

Michał Ciącka, Witold Kobos

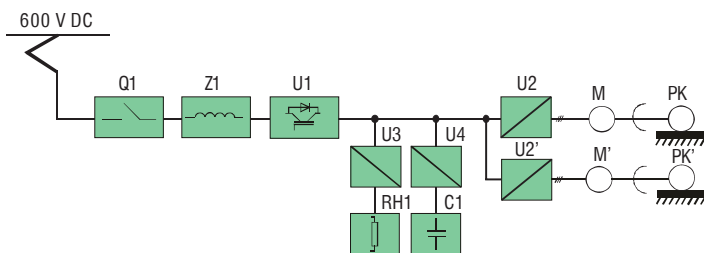
Trakcyjny napęd asynchroniczny o zwiększonej sprawności energetycznej z wykorzystaniem pojemnościowego zasobnika energii

Nowoczesne technologie stwarzają możliwość dalszego rozwoju już istniejących rozwiązań, jak i poszukiwania nowych. Wcześniej na rozwój napędów trakcyjnych miały olbrzymi wpływ opanowanie technologii półprzewodników mocy, tranzystory IGBT, tyrystory IGTC itp. oraz technologii układów mikroprocesorowych, które pozwoliły na podwyższenie parametrów technicznych pojazdów, w tym także ważną sprawność energetyczną. Obok komfortu pasażerów i niezawodności, oszczędność energii staje się coraz istotniejszym kryterium wyboru i oceny napędu trakcyjnego.

Nowa technologia kondensatorów o bardzo dużej gęstości absorbowanej energii w odniesieniu do masy i objętości otwiera drogę do dalszego obniżenia energii pobieranej przez napęd pojazdu trakcyjnego z podstacji. Poniżej przedstawiono strukturę napędu asynchronicznego z zasobnikiem pojemnościowym oraz propozycję kryteriów wymiarowania zasobnika.

Struktura napędu

Do analizy struktury napędu przyjęto, że zasobnik pojemnościowy będzie zabudowany na pojeździe [2]. Znana są aplikacje, w których zasobnik jest związany z siecią trakcyjną oraz podstacją [4, 5]. Za tym rozwiązaniem przemawia fakt, że zasobnik nie obciąża pojazdu i może wymieniać energię z różnymi pojazdami. Jednakże zdaniem autora większe korzyści pojawiają się, gdy każdy pojazd jest wyposażony w indywidualny zasobnik. Wówczas układ sterowania precyzyjnie rozpoznaje stan pojazdu i pozwala na



Rys. 1. Schemat blokowy napędu asynchronicznego z zasobnikiem pojemnościowym
 Q1 - stycznikowa aparatura łączeniowa: nadprądowa, manewrowa, itp.,
 Z1 - wejściowa impedancja tłumiąca: filtr trakcyjny dolnoprzepustowy, obwód EMC, U1 - szybki wyłącznik tranzystorowy, U2 (U2') - falowniki trakcyjne, M (M') - silniki trakcyjne, U3 - czoper hamowania, RH1 - rezystor hamowania, U4 - przekształtnik dwukwadrantowy zasobnika pojemnościowego, C1 - zasobnik pojemnościowy, PK (PK') - zespół przekładni z kołami napędowymi

efektywne wykorzystanie zasobnika i nie ma konieczności analizowania stanu całego systemu zasilania [3, 6]. Ponadto pojawia się możliwość zasilania nawet przy braku napięcia w sieci – zjazd awaryjny z odcinka izolowanego [1]. Również, co jest bardzo istotne, można uniknąć wypyły energii do sieci. Wówczas eliminowane są straty w sieci, a także wzrost napięcia, który jest nieunikniony przy przekazywaniu energii do innego pojazdu.

Przy konstruowaniu struktury zostały uwzględnione dwa ważne kryteria odnoszące się do wymagań eksploatacyjnych, tj. wymagania normatywne oraz podatność na modyfikacje.

1. Wymagania normatywne

Jednym z istotnych wymagań stawianych napędom w pojazdach komunikacji miejskiej jest zapewnienie skutecznego hamowania elektrodynamicznego podczas wjazdu na odcinek sieci uziemionej lub pozbawionej zasilania.

2. Podatność na modyfikacje

Systemy komunikacji miejskiej poszczególnych aglomeracji cechuje duże zróżnicowanie zarówno pod względem parametrów sieci zasilającej, jak i wymagań przewozowych. Struktura napędu zasobnikowego powinna pozwalać na łatwe dostosowanie do oczekiwanych wymagań, nawet w trakcie trwania okresu eksploatacji. Wymagany czas eksploatacji nowego taboru osiąga 20 lat i więcej, tak więc należy spodziewać się, że w tym czasie mogą się znacznie zmienić parametry infrastruktury zasilania oraz wymagania przewozowe.

■ Schemat blokowy napędu

W działaniu napędu z zasobnikiem, można wyróżnić wiele odmiennych faz pracy, w których zachodzi przetwarzanie energii elektrycznej na mechaniczną ($E \rightarrow M$), i odwrotnie ($E \leftarrow M$). Na podstawie schematu z rysunku 1 przedstawiono zakładane działanie napędu wraz z poszczególnymi blokami.

Na rysunkach 2, 5, 6 przedstawiono typowe fazy pracy napędu asynchronicznego bez zasobnika i są to odpowiednio:

- rozruch i jazda,
- hamowanie odzyskowe ze zwrotem energii do sieci,
- hamowanie rezystorowe.

W napędzie, w którym zastosowano zasobnik pojemnościowy, występują dodatkowe stany pracy przedstawione na rysunkach 3 i 4. Stanowią je odpowiednio:

- faza magazynowania energii w zasobniku,
- pobór energii w trakcie rozruchu i jazdy.

W realizacji praktycznej, można poprzez odpowiednie zadanie wysterowania falownika U3, czopera zasobnika U4 oraz szybkiego odtędnika tranzystorowego U1, łączyć ze sobą niektóre fazy, np. fazę zwrotu energii do sieci, magazynowanie energii

w zasobniku tak, aby do maksimum wykorzystać możliwość absorpcji energii przez sieć trakcyjną.

Jak można zauważyć z rysunku 1 układ napędu jest tak skonstruowany, aby zastosowanie zasobnika było rozwinięciem, które zwiększa parametry techniczne i stanowiło rodzaj opcji umożliwiającej korektę wielkości zasobnika, na skutek zmienności warunków eksploatacji, bez konieczności przebudowy już istniejących połączeń.

Wymiarowanie zasobnika pojemnościowego

W procesie doboru wielkości zasobnika należy uwzględnić wiele parametrów, które wynikają ze stosowania nowej technologii superkondensatorów [5]. Są to zagadnienia z jednej strony techniczne i z drugiej strony ekonomiczne, które obecnie wydają się szczególnie ważne. Rozpatrując zagadnienia techniczne można zauważyć, że parametry zasobnika takie, jak pojemność, znamionowe napięcie pracy, nie mają znacznego wpływu na konstrukcję napędu. Jedynej zmianie ulegają gabaryty i masa samego kontenera zasobnika. Konstrukcja jest powiązana z mocą silnika trakcyjnego, która narzuca gabaryty i wymiarowanie podzespołów.

Analizując zagadnienia ekonomiczne należy przynajmniej uwzględnić:

- koszt zakupu zasobnika;
- koszt energii elektrycznej pobieranej z sieci trakcyjnej;
- czas zwrotu kosztów zakupu zasobnika;
- wymagany czas eksploatacji, żywotność zasobnika.

Nie są znane jednoznaczne metody wymiarowania zasobnika, uwzględniające te zagadnienia ekonomiczne. Stosunkowo wysoka cena zakupu superkondensatorów wymusza poszukiwanie największych korzyści poprzez zastosowanie możliwie taniej, a więc małej baterii zasobnika. Koszt zakupu zasobnika pozwala oszacować koszt energii gromadzonej w superkondensatorach na ok. 0,0036 euro/kWh, przy założeniu 1×10^6 pełnych cykli ładowania i rozładowania.

Energia kinetyczna hamującego pojazdu jest to wartość teoretyczna energii, którą można odzyskać i wyraża ją zależność:

$$E_k = \frac{m_p \cdot \alpha \cdot V_p^2}{2} \quad (1)$$

gdzie:

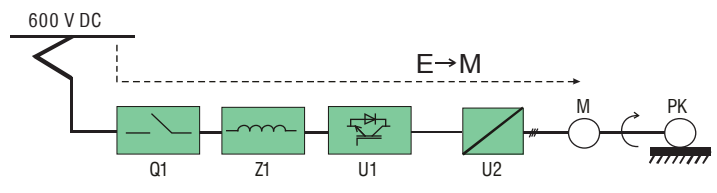
- m_p – masa pojazdu,
- α – współczynnik mas wirujących,
- V_p – prędkość początku hamowania.

Część tej energii pomniejszona o straty wywołane oporami ruchu oraz stratami w poszczególnych podzespołach, jak pokazano na rysunku 1 tj.: przekładni, silniku, falowniku U2 oraz przetworniku zasobnika U4, można zgromadzić w zasobniku.

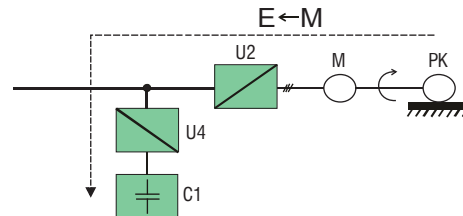
Sprawność przetwarzania energii mechanicznej na elektryczną ($E \rightarrow M$) wynosi:

$$\eta_E = \eta_p \cdot \eta_s \cdot \eta_{V2} \cdot \eta_{U4} = 0,96 \cdot 0,94 \cdot 0,98 \cdot 0,96 \cdot 0,849 \quad (2)$$

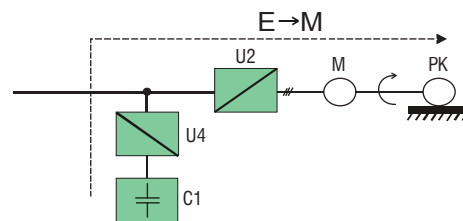
Z zależności (1) wynika, że wielkość zasobnika jest wprost proporcjonalna do masy pojazdu oraz do kwadratu prędkości początku hamowania V_p . Tak więc szczególnie istotne jest przyjęcie właściwej wartości V_p . Na podstawie pracy [8] przyjęto $V_p =$



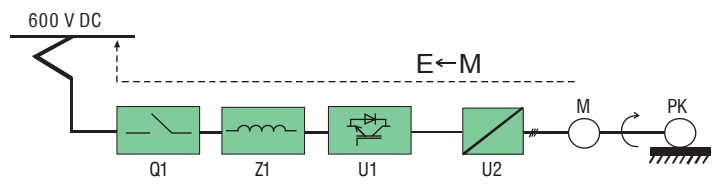
Rys. 2. Faza jazdy przy pobieraniu energii z sieci trakcyjnej



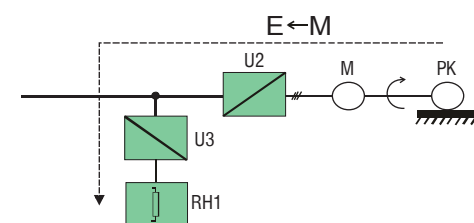
Rys. 3. Faza hamowania przy oddawaniu energii kinetycznej do zasobników pojemnościowych



Rys. 4. Faza jazdy przy pobieraniu energii tylko z zasobnika kondensatorowego



Rys. 5. Faza hamowania przy oddawaniu energii do sieci trakcyjnej



Rys. 6. Faza hamowania przy rozpraszaniu energii w rezystorze hamowania

= 40 km/h, stąd dla średnio załadowanego trolejbusu otrzymujemy z (1), przy:

$$\begin{aligned} m_p &= 13\,000 \text{ kg} \\ \alpha &= 1,2 \\ V_p &= 40 \text{ km/h (11,1 m/s)} \end{aligned}$$

$$E_k = \frac{1300 \cdot 1,2 \cdot 11,1^2}{2} = 961\,038 \text{ J} \quad (3)$$

Na podstawie (2) oraz (3) energia, którą może przyjąć zasobnik nie przekroczy wartości:

$$E_{zas} = E_k \cdot \eta_E = 815\,921 \text{ J} = 0,227 \text{ kWh}$$

Koszt zakupu zasobnika o tej pojemności energetycznej przy obecnych cenach (0,013 euro/J) wynosi:

$$815\,921 \cdot 0,013 = 10\,607 \text{ euro}$$

Jak łatwo można pokazać, zwiększenie prędkości początku hamowania z $V_p = 40 \text{ km/h}$ do $V_p = 50 \text{ km/h}$ zwiększa cenę zasobnika o około 56%.

Oszacowanie oszczędności płynących z eksploatacji zasobnika pojemnościowego

Do obliczeń przyjęto za pracę [7] dane zebrane w tabeli 1.

Tabela 1

Parametry ruchowe dla pojazdu komunikacji miejskiej

Parametr	Wartość
Prędkość początku hamowania	$V_p = 40 \text{ km/h}$
Energia zmagazynowana w zasobniku podczas jednego hamowania	$E = 0,227 \text{ kWh}$
Średni przebieg miesięczny pojazdu	$P_m = 5000 \text{ km}$
Średnia prędkość komunikacyjna	$V_k = 15 \text{ km/h}$
Średni miesięczny czas jazdy	$P_m/V_k = 333,3 \text{ godz.}$
Średnia miesięczna liczba hamowań	$N_k = 10\,000$
Koszt (netto) energii	0,28 zł/kWh

Zaoszczędzona energia w jednym miesiącu eksploatacji zasobnika wyniesie:

$$E_{mies.} = N_k \cdot E = 10\,000 \cdot 0,227 = 2270 \text{ kWh}$$

Stąd miesięczna oszczędność wynosi:

$$K_{mies.} = 2270 \text{ kWh} \cdot 0,28 \text{ zł/kWh} = 635,6 \text{ zł}$$

natomiast w skali roku:

$$E_{rok} = 12 \cdot 2270 \text{ kWh} = 27,24 \text{ MWh}$$
 i jest to 7 627,20 zł

Oszacowanie czasu zwrotu kosztów zasobnika

Z wcześniej dokonanych obliczeń, gdzie koszt zakupu samego zasobnika wynosi ok. 10 607 euro, co przy kursie 4,50 stanowi 47 731,5 zł oraz kosztów zaoszczędzonej energii w ciągu roku 7 627,2 zł pozwala na zwrot jego zakupu w czasie:

$$\frac{47\,731,5}{7\,627,2} = 6,26 \text{ roku}$$

Jest to wartość przybliżona, nie uwzględniająca kosztów obsługi oraz przekształtnika sterującego pracą zasobnika.

Oszacowanie czasu eksploatacji zasobnika

Dane techniczne udostępniane przez producentów superkondensatorów zapewniają, że są one przewidziane do przeprowadzenia minimum 10^6 pełnych cykli ładowanie–rozładowanie. Przy założeniu, że miesięcznie wystąpi 10 000 cykli uzyskujemy:

$$T_{eksp.} = \frac{10^6}{10^4} = 100 \text{ miesiące, czyli 8 lat i 4 miesiące,}$$

po których powinna nastąpić wymiana superkondensatorów.

Praktyczna realizacja napędu dla trolejbusu

W trakcie projektu, opierając się na wybranej strukturze układu, przeprowadzono analizę techniczną oraz obliczenia i symulacje

numeryczne. Szczególny nacisk położono na rozpoznanie nowej technologii kondensatorów o dużej pojemności – superkondensatorów, gdzie muszą być zapewnione właściwe warunki ich pracy, aby uzyskać wymaganą żywotność.

Schemat ideowy napędu przedstawiono na rysunku 7, a rysunki konstrukcyjne najważniejszych podzespołów na rysunkach 8 i 9.

Urządzenia zostały przewidziane do zabudowy w modernizowanych pojazdach na bazie konstrukcji czeskiego trolejbusu TR 14. Aparatura stykowa, filtr wejściowy, falownik, przekształtnik zasobnika oraz sterowanie umieszczono w dostępnych wnękach pod podwoziem. Rezystor hamowania oraz zasobnik pojemnościowy są zabudowane na dachu.

Pojazd jest wyposażony w pomiar i rejestrację zużytej energii.

Pomiary zużycia energii oraz zasięgu jazdy na zasobniku

Wielkość zużycia energii pobranej przez pojazd, jak wiadomo, zależy od wielu czynników, takich jak: parametry sieci zasilania, profil trasy, odległości międzyprzystankowe, obciążenie pojazdu (stopień zapelnienia), sposób jazdy i oczywiście od samego rozwiązania technicznego.

Poniżej przedstawiano zapisy odczytów pomiarów energii zarejestrowanych podczas jazd testowych oraz eksploatacji w pracy liniowej. Oddzielnie była zapisywana energia E_p pobierana przez napęd – a właściwie przez falownik zasilający silnik trakcyjny podczas rozruchu i jazdy wybiegiem oraz energia E_{od} oddawana przez falownik do zasobnika i sieci. Jednostkowe zużycie energii J_e wyrażone w kWh/km było obliczane jako iloraz różnicy energii pobranej podczas jazdy E_p i energii oddanej E_{od} , odniesionej do pokonanej drogi według zależności:

$$J_e = \frac{E_p - E_{od}}{d} \quad (4)$$

Odczyt 1. Napęd tyrystorowy typu T14 (rezystorowe hamowanie elektrodynamiczne)

Warunki: jazda testowa, pojazd bez obciążenia (pusty), odcinek pomiarowy $d = 13,4 \text{ km}$

Energia pobrana z sieci trakcyjnej: $E_p = 21 \text{ kW}$

Energia oddana przez falownik: $E_{od} = 0 \text{ kW}$

Jednostkowe zużycie energii: $J_e = 1,56 \text{ kWh/km}$

Odczyt 2. Napęd zmodernizowany, wyposażony w zasobnik kondensatorowy

Warunki: jazda testowa, pojazd obciążony balastem ok. 4 t, odcinek pomiarowy $d = 13,4 \text{ km}$

Energia pobrana z sieci trakcyjnej: $E_p = 21 \text{ kW}$

Energia oddana przez falownik: $E_{od} = 8 \text{ kW}$

Jednostkowe zużycie energii: $J_e = 0,97 \text{ kWh/km}$

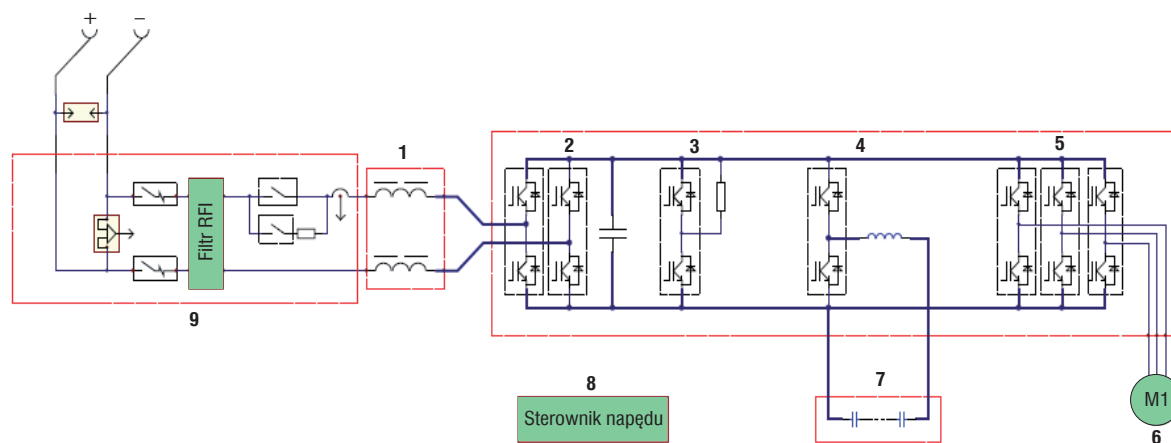
Odczyt 3. Napęd zmodernizowany, wyposażony w zasobnik kondensatorowy

Warunki: jazda testowa, pojazd obciążony balastem ok. 3,2 t, odcinek pomiarowy $d = 13,6 \text{ km}$

Energia pobrana z sieci trakcyjnej: $E_p = 18 \text{ kW}$

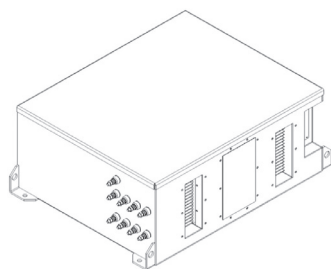
Energia oddana przez falownik: $E_{od} = 6 \text{ kW}$

Jednostkowe zużycie energii: $J_e = 0,88 \text{ kWh/km}$

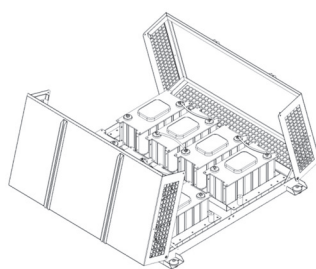


Rys. 7. Schemat obwodu głównego napędu trolejbusu z zasobnikiem superkondensatorowym

1 – dławik wejściowy filtru, 2 – prostownik sterowany, 3 – czoper hamowania wraz z rezystorem hamowania, 4 – przekształtnik dwukwadrantowy zasobnika pojemnościowego, 5 – falownik trakcyjny, 6 – silnik trakcyjny, 7 – zasobnik superkondensatorowy, 8 – sterownik napędu, 9 – stycznikowa aparatura łączeniowa



Rys. 8. Falownik napędu



Rys. 9. Zasobnik superkondensatorowy

Odczyt 4. Napęd zmodernizowany, wyposażony w zasobnik kondensatorowy

Warunki: jazda liniowa, pojazd obciążony pasażerami, odcinek pomiarowy $d = 622,8$ km

Energia pobrana z sieci trakcyjnej: $E_p = 662$ kW

Energia oddana przez falownik: $E_{od} = 229$ kW

Jednostkowe zużycie energii: $J_e = 0,69$ kWh/km

Odczyt 5. Napęd zmodernizowany, wyposażony w zasobnik kondensatorowy

Warunki: jazda liniowa, pojazd obciążony pasażerami, odcinek pomiarowy $d = 4350$ km

Energia pobrana z sieci trakcyjnej: $E_p = 5013$ kW

Energia oddana przez falownik: $E_{od} = 1846$ kW

Jednostkowe zużycie energii: $J_e = 0,73$ kWh/km

Na podstawie zaprezentowanych odczytów można stwierdzić, że układ z zasobnikiem umożliwia zaoszczędzenie ponad 30% energii w porównaniu do napędu tyrystorowego z oporowym hamowaniem elektrodynamicznym.

Odczyt zasięgu jazdy podczas zasilania tylko z zasobnika pojemnościowego

Warunki: jazda po trasie bez pochyłości, pojazd obciążony balastem ok. 3,2 t, prędkość jazdy ok. 8 km/h

Pomierzony zasięg: 700 m.

Podsumowanie

■ W wyniku przeprowadzonych prac projektowych, z uwzględnieniem analizy dostępnej literatury, opracowano strukturę układu napędowego oraz określono wielkość zasobnika pojemnościowego dla modernizowanego trolejbusu.

■ Zabudowa zasobnika na pojeździe ułatwia efektywne sterowanie pracą baterii superkondensatorów, zmniejsza straty w sieci trakcyjnej oraz umożliwia samodzielną jazdę (zjazd awaryjny) pojazdu w przypadku braku napięcia w sieci trakcyjnej [1, 6].

■ Zastosowanie zasobnika w układzie z napędem asynchronicznym zwiększa oszczędność energii w stosunku do napędu z możliwością hamowania odzyskowego (o 10–15%), zwłaszcza w ruchu poza godzinami szczytu [7].

■ Wielkość zainstalowanego zasobnika zależy od masy pojazdu i wymagań ruchowych. Znaczące efekty energetyczne uzyskuje się dla zasobnika o wielkościach większych lub równych 0,14 kWh/10 t [7].

■ Przy obecnych cenach energii oraz baterii superkondensatorów szacowany czas zwrotu kosztów zasobnika, to minimum 6,26 roku, natomiast czas eksploatacji to minimum 8,33 roku.

■ Zastosowanie napędu wyposażonego w zasobnik pojemnościowy umożliwia zaoszczędzenie ponad 30% energii w stosunku do napędu z rozruchem impulsowym z oporowym hamowaniem elektrodynamicznym oraz przejechanie ponad 500 m bez sieci trakcyjnej.

□

Dokończenie na s. 88 >