

MODELOWANIE MAGAZYNÓW ENERGII NA LINII WYBIEGOWEJ

Streszczenie

W artykule przedstawiono badania porównawcze (symulacyjne) trzech typów superkondensatorów dostępnych na rynku jako magazynów energii hamowania odzyskowego na wybiegowej linii tramwajowej. Zaprezentowano model i wyniki obliczeń w środowisku MATLAB/Simulink

WSTĘP

Wprowadzenie na szeroką skalę napędów impulsowych (DC i AC) w trakcji elektrycznej umożliwiło zastosowanie hamowania rekuperacyjnego i zmniejszenie zużycia energii przez tabor elektryczny. Podstawowym warunkiem wykorzystanie energii hamującego pojazdu jest obecność na odcinku zasilania innego pojazdu, który pobiera energię z sieci trakcyjnej. W przeciwnym wypadku energia hamowania rozpraszana jest na rezystorach hamowania.

Rozwiązaniem alternatywnym jest magazynowanie energii hamowania w różnego typu magazynach energii. Można wyróżnić trzy podstawowe typy zasobników energii:

- zasobniki mobilne instalowane na pojeździe magazynujące energię hamowania pojazdu na którym jest zainstalowany i (opcjonalnie) odbierający energię z innego hamującego pojazdu,
- zasobniki podstacyjne magazynujące energię z pojazdów hamujących w obszarze zasilania podstacji,
- zasobniki przytorowe i wybiegowe, instalowane na szlaku lub odcinku wybiegowym i magazynujące energię hamowania pojazdów znajdujących się na odcinku zasilania.

Rozwiązanie pierwsze jest rozwiązaniem o najwyższej sprawności przesyłu energii ze względu na małe straty przesyłowe pomiędzy źródłem a odbiornikiem. Rozwiązanie takie ma również swoje wady, gdyż może być instalowane fabrycznie na nowym typie taboru. Modernizacja istniejącego taboru nie jest ekonomicznie uzasadniona, gdyż wymaga wyłączenia z ruchu taboru i dodatkowo nie jest możliwa we wszystkich typach. Inną wadą takiego rozwiązania jest zwiększenie masy pojazdu. Rozwiązanie drugie – zasobnik instalowany na szynach DC podstacji trakcyjnej umożliwia magazynowanie energii wszystkich pojazdów hamujących znajdujących się w obszarze zasilania. Wadą takiego rozwiązania jest zmienna sprawność energetyczna uzależniona od odległości pojazdu oddającego/pobierającego energię od podstacji. Z drugiej strony, szyny podstacji działają jako sumator prądów kabli zasilający i umożliwiają przesyłanie energii pomiędzy dwoma pojazdami znajdującymi się na różnych odcinkach zasilania.

Rozwiązanie trzecie w wersji wybiegowej (na końcu linii zasilającej) jest nastawione na przyjęcie /oddanie energii jednego pojazdu dojeżdżającego do pętli końcowej z funkcją stabilizacji napięcia sieci przy spadkach poniżej dolnego dopuszczalnego poziomu napięcia trakcyjnego.

Najczęściej stosowanymi elementami magazynów energii są obecnie superkondensatory (SC) dwuwarstwowe typu EDLC (Electric Double Layer Capacitors).

Nowe rozwiązania w technologii superkondensatorów są ukierunkowane na zwiększenie napięcia i zmniejszenie rezystancji szeregowej. Szczególnie interesująca jest tendencja zwiększania

maksymalnego napięcia komórek, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej pojemności, która charakteryzuje te urządzenia. Nowe rozwiązania technologiczne doprowadziły do rozwoju asymetrycznych litowo-jonowych (LiC) kondensatorów o imponujących właściwościach magazynowania energii, co jednak zostało okupione znacznie większą rezystancją szeregową. [2]

Maksymalne napięcie pojedynczej celi kondensatorów LiC jest 3.8V co przy napięciu SC typu EDLC wynoszącym 2,7-2,9V i podobnych wielkościach, pozwala uzyskać znaczne większe pojemności z tej samej objętości. Ponieważ energia zmagazynowana w kondensatorze jest proporcjonalna do kwadratu jego napięcia na zaciskach, wzrost napięcia w stosunku do EDLC powoduje zwiększenie ilości energii zmagazynowanej. Jednocześnie elementy te charakteryzują się znacznie większymi mocami i energią na jednostkę masy i gwarantują większe niezależności parametrów od napięcia i czasu. Porównanie parametrów energetycznych obydwu typów SC przedstawiono w Tab.1 [1],[2].

Tab. 1. Porównanie kondensatorów EDLC i LiC

Typ superkondensatora	Gęstość energii	Gęstość mocy
	Wh/kg	W/kg
EDLC	2-8	500-5000
LiC	10-20	900-9000

W artykule przedstawiono wyniki badań porównawczych trzech typów magazynów energii opartych o superkondensatory w zastosowaniu do magazynów energii rekuperacji na liniach wybiegowych jako urządzenia typu przytorowego. Badanie tego typu układu i analiza przepływu mocy w systemie dla fazy rozruchu przedstawiono między innymi w [1],[3]. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań układu dla linii wybiegowej w fazie hamowania odzyskowego na linii jednotorowej dla trzech typów kondensatorów.

1. MAGAZYN ENERGII NA LINII WYBIEGOWEJ

W celu określenia sprawności energetycznej zasobników różnych typów i różnych producentów przeprowadzono badania symulacyjne układu superkondensatorowego magazynu energii w wersji przytorowej. Zadaniem takiego rozwiązania jest magazynowanie energii hamowania wagonu tramwajowego i wspomaganie rozruchu przez stabilizację napięcia sieci w przypadku odległej podstacji zasilającej i „miękkiej” sieci.

Dla modelu symulacyjnego przyjęto następujące założenia:

- magazyn energii o napięciu znamionowym 720-740V złożony jest z dostępnych w handlu modułów o zbliżonym napięciu znamionowym ok. 48V,
- układ zasilany jest z odległej podstacji trakcyjnej, brak innych odbiorników na odcinku zasilania,
- obciążeniem jest tramwaj typu „SWING” hamujący z opóźnieniem 1.4 m/s² z prędkości 40 km/h,

- g) jako układ energoelektroniczny dopasowujący napięcie zasobnika do napięcia sieci wybrano układ przetwornicy boost-buck w układzie H (pełny mostek), [1], [2],
- h) napięcie biegu jałowego prostownika podstacji 720 V,
- i) maksymalne napięcie sieci w trakcie hamowania 820 V.

Początkowa prędkość hamowania odpowiada prędkości jazdy na końcu I strefy pracy napędu – obszarowi stałego momentu. Założenie to jest założeniem upraszczającym model ale nie mającym wpływu na ocenę właściwości magazynów energii.

1.1. Energia do zmagazynowania

Teoretycznie maksymalna energia, która może być zmagazynowana jest suma energii potencjalnej i kinetycznej pojazdu. [5], [6] Przyjmując prędkość początkową hamowania wagonu 40 km/h (11.11 m/s) i 75% zapęnlienia, czyli 47000 kg masy i zakładając różnicę poziomów $h=0$ m ($E_p = 0$), energia kinetyczna wynosi:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{47000 * 11,11^2}{2 * 3,6 * 10^6} = 0.8057 \text{ kWh} \quad (1)$$

gdzie:

E_k – energia kinetyczna wagonu na początku hamowania w kWh

m – masa wagonu w kg,

v – prędkość początku hamowania w m/s.

Energia przekazywana do sieci może być wyznaczona z zależności:

$$E_s = (E_k - E_{OR} - E_{hm})\eta_t - E_{pom} \quad (2)$$

gdzie:

E_s – energia przekazywana do sieci,

E_k – energia kinetyczna początku hamowania,

E_{OR} – energia oporów ruchu aerodynamicznych i toczenia,

E_{hm} – energia tracona w hamulcach mechanicznych,

E_{pom} – energia pobierana przez układy pomocnicze,

$$\eta_t = \eta_p \eta_m \eta_f \quad (3)$$

gdzie:

η_t – całkowita sprawność układu napędowego tramwaju,

η_p – sprawność przekładni,

η_m – sprawność maszyn trakcyjnych,

η_f – sprawność układu napędowego.

Zakładając, że tramwaj hamuje wyłącznie elektrodynamicznie $E_{hm}=0$ i $E_{pom}=0$, współczynnik wykorzystania energii kinetycznej pojazdu kształtuje się w przedziale 0.45-0.65, co oznacza, że dla rozpatrywanego przypadku możliwa do wykorzystania energia na pantografie wynosi:

$$E_{pt} = 0.3625 \div 0.5237 \text{ kWh}$$

Uwzględniając straty na sieci, w przekształtniku i w superkondensatorze, pojemność energetyczna zasobnika przystosowana do zmagazynowania energii hamowania jednego wagonu tramwajowego, może być wstępnie określona jako $E_{sc}=0,5\text{kWh}$.

1.2. Dobór magazynu energii

Dla celów badań symulacyjnych modelowy magazyn energii jest zbudowany z dostępnych w handlu modułów superkondensatorowych 3 różnych typów o podobnym napięciu ok. 48V i pojemności energetycznej magazynu min. 0,5 kWh. Zestawienie modułów superkondensatorowych przedstawiono w Tab.2, a parametry magazynu energii w Tab.3.

Tab. 2. Zestawienie parametrów symulowanych modułów superkondensatorów

L.p.	Producent	Model	C [F]	U [V]	ESR [ohm]	Imax [A]	Masa [kg]
1	Maxwell	BMOD0165P048	165	48	0,0063	1941,7	13,5
2	JSRMicro	MPA45G275G	275	45,6	0,014	1292,8	5,4
3	LSMtron	LSUM 048R6C 0166F EA	166	48,6	0,005	2200,0	13,2

Tab. 3. Zestawienie parametrów magazynów energii

L.p.	Producent	C [F]	Ucs [V]	R_{ESR} [W]	Masa [kg]	E_{CS} [kWh]	Gęstość energii [Wh/kg]
1	Maxwell	11,00	720	0,0945	202,5	0.5940	2,93
2	JSRMicro	17,19	729,6	0,224	86,4	0.9530	11,03
3	LSMtron	11,07	729	0,075	198,0	0.6126	3,09

Z powyższego zestawienia wynika, że najkorzystniejszym rozwiązaniem pod względem gęstości energii i pojemności faradowej jest rozwiązanie 2 (JSRMicro). Niestety, rozwiązanie to oznacza się największą wartością rezystancji szeregowej R_{ESR} . Wpływ rezystancji szeregowej będzie pokazany w następnych rozdziałach.

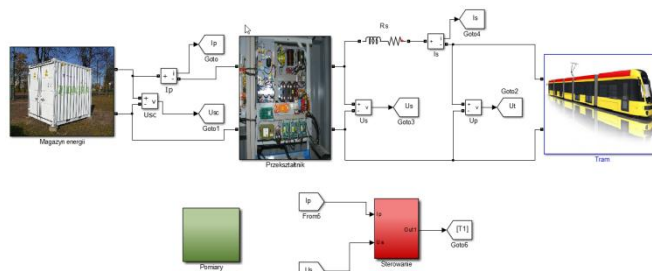
2. MODEL UKŁADU MAGAZYNU ENERGII I HAMUJĄCEGO WAGONU

Do modelowania przepływu mocy pomiędzy pojazdem hamującym a siecią i magazynem energii zastosowano metodę odwrotnej zależności przyczynowo skutkowej [4],[5],[6]. Podstawowym założeniem tej metody jest narzucenie wymaganego cyklu prędkościowego na kołach i następnie przeprowadzanie obliczeń w poszczególnych elementach układu napędowego aż do magazynu energii.

W rozpatrywanym przypadku, wymuszeniem jest stałe opóźnienie hamowania, z którego wylicza się wymaganą siłę hamującą z uwzględnieniem oporów ruchu, moc oddawaną do sieci i dla zadanego napięcia sieci prąd. W obliczeniu mocy na pantografie uwzględnione są sprawności poszczególnych elementów zgodnie z zależnością (3). [5]

Dla obydwu typów superkondensatorów EDLC i LiC przyjęto ten sam uproszczony model matematyczny superkondensatora: szeregowy RC składający się z rezystancji szeregowej R_{ESR} i stałej wartości pojemności C [1],[7]. Model ten zakłada idealne zachowanie superkondensatora i nie odzwierciedla aspektów fizycznego zachowania ani wpływu temperatury na napięcie. Model ten może być stosowany w analizach o małej dynamice zmian prądu superkondensatora, gdzie zjawiska odpowiedzi dynamicznej modelu mogą być pominięte.

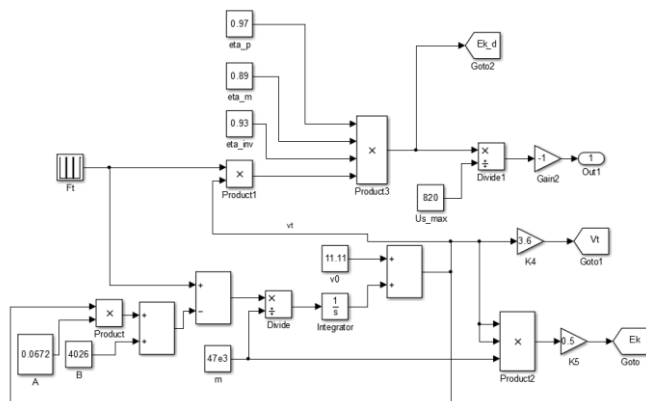
Model obliczeniowy układu w środowisku MATLAB/SIMULINK przedstawiony jest na rysunku 1. W bloku oznaczonym jako *Tram* wykonywane są obliczenia związane z realizacją strategii odwrotnej zależności przyczynowo skutkowej i wyznaczane są wymagane wielkości fizyczne w układzie pojazdu (rys. 2.).



Rys.1. Schemat obliczeniowy magazynu energii dla linii wybiegowej

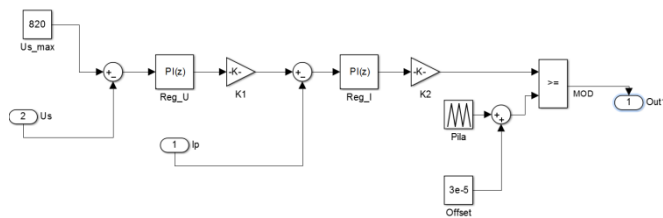
Moduł *Przekształtnik* jest modelem przekształtnika buck-booster pracującego z częstotliwością 4 kHz i sterowanego z układu regulatora *Sterowanie* w układzie kaskadowego połączenia regulatora napięcia i prądu. [8] W bloku *Pomiary* realizowane są rejestracje wielkości mierzonych oraz obliczane straty mocy w układzie przekształtnika i superkondensator (blok *Magazyn energii*).

Odcinek sieci pomiędzy hamującym wagonem a zasobnikiem został zamodelowany jako element RL o stałych parametrach.



Rys. 2. Schemat obliczeniowy wyznaczanie mocy na kołach, prędkości i prądu hamowania odzyskowego. *A, B* – współczynniki równania oporów ruchu, *Vt* – prędkość pojazdu, *eta_p* – sprawność przekładni, *eta_m* – sprawność silnika napędowego, *eta_inv* – sprawność falownika

Zmiana wartości rezystancji, a co za tym idzie strat mocy w sieci, na odcinku hamowania nie będzie miała istotnego wpływu na wyniki obliczeń symulacyjnych.

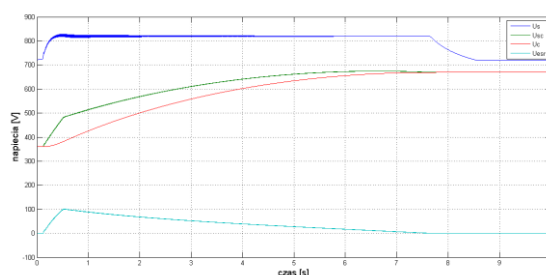


Rys. 3. Schemat regulatora układu przekształtnika wejściowego magazynu energii

3. WYNIKI OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH.

Na rys.4. przedstawiono przykładowe przebiegi zmiany napięć w układzie w trakcie symulacji. Czas symulacji do 7s: hamowanie od prędkości 11.1 m/s² do zatrzymania pojazdu. w chwili czasowej 0,1 s następuje załączenie hamowania pojazdu i ładowanie kondensatora wyjściowego filtra do napięcia przewyższającego napięcie biegu jałowego podstacji trakcyjnej $U_s=720V$ brak odbiorów na odcinku zasilania). Po wykryciu wzrostu napięcia powyżej dopuszczalnego poziomu, uruchomiony zostaje układ ładowania superkondensatora. Napięcie początkowe jest ustalone na wartość minimalna, tzn. $0,5 \cdot U_n$. Po zakończeniu ładowania napięcie na sieci spada do napięcia biegu jałowego.

Należy zwrócić uwagę, że przedstawione na rys.4 napięcie pojemności superkondensatora jest niedostępne w warunkach rzeczywistych. Napięciem pomiarowym będzie zawsze napięcie na zaciskach U_{sc} , które jest sumą spadku napięcia na rezystancji szeregowej R_{ESR} i napięcia ładowania/rozładowania.



Rys.4. Przebiegi napięć w układzie w trakcie ładowania magazynu energii. U_s – napięcie sieci, U_{sc} – napięcie na zaciskach modułu, U_c – napięcia na pojemności superkondensatora, U_{csr} – spadek napięcia na rezystancji szeregowej

Wyniki wyznaczania energii w układzie przedstawione są w Tab.4.

Tab.4. Wyniki obliczeń symulacyjnych

Typ	E_p	E_{we}	E_{dsc}	E_{ak}	SoC	η
1	0,5626	0,5440	0,0574	0,4866	0,8466	0,8950
2	0,5626	0,5445	0,1217	0,4228	0,5767	0,7760
3	0,5626	0,5438	0,0475	0,4963	0,8519	0,913

Numery w kolumnie pierwszej odpowiadają typom magazynów energii (producentom) tak jak w tabelicy 3. W kolejnych tablicach zamieszczono następujące wartości:

- E_p – energia na pantografie z uwzględnieniem strat w całym łańcuchu od kół do odbieraka,
 - E_{we} – energia na wejściu przekształtnika magazynu energii: $E_p - E_s$, gdzie E_s strata energii na rezystancji sieci.
 - E_{dsc} – energia rozproszona na rezystancji szeregowej superkondensatora R_{ESR} ,
 - E_{ak} – energia zmagazynowana.
- Wartości energii w kWh.

Stan naładowania superkondensatora SoC (State of Charge) wyznaczono z zależności [7]:

$$SoC = \frac{U_k^2}{U_n^2} \quad (4)$$

gdzie: U_n – napięcie znamionowe superkondensatora, U_k – napięcie końca ładowania.

Sprawność energetyczna ładowania superkondensatora określona jest jako:

$$\eta = \frac{E_{ak}}{E_{we}} \quad (5)$$

gdzie E_{ak} i E_{we} zostały zdefiniowane wyżej. Niski stopień końcowego naładowania superkondensatorów typu LiC świadczą o sporym zapasie pojemności energetycznej i możliwościach przyjęcia większej energii hamowania (np. z większej prędkości).

PODSUMOWANIE

Przedstawiony model symulacyjny systemu energetycznego zawierający pojazd elektryczny i magazyn energii umożliwia ocenę funkcjonalną i sprawność energetyczną różnych typów superkondensatorów.

Symulacje potwierdziły wcześniejsze badania [1] dotyczące zalet jak i niedoskonałości superkondensatorów LiC. Wysoka wartość

rezystancji szeregowej a co za tym idzie wysokie straty wewnętrzne mogą być źródłem wzrostu temperatury elementów. Jednak dla tej technologii wzrost temperatury powyżej 25°C nie powoduje dramatycznego skracania żywotności elementów z czym mamy do czynienia w przypadku technologii EDLC. Znacznie większa pojemność energetyczna przy tym samym napięciu znamionowym i znacznie mniejsze wymiary fizyczne, pozwalają zapewnić znaczną rezerwę na odbieranie energii hamowania odzyskowego w magazynach umieszczonych na linii wybiegowej bez potrzeby stosowania dodatkowych, równoległych gałęzi.

BIBLIOGRAFIA

1. Bramson E., Staroński K., *Superkondensatory hybrydowe dla komunikacji miejskiej*, Pojazdy Szynowe 2015, numer 4 (w druku).
2. JSR Micro, JM Energy's Lithium Ion Capacitor: *The Hybrid Energy Storage Advantage*, 2009
3. Lewandowski M. Orzyłowski M. Bramson E., *Badania superkondensatorowego zasobnika energii ulokowanego na końcu linii tramwajowej*, Logistyka 2015, numer 3.
4. Van Mierlo J., Maggeto G. Van den Bossche P., *Simulation methodologies for innovative vehicle drive systems*, EPE-PEMC 2004
5. Barrero R., Tackoen X., Van Mierlo J., *Improving Energy Efficiency in Public Transport: Stationary Supercapacitor Based Energy Storage System for a metro Network*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2008, Harbin, Chiny
6. Barrero R. Tackoen X., *New technologies (supercapacitors) for energy storage and energy recuperation for a higher energy efficiency of the Brussels public transportation company vehicles. Intermediate Report 2008*, Vrije Universiteit Bruksela 2008.
7. Zhang Y., Wei L., Shen X., Liang H., *Study of Supercapacitors in the Application of Power Electronics*, WSEAS Transactions on Circuits and Systems, 2009 Issue 6, Volume 8 str. 508-517
8. Staroński K., *Sterowanie stacjonarnymi superkondensatorowymi zasobnikami energii*. XVI Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej Semtrak 2014

ENERGY STORAGE SYSTEM MODELING ON A CATWALK LINES

Abstract

The article presents a simulation model of energy storage on the run-out of the tram line. Presents the results of comparative tests for three types of supercapacitors receiving the braking energy of the tram, set the energy efficiency energy storage and final state of charge.

Autor:

dr inż. **Edward Bramson** – Instytut Elektrotechniki