

PAWEŁ GIZIŃSKI, ZYGMUNT GIZIŃSKI\*

## KONDENSATOROWY ZASOBNIK ENERGII DLA POJAZDÓW TRAKCJI ELEKTRYCZNEJ

### CAPACITIVE ENERGY STORAGE FOR TRACTION VEHICLES

#### Streszczenie

Elektryczne pojazdy trakcyjne są ważnymi odbiorcami energii elektrycznej. Nowoczesne przekształtniki IGBT pozwalają na wysoką efektywność odzysku energii w czasie hamowania rekuperacyjnego. Teoretycznie, w transporcie miejskim można odzyskać 20–40% energii trakcyjnej, co w skali roku w odniesieniu do jednego tramwaju daje ok. 40 MWh. Dla miasta średniej wielkości, mającego 300 tramwajów, ilość zaoszczędzonej energii wyniesie ok. 12 000 MWh w skali roku. Aby rekuperacja była efektywna, niezbędne jest jej wykorzystanie przez pozostałe pojazdy, znajdujące się na odcinku zasilania. Wzrost efektywności hamowania odzyskowego może być osiągnięty przez zastosowanie na podstacjach trakcyjnych zasobników energii typu inercyjnego lub kondensatorów. Możliwe jest też zainstalowanie kondensatorowego magazynu energii o mniejszej mocy i pojemności, wystarczającego do przyjęcia energii hamowania, odpowiadającej warunkom ruchowym i prędkości pojazdu. W artykule opisano system dla wagonu tramwajowego o masie 30 t z kondensatorami o pojemności 9 F na napięcie 600 V.

*Słowa kluczowe:* trakcja elektryczna, kondensatory

#### Abstract

Electric traction vehicles are important receivers of electric energy. Modern IGBT converter systems allow high efficiency usage of energy with recuperation of some vehicle kinetic energy in braking mode. Theoretically, in urban transport it is possible to recover 20–40% of the energy used for traction and energy saved for one tramcar per year can be estimated at about 40 MWh. For a middle size town operating 300 tramcars gives some 12 000 MWh braking energy saved per year. To make the recuperation effective it is necessary to reuse the returned energy by other vehicles on a power supply section. Effectiveness increase of recovering vehicle braking energy can be achieved by installing at traction substations inertial or capacitor energy storage systems or by installing on the vehicle capacitor energy storage systems with lower power and energy capacity, sufficient to take over braking energy corresponding to the traffic conditions and vehicle speed. Such a system with 9 Farad/600 V capacitor energy storage, for a tramcar with of 30 Mg is being considered in the following paper.

*Keywords:* electrical traction, capacitor

\* Mgr inż. Paweł Giziński, dr hab. inż. Zygmunt Giziński, Instytut Elektrotechniki, Warszawa.

## 1. Wstęp

Pojazdy trakcji elektrycznej są znaczącymi odbiorcami energii elektrycznej. Moc napędów zainstalowanych w lokomotywach osiąga 6 MW, w pociągach metra – 3 MW, a w tramwajach – 600–800 kW.

Współczesne tranzystorowe układy regulacyjne umożliwiają wykorzystanie pobieranej z podstacji energii ze stosunkowo wysoką sprawnością – równą 0,9. Układy te umożliwiają również częściowe odzyskanie energii kinetycznej rozpędzonego pojazdu podczas hamowania. Dotyczy to zwłaszcza pojazdów zasilanych z sieci trakcyjnej prądu stałego (takich jak tramwaje, trolejbusy, metro) oraz pojazdów kolejowych w krajach z systemem zasilania 3000 V DC i 1500 V DC. Przy zasilaniu sieci prądem przemiennym stosowane są układy falownikowe przetwarzające pośrednie napięcie prądu stałego pojazdu na prąd przemienny. Układy takie ze względu na wymaganą wysoką jakość prądu zwracanego do sieci są skomplikowane i kosztowne.

Teoretycznie w trakcji miejskiej można odzyskać 20–40% pobranej na rozruch i jazdę energii – zależnie od gęstości ruchu, prędkości komunikacyjnej oraz struktury układu zasilania sieci trakcyjnej. Można więc odzyskać ok. 40 MWh rocznie w przypadku jednego tramwaju, czyli dla miasta średniej wielkości eksploatującego 400 tramwajów roczna oszczędność energii wynosi ok. 16 000 MWh. Dla trakcji kolejowej przy dużych odległościach zwracaną energię można oszacować na kilka procent. Stosowanie rekuperacyjnego hamowania jest więc uzasadnione tylko w ruchu podmiejskim i w terenach górzystych.

Aby rekuperacja była efektywna, niezbędna jest możliwość odbioru zwracanej energii przez inne pojazdy znajdujące się w tym czasie na danym odcinku zasilania. Na przykład w Warszawie przy 20% tramwajów wyposażonych w układ umożliwiający hamowanie rekuperacyjne efektywny zwrot energii nie przekracza 25% energii pobranej na jazdę. Przy większym udziale taboru z rekuperacją możliwość jej odzysku będzie jeszcze niższa.

Zwiększenie efektywności odzysku energii hamowania pojazdów można osiągnąć dwiema metodami:

- instalując na podstacjach trakcyjnych bezwładnikowe lub kondensatorowe zasobniki energii (takie rozwiązanie zastosowano próbnie w kilku miastach),
- zabudowując na pojeździe zasobniki kondensatorowe o mniejszej mocy i pojemności wystarczającej do przejęcia energii hamowania z prędkości odpowiadającej warunkom ruchowym (taki układ dla tramwaju będzie rozpatrzony w dalszej części artykułu).

## 2. Kondensatorowy zasobnik energii

Kondensatorowy zasobnik energii zabudowany na pojeździe trakcyjnym powinien przejmować całkowitą energię lub część energii  $E_K$  zwracanej przez pojazd podczas hamowania.

Energia zmagazynowana w kondensatorze

$$E = \frac{C \cdot U^2}{2} \quad (1)$$

Podczas hamowania maksymalna wartość prądu ładowania kondensatora równa jest sumie prądu hamowania dwóch grup silników. Superkondensatory charakteryzują się możliwością ładowania prądem o dużych wartościach, tym niemniej powinno się zastosować przekształtnik tranzystorowy zabezpieczający przed zwarcie.

Sprawność ładowania kondensatora ze stałą wartością prądu wynika ze strat w rezystancji  $R_C$  szeregowo połączonych kondensatorów oraz strat w chopperze i określona jest na ok. 0,9.

Przy założeniu, że sprawność ładowania zasobnika kondensatorowego  $\eta_C = 0,9$  i maksymalne napięcie baterii kondensatorów  $U_c = 750$  V, niezbędna pojemność zasobnika dla jednoczłonowego wagonu obciążonego o masie 28 Mg wynosi

$$C = \frac{2 \cdot E_k \cdot \eta_c}{U_c^2} \approx 7 \text{ F} \quad (2)$$

Hamowanie tramwaju w celu uzyskania wymaganego opóźnienia  $1,4 \text{ m/s}^2$  dla wagonu pustego wymaga mocy hamowania ok. 240 kW. Moment hamujący silników w zakresie prędkości powyżej znamionowej proporcjonalny do napięcia maleje wraz z napięciem. Dlatego też bateria kondensatorów przed rozpoczęciem nie może być rozładowana do zbyt niskiego napięcia.

Przy założeniu, że wartość napięcia baterii kondensatorów przed rozpoczęciem hamowania wynosi  $U_{co} = 500$  V, niezbędna pojemność wynosi

$$C = \frac{2 \cdot E_k \cdot \eta_c}{U_c^2 - U_{co}^2} = 12 \text{ F} \quad (3)$$

W tramwajach wieloczłonowych przy hamowaniu intensywnym wózki toczne hamowane są mechanicznie za pomocą hamulców tarczowych. Liczba osi napędnych wynosi na ogół 4, a osi tocznych 2–4. Część energii (1/3) wytracana jest w hamulcach mechanicznych. W takich przypadkach mimo większej masy pojazdów wieloczłonowych (ok. 40 Mg dla wagonu obciążonego) niezbędna pojemność baterii kondensatorów jest zbliżona do wartości dla tramwajów jednoczłonowych i może wynosić ok. 12 F.

Uwzględniając jednocześnie, że część energii może być odebrana przez inne pojazdy znajdujące się na tym samym odcinku zasilania, optymalna pojemność baterii kondensatorów dla tramwaju 105N oraz członowego o masie własnej ok. 30 Mg powinna wynosić 9–10 F.

Baterie kondensatorów o pojemności ok. 9 F można zbudować np. z takich oferowanych superkondensatorów, jak:

- a) MAXWEL 2600 F, 2,5 V – przy połączeniu szeregowym 300 kondensatorów uzyskuje się  $C = 8,7 \text{ F} - 750 \text{ V}$ ,
- b) kondensatory firmy VITAN 2 F, 400 V – przy połączeniu szeregowym dwóch takich kondensatorów w dziewięciu gałęziach równoległych, łącznie 18 kondensatorów, uzyskuje się  $C = 9 \text{ F} - 800 \text{ V}$ .

Baterie takie pozwalają na przejęcie połowy energii kinetycznej tramwaju lub 75% energii kinetycznej z uwzględnieniem stosowania hamowania mechanicznego osi tocznych. Pozostała energia oddawana będzie do sieci trakcyjnej lub tracona w opornicach hamowania.

Początkowe wartości prędkości maksymalnej, przy których bateria kondensatorów o pojemności 9 F przejmie energię dla różnych sposobów hamowania zestawiono w tabelicy 1.

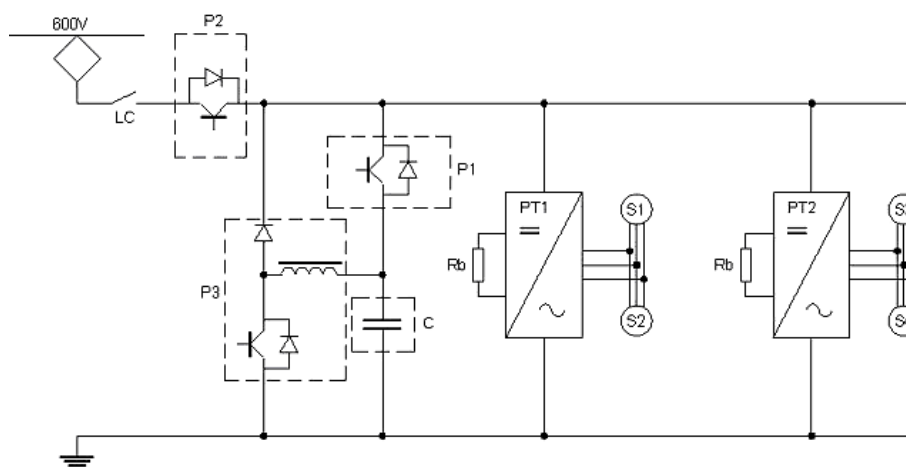
Tabela 1

Początkowa prędkość hamowania tramwaju dla kondensatora 9 F

Lp.	Masa wagonu Mg	Rodzaj hamowania	Początkowa prędkość hamowania [km/h]
1	40	rekuperacyjne 100%	35
2	28	rekuperacyjne 100%	50
3	40	rekuperacyjne + mechaniczne 1/3	43
4	28	rekuperacyjne + mechaniczne 1/3	50,4
5	40	rekuperacja – 50% bateria + 50% sieć	48
6	28	rekuperacja – 50% bateria + 50% sieć	57

Baterie kondensatorów o pojemności 9 F umożliwiają przy braku zasilania z sieci trakcyjnej przejazd z ograniczoną prędkością odcinka powyżej 250 m.

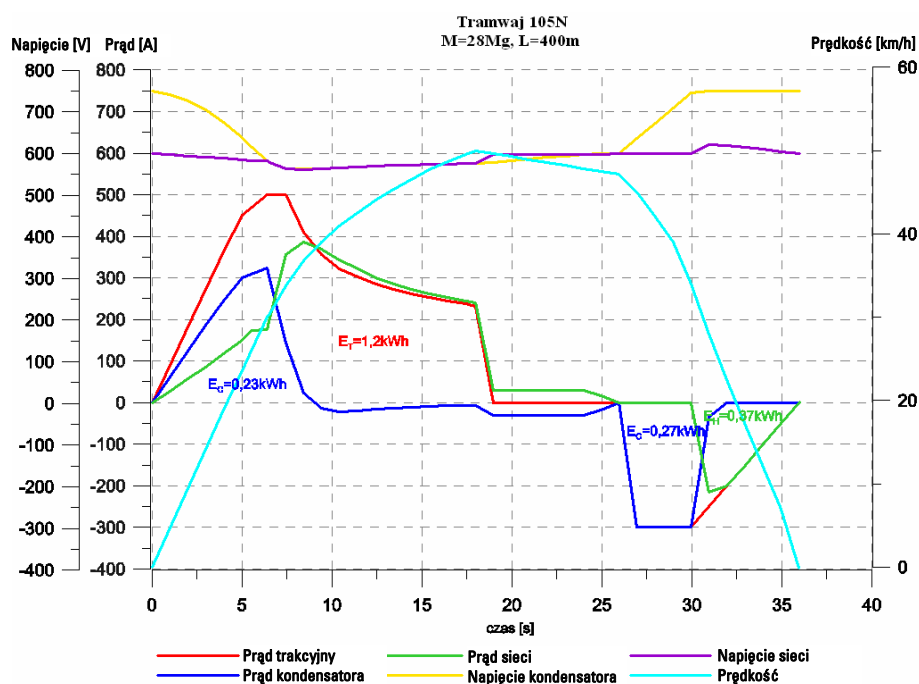
Schemat ideowy układu elektrycznego tramwaju napędzanego przez 4 silniki asynchroniczne zasilane z dwóch przekształtników pokazano na ryc. 1.



Ryc. 1. Schemat ideowy włączenia zasobnika C w układ tramwaju. Oznaczenia: LC – wyłącznik główny, PT1–PT2 – falownik, P1 – przekształtnik ładowania baterii, P2 – przekształtnik hamowania odzyskowego, P3 – przekształtnik podwyższający napięcie zasilania, C – zasobnik kondensatorowy,  $R_b$  – opornice hamowania

Fig. 1. Scheme of energy storage in tram circuit. Where: LC – main breaker, PT1–PT2 – converter, P1 – battery charging converter, P2 – recuperative braking converter, P3 – converter increasing supply voltage, C – capacitive energy storage,  $R_b$  – braking resistor

Przez stycznik liniowy **LC** oraz przekształtniki **P1** i **P2** hamowania odzyskowego zasilane są dwa układy napędowe. Przekształtniki **P1** i **P2** składające się z falowników i chopperów hamowania oporowego mają własny filtr wejściowy i opornik hamowania  $R_b$  dla zapewnienia hamowania elektrodynamicznego w sytuacjach awaryjnych. Zasobnik energii składający się z przekształtnika **P1** oraz baterii superkondensatorów dla pojazdu średniej mocy może być wspólnym podzespolem, natomiast dla dużych mocy każda grupa silników ma własny zasobnik.



Ryc. 2. Wykres dla tramwaju 105N

Fig. 2. Characteristics for tram 105N

Układ może być wyposażony w dodatkowy podzespół **P3** podwyższający napięcie, umożliwiając pełne wykorzystanie energii zasobnika.

Przykładowy przejazd odcinka 400 m obciążonym tramwajem 105N pokazano na ryc. 2.

Początkowa wartość napięcia kondensatora 750 V spada w trakcie rozruchu do ok. 560 V, podczas wybiegu kondensator doładowuje się do wartości napięcia sieci ok. 600 V, następnie w czasie hamowania doładowuje się do przyjętego napięcia granicznego 750 V. Wartość szczytowa prądu pobranego z sieci trakcyjnej wynosi ok. 300 A przy prądzie silników 500 A.

Podczas rozruchu kondensator dostarcza 0,23 kWh energii – przy całkowitym zapotrzebowaniu na cele trakcyjne ok. 1,2 kWh.

W czasie hamowania energia przyjęta przez zasobnik kondensatorowy wynosi ok. 0,27 kWh, natomiast energia zwracana do sieci trakcyjnej – ok. 0,1 kWh. Możliwe jest za-

blokowanie doładowywania z sieci kondensatorów podczas wybiegu, wówczas cała energia hamowania tramwaju przejęta będzie przez zasobnik kondensatorowy.

### 3. Wnioski

Zastosowanie w tramwajach wielozłonowych o masie ~30 Mg kondensatorowych zasobników energii jest technicznie możliwe i daje następujące korzyści:

- umożliwia przejęcie znacznej części energii hamowania tramwaju, bowiem przy obecnym układzie zasilania sieci trakcyjnej praktycznie tylko połowa energii kinetycznej hamowania absorbowana jest przez inne pojazdy znajdujące się na danym odcinku zasilania,
- powoduje, że zakumulowana w kondensatorach energia zmniejsza obciążenie średnie i szczytowe podstacji trakcyjnych,
- kondensatorowy zasobnik energii zamontowany na pojeździe umożliwia w przypadkach awarii układu zasilania: zjazd ze skrzyżowania, przejechanie odcinka np. z zerwaną siecią trakcyjną (tramwaj, trolejbus) oraz dojazd do najbliższej stacji dla pojazdów metra.