

## Oddziaływanie przewodu głównego na pracę zaworu maszynisty hamulca pociągu

*W referacie przedstawiono nowoutworzone elementy symulacyjnej metody analizy układu hamulcowego pociągu. Umożliwiają one łączenie w procesie symulacji dwóch elementów: całopociągowego modelu hamulca pneumatycznego pociągu oraz pakietu symulacji dowolnego układu pneumatyczno-mechanicznego modelującego szczegółowo zawór maszynisty. Łączona metoda analiz może być pomocna przy rozważaniach nad określeniem konstrukcji zaworu maszynisty.*

### 1. WSTĘP

Metoda symulacyjna analizy układu pneumatycznego hamulca pociągu rozwijana jest przez autora od kilku lat. Składała się z dwóch odrębnych typów modeli: całopociągowego modelu hamulca i modelu szczegółowego układów pneumatyczno-mechanicznych. Metody te zostały szczegółowiej przedstawione w [1] i [2], a ich wykorzystanie w [3].

**Model całopociągowy** stworzono do analiz procesów zachodzących w układzie pneu-matycznym hamulca pociągu. Bazuje on na podziale układu na elementy składowe przedstawione na rys. 1.

Model ten opisuje zachowanie się członów funkcjonalnych hamulca w stopniu szczegółowości wystarczającym dla obliczeń całopociągowych. Zasadniczym elementem układu jest przewód główny (oznaczany dalej PG). Jego znaczna długość i duże opory przepływu oraz zjawiska falowe limitują jakość układu hamulcowego. Przepływ gazu w przewodzie głównym opisano nieliniowym układem równań różniczkowych cząstkowych rozwiązywanych metodą elementów skończonych. Zawór maszynisty modeluje się jako dyszę o zadanych współczynnikach oporu i prędkości krytycznej. Sterowanie zaworem opisywane jest jako zmiana przekroju odpowiedniej dyszy.

Model zaworu rozrządczego sterującego hamowaniem wagonu zawiera człony opisujące dławiony przepływ powietrza (dysze) między przewodem głównym, zbiornikami: sterującym i pomocniczym oraz cylindrem, uwzględniający także przyspieszacz, zawór podskoku ciśnienia, ogranicznik ciśnienia w cylindrze i zaworki regulujące ciśnienie w zbiorniku sterującym.

**Model szczegółowy układów pneumatyczno-mechanicznych (nazwany BLOK).** Jest on oparty na komputerowej metodzie obliczeń symulacyjnych opracowanej z

myślą o analizie układów mechaniczno - pneumatycznych typu: elementy sterujące, siłowe, zawory wraz z układami realizacji, połączone w nieskomplikowane instalacje. Poszczególne elementy dyskretnie opisują takie części składowe, jak dysze, kanały z oporem przepływu modelowane dyskretnie, bądź ze zmiennymi rozciągniętymi (modelowane MES), objętości, zbiorniki, elementy mechaniczne układu ruchomego, np. membrany, zawory, cylindry, sprężyny, zderzaki. W elementach przepływowych założono przepływy jednowymiarowe gazu doskonałego i niewystępowanie prędkości nadkrytycznych. Dla elementów mechanicznych ograniczono się do przyjęcia mas dyskretnych poruszających się w jednym wymiarze. Wprowadzono też elementy sprężyste o zmiennych charakterystykach, możliwość zderzania się mas.

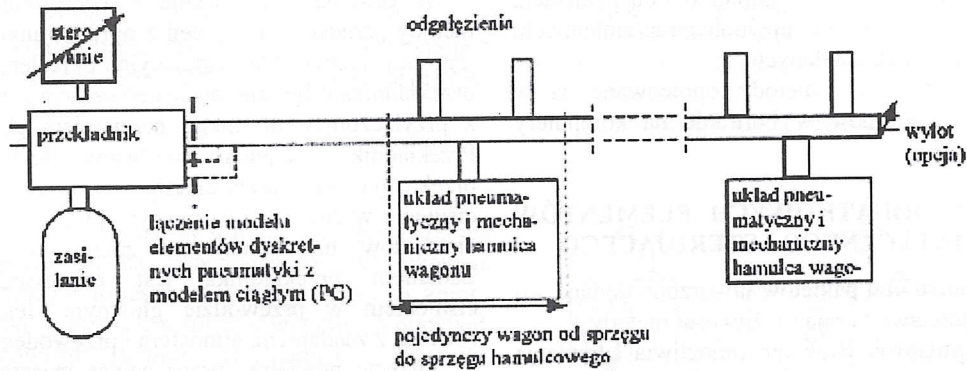
Metoda opisu układów mechaniczno-pneumatycznych bazuje na dyskretyzacji układu na elementy składowe, z których można utworzyć dowolne układy. Opisane są one nieliniowymi funkcjami stanu. Metoda ta jest uniwersalna, może być wykorzystana do analizy różnych układów.

### 2. ŁĄCZENIE OBU METOD

#### 2.1. Idea i zależności teoretyczne

Dla szczegółowych analiz współpracy zaworu maszynisty, (którego częścią wykonawczą jest przekładnik) z przewodem głównym dokonano scalenia obu omawianych metod. W tym celu utworzono łącznik komunikujący elementy modeli z obu metod, przekazujący strumień gazu z zachowaniem równań ciągłości, energii i pędu (rys. 1 i 2). W uproszczeniu posiada on postać dyszy ustawionej na kierunku PG. Oprócz niego istnieje możliwość wykorzystania drugiego połączenia przekazującego ciśnienie dowolnego punktu PG jako sterowania układem BLOK.





Rys. 1. Uproszczony model układu hamulcowego pociągu.

Połączenie zależności występujących dla MES przewodu głównego oraz pojemności dyskretnych pakietu BLOK wymagało określenia parametrów gazu oraz masowego natężenia przepływu w przekroju łączącym przewód główny z przestrzenią z gazem w stanie stagnacji, uwzględniając prędkość gazu w PG. Nieuwzględnienie energii pochodzącej od prędkości gazu przy wysoce wydajnych zaworach maszynisty mogłoby wywołać znaczną niedokładność wyników. Równocześnie dokonuje się określenia parametrów gazu w PG na końcu kroku obliczeń zgodny z MES.

Najważniejsze założenia są następujące:

- medium stanowi gaz doskonały,
- gaz jest ściśliwy,
- nie istnieje wymiana ciepła z otoczeniem,
- przepływ traktuje się jako jednowymiarowy,
- podczas przepływu pomija się opory tarcia,

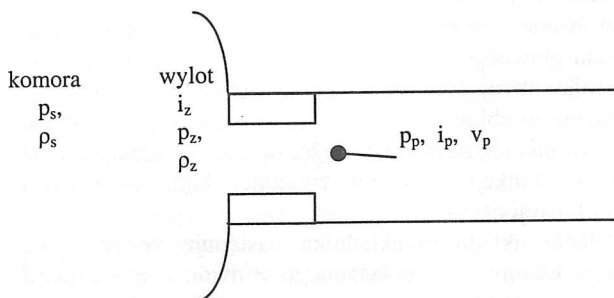
Układ równań jednowymiarowego przepływu gazu, składa się z: równania ciągłości przepływu, równanie energii i równanie pędu.

Oznaczając:  $\dot{m}$  - masowe natężenie przepływu,  
 $\rho$  - gęstość gazu,  
 $A$  - przekrój poprzeczny przewodu,  
 $v$  - prędkość przepływu,  
 $p$  - ciśnienie gazu,  
 $u_w$  - energia wewnętrzna,

wprowadza się pojęcie entalpii „ $i$ ”:

$$i_0 = i + \frac{v^2}{2} = u_w + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (1)$$

Dla wypływu powietrza z PG do zaworu maszynisty uwzględniono przedstawione poniżej zależności.



Rys. 2. Oznaczenia łącznika obu metod modelowania.

Wykorzystując zależności termodynamiczne dla stanu stagnacji:

$$\frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \frac{p_0}{\rho_0} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \frac{p_p}{\rho_p} + \frac{v_p^2}{2} \quad (2)$$

$$\text{oraz } \rho_0 = \rho_p \left( \frac{p_0}{p_p} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (3)$$

podstawiając zależności (2) i (3) otrzymuje się po przekształceniach:

$$p_0^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = p_p^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} + \frac{\kappa-1}{2\kappa} v_p^2 \frac{\rho_p}{p_p^{\frac{1}{\kappa}}} \quad (4)$$

Na podstawie ciśnienia stagnacji określa się masowe natężenie przepływu przez przekrój wylotu  $\dot{m}$ , jak dla dyszy izentropowej uwzględniając ściśliwość gazu, a entalpię gazu na wylocie określa się zależnością:

$$i_z = \frac{\kappa}{\kappa-1} \dot{m} \frac{p_0}{\rho_0} \quad (5)$$

Prędkość powietrza na początku PG określa się z zależności:

$$v_p = \frac{\dot{m}}{\text{przekrój}_{PG} \cdot \rho_p} \quad (6)$$

Prędkość ta jest wykorzystywana w metodzie MES przewodu głównego. Podobne zależności są wykorzystywane przy przepływie gazu do PG, powietrze w zbiorniku zaworu maszynisty jest w stanie stagnacji, więc zbędne są dodatkowe przekształcenia.

Scalenie obu pakietów programów

Zastosowano następujące rozwiązanie w scalonym programie: przewód główny jest głównym elementem programu, dołącza się do niego alternatywnie uproszczony zawór maszynisty będący elementem symulacji układu całopociągowego, albo przedstawiony wyżej łącznik wraz z układem symulacji BLOK, a następnie wczytuje się dowolną konfigurację zaworu maszynisty. Oba warianty zaworu maszynisty mogą być sterowane skokowymi lub odcinkowo liniowymi zmianami ciśnienia w funkcji czasu w zadanym punkcie układu (np. w zbiorniku sterującym) lub poprzez zadawane zmienne w czasie określone przekroje (odpowiadające załączaniu zaworów przez maszynistę).



Dodatkowo można załączyć otwarcie nieszczelności na końcu PG.

Scalenie programów wymagało zmian w obu pakietach, np. zmian sterowania programów, ujednoczenia: zmiennych, zależności czasowych, czytania danych.

Wszystkie prezentowane metody opracowane są w postaci pakietów programów w Fortranie na komputery klasy PC.

### 3. UTWORZENIE DODATKOWYCH ELEMENTÓW UKŁADU PNEUMATYCZNEGO I STERUJĄCEGO

Wraz z połączeniem obu pakietów utworzono dodatkowo kilka elementów, które zwiększają możliwości metody.

**Sterowanie impulsowe.** Blok ten umożliwia symulację sterowania impulsowego o stałym okresie i stałym procentowym wypełnieniu cyklu otwarcia elektrozaworu, co pozwala zmieniać szybkość zmian ciśnienia i dokładność sterowania ciśnieniem.

**Nieliniowe źródło ciśnienia w funkcji czasu.** Blok służy do zadawania zmiennego w czasie ciśnienia jako funkcji wczytywanej w postaci ciśnienia w danych punktach czasu z aproksymacją liniową między tymi punktami. Procedurę tę można wykorzystywać przy szukaniu odpowiedzi układu pneumatyczno-mechanicznego na zadaną funkcję wejściową.

**Zmienny w czasie przekrój.** Blok ten umożliwia jednorazową zmianę przekroju elementu przepływowego w funkcji czasu w sposób skokowy lub zmienny liniowo w zadanym przedziale czasu. Wykorzystywana może być dla symulacji zmiennego w czasie procesu, np. otwierania lub zamykania przelotu. Procedura ta jest również wygodna w dla porównywania symulacji z przebiegiem mierzonym.

**Wylot powietrza z końca przewodu głównego.** Dla oceny procesu awaryjnego opróżniania przewodu głównego przez otwarcie zaworu bezpieczeństwa lub zerwania sprzęgu na końcu składu, w metodzie symulacyjnej utworzono dodatkowe elementy umożliwiające symulację tego typu zdarzeń poprzez możliwość otwarcia odpowiedniej dyszy łączącej koniec przewodu głównego z atmosferą. Ponieważ prędkość przepływu w PG w pobliżu dyszy może osiągać znaczne wartości, energia kinetyczna gazu w PG uwzględniana jest w równaniach przepływu.

**Sprężarka.** Element ten modeluje zasilanie układu sprężarką o stałym wydatku masowym załączaną wyłącznikami krańcowymi ciśnienia

### 4. IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW

Weryfikacja całej metody numerycznej oparta jest na modelach cząstkowych i pomiarach doświadczalnych, w modelach wstawia się elementy sterujące, których parametry czasowe dobiera się do zgodności z przeprowadzonym eksperymentem, a identyfikuje się pozostałe parametry modeli.

Podstawą do doboru parametrów liczbowych modeli są rysunki konstrukcyjne elementów oraz ewentualnie wyniki badań stanowiskowych dokonane na prototypowych urządzeniach. Badania te pozwalają na określenie tych parametrów modelu, których dobranie tylko na podstawie analiz teoretycznych wiązałoby się z ryzykiem większego błędu.

### 5. APLIKACJA

W celu zaprezentowania wykorzystania prezentowanej metody przedstawiono jeden z opracowanych modeli, celem jego utworzenia było symulacyjne określenie współdziałania przekładnika ciśnienia (będącego częścią zaworu maszynisty) z przyłączonym do niego przewodem głównym pociągu. Przekładnik ciśnienia sterowany jest manipulatorem przekazującym sygnały elektryczne, które pośrednio ustalają ciśnienie w zbiorniku sterującym przekładnika, analiza tych elementów nie należy do zakresu tego opracowania. Zadaniem przekładnika jest odpowiednie sterowanie ciśnieniem w przewodzie głównym. Jest on połączony również z zasilaniem, atmosferą i przewodem głównym.

Zużycie powietrza przez zawór maszynisty w trakcie luzowania hamulca lub napełniania układu jest tak znaczne, że powoduje załączanie sprężarek zasilających zbiornik główny na lokomotywie. Zjawisko to uwzględniono w analizach układu.

Przewód główny jest tzw. linią długą pneumatyczną o dużej pojemności, którą to pojemność powiększają dodatkowo w czasie luzowania hamulca połączone z przewodem głównym zbiorniki hamulcowe na wagonach. W związku z tym odpowiedź przewodu głównego na sygnał sterowania przekładnika jest procesem rozciągłym na długości przewodu głównego i w czasie. Tłumienie przepływu powietrza w przewodzie głównym z powodu jego dużej długości i oporów wynikających z jego elementów konstrukcyjnych (kurki, rozwidlenia, sprzęgi hamulcowe) jest czynnikiem determinującym cały proces pracy układu hamulcowego. Nie ma dużych możliwości zmiany (poprawy) parametrów przewodu głównego, gdyż jest on zdefiniowany zgodnie z międzynarodowymi przepisami. Jediną możliwością poprawy funkcjonowania hamulca jest optymalizacja pracy przekładnika z uwzględnieniem oddziaływania przewodu głównego oraz układu zasilającego na lokomotywie.

Zawory rozrządzące dołączone do przewodu głównego na poszczególnych wagonach powodują sterowanie ciśnieniem powietrza w cylindrach hamulcowych, ale oprócz tego w zależności od stanu pracy powodują pobór powietrza z przewodu głównego przez przyspieszacze, zbiorniki pomocnicze i sterujące i modyfikują przez to oddziaływanie zaworu maszynisty.

Wymienione uwarunkowania analizy układu pneumatycznego hamulca zostały uwzględnionym w prezentowanym modelu całościowym. Model analizowanego układu

Uproszczony model całego analizowanego układu hamulcowego przedstawia rys.1, a zaworu maszynisty (przekładnika) rys. 3 i 4.

Sterowanie procesami napełniania i opróżniania przewodu głównego odbywa się poprzez regulację ciśnienia w zbiorniku sterującym przekładnika elementami. Założono, że ciśnienie w zbiorniku sterującym zmienia się niezależnie od zachowania się pozostałej części układu pneumatycznego w postaci funkcji skokowo zmiennej bądź odcinkowo liniowej funkcji czasu.

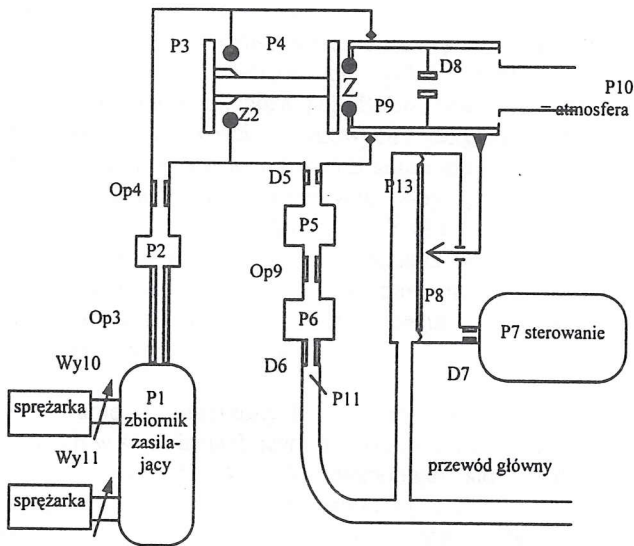
Zasilanie układu przekładnika następuje ze zbiornika głównego lokomotywy połączonego z dwoma sprężarkami nastawionymi na różne ciśnienia.



Przyłączenie przekładnika do przewodu głównego następuje poprzez dodatkowe elementy pośrednie, uwzględniono je w opisie przepływu jako opór  $Op_9$  i pojemność  $P_6$ . Komora nadmembranowa  $P_{13}$  połączona jest z odgałęzieniem na przewodzie przyłączającym do przewodu głównego.

## 5.2. Wyniki

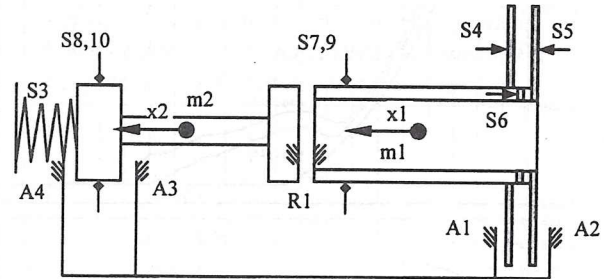
Wynikiem pojedynczej analizy symulacyjnej jest przebieg czasowy zadanego procesu zachodzącego w układzie hamulcowym pociągu. Rejestrowanym wynikiem są zbiory wybranych wyników, głównie ciśnień w wybranych punktach układu hamulcowego (komór przekładnika, zbiornika zasilającego, przewodu głównego, cylindrów hamulcowych) oraz uniesienia zaworków przekładnika. Przykład wyniku symulacji luzowania uderzeniowego hamulca krótkiego pociągu przedstawiają rysunki 5a i 5b. Zauważalne jest, że w początkowych 9 s proces jest nieco spowolniony niezbyt dużą pojemnością zbiornika głównego i ograniczoną wydajnością sprężarek zasilających. W fazie tej widoczny jest wpływ oporów wewnętrznych przekładnika jako różnica ciśnień w zbiorniku sterującym i na początku PG (rys. 5a, środek). Poza czasem 0 - 9 s wydajność zaworka jest wystarczająca, gdyż pracuje on w stanie domkniętym. Stosunkowo wolne napełnianie przewodu głównego jest spowodowane oporami PG i dyszami napełniania zbiorników pomocniczych. Zakłócenie regularnego wzrostu ciśnienia w przewodzie głównym (rys. 5b dół) spowodowane jest otwieraniem dodatkowych przelotów do zbiorników pomocniczych w zaworach rozrządczych pod koniec odhamowania.



- P11 – początek przewodu głównego (wyjście PG z tablicy pneumatycznej),
- P13 – komora nad membraną, połączona z PG,
- P8 – komora pod membraną,
- P13 – komora nad membraną,
- P6 – pojemność przewodu głównego wewnątrz tablicy pneumatycznej.
- Z1, Z2 – zaworki posiadające nieliniową charakterystykę geometryczną,
- $Op_3 + Op_4$  – pojedyncze rozciągnięte opory przepływu gazu,
- D5, D6, D8 – dysze i dławienia miejscowe modelowane jako dysze,

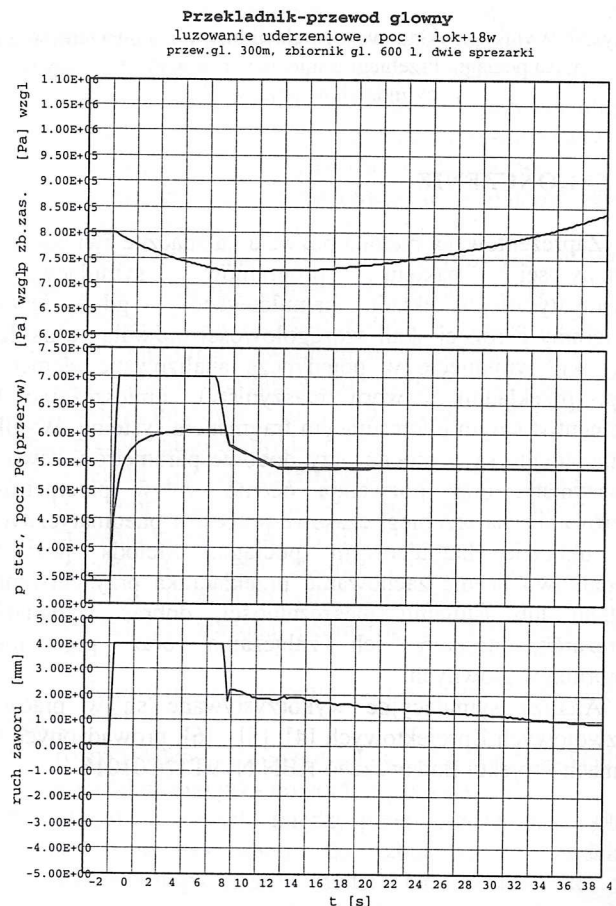
- (D6 –miejsce połączenia modelu przekładnika z modelem przewodu głównego)
- $Op_9$  – opór rozciągliwy elementów pneumatycznych pomiędzy przekładnikiem, a PG
- Wy10 i 11 – wydatki masowe sprężarek (załączane regulatorem ciśnienia).

Rys. 3. Układ pneumatyczny przekładnika.



- $m_1, m_2$  – masy,
- $x_1, x_2$  – współrz. ruchu mas,
- S3 – siła sprężyny,
- S4, S5, S6 – siły parcia gazu na membrane,
- S7, S8 – siły tarcia suchego,
- S9, S10 – siły tarcia wiskot.,
- A1 – A4 zderzaki,
- R1 – jednostronne zablokowanie ruchu ciał

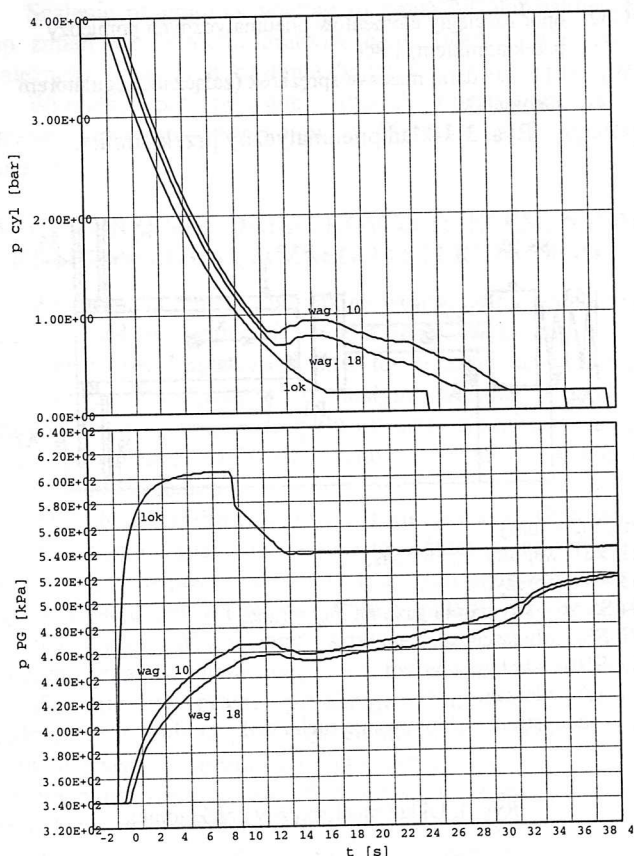
Rys. 4. Układ mechaniczny przekładnika.



Rys.5a Wyniki przykładowej symulacji luzowania uderzeniowego hamulca pociągu. Wykresy pracy zaworka maszynisty.



Przekładnik-przewód główny  
 luzowanie uderzeniowe, poc : lok+18w  
 przew.gł. 300m, zbiornik gł. 600 l, dwie sprężarki, wykresy: lok, wag:



Rys.5b Wyniki przykładowej symulacji luzowania uderzeniowego hamulca pociągu. Przebiegi ciśnienia w przewodzie głównym i cylindrach hamulcowych.

## 6. ZAKOŃCZENIE

Zaprezentowana metoda pozwala na znaczne zwiększenie możliwości pakietu programów symulacyjnych pneumatycznego układu hamulcowego, gdyż łącząc programy o różnej skali szczegółowości pozwala na bardzo głębokie wniknięcie w pojedyncze analizowane elementy (np. przekładnik zaworu maszynisty), umieszczając te element w całym interesującym fragmencie systemu. Wyniki symulacyjne są pomocne przy doborze parametrów zaworu maszynisty, oraz pozwalają ocenić wpływ parametrów sterowania na przebiegi czasowe procesów pneumatycznych w układzie hamulcowym pociągu. Metoda pozwala dodatkowo ocenić zachowanie przekładnika przy zerwaniu składu lub istnieniu nieszczelności, dobrać wydajność sprężarek, nastawy ich załączania oraz pojemność zbiorników głównych.

Analizy symulacyjne wykorzystywane są w pracach rozwojowych i projektowych [4], [5], [6]. prowadzonych w ramach Projektu Badawczego KBN Nr 9T12C01018.

## 1. LITERATURA

- [1] Tadeusz Piechowiak, Jerzy Nowicki: Obliczenia gazodynamiczne układu hamulcowego pociągu. Konferencja „Pojazdy szynowe” Kraków-Arlamów 2000.
- [2] Tadeusz Piechowiak: Metodyka wykorzystania symulacji do analiz części pneumatycznej układu hamulcowego pociągu Konferencja „Metody i systemy komputerowe Kraków 2001.
- [3] Tadeusz Piechowiak, Marian Kaluba: Wpływ napełniania przewodu głównego wysokim ciśnieniem na proces luzowania pociągu. Konferencja „Pojazdy szynowe” Kraków-Arlamów 2000.
- [4] Tadeusz Piechowiak: Model matematyczno-fizyczny przetwornika elektropneumatycznego opartego na pojemności i dwóch zaworach elektropneumatycznych sterowanych binarnie. Instytut Pojazdów Szynowych, OR 8237 Poznań 2000r.
- [5] Tadeusz Piechowiak: Dobór parametrów konstrukcyjnych przekładnika do napełniania przewodu głównego na podstawie obliczeń gazodynamicznych oraz badań modelu przekładnika w aspekcie spełnienia wymagań podanych w karcie UIC 541-03. Instytut Pojazdów Szynowych, OR 8337 Poznań 2001r.
- [6] Tadeusz Piechowiak: Kształtowanie optymalnej charakterystyki sterującej procesami napełniania i opróżniania przewodu głównego. Instytut Pojazdów Szynowych, OR 8432 Poznań 2000r.