

Jan Anuszczyk, Andrzej Gocek  
Politechnika Łódzka, Łódź

## HAMOWANIE POCIĄGÓW METRA Z NAPĘDEM PRĄDU STAŁEGO I PRZEMIENNEGO PRZY WYKORZYSTANIU SYSTEMU ATO

### BRAKING OF UNDERGROUND TRAINS WITH AC AND DC DRIVE USING ATO SYSTEM

**Abstract:** The paper describes AC and DC drives used in underground trains and braking methods of underground trains cooperating with an *Automatic Train Operation (ATO)* system. A train drive with an AC motor and a drive with DC motor with impulse and resistance riot has been described. An ATO system ensures automatic train piloting such as acceleration and braking. A type of this system, used especially on underground lines implements a direct position braking. The precision of train braking depends on the motor control, which is particularly important during electrodynamic braking. The type of used drive affects on preciseness and quality of duty braking process. The concept of an efficient regulation of the duty braking, the control-execution system and a braking quality indicator has been described.

#### 1. Wstęp

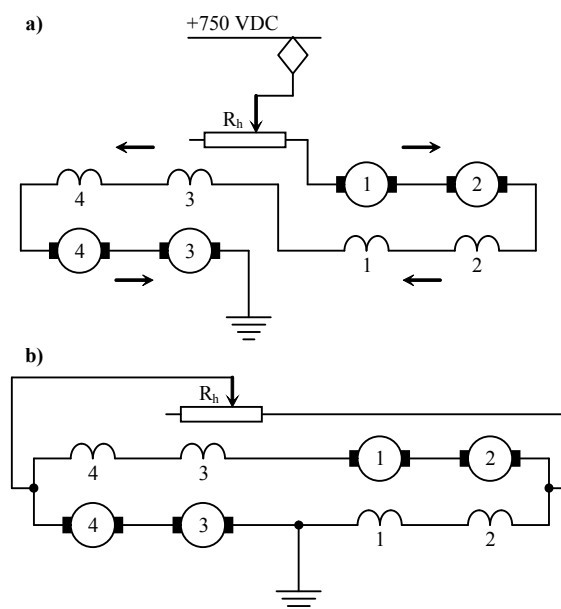
Dokładność hamowania pociągu metra zależy od wielu czynników. Najważniejszymi z nich są: układ hamulcowy, rodzaj zastosowanego silnika trakcyjnego oraz sterowanie układem napędowo-hamulcowym. Podstawowymi rodzajami silników trakcyjnych wykorzystywanych w taborze metra jest silnik szeregowy prądu stałego z rozruchem oporowym, szeregowy silnik prądu stałego z rozruchem impulsowym (czoperem) oraz silnik indukcyjny prądu przemiennego. Procesem hamowania może sterować maszynista włączając hamowanie ręcznie, bądź system automatycznej jazdy pociągu ATO (*Automatic Train Operation*). W przypadku drugiej metody hamowania, realizowane jest ono z dużą precyzją. Dokładność takiego sposobu hamowania będzie przede wszystkim wiązana się z rodzajem zastosowanego silnika trakcyjnego, bowiem wpływ samego układu hamulcowego elektropneumatycznego jest taki sam dla wszystkich omawianych układów napędowych. W omawianym przypadku hamowanie silników trakcyjnych jest realizowane jako hamowanie elektrodynamiczne.

#### 2. Układy napędowe w pociągach metra

##### 2.1 Silnik prądu stałego z rozruchem oporowym

Podstawowym rodzajem układu napędowego stosowanym w taborze metra warszawskiego jest silnik szeregowy prądu stałego z rozruchem oporowym. Odpowiednio dobrane rezystory

rozruchowe ( $R_h$ ), mają na celu przede wszystkim zmniejszyć prąd rozruchowy. W chwili hamowania elektrodynamicznego, energia powstała wskutek pracy prądnicowej silnika wytracana jest w tych samych rezystorach ( $R_h$ ) i oddawana w postaci ciepła.



Rys. 1. Ogólny schemat obwodu głównego lokomotywy z czterema silnikami połączonymi szeregowo i rozruchem oporowym; a) jazda, b) hamowanie, wg [3]

Przy rozruchu silników, prędkość obrotowa jest regulowana przez zmianę napięcia zasilania oraz zmianę prądu wzbudzenia silników. Pierwszy sposób jest realizowany przez kolejne odłą-

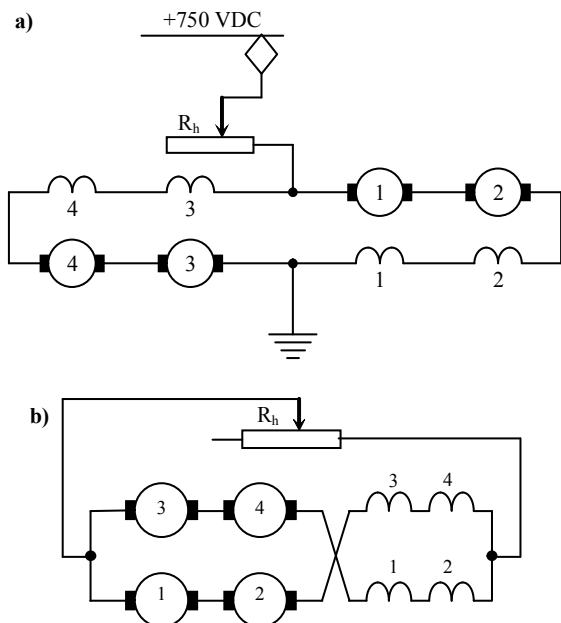
czanie rezystancji rozruchowych przy szeregowym oraz szeregowo-równoległym połączeniu grup silników. Prąd wzbudzenia regulowany jest za pomocą bocznikowania rezystancji w obwodzie wzbudzenia.



Rys. 2. Opory rozruchowe pod pudłem wagonu

W chwili rozruchu stosowane jest kolejno:

- 1) szeregowe połączenie silników z pełnym wzbudzeniem,
- 2) szeregowo-równoległe połączenie silników z pełnym wzbudzeniem,
- 3) szeregowo-równoległe połączenie silników z osłabionym wzbudzeniem.



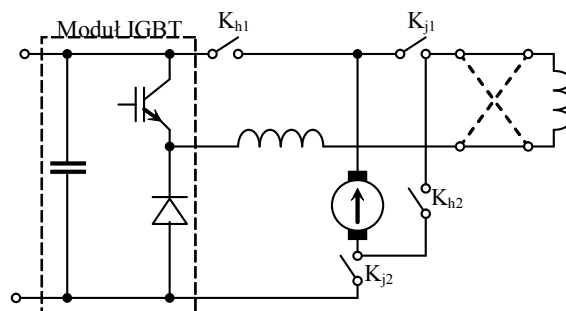
Rys. 3. Ogólny schemat obwodu głównego lokomotywy z czterema silnikami połączonymi równoległe i rozruchem oporowym; a) jazda, b) hamowanie, wg [3]

Hamowanie elektrodynamiczne w pierwszej fazie realizowane jest przez impulsową regulację

wzbudzenia silników trakcyjnych, w drugiej fazie następuje kolejne odłączanie rezystorów rozruchowych w obwodzie hamowania. Dohamowanie następuje hamulcem pneumatycznym. W wagonie napędnym umieszczone są dwa wózki, a każdy wózek wyposażony jest w dwa silniki. Każdy z silników napędza oddzielną oś wózka. W sumie na jeden wagon napędny przypadają cztery silniki trakcyjne o mocy  $4 \times 110$  kW, [6].

## 2.2 Silnik prądu stałego z rozruchem impulsowym

W metrze praskim stosuje się ten sam typ pociągów jak opisany powyżej z tą różnicą, że zamiast rezystorów rozruchowych zastosowano falowniki z tranzystorami IGBT. Umożliwiło to bezoporowy rozruch pociągu i zmniejszyło zużycie energii. Pozwoliło również na zamontowanie hamulca elektrodynamicznego odzyskowego, dzięki któremu energia powstała podczas hamowania może być zwracana do sieci, [4].

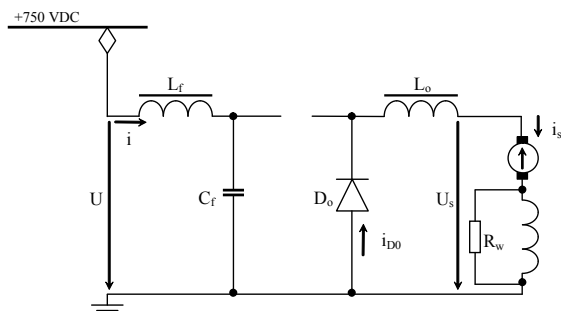


Rys. 4. Ogólny schemat układu jazdy i hamowania z modulem IGBT dla jednego silnika;  $K_j$  – styczniki jazdy,  $K_h$  – stycznik hamowania, wg [3]

Rozruch odbywa się przez impulsową regulację napięcia zasilania silników, a więc i prędkości silników trakcyjnych. Zasada działania układu opiera się na dyskretnym przekształcaniu energii prądu stałego, która dopływa do obwodu obciążenia w postaci oddzielnych impulsów. Regulacja wartości średniej napięcia na silnikach odbywa się poprzez regulację czasu trwania i przerwy impulsu. Stosując takie rozwiązanie można łatwiej zrealizować hamowanie elektrodynamiczne. Powstała w ten sposób energia może zostać zwrócona do sieci, wytracona w rezystorach hamowania, bądź tylko część tej energii może zostać odzyskana, a pozostała część wytracona.

Zastosowanie przekształtnika impulsowego wymaga użycia filtra LC dużej mocy na jego wejściu. Pojemność filtra wygładza prąd wej-

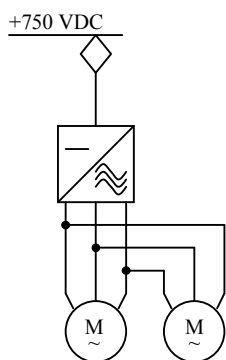
ściowy oraz znosi działanie indukcyjności sieci trakcyjnej na przekształtnik. W celu zmniejszenia strat magnetycznych i zmniejszenia pulsacji siły elektromotorycznej w silnikach trakcyjnych prądu stałego, uzwojenia wzbudzenia bocznikowane są rezystorem ( $R_w$ ), który daje niewielkie osłabienie wzbudzenia (ok. 4-5%), [3].



Rys. 5. Ogólny schemat obwodu głównego lokomotywy z przekształtnikiem na tranzystorze IGBT, wg [3]

### 2.3 Silnik indukcyjny prądu przemiennego

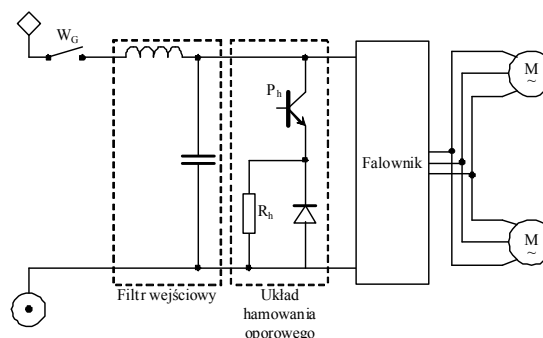
Kolejnym rodzajem napędu metra stosowanym w Pradze i Warszawie są silniki indukcyjne prądu przemiennego. Układ napędowy każdego wagonu składa się z dwóch falowników napięcia, z których każdy zasila dwa połączone równolegle silniki indukcyjne. Układ daje możliwość oddawania energii do sieci, przy czym pierwsza faza hamowania odbywa się z rekuperacją, a następna jako hamowanie elektrodynamiczne oporowe. Powstała energia jest wtedy wytracana w dwóch rezystorach hamowania oporowego, w które wyposażony jest każdy wagon.



Rys. 6. Ogólny schemat zasilania dwóch silników indukcyjnych połączonych równolegle przez falownik, wg [3]

Falownik przekształca napięcie stałe, odbierane z trzeciej szyny zasilającej na napięcie 3-fazowe sinusoidalnie zmienne. Falownik posiada modulację szerokości impulsu PWM,

która zapewnia regulację częstotliwości oraz wartości napięcia wyjściowego. Zastosowane silniki indukcyjne są silnikami klatkowymi. Sterowanie układem napędowym odbywa się za pomocą specjalnego 32-bitowego systemu sterowania. Wykorzystuje on dane z czujników obciążenia wagonu, w sposób ciągły sterując siłą napędową oraz hamowaniem elektrodynamicznym. Współpracuje również ze sterownikiem hamowania pneumatycznego, aby zapewnić odpowiednie opóźnienie hamowania, [7].



Rys. 7. Ogólny schemat obwodu głównego lokomotywy z silnikami indukcyjnymi, wg [3]

W wagonie napędym umieszczone są dwa wózki. W każdym wózku po dwa silniki indukcyjne. W sumie jeden wagon napędny ma moc  $4 \times 180$  kW.

### 3. System automatycznej jazdy pociągu ATO

System ATO realizuje automatyczną jazdę pociągu od stacji do stacji, [1, 2]. Podstawowe czynności systemu to:

- włączanie i wyłączenie silników,
- włączanie i wyłączenie hamulców,
- regulacja siły napędowej,
- regulacja siły hamowania.

W zależności od potrzeb automatyzacji można poddać niektóre bądź wszystkie fazy jazdy pociągu. Automatyczna jazda pociągu musi odbywać się zgodnie z ustalonym algorytmem. Algorytm musi zapewnić przejazd pociągu zgodnie z rozkładem jazdy i zatrzymać pociąg w odpowiednim miejscu, jednocześnie zapewniając energooszczędną jazdę pociągu. System ATO może także spełniać inne dodatkowe zadania np.: otwierać i zamykać drzwi na peronie, zawracać pociąg, itp. Jednak w niniejszym artykule będzie rozpatrywane tylko rozpędzanie i hamowanie pociągu. System automatycznej jazdy pociągu steruje automatycznie napędem i hamulcami pociągu tak, aby w każdej chwili

czasu i drogi prędkość rzeczywista pociągu była równa prędkości zadanej. Działanie systemu ATO może być oparte o sztywny, bądź elastyczny program jazdy. Pierwsze rozwiązanie nadaje się na linię z ruchem jednorodnym jednak staje się kłopotliwy w momencie wystąpienia perturbacji ruchowych na linii. Drugi wariant sprawdza się znacznie lepiej szczególnie w chwili, gdy wystąpią zakłócenia ruchu pociągów.

W pełni elastyczny system ATO na bieżąco wyznacza prędkość zadaną dla każdego pociągu. Do jej wyznaczenia potrzebne są parametry danego pociągu, między innymi zakres regulacji przyspieszenia i opóźnienia rozruchu oraz czasy reakcji urządzeń napędowo-hamulcowych na sygnały sterujące. Taki system będzie realizował hamowanie dużo dokładniej. Dodatkowo jeśli sterowanie napędem, a więc i hamowaniem elektrodynamicznym będzie odpowiednio dokładne, można osiągnąć precyzyjne zahamowanie pociągu w ściśle określonym miejscu na linii. Zasadniczym rodzajem hamowania stosowanym w pociągach jest hamowanie elektrodynamiczne i od niego będzie zależała w głównej mierze dokładność procesu hamowania.

## 4. Hamowanie pociągu

### 4.1 Układy hamowania pociągu

W każdym pociągu dostępne są dwa rodzaje hamowania, [2]:

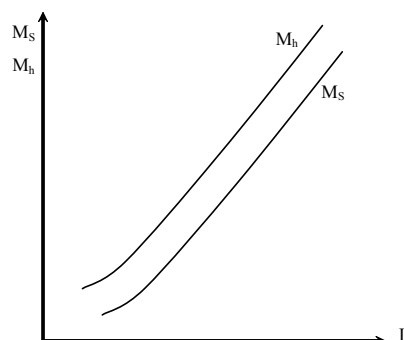
- **Hamowanie służbowe** o łagodnym narastaniu opóźnienia hamowania w czasie, które jest podstawowym rodzajem hamowania wykorzystywanym w systemie ATO. Jest to hamowanie elektrodynamiczne, które w przypadku nie wystarczającego opóźnienia hamowania może zostać uzupełnione hamowaniem elektropneumatycznym.
- **Hamowanie nagłe** ze skokowym narastaniem hamowania w czasie. Hamowanie nagłe włącza się jako hamowanie awaryjne i działa do zatrzymania pociągu. Jest to hamowanie elektropneumatyczne.

Hamowanie elektrodynamiczne uzyskuje się przez zmianę charakteru pracy wszystkich silników trakcyjnych z silnikowego na prądnicowy. Podczas hamowania elektrodynamicznego energia kinetyczna pociągu hamowanego lub energia potencjalna pociągu toczącego się ze spadku zostaje zamieniona na energię elektryczną. W zależności od tego w jaki układ na-

pędowy wyposażony jest tabor energia powstała w ten sposób może zostać wytracona w rezystorach (hamowanie oporowe), bądź oddana do sieci (hamowanie rekuperacyjne). Podczas hamowania pociągu ze stałym opóźnieniem można przyjąć, że moc hamowania dla poziomego odcinka linii wyraża się wzorem

$$N = \frac{m \cdot \alpha \cdot a_h \cdot v}{3,6} [kW] \quad (1)$$

gdzie:  $m$  – masa całego pociągu wyrażona w tonach,  $v$  – prędkość aktualna pociągu w km/h,  $a_h$  – opóźnienie hamowania pociągu wyrażone w  $m/s^2$ ,  $\alpha$  – bezwymiarowy współczynnik mas wirujących, [3]. Moment hamujący silnika prądu stałego ( $M_h$ ) w funkcji prądu silnika ( $I_s$ ) przedstawiony został na rysunku 8. Z powodu ograniczonej mocy silników trakcyjnych pracujących jako prądnice, hamowanie elektrodynamiczne nie może być jedynym rodzajem dostępnego w pociągu hamulca. Dlatego dla bezpieczeństwa wymaga się użycia w taborze drugiego rodzaju hamulców – hamulca pneumatycznego.



Rys. 8. Moment hamujący silnika trakcyjnego prądu stałego

Hamulec elektropneumatyczny działa wspomagająco w przypadku niewystarczającego opóźnienia hamowania. Pociąg jest też dohamowywany tym rodzajem hamulca przy niskich prędkościach, od ok. 8 do 0 km/h. W przeciwieństwie do hamowania elektrodynamicznego działa też na wózkach tocznych. Hamowanie realizowane jest przez układ pneumatyczny i tarcze hamulcowe zainstalowane na każdej osi pociągu. Regulacja siły hamowania odbywa się poprzez zawór rozrządczy, który jest też odpowiedzialny za zmianę hamowania elektrodynamicznego na elektropneumatyczne. Zwiększanie siły hamowania, a więc i zwiększanie opóźnienia hamowania następuje przez zmniejszanie ciśnienia w układzie pneumatycznym.

Odwrotna sytuacja zmniejsza siłę hamowania. Układ hamowania elektropneumatycznego jest sterowany przez odpowiednie urządzenia ściśle współpracuje z hamowaniem elektrodynamicznym oraz z systemem ATO.

Opisane rodzaje hamowania w kontekście rozpatrywanego problemu różnią się tym, że sterowanie hamowaniem elektrodynamicznym jest zaliczane do układu sterowania silnikiem, który realizuje nie tylko funkcję hamowania. Oba sposoby hamowania muszą ściśle ze sobą współpracować i uzupełniać się.

#### 4.2 Hamowanie docelowe

Szczególnym przypadkiem hamowania zasadniczego (służbowego) jest hamowanie docelowe, [5]. Polega ono na stopniowym zmniejszaniu prędkości rzeczywistej pociągu  $V_{rz}$  do wartości prędkości dopuszczalnej  $V_d=0$ , którą należy uzyskać w punkcie ograniczenia prędkości  $x_d$ , przy nie przekroczeniu dopuszczalnego opóźnienia hamowania  $a_h$ . Samoczynne hamowanie docelowe pociągu występuje w czasie zatrzymywania pociągu, tzn.:

- Przy peronie, gdzie zatrzymanie pociągu powinno być bardzo dokładne, a rzeczywiste miejsce zatrzymania pociągu  $x_{rz}$  musi spełniać następujący warunek

$$x_{rz} = x_d \pm c \quad (2)$$

- Przy semaforze, gdzie rzeczywiste miejsce zatrzymania powinno wynosić

$$x_{rz} \pm c \leq x_d \quad (3)$$

gdzie:  $c$  – dopuszczalna tolerancja zatrzymania. Hamowanie docelowe stosuje się głównie na liniach metra do zatrzymania pociągu na peronie, [1, 2]. Hamowanie docelowe na linii metra jest automatycznym procesem zatrzymania pociągu na stacji. Jest to bardzo ważny element jazdy pociągu metra, ponieważ wymaga zatrzymania pociągu na peronie o określonej długości. Coraz częściej projektuje się stacje metra z zamykanymi peronami, w których zatrzymanie pociągu musi być bardzo dokładne i realizować zasadę „drzwi w drzwi”. Precyzyjne zatrzymanie pociągu jest również bardzo ważne z punktu widzenia pasażerów. Podczas zatrzymania pociągu na peronie nie można dopuścić do sytuacji, aby pociąg zatrzymał się w nieodpowiednim miejscu i mogło nastąpić utknięcie pasażera w szczelinie między peronem a pociągiem. Automatyczne hamowanie pociągu musi rozpocząć się we właściwej odległości od punktu zatrzymania oraz wymaga od-

powiedniej regulacji siły hamowania, która zapewni zatrzymanie w wymaganym punkcie linii. Spełnienie tych wymagań oraz znajomość wpływu stosowanego układu napędowego na dokładność hamowania pozwoli na precyzyjne zatrzymanie pociągu z bardzo dużą dokładnością, rzędu kilku centymetrów.

### 5. Optymalizacja automatycznego hamowania pociągu

#### 5.1 Struktura układu sterującego hamowaniem

Podstawowym zadaniem układu automatycznego hamowania pociągu jest osiągnięcie przez pojazd w punkcie ograniczenia prędkości  $x_d$ , prędkości dopuszczalnej  $V_d$  przy określonych ograniczeniach, [5]. Do realizacji tego procesu potrzebne są pewne parametry wyjściowe:

- Parametry stałe, takie jak: zdolność hamowania elektrodynamicznego i elektropneumatycznego, współrzędne miejsca zatrzymania, profil podłużny i poprzeczny linii.
- Parametry zmienne: prędkość rzeczywista pociągu  $V_{rz}$  i położenie na linii  $x_{rz}$ , prędkość dopuszczalna  $V_d$ , obciążenie pociągu oraz ewentualne zakłócenia zewnętrzne.

Układ realizujący proces hamowania służbowego musi wykonywać kolejno następujące zadania:

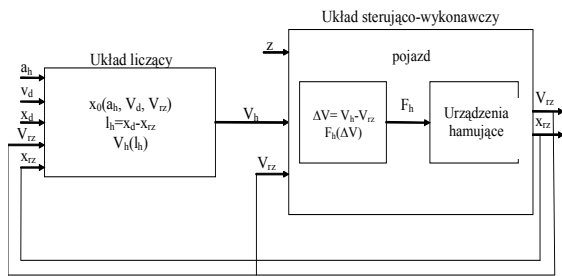
- 1) Wyznaczyć punkt  $x_0$ , w którym ma rozpocząć się hamowanie,
- 2) Określać położenie pociągu  $x_{rz}$  na linii i mierzyć prędkość rzeczywistą  $V_{rz}$ ,
- 3) Wyznaczać prędkość hamowania  $V_h$ ,
- 4) Sterować układem hamowania i określać siłę hamowania  $F_h$ , (poprzez hamowanie służbowe - elektrodynamiczne i elektropneumatyczne).

Czynności 1-3 mają charakter pomiarowo-obliczeniowy, a więc nie zależą od układu hamulcowego. Natomiast czynności wymienione w punkcie 4 mają charakter sterująco-wykonawczy i ściśle zależą od układu hamulcowego. Strukturę takiego układu przedstawiono na rysunku 7. Zastosowany układ liczący realizuje zadania:

- a) Wyznaczenia punktu  $x_0$  rozpoczęcia hamowania,
- b) Oblicza odległość  $l_h$  czoła pociągu  $x_{rz}$  od punktu ograniczenia prędkości  $x_d$ ,
- c) Generuje teoretyczną krzywą hamowania  $V_h(l_h)$ .

Zadania układu sterującego-wykonawczego są następujące:

- Obliczanie różnicy  $\Delta V$  pomiędzy prędkością hamowania  $V_h$  a prędkością rzeczywistą  $V_{rz}$ ,
- Wyznaczanie siły hamującej  $F_h$  i realizację procesu hamowania (elektrodynamicznego i elektropneumatycznego).



Rys. 9. Struktura układu automatycznego hamowania, wg [5]

Urządzenia hamujące realizują hamowanie z zadaniem opóźnieniem hamowania  $a_h$ . Sterowanie hamowaniem musi odpowiednio współpracować z układem sterowania silnikiem, w celu prawidłowego realizowania hamowania elektrodynamicznego oraz współpracować z hamowaniem elektropneumatycznym. Żeby zapewnić optymalną dokładność hamowania trzeba zapewnić takie sterowanie hamowaniem (a więc i silnikiem – dla hamowania elektrodynamicznego), które spełni następujące trzy fazy sterowania optymalnego:

- Fazę stopniowego narastania opóźnienia hamowania aż do wartości maksymalnej,
- Fazę hamowania z maksymalnym opóźnieniem,
- Fazę stopniowego zmniejszania opóźnienia hamowania do wartości zerowej.

## 5.2 Jakość w procesie hamowania

Ocena jakości hamowania powinna uwzględniać parametry statyczne (dokładność zatrzymania pociągu w danym punkcie) oraz dynamiczne pojazdu (dokładność realizacji procesu sterowania hamowaniem i teoretycznej krzywej hamowania  $V_h(l_h)$ ). Można przyjąć zatem, następujący wskaźnik jakości procesu hamowania, [5]:

$$I_r = \alpha \cdot \Delta_d + \beta \cdot \Delta_v + \gamma \cdot \Delta_a \quad (4)$$

gdzie:

$$\Delta_d = |x_{rz}(t_k) - x_g| \quad (5)$$

$$\Delta_v = \int_{t_0}^{t_k} (V_h - V_{rz})^2 dt \quad (6)$$

$$\Delta_a = \int_{t_0}^{t_k} (a_h - a_{rz})^2 dt \quad (7)$$

Przy czym:  $\alpha, \beta, \gamma$  są stałymi współczynnikami poszczególnych wag składników wskaźnika jakości. Dokładność statyczną określa składnik  $\Delta_d$ , natomiast dokładność dynamiczną określają składniki  $\Delta_v$  oraz  $\Delta_a$ .

## 6. Podsumowanie

Struktura i budowa układu sterującego-wykonawczego powinna uwzględniać rodzaj zastosowanego napędu. Konieczne jest określenie jak znacząco wpływa sam układ napędowy na dokładność hamowania docelowego, które realizuje system ATO. Dokładność hamowania pociągu zależy również od sposobu sterowania silnikami, a także od właściwości dynamicznych zastosowanych silników trakcyjnych.

## 7. Literatura

- Barański S.: *Dojazd pociągu metra z systemem SOP-2 do semafora wskazującego sygnał stój*. IX KNTS Semtrak 2000, Zakopane 2000, s. 329-334.
- Bergiel K., Karbowski H.: *Automatyzacja prowadzenia pociągu*. Wyd. Emi-Press, Łódź 2005.
- Bergiel K.: *Podstawy trakcji elektrycznej: Regulacja prędkości obrotowej silników elektrycznych*. Politechnika Łódzka, Łódź 2007.
- Graff M.: *Metro w Pradze*. Technika Transportu Szynowego nr 1-2, 2008, s. 39-45.
- Jeziński E., Karbowski H.: *Problemy optymalizacji automatycznego hamowania*. Zagadnienia Transportu nr 3/4, 1985/85, s. 69-83.
- Siedlecki J.: *Wagony metra warszawskiego serii 81*. Technika Transportu Szynowego nr 10, 1995, s. 32-39.
- Siedlecki J.: *Wagony typu Metropolis dla warszawskiego metra*. Technika Transportu Szynowego nr 12, 2000, s.19-31.