

# Funkcjonowanie systemu elektroenergetyki trakcyjnej prądu stałego w warunkach eksploatacji taboru z rekuperacją energii

**Przy wprowadzeniu do ruchu pojazdów trakcyjnych wyposażonych w układy hamowania rekuperacyjne zwykle mamy do czynienia z istniejącą infrastrukturą techniczną linii, która nie była przewidziana do zasilania taboru z rekuperacją energii, a po której poruszać się będą pojazdy o różnorodnym wyposażeniu. Powoduje to konieczność szczegółowego przeanalizowania warunków pracy systemu elektroenergetyki trakcyjnej ze względu na specyficzne wymagania tych pojazdów.**

Podstawowe parametry i wielkości charakterystyczne układu zasilania trakcji elektrycznej systemu prądu stałego obejmują:

- charakterystyki źródeł energii, tj. podstacji trakcyjnych: liczby i typy zespołów prostownikowych, przeciążalność, napięcia, rezystancje – w zależności od spodziewanego zapotrzebowania na moc i energię, które z kolei zależą od typu taboru, prędkości, trasy, częstości kursowania;
- układ zasilania trakcyjnego – sekcjonowanie i lokalizacja źródeł, schematy zasilania (jedno-, dwustronne) uzależnione od obciążeń, spadków napięć oraz zabezpieczeń od zwarć i przeciążeń;
- warunki zwarciove – zwarcia metaliczne i doziemne, potencjały szyn i konstrukcji wokół linii w stanach normalnych i awaryjnych;
- współczynnik mocy podstacji trakcyjnych;
- zakłócenia wprowadzane do zasilającego systemu elektroenergetycznego (harmoniczne, wahania obciążenia dające wahania napięcia);
- zakłócenia wprowadzane przez podstacje i tabor do sieci trakcyjnej zasilającej i powrotnej, kompatybilność elektromagnetyczna obwodów silno- i słaboprądowych.

Należy zatem postawić pytanie: jak wprowadzenie do eksploatacji nowego taboru z napędem przekształtnikowym, zwykle o większej mocy z możliwością odzysku energii, wpłynie na pracę układu zasilania projektowanego dla innych

założeń dotyczących podstawowych parametrów i wielkości charakterystycznych tego układu?

Przede wszystkim istotne jest czy:

- odbiorcą rekuperowanej energii mają być tylko inne pojazdy;
- rekuperowana energia ma być również oddawana do sieci elektroenergetycznej prądu przemiennego (przez falowniki), czy gromadzona w zasobnikach energii (elektromechanicznych, bateriach, itp.);
- rekuperowana energia przy braku innych odbiorów będzie wytracana na rezystorach (hamowanie dynamiczne).

Rozwój przekształtników i energoelektroniki umożliwia odzyskiwanie energii kinetycznej pociągu podczas hamowania i jej przekazywanie do sieci trakcyjnej. Może być ona przejęta przez inne pojazdy znajdujące się w tej samej sekcji zasilania. Efektywność wykorzystania energii rekuperacji przy rozwiązaniach a) i b) zależy od poziomu generowanego przez pojazd napięcia. Jest istotne, aby napięcie w sieci trakcyjnej przy rekuperacji nie przekraczało wartości dopuszczalnych dla danego układu zasilania niezależnie od położenia pojazdu rekuperującego energię.

## Dopuszczalne napięcia w sieci trakcyjnej

Według normy EN 50163:195 dla sieci 3000 V DC deklarowane są następujące poziomy napięć (ze względu na parametry zasilania taboru):

$U_{\min 1}$  – 2000 V (najniższe napięcie ciągłe),

$U_{\max 1}$  – 3600 V (najwyższe napięcie ciągłe),

$U_{\max 2}$  – 3900 V (najwyższe napięcie o czasie trwania do 5 min).

Za przepięcie przyjmuje się przemijający przyrost napięcia o czasie trwania do 2 s:

- długotrwałe – powyżej 20 ms (na skutek wahań napięcia zasilania energetycznego);
- średniokresowe – 20  $\mu$ s do 20 ms (wynikające ze stanów łączeniowych w układzie, zwarć);
- krótkookresowe – do 20  $\mu$ s (od wyładowań atmosferycznych).

W celu określenia wartości dopuszczalnej przepięć długotrwałych  $U_{\max}$  stosuje się zależność:

$$U < U_n \frac{K}{t^A}$$

gdzie:  $U_n$  – napięcie znamionowe systemu,

$t$  – czas [s],  $0,02 < t < 2$  s;  $A = 0,0745$ ;  $K = 1,264$ ;

dla  $t = 20$  ms,  $U_{\max} = 5075$  V dla  $U_n = 3$  kV.

Wartości odpowiednich poziomów napięć dla systemu 750 V (metro) wyniosą:

$U_{\min 1} = 500$  V;  $U_{\max 1} = 900$  V,  $U_{\max 2} = 950$  V (w przypadku stosowania hamowania rekuperacyjnego dopuszcza się 1000 V), dla  $t = 20$  ms  $U_{\max 3} = 1269$  V;

zaś dla systemu 600 V (tramwaje, trolejbusy):

$U_{\min 1} = 400$  V;  $U_{\max 1} = 720$  V,  $U_{\max 2} = 770$  V (w przypadku stosowania hamowania rekuperacyjnego dopuszcza się 800 V), dla  $t = 20$  ms  $U_{\max 3} = 1269$  V.

Jeśli jest to niezbędne (tzn. występuje przekroczenie dopuszczalnych wartości napięć przez określony czas), na-

leży zmniejszyć napięcie rekuperacji i zastosować wytracanie energii na rezystorze w pojeździe lub w podstacji trakcyjnej albo wyposażyć podstacje trakcyjne w falowniki, co umożliwi zwrot energii do sieci zasilającej w przypadku, gdy nie ma na odcinku pojazdów pobierających energię.

#### **Techniczne aspekty rekuperacji (ze względu na układ zasilania)**

##### **Zalety:**

- zmniejszenie obciążenia podstacji i spadków napięć (szczególnie w godzinach szczytu),
- poprawa sprawności przesyłu energii i zmniejszenie kosztów energii.

##### **Wady:**

- zwiększenie kosztów inwestycyjnych zarówno w taborze, jak i w układach zasilania (wymagane większe przekroje sieci ze względu na wydłużanie sekcji, prostowniki sterowane i falowniki);
- zwiększenie zakłóceń w sieci zasilającej AC i DC – przy stosowaniu falowników i prostowników sterowanych (harmoniczne i pobór mocy biernej);
- wymagania co do stosowania inteligentnych systemów w taborze i układach zasilania do identyfikacji zwarć i ich prawidłowej eliminacji.

#### **Układy do gromadzenia energii i falowniki w podstacjach**

Wykorzystanie zasobników energii i falowników w podstacjach trakcyjnych i ich efektywność powinna być rozpatrywana, ze względu na różnorodne warunki pracy systemów transportowych, indywidualnie dla każdego z nich, z uwzględnieniem uwarunkowań technicznych oraz efektów finansowych i ekonomicznych w odniesieniu do konkretnego rozwiązania. Zanim podejmie się decyzję o zastosowaniu tego typu rozwiązania, niezbędne jest określenie technicznych i finansowych celów jakie chce się przez nie osiągnąć.

Zastosowanie zasobników energii w PT pozwala na:

- zmniejszenie szczytów i wyrównywanie obciążeń dzięki zmniejszeniu zapotrzebowania na moc szczytową (zasobnik zaczyna oddawać moc przy wzroście zapotrzebowania); może to dawać w efekcie zmniejszenie mocy zamawianej i zmniejszenie kosztów opłat za moc 15-minutową i jej przekroczenia;
- poprawę warunków napięciowych przez zmniejszenie obciążenia systemu, dzięki czemu zwiększa się sprawność i prędkość jazdy pociągów (charakterystyka trakcyjna zależy od napięcia);
- poprawę warunków dostawy mocy w awaryjnych układach zasilania; energia zgromadzona w zasobniku, dostarczona do pojazdów, pozwala na dojechanie pociągów do stacji nawet w przypadku zaniku zasilania podstacji;
- wyrównywanie obciążeń w okresach zwiększonego zapotrzebowania na energię z systemu (gromadzenie energii w zasobniku, gdy zapotrzebowanie na energię jest niewielkie i oddawanie w godzinach szczytu poboru z systemu elektroenergetycznego).

Zasobniki energii stosowane są w trakcji miejskiej m.in. w USA (Long Island – w celu wyrównywania obciążeń), Niemczech (dla wyrównywania obciążeń i oszczędności energii), Włoszech (oszczędność energii).

##### **Zalety stosowania falowników w PT to:**

- wykorzystanie energii, która w innym przypadku będzie wytracana w rezystorach hamowania lub na ciepło w hamulcach;
- dodatkowe źródło energii dla sieci elektroenergetycznej w stanach znacznego obciążenia sieci;
- możliwość transferu energii przez sieci SN do punktów zwiększonego poboru energii;
- możliwość eliminacji rezystorów z pojazdów (zapewnienie odbioru energii rekuperacji).

##### **Wady stosowania falowników w PT:**

- większe nakłady inwestycyjne na urządzenia;
- większe zapotrzebowanie na teren dla PT;
- większe straty energii w PT, zwiększenie obciążenia prostowników (kilka procent), falownik musi mieć większe parametry znamionowe niż odpowiedni prostownik;
- zwiększenie zakłóceń od w.h. i wahań napięcia w sieci SN, problemy z kompatybilnością elektromagnetyczną i zakłóceniami radioelektrycznymi;
- zwiększenie poboru mocy biernej i niższy współczynnik mocy oraz większe spadki napięcia w sieci AC, co może wymagać stosowania filtrów w.h. lub kompensatorów mocy biernej;
- wymagania stosowania inteligentnych układów sterowania, monitoringu i zabezpieczeń;
- wymóg, by PT przy pracy falownikowej miała wyższe napięcie niż napięcie stanu jałowego pracy prostownikowej (m.in. aby nie występował przepływ prądu od zespołów prostownikowych, a tylko od pojazdu);
- konieczność uzgodnień z dostawcą możliwości zwrotu energii do sieci.

Falowniki stosowane są w podstacjach trakcyjnych m.in. w: San Paolo (Brazylia), Kobe, Sapporo, Fukuoka, Kyoto (Japonia (22% energii dostarczonej z prostowników zostaje zwrócone do sieci 33 kV, system 1500 V, małe częstotliwości kursowania, schemat linii pokazany jest na rys. 1), Singapurze (odzysk energii w metrze zwiększa się dzięki temu dodatkowo ok. 1,5%).

Przy podejmowaniu decyzji o zastosowaniu zasobników energii lub falowników w PT należy uwzględnić:

- a) częstość ruchu pociągów;
- b) strukturę układów sekcjonowania i zasilania linii po stronie DC;
- c) rezystancje w obwodach DC;
- d) dopuszczalny poziom napięć w sieci trakcyjnej;
- e) ile energii może być przejęte przez inne pociągi, a ile musi przejąć zasobnik/falownik PT;
- f) dodatkowe koszty wyposażenia taboru/podstacji lub oszczędności, jakie można uzyskać wprowadzając te rozwiązania (analiza efektywności finansowej i ekonomicznej), co pozwoli określić liczbę wymaganych falowników lub zasobników, ich parametry i koszt.

Przy niewielkich nadwyżkach możliwej do oddania energii w stosunku do energii, którą są zdolne pobrać inne pojazdy, nie jest opłacalne stosowanie dodatkowych urządzeń do przejmowania energii w podstacjach, ponieważ przy stosunkowo dużych nakładach w niewielkim stopniu wpływa na poprawę sprawności energetycznej układu. Zainstalowanie urządzeń umożliwiających zwrot energii do sieci energetycznej (lub jej gromadzenie w zasobnikach) pozwala zagospodarować energię odzyskiwaną z pojazdu (z uwzględnieniem strat przesyłowych).

### Efektywność rekuperacji energii

Proces odzyskiwania energii hamującego pojazdu należy rozpatrywać globalnie, począwszy od taboru, a kończąc na układzie zasilania. Konkretny tabor ma zwykle zdefiniowane warunki i wymagania co do poprawnej pracy, w tym hamowania odzyskowego. Zdolność pojazdu do oddania energii, określona poprzez jego charakterystyki, nie jest warunkiem wystarczającym do jej odzysku. Niezbędny jest odbiornik tej energii o wymaganej zdolności jej wchłonięcia, jak i układ zasilania zdolny do jej przesłania od pojazdu hamującego odzyskowo do pojazdu pobierającego energię.

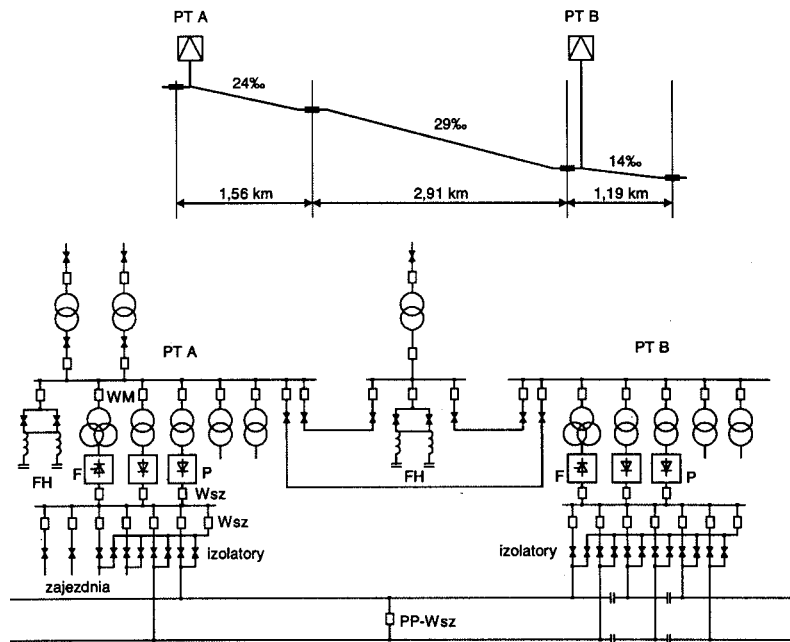
Na rysunku 2 przedstawiono przykład dwustronnego odcinka zasilania z podstacji P1 i P2 z jednym hamującym pojazdem (napięcie  $U_h$ , prąd  $I_h$ ) i jednym pojazdem pobierającym energię (napięcie  $U_{po}$ , prąd  $I_{po}$ ). Bilans mocy w układzie bez podstacji wyposażonych w układy gromadzenia lub transferu energii do sieci można przedstawić następująco:

- zdolność pojazdu do oddania mocy:  $P_{hp} = :U_{ph} I_{ph}$
- moc rzeczywiście oddana do sieci:  $P_h = :U_h I_h$
- moc odebrana (trakcyjna):  $P_o = :U_{po} I_{po}$
- moc strat w sieci przesyłowej od prądów rekuperacji  $\Delta P_{sr}$
- moc strat w sieci przesyłowej od prądów pobieranych z podstacji:  $\Delta P_{sp}$
- moc dostarczona z podstacji P1:  $P_{p1} = U_{p1} I_{p1}$
- moc dostarczona z podstacji P2:  $P_{p2} = U_{p2} I_{p2}$

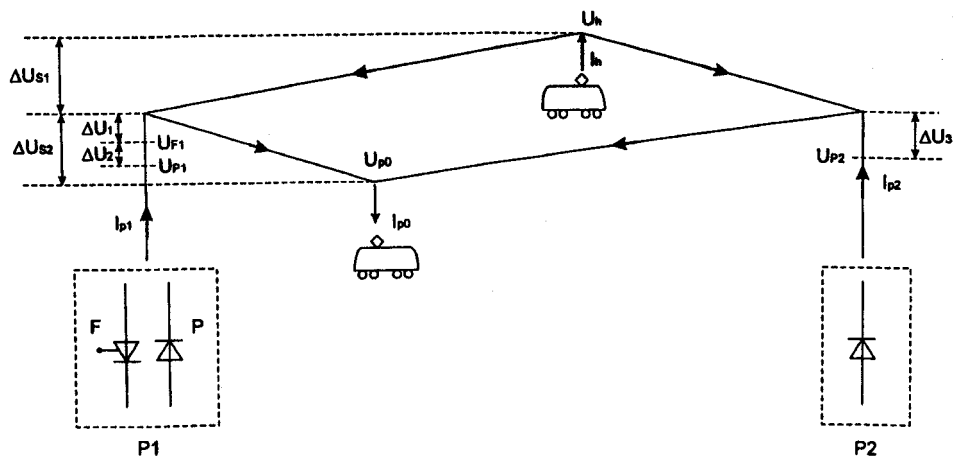
Mogą wystąpić następujące warianty (sytuacja dynamiczna zależna od obciążeń):

1.  $P_o = U_{po} I_{po}$   
 $U_{po} I_{po} + \Delta P_r \geq P_h, P_h = P_{hp}$

Cała energia możliwa do oddania jest przekazana do sieci.



Rys. 1. Schemat linii z zastosowaniem falowników w podstacjach trakcyjnych (Japonia)



Rys. 2. Przykład odcinka zasilanego dwustronnie z podstacji P1 (wyposażenie: prostownik P i falownik F) i P2 (tylko prostownik P) z jednym hamującym (napięcie  $U_h$ , prąd  $I_h$ ) i jednym pobierającym energię pojazdem (napięcie  $U_{po}$ , prąd  $I_{po}$ )

$$2. P_o = U_{po} I_{po}$$

$$U_{po} I_{po} + \Delta P_{sr} + \Delta P_{sp} = P_h + P_{p1} + P_{p2} \quad P_h < P_{hp}$$

(nie ma możliwości przesłania całej mocy rekuperacji do pojazdu ze względu na warunki napięciowe), lub

$$U_{po} I_{po} < P_{hp}$$

(pojazd odbiera tylko część mocy  $P_o$ ).

Wtedy część mocy możliwej do oddania  $P_{hp}$  przez pojazd jest oddana do sąsiednich pojazdów  $P_h$ , a część

$$\Delta P_r = P_{hp} - P_h$$

musi zostać wytracona w rezystorze (w pojeździe) lub przesłana do podstacji, gdzie zostanie zgromadzona w zasobniku, bądź przetransferowana do sieci energetycznej (falownik F w podstacji P1) lub wytracona w rezystorze. Aby

energia została przesłana, muszą zostać spełnione warunki transferu, tzn. napięcie w punkcie rekuperacji musi być odpowiednio wyższe od napięcia w punkcie odbioru (na pojeździe lub w podstacji), warunek przesłania przez falownik:

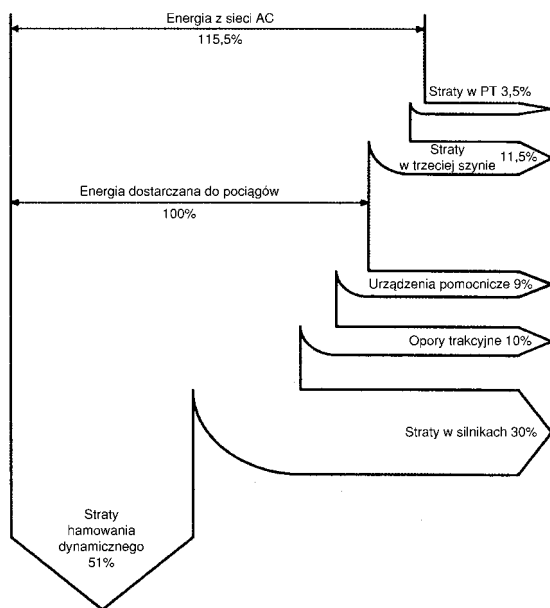
$$U_{F1} < U_h + \Delta U_{s1} + \Delta U_1$$

Istotna jest także wartość rezystancji na drodze przepływu prądu rekuperacji, która zależy od schematu sekcjonowania, odległości między podstacjami, rezystancji jednostkowej szyny prądowej i szyn jezdnych, charakterystyki (pochylenia) podstacji trakcyjnej.

Efektywność rekuperacji energii do innych pojazdów zależy będzie od liczby pojazdów, które znajdować się będą w strefie (obszarze zasilania), do której rekuperujący pojazd może dostarczyć energię i stosunku czasu poboru energii do czasu ich znajdowania się na odcinku.

Na rysunkach 3 a, b i c przedstawiono schematy przepływu energii w systemie transportu miejskiego (wyniki symulacji podane w [10]) dla warunków ruchu w metrze w Nowym Yorku dla przypadków:

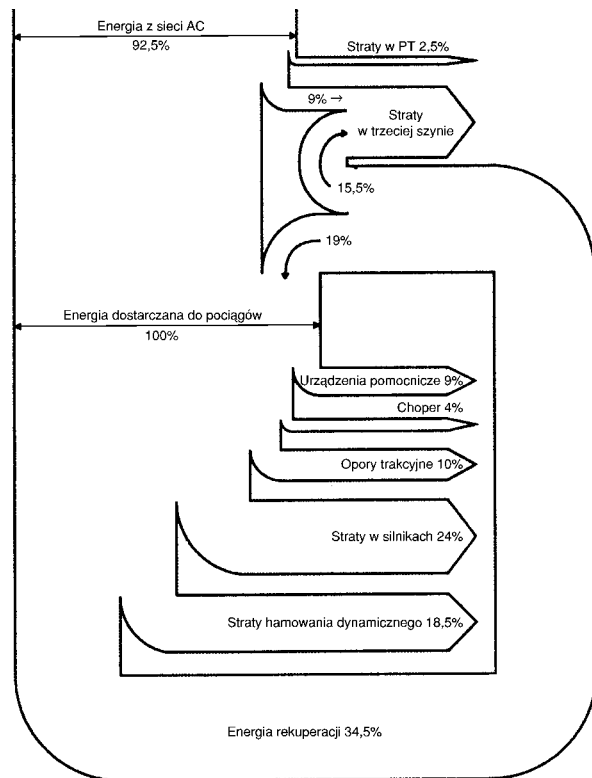
- pojazdy z rozruchem rezystorowym (rys. 3a),
- z pojazdami wyposażonymi w czopery z możliwością hamowania odzyskowego (rys. 3b),
- prototypowego rozwiązania z bezwładnikiem na pojeździe (rys. 3c).



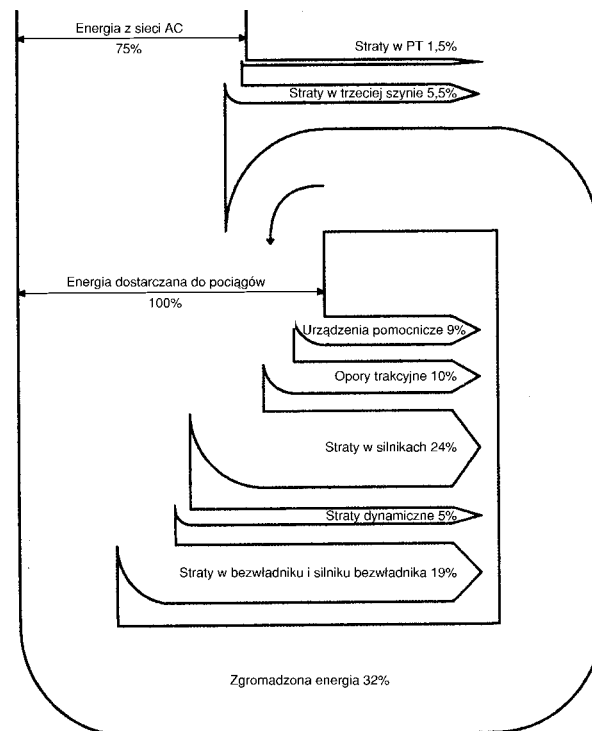
Rys. 3a. Przepływ energii w systemie przy taborze z rozruchem rezystorowym

Według danych z doświadczeń eksploatacyjnych w typowym systemie transportu miejskiego z hamowaniem rekuperacyjnym, oszczędności energii sięgają 20%. Wartość ta opiera się na danych m.in. z Sao Paulo, Brazylia (zmniejszenie jednostkowego zużycia energii z 4,2 kWh/wagonokm do 3,4 kWh/wagonokm) i Niemiec.

Prototypowy układ z bezwładnikiem zainstalowanym na pojeździe zbudowano i testowano na dwu pojazdach w Nowym Yorku [10]. Pojazd miał masę 35 t (tara), zdolność po-



Rys. 3b. Przepływ energii w systemie przy taborze z rozruchem czopierowym



Rys. 3c. Przepływ energii przy taborze z rozruchem czopierowym i wyposażeniem pojazdu w bezwładnikowy zasobnik energii

chłaniania energii 3,2 kWh/wagon, moc 1,3 MW/wagon. W trakcie testów uzyskano zmniejszenie zużycia energii o ok. 30% w porównaniu do typowych pojazdów (z 5 do 3,5 kWh/wagonokm) i zmniejszenie szczytowych obciążeń podstacji o ok. 50%, przy bardzo intensywnym ruchu i dostosowaniu układu zasilania.

### Możliwości zwiększenia efektywności rekuperacji

Efektywność hamowania odzyskowego można zwiększyć poprzez:

#### ▣ wydłużenie sekcjonowanych obszarów zasilania

Na przykład przy zasilaniu dwustronnym z sąsiednich podstacji linii metra, zakładając prędkość średnią ruchu 36km/h (10 m/s), mamy następujące odległości między pociągami

częstość ruchu:	90 s	900 m
	180 s	1800 m

Zatem przy częstości ruchu co 180 s na odcinku  $P1 - P2$  (przyjmując ok. 2 km) znajdują się dwa pojazdy na kierunku ruchu. O tym czy wystąpi jednocześnie hamowanie i rozruch decydować będzie synchronizacja ruchu i sposób sterowania. Pociąg  $P1$  dojeżdżający do podstacji  $P2$  i hamujący raczej będzie oddawał energię do pojazdu  $P2$  ruszającego na drugim torze w przeciwnym kierunku, niż do ruszającego przy  $PT1$ ;

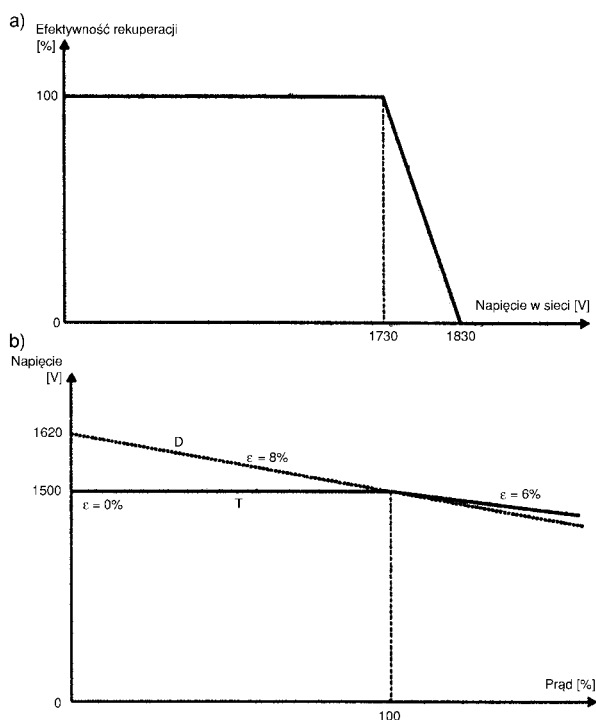
▣ **zwiększenie różnicy napięcia** między napięciem na pantografie rekuperującego pojazdu i w najbliższej podstacji (zwykle napięcie rekuperacji ustalone jest na najwyższym możliwym poziomie, dlatego zwiększenie tej różnicy zasadniczo jest możliwe poprzez zmniejszenie napięcia podstacji – prostowniki sterowane);

▣ **zmniejszenie rezystancji** na drodze przepływu energii rekuperacji (zmniejszenie strat).

Zmiany te wymagają jednak:

- rozpatrzenia warunków zwarciovych w nowej konfiguracji układu zasilania (minimalne prądy zwarcia przy dłuższych sekcjach i obniżonym napięciu podstacji, zdolność wyłączenia zwarć dosilanych z sąsiednich podstacji – wyłączniki szybkie o większej zdolności łączeniowej, wyłączniki szybkie niespolaryzowane);
- rozpatrzenia celowości zastosowania filtrów w podstacjach;
- oceny warunków stosowania podstacji trakcyjnych o regulowanej charakterystyce (prostowniki sterowane). Zastosowanie prostowników o regulowanej charakterystyce (tyrystorowych) pozwala na uzyskanie pewnych efektów, jak:

- zmniejszenie strat przesyłowych (możliwość stabilizacji napięcia przy wzroście obciążenia);
- zwiększenie efektywności hamowania odzyskowego dzięki obniżeniu napięcia przy braku obciążenia podstacji.; przykładowa zależność między wykorzystaniem możliwości rekuperacji wyrażonym efektywnością rekuperacji – stosunkiem mocy rekuperacji przesłanej do sieci  $P_{rekS}$  do potencjalnej mocy rekuperacji  $P_{rek}$  od napięcia sieci trakcyjnej  $U_s$  dla systemu 1500 V w Japonii przedstawiono na rysunku 4 [1, 13]; obniżenie napięcia o 100 V pozwalało na wzrost efektywności (wykorzystania) hamowania reku-



Rys. 4. a - zależność efektywności rekuperacji  $Preks/Prek$  od napięcia w sieci trakcyjnej  $U_s$ ; b - charakterystyki prostownika diodowego (D) i tyrystorowo-diodowego (T) ze stabilizacją napięcia w zakresie małych obciążeń

peracyjnego z 0 do 100%; w celu obniżenia napięcia w podstacji w stanie małych obciążeń wprowadzono prostowniki sterowane o charakterystyce jak na rysunku 4 (D+T); dla następstw pociągów co 3 min uzyskano 5% zmniejszenie zużycia energii;

- zmniejszenie liczby PT dzięki wydłużeniu odcinków między PT (30-50%),
- możliwość pracy prostowników tyrystorowych jak w. sz;
- możliwość wyrównywania obciążeń między sąsiednimi podstacjami (regulacja napięciowa).

Główne wady prostowników sterowanych to:

- wysokie koszty inwestycyjne;
- zwiększenie zakłóceń od w. h. po stronie napięcia AC (może okazać się konieczne instalowanie filtrów w. h. lub stosowanie układów 24-pulsowych);
- zwiększenie zakłóceń po stronie DC, co może powodować konieczność instalowania specjalnego typu filtrów i nawet wymian systemu sterowania ruchem oraz sygnalizacji na odporny na tego typu zakłócenia;
- znaczne zwiększenie poboru mocy biernej (praktycznie przy pełnym wysterowaniu prostownik pracuje tylko przy dużym obciążeniu, w pozostałym czasie pobierając moc bierną, szczególnie dużą przy małym obciążeniu).

### Wpływ konfiguracji układu zasilania

#### i sytuacji ruchowej na efektywność rekuperacji

Za pomocą opracowanego w Zakładzie Trakcji Elektrycznej Politechniki Warszawskiej pakietu programów symulacyjnych przeprowadzono analizy wpływu sytuacji ruchowej (na-



stępstw ruchu pociągów – co  $T$  s) oraz sekwencji ruchu (przesunięcia strumieni pociągów obu kierunków ruchu względem siebie o czas  $\Delta t$  dla linii metra o długości 15 km (15 przystanków, 7 podstacji trakcyjnych). Rozpatrzono dwa warianty układu zasilania o napięciu 750 V DC:

A – odcinek między sąsiednimi podstacjami zasilany tylko dwustronnie (jak na rys. 2), tzn. w podstacjach trakcyjnych wyposażonych w dwa zespoły każdy zespół pracuje na jeden odcinek (na prawo lub lewo od podstacji),

B – sekcje szyn 750 V w podstacjach są spięte (zasilanie dwustronne z dosilaniem z sąsiednich podstacji).

Wyniki symulacji przedstawione są na rysunkach 5 ÷ 12.

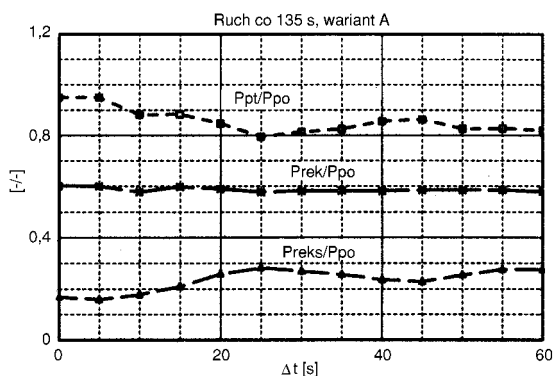
Oznaczenia:

$P_{pt}$  – energia pobrana z podstacji trakcyjnych,  
 $P_{po}$  – energia pobrana przez pojazdy trakcyjne,  
 $P_{rek}$  – potencjalnie możliwa do odzysku energia rekuperujących pojazdów,  
 $P_{reks}$  – rzeczywiście oddana do sieci trakcyjnej energia rekuperacji.

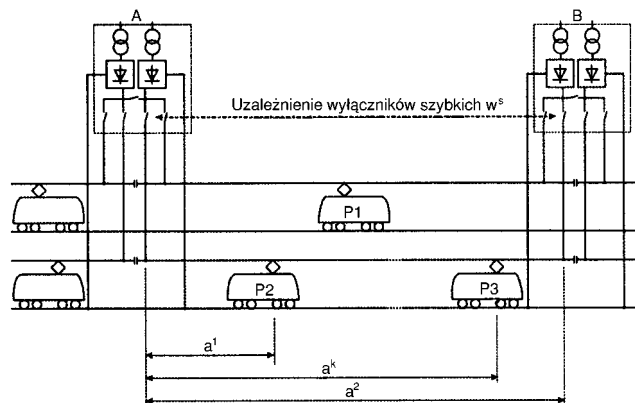
Na rysunkach 5, 6 i 8 przedstawiono względne wartości  $P_{pt}$ ,  $P_{rek}$  oraz  $P_{reks}$  odniesione do energii pobranej przez pojazdy  $P_{po}$  w funkcji przesunięcia między  $\Delta t$  strumieniami ruchu pojazdów na obu kierunkach ruchu dla następstwa

$T = 135$  s i układu zasilania A (rys. 5),  $T = 190$  s i układu zasilania A (rys. 6) oraz B (rys. 8).

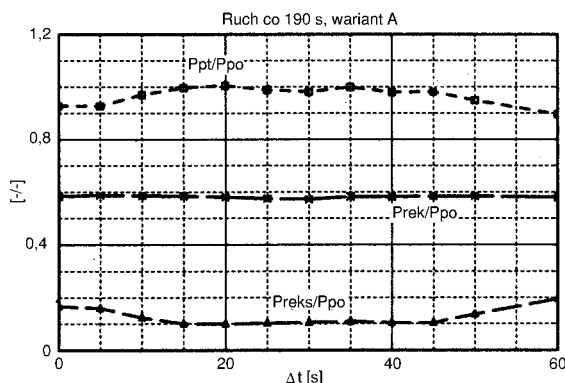
Jak można zauważyć występuje znaczący wpływ częstotliwości kursowania, jak i przesunięć między strumieniami ruchu pociągów na możliwości wykorzystania energii hamowania rekuperacyjnego. Istotna jest również konfiguracja układu zasilania. W przypadku zasilania odcinków tylko dwustronnie między podstacjami (wariant A) efektywność rekuperacji będzie znacznie mniejsza niż dla przypadku zasilania z dosilaniem odcinka również z dalszych podstacji (wariant B – w ten sposób wydłużają się sekcje zasilania i zwiększa się prawdopodobieństwo nałożenia rozruchu i hamowania). Zastosowania rekuperacji pozwala na istotne zmniejszenie energii  $P_{pt}$ , dostarczanej z podstacji trakcyjnych (ze 110% – rys. 6 do mniej niż 70% – rys. 8) i zapotrzebowania na moc dostarczaną z układu zasilania. Przebieg mocy chwilowej  $P$ , pobieranej z podstacji trakcyjnych dla linii metra (symulacja), przedstawiony jest na rysunkach 9 ÷ 12. Na rysunku 9 przedstawiono przebieg w funkcji czasu sumarycznej mocy chwilowej  $P$  dostarczanej przez podstacje dla dwóch wariantów układu zasilania: A i B (następstwo pociągów: 135 s), zaś na rysunku 10 przy następstwie co 500 s. Wpływ na sumaryczną moc  $P$  przesunięć między strumieniami ruchu pociągów  $DT$  obu kierunków przedstawiony jest na rysunkach 11 (układ zasilania A, następstwa  $T = 135$  s)



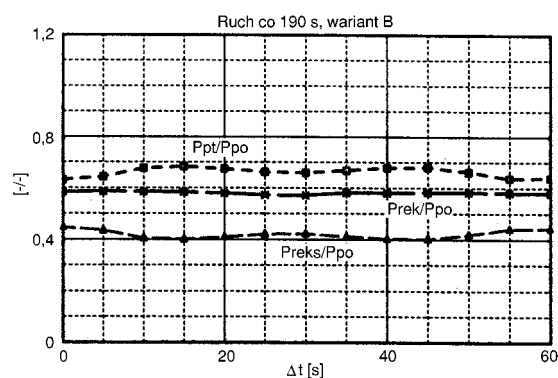
Rys. 5. Zależność względnych wartości energii  $P_{pt}/P_{po}$ ,  $P_{rek}/P_{po}$  oraz  $P_{reks}/P_{po}$ , w funkcji przesunięcia między  $\Delta t$  strumieniami ruchu



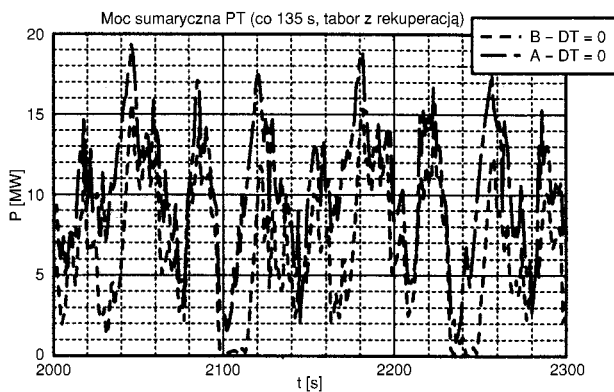
Rys. 7. Uproszczony schemat ideowy struktury obwodu zasilania obszaru dwóch podstacji metra (typu A)



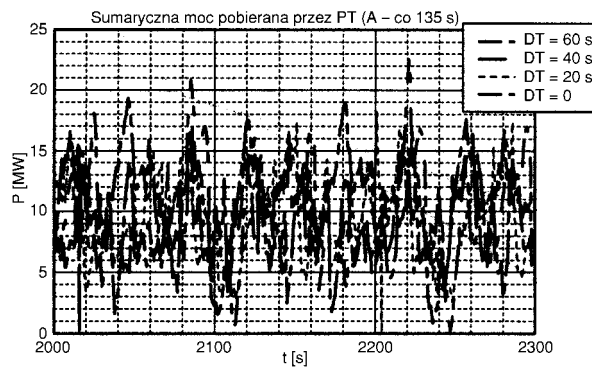
Rys. 6. Zależność względnych wartości energii  $P_{pt}/P_{po}$ ,  $P_{rek}/P_{po}$  oraz  $P_{reks}/P_{po}$ , w funkcji przesunięcia między  $\Delta t$  strumieniami ruchu



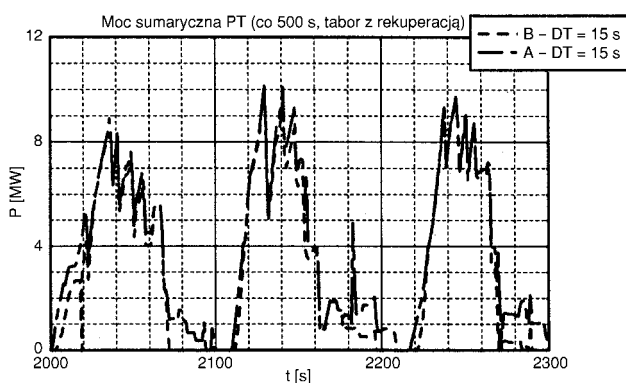
Rys. 8. Zależność względnych wartości energii  $P_{pt}/P_{po}$ ,  $P_{rek}/P_{po}$  oraz  $P_{reks}/P_{po}$ , w funkcji przesunięcia między  $\Delta t$  strumieniami ruchu



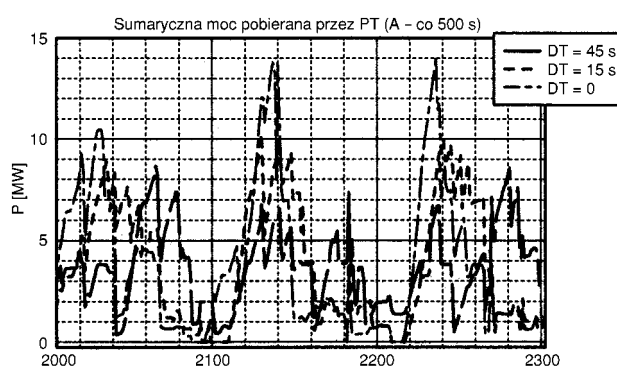
Rys. 9. Przebieg w funkcji czasu sumarycznej mocy  $P$  dostarczanej przez podstacje trakcyjne w zależności od konfiguracji układu zasilania (typu A i B) – pociągi co 135 s



Rys. 11. Przebieg w funkcji czasu sumarycznej mocy chwilowej  $P$  dostarczanej przez podstacje trakcyjne w zależności od przesunięcia między strumieniami ruchu pociągów  $DT$  (pociągi co 135 s)



Rys. 10. Przebieg w funkcji czasu sumarycznej mocy chwilowej  $P$  dostarczanej przez podstacje trakcyjne w zależności od konfiguracji układu zasilania (typu A i B) – pociągi co 500 s



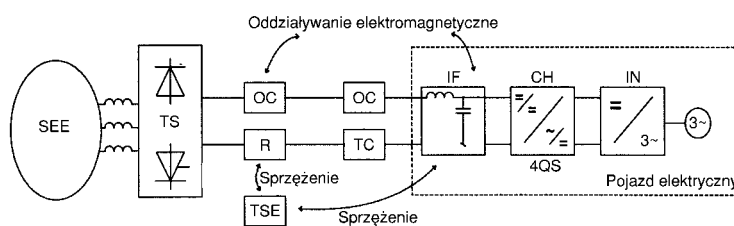
Rys. 12. Przebieg w funkcji czasu sumarycznej mocy chwilowej  $P$  dostarczanej przez podstacje trakcyjne w zależności od przesunięcia między strumieniami ruchu pociągów  $DT$  (pociągi co 500 s)

oraz 12 (układ zasilania A, następstwa  $T = 500$  s). Wpływ ten jest szczególnie zauważalny w przypadku małej częstotliwości ruchu i układu zasilania typu A.

### Zabezpieczenia w układach zasilania w przypadku pojazdów wyposażonych w urządzenia rekuperacji energii

Przy wprowadzaniu taboru z rekuperacją energii należy zwrócić szczególną uwagę na układy zabezpieczeń – w jaki sposób rekuperacja może wpłynąć na ich funkcjonowanie.

Każde zwarcie w prawidłowo funkcjonującym układzie zasilania DC (rys. 7) powinno być wyłączone przez wyłącznik szybki zasilacza. Pojazd hamujący rekuperacyjnie w obszarze tej samej sekcji może spowodować zakłócenia w działaniu zabezpieczeń wrażliwych na napięcie (np. przez podanie napięcia rekuperacji na sekcję sieci w stanie zwarcia z otwartymi wyłącznikami szybkimi). Układy sterownia muszą chronić przed wjazdem rekuperującego pojazdu na odcinek ze zwarcie z odłączonymi w.s.z. na obu końcach, a pojazd trakcyjny powinien być w stanie zidentyfikować wyizolowaną uszkodzoną sekcję (z otwartymi w.s.z. zasilaczy), np. poprzez kontrolę poziomu napięcia na odbieraku) i umożliwić rekuperację do sieci na odcinku ze zwarcie. Dodatkowo wymagane jest zabezpieczenie w PT od zwarć

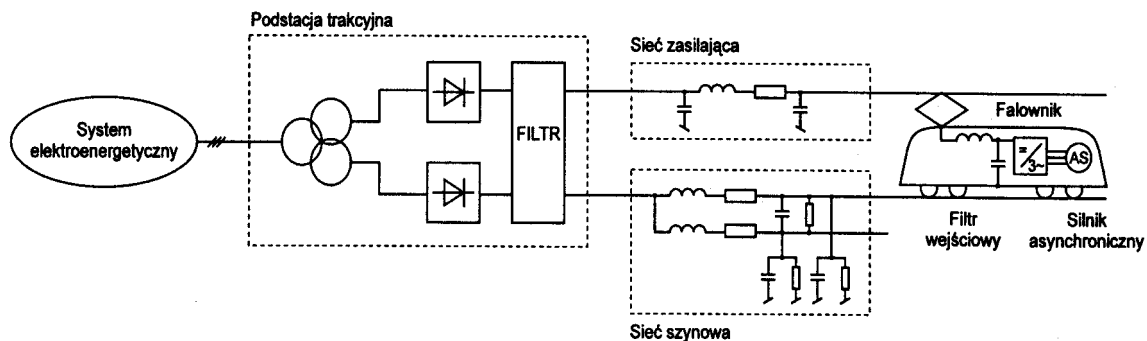


Rys. 13. Źródła oddziaływań zakłócających w systemie zelektrykowanego transportu

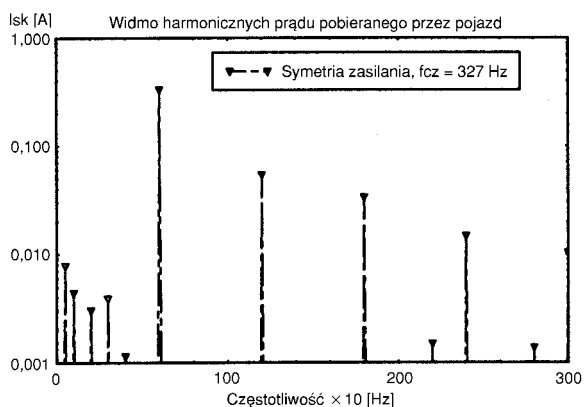
w falowniku (jeśli jest zainstalowany) na skutek zakłóceń w komutacji, co prowadzi do zwarcia obwodu DC poprzez gałąź falownika. Zwarcie to powinno zostać wykryte i usunięte przez w.s.z. falownika.

### Kompatybilność elektromagnetyczna obwodów silnoprądowych i słaboprądowych w warunkach rekuperacji energii.

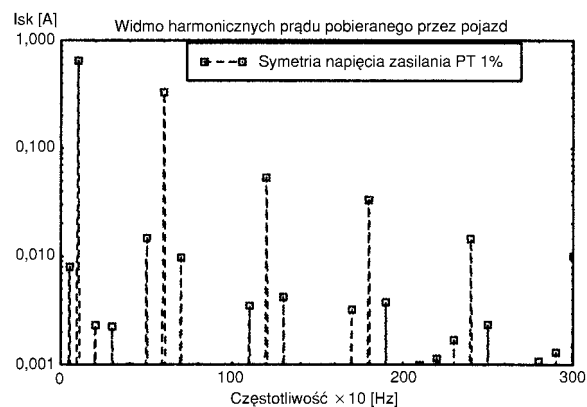
Wprowadzenie hamowania odzyskowego stanowi nowe wyzwanie i może powodować wzrost zakłóceń w stanach przejściowych, jak i ustalonych od wyższych harmonicznych prądu i napięcia. Źródłem tych zakłóceń są tak podstacja trakcyjna, jak i pojazd (rys. 13). Przy czym o ile przy stoso-



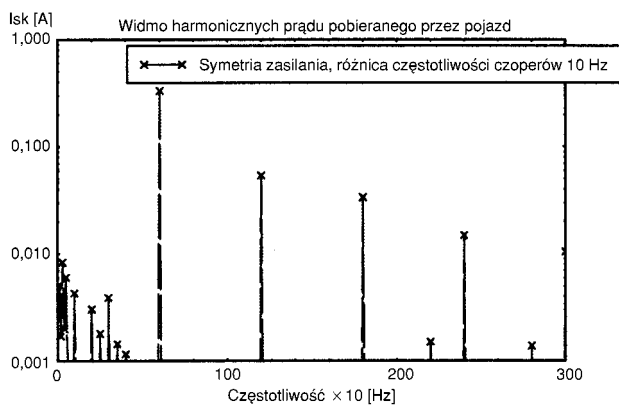
Rys. 14. Schemat zastępczy do kompleksowych analiz systemu zelektryfikowanego transportu



Rys. 15a. Widmo prądu pojazdu z napędem czoperowym 327 Hz (dwa czopery pracujące w przeciwfazie przy symetrii zasilania)



Rys. 15c. Widmo harmonicznych prądu pojazdu przy asymetrii napięcia zasilania 1%



Rys. 15b. Widmo prądu pojazdu przy symetrii zasilania i różnicy częstotliwości pracujących w przeciwfazie czoperów wejściowych wynoszącej 10 Hz

waniu taboru z silnikami DC i AC bez rekuperacji podstacja stanowi źródło energii ze składową zmienną (w.h), a pojazd jest odbiorem energii pobierając prąd odkształcony na skutek pracy przekształtników (chopery, falowniki), to w przypadku rekuperacji pojazd staje się również źródłem energii, generując tak odkształcony prąd, jak i napięcie. Aby kompleksowo przeanalizować tego typu zagadnienie, należy uwzględnić wzajemne oddziaływanie podstacji, pojazdów pobierających energię i hamujących odzyskowo wraz z siecią

trakcyjną (rys. 14). Ze względu na złożoność zjawiska należy stosować techniki modelowania i symulacji, a modele obiektów muszą uwzględniać ich parametry (zmiennie w funkcji częstotliwości) i różne stany pracy, jak i zmienność położenia [14]. W takim zasilanym wieloźródłowo obwodzie o zmiennych parametrach mogą, w pewnych niekorzystnych warunkach, wystąpić rezonanse wzmacniające pewne nawet niewielkie zakłócenia do znacznych wartości.

Z punktu widzenia układu zasilania istotne są tu:

- parametry podstacji trakcyjnej;
- obecność lub brak filtra po stronie prądu stałego, typ;
- schematy sekcjonowania;
- parametry sieci trakcyjnej;
- parametry filtra wejściowego pojazdu;
- symetria napięcia zasilającego podstację.

Na rysunkach 15 a, b i c przedstawiono przykładowe widma harmonicznych prądu w sieci trakcyjnej 750 V w przypadku pracy PT dwunastopulsowej bez filtra i z asymetrią napięcia zasilającego lub impedancji fazy przy zasilaniu pojazdu z napędem asynchronicznym z dwoma czoperami wejściowymi o częstotliwości 327 Hz pracującymi w przeciwfazie.

### Podsumowanie

Zagadnienia zwrotu energii w systemach zelektryfikowanego transportu z pojazdami wyposażonymi w układy hamo-



wania rekuperacyjnego należy rozpatrywać globalnie, począwszy od taboru, a kończąc na układzie zasilania i urządzeniach infrastruktury technicznej (systemy sterowania, sygnalizacji). Konkretny tabor ma zwykle zdefiniowane warunki i wymagania co do poprawnej pracy, w tym hamowania odzyskowego. Zdolność pojazdu do oddania energii, określona poprzez jego charakterystyki, nie jest warunkiem wystarczającym do jej wykorzystania, niezbędny jest odbiornik tej energii o wymaganej zdolności jej wchłonięcia, jak i układ zasilania umożliwiający jej przesłanie od pojazdu hamującego odzyskowo do pojazdu pobierającego energię.

Stosowanie różnych rozwiązań technicznych w strukturze i wyposażeniu układu zasilania, w celu stworzenia optymalnych warunków dla maksymalizacji odzysku energii, wiąże się z koniecznością uwzględnienia różnorodnych warunków pracy systemu transportu zelektrykowanego, parametrów technicznych taboru i układu zasilania oraz infrastruktury linii.

□□

## Literatura

- [1] Abe S., Fuimori H., Ito T.: *DC feeding system suitable for rolling stocks with regenerative braking system utilizing thyristor rectifier*. EPE'93 Conference, Brighton, UK, 1993.
- [2] ELTRAK'88 Materiały Seminarium Naukowo-Technicznego *Elektroenergetyka w transporcie miejskim*, Roś, 1988.10.3-6.
- [3] Fletcher R.G.: *Regenerative equipment for railway rolling stock*. Power Engineering Journal, May 1999.
- [4] Kacprzak J., Mierzejewski L., Szeląg A., Urbanek R., Sielski R.: *Analiza efektywności technicznej hamowania rekuperacyjnego wagonów METROPOLIS seria TC/M. produkcji ALSTOM w aspekcie możliwości obecnego zasilania w Metrze Warszawskim*. Praca Zakładu Trakcji Elektrycznej IME PW na zlecenie Metra Warszawskiego (nie publikowane), 1999–2000.
- [5] Kemp R.J.: *Introduction of chopper controlled trains on established DC railways*. IEE Proc., Vol. 134, PtB., No3, May, 1987.
- [6] Makoto Kuwabara, Akira Ito, Yasuo Suzuki: *Traction Substation for Suburban Train Service*. Hitachi Review, Vol. 40 (1991), No 4.
- [7] Mellitt B., Mouneimne Z.S., Goodman C.J.: *Simulation study of DC transit systems with inverting substations*. IEE Proc. Vol. 131, Pt. B, No 2, March 1984 USA.
- [8] Mierzejewski L., Szeląg A.: *Ground transportation systems (w): The Encyclopedia of Electrical and Electronic Engineering, Supplement 1.*; John Wiley & Sons, NY, USA, 2000, s. 169–194.
- [9] Mierzejewski L., Szeląg A.: *Wpływ taboru z możliwością rekuperacji energii na warunki funkcjonowania układu zasilania prądu stałego*. Seminarium SEP, Metro Warszawskie, Warszawa, styczeń 1999.
- [10] Nene V.D.: *Advanced propulsion systems for urban rail vehicles*. 1980.
- [11] Sone S., Ishizu S.: *Reassessment of Power Feeding Systems at Introducing Regenerative Trains*. IEE Int. Conference on Electric Railway Systems for a New Century. Sept. 1987.
- [12] Sugimoto T.: *Coefficient of regenerative energy for commuter and light-traffic railways*. COMPRAIL '2000 Conference, IX, Bologna.
- [13] Suzuki T.: *DC power supply system with inverting substations for traction systems using regenerative brakes*. IEE Proc. Vol. 129, Pt 8, No 1, January 1982.
- [14] Szeląg A.(kier.): *Modele elementów zasilania trakcji elektrycznej w symulacyjnej analizie współpracy układu: system elektroenergetyczny – prostownikowa podstacja trakcyjna – sieć trakcyjna i szynowa – pojazd z energoelektrycznymi układami przetwarzania energii*. Projekt badawczy KBN 8 T10A 031 18, 2000.
- [15] Szeląg A.: *Kryteria, standardy techniczne oraz zagadnienia jakości energii elektrycznej w projektowaniu układów zasilania elektroenergetyki kolejowej systemu 3 kV*. Technika Transportu Szynowego 12/2000.

**Abstract** – Regenerative braking is widely applied in modern electric traction rolling stock due to many advantages. Introduction of vehicles with regenerative braking on being in operation electrified railway lines creates a must to take into consideration special requirements towards their technical infrastructure. The paper presents some aspects of DC power supply system parameters and solutions, which have to be analysed in order to get proper operation of the transport systems with regenerating vehicles as well as technical and economical effectiveness of the applied variants. Results of exemplary applications and study works are enclosed.

Autorzy

Leszek Mierzejewski

Adam Szeląg

Zakład Trakcji Elektrycznej, Instytut Maszyn Elektrycznych  
Politechnika Warszawska

## II Konferencja Techniczna

# Automatyka Kolejowa

Gdańsk, 27–28.09.2001 r.

- Aktualny stan restrukturyzacji zakładów infrastruktury kolejowej
- Nowoczesne, obszarowe systemy sterowania i kierowania ruchem
- Nowoczesne urządzenia srk i monitoringu PKP