

## Problemy przepływu powietrza w układzie hamulcowym pociągu

*W artykule przedstawiono zagadnienie szczegółowej analizy zjawisk zachodzących przy przepływie powietrza w części pneumatycznej hamulca pociągu, rozpatrzono także problemy występujące w trakcie działania hamulca, opisano zjawiska i sposoby ich interpretacji łącznie z propozycją metody symulacyjnej analizy działania części pneumatycznej kolejowego układu hamulcowego.*

### 1. WSTĘP

Hamulec pneumatyczny pociągu stosowany jest w kolejnictwie od jego zarania. Do tej pory nie wynaleziono nic lepszego i dlatego jest on nadal zasadniczym hamulcem pociągów osobowych i towarowych oraz będzie pozostawał hamulcem bezpieczeństwa szybkich pociągów zespołowych. Tylko z pozoru jest on dostatecznie dopracowany, gdyż ciągle trwa rozwój jego komponentów, np. wprowadzonych elementów sterowania elektronicznego. Problematyka hamulca pozostaje nieco w cieniu innych zagadnień rozwojowych kolejnictwa. Jednakże istnieją problemy, których rozwiązanie byłoby korzystne dla polepszenia techniki hamowania i to nie tylko w jednym kraju.

Ważne jest więc dokładne rozpoznanie zjawisk zachodzących w układzie pneumatycznym pociągu. Istnieje też potrzeba posiadania wiarygodnego narzędzia analitycznego w trakcie prac rozwojowych lub wykrywania przyczyn nieprawidłowości działania rzeczywistych układów.

Rozpatrując możliwości polepszenia działania hamulca pneumatycznego autorzy na podstawie własnych doświadczeń dokonali przeglądu problematyki przepływu powietrza w układzie hamulcowym pociągu oraz działania współpracujących z układem pneumatycznym elementów mechanicznych.

Analizy działania układu hamulcowego wymagają odpowiedniej bazy badawczej. Bazę tę mogą stanowić:

- rzeczywiste pociągi lub ich fragmenty,
- stanowiska badawcze zbudowane na podstawie obiektów rzeczywistych,
- metody symulacyjne.

Próby poligonowe z rzeczywistym pociągiem są narzędziem najbardziej wiarygodnym, ale także kosztownym i kłopotliwym ze względu na znaczny rozmiar obiektu i warunki terenowe badań. Utrudniają one też optymalizację układu.

Światowe firmy produkujące homologowane elementy kolejowych układów hamulcowych posiadają całopociągowe stanowiska pomiarowe hamulca pneumatycznego, na których doskonałą i testują własne projektowane układy. Publikowane prace na ten temat są rzadkie. Stanowiska

całopociągowe wymagają znacznych nakładów finansowych. Powinno się z nich korzystać jako z ostatecznego narzędzia weryfikacyjnego projektu.

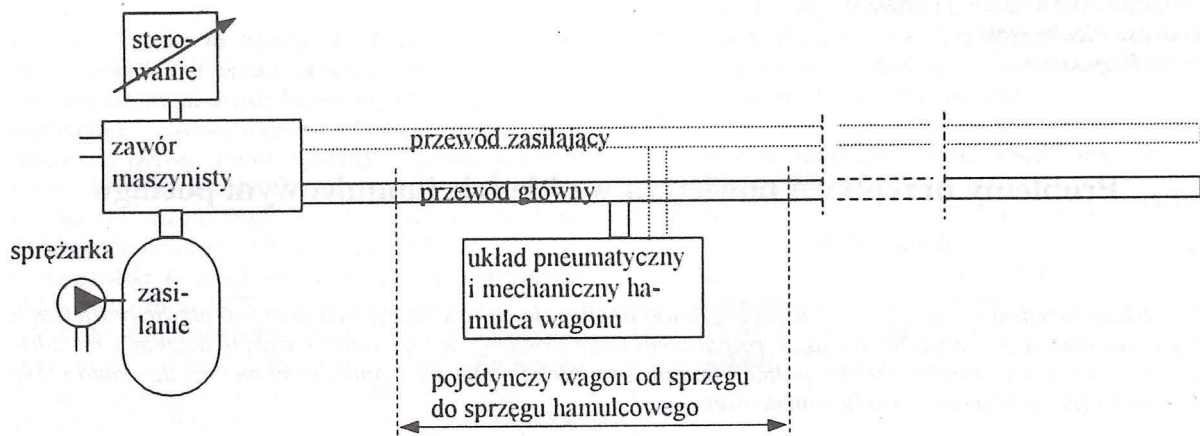
Symulacyjne metody analiz bazujące na komputerowej technice cyfrowej, zakładając posiadanie odpowiednio skutecznego oprogramowania, cechują się takimi niewątpliwymi zaletami, jak elastyczność wprowadzenia zmian w obiekcie oraz niskie koszty analiz. Jednak obciążone są one ryzykiem niedokładności metody i modelu. W artykule przedstawiono problemy napotkane przez autorów w trakcie prac nad proponowanym zbiorem metod symulacyjnych rozwiązania opisywanych układów [1, 2, 10, 11, 13]. Celem opracowania tych metod jest umożliwienie dokładnego ilościowego opisu zjawisk zachodzących w części pneumatycznej hamulca pociągu, dokonanie analizy różnych istniejących i projektowanych układów hamulcowych, mając na względzie określenie możliwości polepszenia działania hamulca i otrzymanie wniosków przydatnych do podejmowania decyzji dotyczących eksploatacji i konstrukcji układów hamulcowych.

Istnieją lub pojawiają się ciągle nowe problemy projektowe i eksploatacyjne dotyczące hamulców możliwe do rozwiązania metodami symulacyjnymi. Niektóre z nich są pomyślnie rozwiązywane, na przykład na podstawie analiz symulacyjnych zaproponowano skrócenie czasu napełniania uderzeniowego zaworu maszynisty [9].

Odrębnym obszarem technik hamowania jest współdziałanie pneumatycznego układu hamulcowego z innymi nowoczesnymi rodzajami hamulców kolejowych, np. z hamulcem szynowym, elektrodynamicznym i hydrodynamicznym.

### 2. OBIEKT ANALIZ

Zasadniczymi elementami układu pneumatycznego hamulca pociągu są: przewód główny, zawór maszynisty, zawory rozrządzące wraz z cylindrami hamulcowymi, zbiornikami pomocniczymi oraz rozrządczymi na wagonach (rys. 1). Niektóre układy hamulcowe posiadają także przewód zasilający. Niekiedy stosuje się także hamulec elektropneumatyczny.



Rys. 1. Uproszczony schemat całopociągowego układu pneumatycznego hamulca.

Dodatkowe elementy, takie jak urządzenia przeciwpoślizgowe, nastawiacze regulujące siłę hamowania w funkcji ładunku lub prędkości jazdy mają również wpływ na działanie całego układu pneumatycznego hamulca.

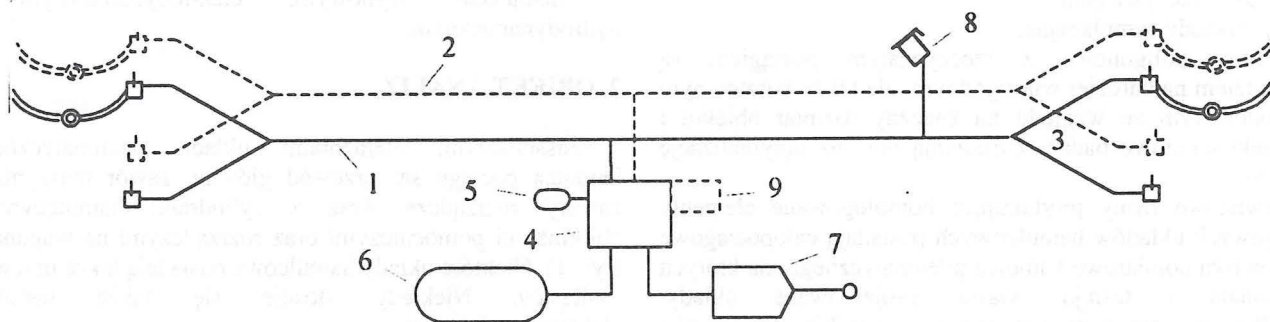
Właściwości przewodu głównego w sposób istotny wpływają na zachowanie się całego układu pneumatycznego. Działanie pozostałych elementów układu hamulcowego częściowo służy polepszeniu funkcjonowania przewodu głównego lub zmniejszeniu skutków niekorzystnych zjawisk nim spowodowanych. Z tego względu nie można traktować przewodu głównego jako samoistnego elementu, ale jako główny element całego zespołu. Problemy przepływu powietrza w przewodzie głównym można rozwiązywać poprzez zmiany w nim samym oraz w urządzeniach z nim współpracujących.

### 3. CECHY CHARAKTERYSTYCZNE PRZEWODU GŁÓWNEGO

Przewód główny posiada następujące cechy determinujące zachodzące w nim zjawiska pneumatyczne:

- dualizm działania: służy on zarówno do przenoszenia sygnałów sterujących działaniem hamulca, jak i przenosi energię do jego uruchamiania,

- dużą długość przewodu głównego,
- znaczne dławienie przepływu powietrza w rurociągu z powodu:
  - oporu tarcia gazu o ścianki przewodu o znacznej długości,
  - oporów miejscowych wywołanych kształtem przewodu (zagięciami, odgałęzieniami), oraz dodatkowymi elementami na przewodzie (kurki krańcowe, elastyczne złącza międzywagonowe),
- występowanie dodatkowych odgałęzień (objętości) poza kierunkiem zasadniczego przepływu powietrza, takich jak:
  - przyłączenia zaworów rozrządczych lub innych zaworów na wagonach (rys. 2),
  - odgałęzienia do alternatywnego połączenia międzywagonowego przewodu głównego (w wagonach z dwoma sprzęgami pneumatycznymi na każdej czołownicy),
  - odgałęzienie przewodu głównego w lokomotywie do niewykorzystywanego aktualnie sprzęgu na przedniej czołownicy,
- przenikalność i pojemność cieplna przewodu.



Rys.2. Główne elementy układu pneumatycznego na wagonie

- 1 - przewód główny, 2 - przewód zasilający, 3 - odgałęzienia, 4 - zawór rozrządczy, 5 - zbiornik przyspieszacza (wewnątrz zaworu rozrządczego), 6 - zbiornik pomocniczy, 7 - cylinder hamulcowy, 8 - zawór bezpieczeństwa, 9 - zawór elektropneumatyczny.



#### 4. CECHY POZOSTAŁYCH ELEMENTÓW PNEUMATYCZNEGO UKŁADU HAMULCOWEGO

Pozostałe elementy układu hamulcowego posiadają następujące cechy wpływające na działanie całego układu:

- zawór maszynisty steruje pracą przewodu głównego poprzez pobieranie lub dostarczanie do niego powietrza; działanie zaworu jest silnie sprzężone z reakcją ze strony przewodu głównego, nie można go traktować jako układu jednokierunkowego sterowania wejście-wyjście,
- zawory rozrządzące w niektórych stanach pracy mają niewielki wpływ na przewód główny, np. w trakcie hamowania, natomiast w innych w zasadniczy sposób zmieniają przebieg procesu zachodzącego w przewodzie głównym, np. w trakcie działania przyspieszaczy przy rozchodzeniu się fali hamowania lub napełniania zbiorników pomocniczych w czasie odhamowania,
- przenikalność cieplna i pojemności cieplne przewodów i zbiorników grają znaczącą rolę w przebiegu czasowym ciśnienia,
- grzybki zaworków wymagają odpowiedniego docisku, by zapewnić szczelność domykania zaworu. Z tego powodu (oraz z powodu przenikania ciepła) często zauważa się w trakcie pomiarów doświadczalnych, że po zamknięciu zaworów ciśnienia w układzie nie zachowują stałych wartości.

#### 5. AKTUALNA PROBLEMATYKA

Ogólne problemy dotyczące działania i konstrukcji pneumatycznego układu hamulcowego, które wymagają rozwiązań, są następujące:

1. Rozchodzenie się fali hamowania – musi ono być szybkie i pewne, a niewłaściwie poprowadzony przewód główny, wyłączenie części zaworów rozrządzących lub źle skonstruowany zawór rozrządzący mogą być powodem znacznego spowolnienia rozchodzenia się fali hamowania aż do wartości mniejszej, niż dopuszczalna przepisami [3].
2. Prawidłowość reakcji układu hamulcowego i człowieka na przypadki nieszczelności układu, zerwania składu lub otwarcie kurka krańcowego. Karta UIC [4] w części dotyczącej zdolności (mocy) dopełniania przewodu głównego wskazuje na istnienie tego problemu. Mianowicie zawór maszynisty winien z jednej strony posiadać dużą zdolność uzupełniania powietrza do wartości zadanej nastawnikiem, ale z drugiej strony zbyt duża wydajność zaworu maszynisty może spowodować tak skuteczne dopełnianie ubytku ciśnienia w przewodzie głównym, że w bardzo długim pociągu nieszczelność przewodu głównego lub wręcz jego zerwanie może zostać niezauważone. Powoduje to bardzo duże zagrożenie bezpieczeństwa jazdy.
3. Zdolność dopełniania przewodu głównego zaworem maszynisty po hamowaniu – należy odpowiednio dobrać wydajności sprężarek, pojemności zbiorników głównych i połączeń układu wewnątrz lokomotywy.
4. Sterowanie odhamowaniem uderzeniowym oraz odporność zaworów rozrządzących na przepełnienie – jest to problem doboru zmienności ciśnienia sterowania w czasie i jego związek z równomiernością odhamowania i odpornością zaworu rozrządzącego na przepełnienie.

5. Niewyczerpalność hamulca na skutek awaryjnego ubytku powietrza w układzie zawór rozrządzący – cylinder hamulcowy.
6. Zmiana przyzwyczajęń personelu obsługującego (maszynistów) w celu polepszenia jakości działania układu hamulcowego, wprowadzanie półautomatycznego sterowania procesem hamowania i odhamowania.
7. Wpływ niskich temperatur na elementy membranowe, uszczelniające, ruchome oraz wpływ wywołany zamrażaniem skroplin na zmianę działania układu pneumatycznego.
8. Zachowanie bezpieczeństwa przy niestandardowym działaniu układów elektropneumatycznych z powodu globalnych i lokalnych niesprawności podukładu pneumatycznego lub elektrycznego.
9. Określenie granic stosowalności układu hamulca pneumatycznego ze względu na wielkość i masę składu - określenie do jak długiego składu użycie danego typu hamulca będzie zapewniać wymagane bezpieczeństwo i jakość jego działania, a kiedy należy wprowadzić inne rozwiązanie, np. hamulec elektropneumatyczny.
10. Automatyczne diagnozowanie układu hamulcowego, rozpoznanie jego wielkości (długości składu) w celu polepszenia jego sterowania.
11. Automatyczne, inteligentne rozpoznanie układu hamulcowego, jego wielkości (długości), rodzaju i masy pociągu, nastawienia hamulca:
  - stacjonarne- na postoju,
  - ruchowe - w czasie jazdy pociągu.w celu polepszenia hamowności i polepszenia dynamiki wzdłużnej pociągu. Na razie jest to zadanie przyszłościowe.

#### 6. MODELOWANIE UKŁADU

Problematyka modelowania układu pneumatycznego hamulca poruszana była przez wielu autorów. Obszar analizowanego podukładu hamulca i metodyka analiz jest różna (w zależności od stawianego problemu), począwszy od rozpatrywania układu zaworu maszynisty bądź hamulca pojedynczego wagonu, aż po analizy całopociągowe.

Przy rozwiązywaniu tych zagadnień szczególnie nacisk należy położyć na wierność i dokładność modelowania, by wyniki odpowiadały działaniu układów rzeczywistych. Analizy teoretyczne winny być zweryfikowane pomiarami doświadczalnymi w naturalnej skali, umożliwi to identyfikację parametrów modeli.

##### 6.1. Podział modeli

Podjęte przez autorów działania w zakresie symulacji procesów pneumatycznych w kolejowym układzie hamulcowym przewidują utworzenie bądź rozbudowę następujących modeli o różnych stopniach szczegółowości:

1. *Uniwersalny model do analizy dowolnych pojedynczych układów pneumatyczno-mechanicznych.*

Opisuje się w nim odrębnie przepływy przez pojedyncze kanały, dysze, dławienia, przewody z uwzględnieniem zjawisk falowych; łączące komory lub zbiorniki (również odkształcalne), uwzględnia się membrany. Modelowanie obejmuje dynamikę ruchomych elementów zaworów. Metoda może również służyć do analizy innych układów pneumatyki, nie tylko hamulcowych. Pojedyncze elementy układu pneumatyczno-mechanicznego opisane



są jako dyskretne podmodele – “klocki”, z których można złożyć dowolny układ. Modele różnych układów pneumatyczno-mechanicznych publikowano w literaturze, jednakże cechą opracowywanego przez autorów modelu jest zautomatyzowanie tworzenia konfiguracji układu (bez ingerencji w program źródłowy), oraz zamodelowanie elementów specyficznych dla układów hamulcowych. Model ten może być wykorzystywany w szczegółowych analizach projektowych.

### 2. Uproszczony model układu pneumatycznego hamulca całego pociągu.

Ma on szerokie zastosowanie, umożliwia np. analizę rozchodzenia się fali hamowania, procesów opróżniania i napełniania przewodu głównego wykorzystując uproszczone modele zaworu maszynisty i zaworów rozrządnych. Jest on wystarczający dla analiz hamowności, procesu odhamowania pociągu, może służyć jako podmodel w innych aplikacjach, np. analizie sił wzdłużnych w procesie hamowania [5].

### 3. Pełny model układu pneumatycznego hamulca całego pociągu.

Łączy on wyżej przedstawione modele. Pojedyncze układy pneumatyczno-mechaniczne opisane są jako zbiór dyskretnych “klocków” tworząc np. modele zaworów rozrządnych, zaworu głównego i innych. Dołącza się je do przewodu głównego lub jego odgałęzień. Scalanie układu równań i rozwiązywanie odbywa się automatycznie. Dla użytkownika różni się on od modeli 1 i 2 dużo większymi nakładem pracy w trakcie modelowania oraz większym czasem obliczeń.

Działanie przewodu głównego opisane jest w modelach 2 i 3 za pomocą nieliniowych cząstkowych równań różniczkowych mechaniki gazu. Rozwiązane są one metodą elementów skończonych (MES). Połączenie przewodu głównego z jego odgałęzieniami i zaworami układu hamulcowego następuje w węzłach MES. Analizy działania układu dokonuje się wykorzystując symulację w dziedzinie czasu za pomocą całkowania numerycznego. Dąży się do uzyskania minimalnych błędów zarówno w procesach szybkozmiennych (fala hamowania), jak i wolnozmiennych (przepływ z dużymi oporami) przy możliwym występowaniu znacznych strumieni gazu pobieranych w odgałęzieniach (przez zbiorniki pomocnicze). W tym celu przewiduje się zarówno doskonalenie zastosowanej MES, jak i dobór metody całkowania numerycznego.

Modelowanie poszczególnych zaworów maszynisty i rozrządnych podzielić można na kilka stopni dokładności:

- model uproszczony, w którym uruchamianie danej jednej uproszczonej funkcji jest założone przed symulacją, np. nastawienie zaworu maszynisty na opróżnianie przewodu głównego (hamowanie),
- model funkcyjny (quasistatyczny), w którym działanie zaworu opisane jest szczegółowo wewnątrz algorytmu na zasadzie następstwa zdarzeń w zależności od stanu układu, ciśnienia i parametrów danego zaworu, uruchamianie danej funkcji wynika z równowagi sił działających na elementy ruchome,
- model szczegółowy (dynamiczny) – metoda najdokładniejsza, uwzględnia się w niej również dynamikę elementów ruchomych (model 1).

## 6.2. Wymagania stawiane metodzie symulacyjnej

Metoda opisu przepływów rozciągniętych w przestrzeni (przewód główny opisany MES) winna zapewniać:

- stabilność numeryczną,
  - dokładność; metoda matematyczna musi najdokładniej opisywać zarówno rozchodzenie się fali zaburzeń, jak i posiadać minimalny dryft numeryczny mogący zmniejszyć dokładność analiz wolnozmiennego przepływu w warunkach dużego oporu,
  - minimalne numeryczne „zaokrąglenie” przebiegu fali ciśnienia; w przewodzie głównym mogą występować duże gradienty ciśnienia (zwłaszcza na początku hamowania nagłego), a ponieważ uruchamianie działania przyspieszaczy następuje już przy małych różnicach ciśnienia, numeryczne „zaokrąglenia” mogą mieć wpływ na powstanie dużego błędu symulacji rozchodzenia się fali hamowania,
  - uwzględnienie lokalnych oporów skupionych położonych na elementach rozciągniętych, gdyż są one źródłem dodatkowych odbić fali rozchodzenia się zaburzenia,
  - uwzględnienie odgałęzień w MES – jednowymiarowe elementy MES nie pozwalają wprost na stosowane odgałęzień, należy zastosować dodatkowe procedury w celu uwzględnienia utraty pędu i energii gazu na odgałęzieniu w zależności od budowy trójników,
  - możliwość brania pod uwagę faktu, że odgałęzienia tworzą dodatkowe objętości w układzie, co powoduje dodatkowe rozmycie rozchodzących się zaburzeń oraz wprowadzenie dodatkowych odbić od końca odgałęzienia; duża ilość odgałęzień, a więc i odbić wymaga prawidłowego doboru metody numerycznej,
  - uwzględnienie w modelu wszystkich powiązań funkcyjnych układu rzeczywistego bez stosowania cząstkowości i uproszczeń, np. tylko hamowania lub tylko odhamowania, co jest szczególnie ważne w przypadku analizy przejściowych stanów pracy układu hamulcowego, w których mogą zachodzić „niespodziewane” zjawiska, jak krótkotrwałe odhamowywanie (opróżnianie cylindrów) na początku hamowania (w przypadku zastosowania dużego zaskoku); ponowne dohamowanie kilku wagonów pod koniec odhamowania długiego składu wywołane przełączeniami wewnątrz zaworów rozrządnych; podhamowywanie części składu w stanie odhamowania wywołane przepełnieniem zbiorników sterujących,
  - dopasowanie modelowania do konkretnego rozwiązania konstrukcyjnego zaworu maszynisty lub rozrządczego. Ponieważ zawory te są układami o skomplikowanym działaniu i w przypadku zaniedbania w modelu pewnych ich funkcji oraz wzajemnych wewnętrznych powiązań istnieje bardzo duże ryzyko, że pominię się pewne nietypowe zachowania, modelowanie musi więc być wykonane dokładnie i obejmować odrębne opisy zaworów poszczególnych producentów i typów.
- Modelowanie działania zaworu maszynisty lub zaworu rozrządczego hamulca winno także uwzględniać:
- powiązania (jeżeli istnieją) układu pneumatycznego i elektrycznego,
  - działanie wszystkich sił na elementy ruchome np. tarcia suchego i wiskotycznego elementów przesuwanych oraz sił od histerezy, sztywności i tłumienności elementów odkształcalnych, np. membran,



- dynamikę układu mechanicznego, zwłaszcza ciężkich elementów mogących powodować opóźnienie działania urządzenia, zwłaszcza opóźnienie fali hamownia,
- dynamikę procesów termodynamicznych przepływu powietrza, gdyż zasadnicze znaczenie będzie miała wymiana ciepła ze ściankami aparatury – przy szybkich zmianach przemiana będzie zbliżona do adiabatycznej, a w wolnych do izotermicznej.

Często przepływy dławione są nie jedną dyszą, a ciągiem przelotów i kanałów. Należy wtedy uwzględnić w kaskadzie oporów zmiany temperatury i całkowitą energię, gdyż mogą one istotnie wpłynąć na pojawienie się przepływu krytycznego. Przykładem konieczności uwzględnienia szeregowego złożenia wszystkich oporów przepływu są elementy limitowania czasu napełniania cylindra hamulcowego w nastawieniu „osobowy”, w którym dysza sterująca może mieć przekrój zbliżony do pozostałych przekrojów ciągu kanałów dolotowych.

### 6.3. Dokładność metod modelowania i rozwiązania

Dokładność metod modelowania i rozwiązania symulacyjnej analizy działania układu hamulcowego zależy głównie od następujących czynników:

1. Użytej metody rozwiązania równań przepływu powietrza w przewodzie głównym. Powinna ona prawidłowo odwzorowywać zarówno rozchodzenie się fali zaburzenia, jak i wolno zmienne napełnianie całego układu. Najbardziej przydatną jest metoda elementów skończonych. W porównaniu z nią metoda charakterystyk, przy bardzo zmiennym po długości przewodzie (zmiany geometrii i źródła strumienia powietrza), byłaby zbyt kłopotliwa, a modelowanie przewodu jako szeregowego zbioru objętości połączonych elementami dławiącymi, np. dyszami nie odzwierciedlałoby prawidłowo rozchodzenia się zaburzeń.
2. Dobrania najodpowiedniejszej metody dla modelowania odgałęzień, ponieważ:
  - modelowanie różnorodnych odgałęzień jest kłopotliwe organizacyjnie,
  - modelowanie w MES małych odgałęzień daje elementy o małej długości, co zmniejsza nadmiernie maksymalny dopuszczalny krok czasowy metody; z kolei modelowanie odgałęzień jako małych pojemności może zmniejszyć dokładność modelowania zjawisk szybkozmiennych,
3. Wyboru wariantu MES prawidłowo odwzorowującego rozmywanie lub zagęszczanie czoła fali rozchodzenia się zaburzeń.
4. Dokładności metody modelowania zaworów. W tym przypadku można wykorzystać następujące metody (przedstawione również w punkcie 6.1):
  - uproszczoną,
  - funkcyjną (quasistatyczną),
  - dynamiczną – uwzględniającą dynamikę elementów ruchomych.

Metoda dynamiczna jest najbardziej prawidłowa, ale związana z niebezpieczeństwami nie uzyskania prawidłowych wyników numerycznych (małe masy elementów dają duże wartości własne układu i mniejszą stabilność numeryczną); metoda umożliwia analizę otwierania się zaworków ze skończoną prędkością, co

udokładnia analizę rozmywania się fali zaburzenia (np., fali hamowania),

5. Zastosowania metody numerycznej rozwiązania po czasie. Można ją rozpatrywać odrębnie dla całego układu hamulca, bądź dla MES. Ze względu na duże nieliniowości w przewodzie głównym, dokładność wyniku będzie zależała od zastosowania metody jedno-, czy wielokrokowej, otwartej, czy zamkniętej. Należy brać pod uwagę uzyskanie algorytmu mniej lub bardziej stabilnego, ale również i trudność jego zastosowania, gdy występują w modelu elementy przełączalne (sterowanie elektryczne), jak i zderzenia mechaniczne (np. grzybka zaworka o siedzenie). Z powyższych względów można zaproponować MES rozciągłą po długości przewodu, a jednoelementową po czasie.

### 6.4. Problemy identyfikacji układu

Samo utworzenie prawidłowego algorytmu nie wystarcza do otrzymania zdatnego narzędzia symulacyjnego. Konieczne jest także posiadanie wystarczająco dokładnych parametrów modelu, które w części można uzyskać jedynie przez identyfikację na bazie obiektu rzeczywistego.

Najbardziej kłopotliwe do określenia są następujące parametry:

- nieliniowy współczynnik oporu przepływu, przenikania ciepła i pojemności cieplnej przewodu głównego,
- współczynniki oporu, przenikania ciepła i pojemności cieplnej kanałów aparatury pneumatycznej,
- charakterystyki elementów służących do dławienia przepływu: dysz, zaworów,
- sztywności, histerezy membran i opory elementów ruchomych,
- szczelność grzybków zaworów w funkcji docisku zaworu,
- określenie działania aparatury hamulcowej różnych producentów (ze względu na niekompletność danych).

## 7. WNIOSKI

Dokładne określenie działania układu hamulca pneumatycznego oraz utworzenie metod jego optymalizacji nie jest zagadnieniem prostym. Jedną z metod doskonalenia hamulca jest symulacja cyfrowa procesu hamowania. Symulacyjne metody analizy układu pneumatycznego hamulca, zweryfikowane oraz oparte na zidentyfikowanych danych, mogą umożliwić opracowanie wiarygodnego narzędzia analizy pneumatycznych układów hamulcowych na etapie projektowania i w trakcie ich eksploatacji.

Wraz z dodatkowymi opisami układów pociągowo-zderznych pojazdów oraz elementów ciernych hamulca można uzyskać skuteczne narzędzie do analizy hamowności pociągu oraz dynamiki wzdłużnej hamowanego pociągu.

## 8. LITERATURA

- [1] Gąsowski W., Kaluba M., Maluśkiewicz M.: *Pneumatyczny układ hamulcowy lokomotywy sterowanej zdalnie. Materiały XIV Konferencji Naukowej „Pojazdy Szynowe 2000”*, Kraków, Arłamów, 2000r.
- [2] Gąsowski W., Maluśkiewicz M.: *Analiza wymagań stawianych przez przepisy międzynarodowe układom sterowania hamulcem zespolonym pociągu. Pojazdy Szynowe, nr 1/2001.*

- [3] Karta UIC 540, Hamulec. Hamulce pneumatyczne dla pociągów towarowych i osobowych. 1982, ze zmianami.
- [4] Karta UIC 541-03, Hamulec. Układ zaworu hamulcowego maszynisty. 1984r.
- [5] Piechowiak T.: Wpływ wybranych parametrów układu hamulcowego na bezpieczeństwo jazdy pociągów towarowych. Praca doktorska, Politechnika Poznańska 1985r.
- [6] Nowicki J., Piechowiak T.: Symulacja procesów hamowania pociągów dla opracowania metod i racjonalizacji urządzeń hamulcowych. CPBP 02.19.03.09 Podstawy Rozwoju Systemów i Środków Transportu, Politechnika Poznańska, 1986-1990.
- [7] Nowicki J., Piechowiak T.: Simulation Computations of Braking System of Railway Vehicles. The Archives of Transport No. 2/1990. Warsaw.
- [8] Nowicki J., Piechowiak T.: Obliczenia gazodynamiczne układu hamulcowego pociągu. Materiały XIV Konferencji Naukowej „Pojazdy Szynowe 2000”, Kraków, Arłamów, 2000r.
- [9] Kaluba M., Piechowiak T.: Wpływ napełniania przewodu głównego wysokim ciśnieniem na proces luzowania pociągu. Materiały XIV Konferencji Naukowej „Pojazdy Szynowe 2000”, Kraków, Arłamów, 2000r.
- [10] Piechowiak T.: Kształtowanie optymalnej charakterystyki sterującej procesami napełniania i opróżniania przewodu głównego. Instytut Pojazdów Szynowych, OR 8432 Poznań 2000r.
- [11] Piechowiak T.: Metodyka wykorzystania symulacji do analiz części pneumatycznej układu hamulcowego pociągu. Konferencja „Metody i systemy komputerowe”. Kraków 2001r.
- [12] Piechowiak T.: Dobór parametrów konstrukcyjnych przekładnika do napełniania przewodu głównego na podstawie obliczeń gazo-dynamicznych oraz badań modelu przekładnika w aspekcie spełnienia wymagań podanych w karcie UIC 541-03. Instytut Pojazdów Szynowych, OR 8337 Poznań 2001r.
- [13] Piechowiak T.: Oddziaływanie przewodu głównego na pracę zaworu maszynisty hamulca pociągu. Pojazdy Szynowe, nr 3/2002 s. 68-72.