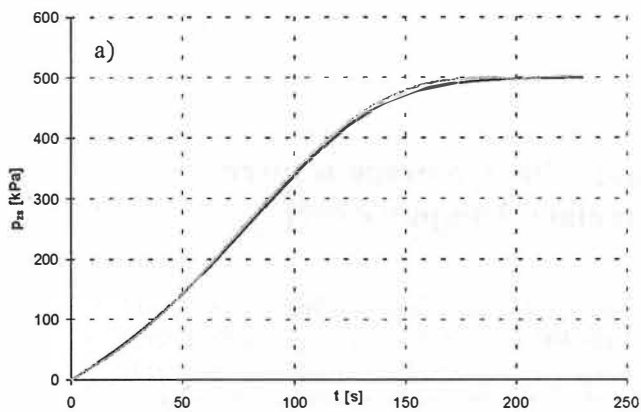
Rys. 5. a) Przebieg ciśnienia w zbiorniku pomocniczym w fazie napełniania dla cylindra 12<sup>o</sup>: 1 – symulacja komputerowa, 2 – badania eksperymentalne, b) różnica pomiędzy ciśnieniem w zbiorniku pomocniczym uzyskanym na podstawie badań eksperymentalnych oraz symulacji komputerowej



Rys. 7a) Przebieg ciśnienia w zbiorniku pomocniczym w fazie napełniania dla cylindra 16<sup>o</sup>: 1 – symulacja komputerowa, 2 – badania eksperymentalne



Rys. 7b) Różnica pomiędzy ciśnieniem w zbiorniku pomocniczym uzyskanym na podstawie badań eksperymentalnych oraz symulacji komputerowej



Rys. 8. a) Przebieg ciśnienia w zbiorniku sterującym w fazie napełniania dla cylindra 16<sup>o</sup>: 1 – symulacja komputerowa, 2 – badania eksperymentalne b) różnica pomiędzy ciśnieniem w zbiorniku sterującym uzyskanym na podstawie badań eksperymentalnych oraz symulacji komputerowej

## Literatura

- [1] Gąsowski W., Nowak R.: *Badania wagonów kolejowych. WPP, nr 1494 Poznań 1989.*
- [2] Miatluk M., Kamiński Z.: *Podstawy teoretyczne procesów przejściowych w pneumatycznych układach hamulcowych pojazdów. Teza Komisji Naukowo-Problemowej Motoryzacji, Tom 20, Kraków 2000.*
- [3] Kamiński Z., Miatluk M.: *Dynamika wieloobwodowych pneumatycznych układów hamulcowych pojazdów. Teza Komisji Naukowo-Problemowej Motoryzacji, Tom 20, Kraków 2000.*
- [4] Orlik A.: *Hamulce pociągów kolejowych. WKŁ, Warszawa 1975.*
- [5] Пушкарев И.Ф., Пахомов Э.А.: *Контроль и оценка технического состояния тепловозов. Транспорт, Москва 1985.*
- [6] Sowa A.: *Ocena rozróżnialności stanów technicznych złożonych obiektów diagnostyki metodą liczby charakterystycznej. Materiały V Krajowej Konferencji Diagnostyka Techniczna Urzędzeń i Systemów, Ustroń 13-17.10.2003 (wersja skrócona – materiały drukowane, wersja pełna CD).*
- [7] Zawór rozrządczy H1E1b (Oerlikon typ Est3e). *Materiały reklamowe, Kolmex-Fablok, 1971.*