

Maciej Wieczorek, Mirosław Lewandowski

# Zasobnik energii umożliwiający przejazd tramwaju przez skrzyżowanie bez użycia sieci trakcyjnej

Obecny, dynamiczny rozwój zasobników energii elektrycznej, takich jak akumulatory litowo-jonowe i superkondensatory, pozwala na ich szerokie zastosowanie w trakcji elektrycznej. W niniejszym artykule pod rozważanie poddano możliwość likwidacji skrzyżowań w tramwajowej sieci trakcyjnej i przejazd tramwaju przez skrzyżowanie z wykorzystaniem zasobnika energii. Rozpatrzono trzy możliwe konfiguracje zasobnika – akumulator litowo-jonowy, superkondensator i zasobnik hybrydowy, wykorzystujący obie wymienione technologie. Analizie poddano koszty zasobników, ich masę oraz trwałość zaproponowanych rozwiązań.

**Słowa kluczowe:** zasobnik energii, superkondensator, akumulator.

Zastosowanie zasobników energii w tramwajach umożliwia im poruszanie się bez potrzeby poboru mocy z sieci trakcyjnej [11]. Fakt ten można wykorzystać do ograniczenia kosztownych elementów infrastruktury komunikacji miejskiej. Jednym z takich elementów są skrzyżowania sieci trakcyjnej. Ich konstrukcja jest skomplikowana i obniża wartość architektoniczną miejsca, w którym się znajdują. Przejazdy przez skrzyżowania powodują również szybsze zużycie nakładki pantografu oraz sieci przez iskrzenie spowodowane odrywaniem się pantografu od sieci. O ile zasobniki energii elektrycznej, takie jak akumulatory litowo-jonowe czy superkondensatory, mają nadal zbyt niską energię właściwą, aby zasilić tramwaj poruszający się całkowicie bez udziału sieci, o tyle ich parametry w zupełności wystarczą do przejazdu krótkiego odcinka przez skrzyżowania.

W artykule pod rozważanie poddano możliwość likwidacji skrzyżowań w tramwajowej sieci trakcyjnej i przejazd tramwaju

przez skrzyżowanie z wykorzystaniem zasobnika energii. Rozpatrzono trzy możliwe konfiguracje zasobnika – akumulator litowo-jonowy, superkondensator i zasobnik hybrydowy, wykorzystujący obie wymienione technologie. Analizie poddano koszty zasobników, ich masę oraz trwałość zaproponowanych rozwiązań.

## Topologia zasobnika hybrydowego

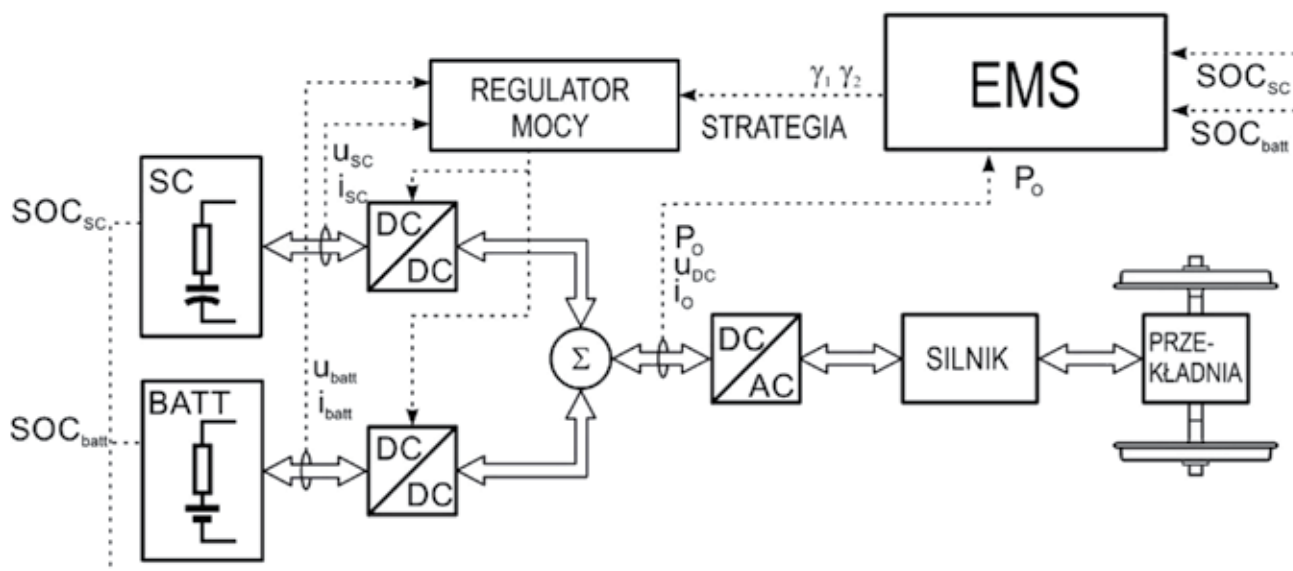
Przyjęto aktywną topologię zasobnika hybrydowego, w której oba zasobniki są przyłączone do wspólnej szyny DC przez przekształtniki dwukierunkowe DC/DC. Schemat blokowy pojazdu z zasobnikiem hybrydowym pokazano na rys. 1

Zaprezentowano na nim kierunki przepływu energii oraz wielkości pomiarowe przekazywane do układu sterowania, niezbędne do wygenerowania strategii i w procesie regulacji mocy. Falownik zasilający silnik zasilany jest równoległe z dwóch źródeł – akumulatora i superkondensatora przez przekształtniki DC/DC. Na podstawie strategii w bloku EMS wyznaczane są współczynniki  $\gamma_1, \gamma_2$ . Decydują one o podziale mocy obciążenia  $P_0$  między akumulator i superkondensator zgodnie z zależnością (1). W regulatorze mocy są wykorzystywane do wyznaczenia wartości współczynników wypełnienia dla przekształtników DC/DC:

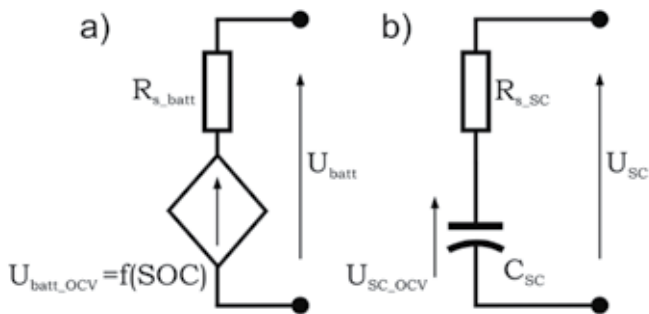
$$\begin{aligned} P_{sc} &= \gamma_1 \cdot P_0 \\ P_{batt} &= \gamma_2 \cdot P_0 \\ \gamma_1 + \gamma_2 &= 1 \end{aligned} \quad (1)$$

## Modele zasobników energii

W celu dokładnego wyznaczenia wartości prądów i zużycia energii zasobników pracujących w pojeździe najistotniejszymi



Rys. 1. Schemat blokowy tramwaju z zasobnikiem hybrydowym



Rys. 2. Schemat zastępczy a) akumulatora i b) superkondensatora

parametrami są napięcie źródła oraz rezystancja szeregową. W przypadku akumulatora litowo-jonowego wykorzystano model składający się ze źródła napięcia oraz szeregowej rezystancji  $R_{s\_batt}$ , gdzie napięcie  $U_{batt\_OCV}$  jest funkcją stanu naładowania. Schemat zastępczy obwodu akumulatora pokazano na rys. 2a. Modelując superkondensator, posłużono się modelem szeregowym złożonym z rezystancji  $R_{s\_sc}$  i pojemności  $C_{sc}$  (rys. 2b).

Istotnym parametrem dla opłacalności zastosowania zasobników energii w tramwaju jest ich trwałość. Akumulator litowo-jonowy uważa się za zużyty, kiedy jego pojemność spadnie do 80% wartości znamionowej. Według danych podanych przez producenta akumulator LFP jest w stanie wykonać 2 000 cykli dla wartości prądu ładowania i rozładowania nieprzekraczającej wartości znamionowej. Po przekroczeniu tej wartości liczba cykli znacząco spada. Dane te dotyczą stałych wartości prądu. W pojeździe elektrycznym obciążenie akumulatora nie jest stałe i ustalenie długości jego życia jest znacznie bardziej skomplikowane. Aby ustalić długość życia akumulatorów, w badaniach skorzystano z równania Arrhenius'a (2). Zależność ta jest stosowana w wielu pracach dla akumulatorów LFP i jej działanie zostało pozytywnie zweryfikowane pomiarowo [1, 2].

$$Q_{loss} = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a - B \cdot C_{rate}}{R \cdot T}\right) \cdot Ah^z \quad (2)$$

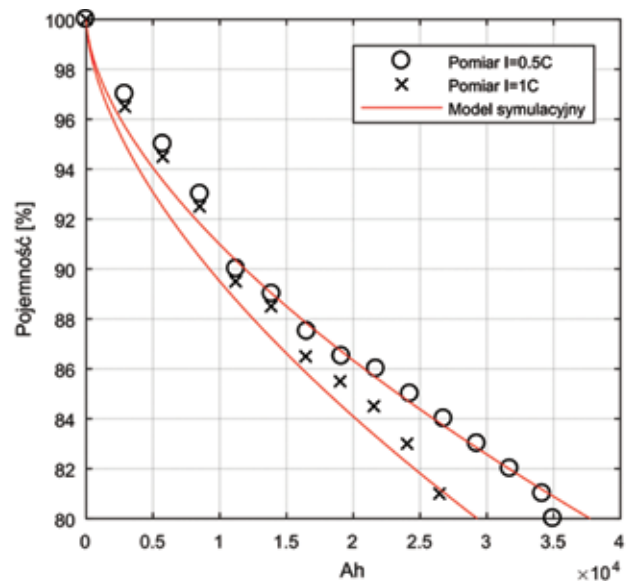
gdzie:

$Q_{loss}$  – utrata pojemności akumulatora,  
 $A = 26,7$  – współczynnik proporcjonalności,  
 $E_a = 24\,580$  J – energia aktywacji,  
 $R$  – stała gazowa,  
 $T = 296$  K – temperatura.

Przez  $C_{rate}$  została oznaczona wartość prądu w odniesieniu do pojemności akumulatora, a  $B = 747,9$  to współczynnik kompensacji  $C_{rate}$ .  $A_h$  to całkowity ładunek przepływający przez zaciski akumulatora wyrażony w amperogodzinach i wyznaczany na podstawie (3). Wartość  $z = 0,6$  jest stałym współczynnikiem.

$$Ah = \frac{1}{3600} \cdot \int |i_{batt}| \cdot dt \quad (3)$$

Wartości poszczególnych współczynników w równaniu (2) zostały wyznaczone poprzez aproksymację funkcji względem wyników pomiarowych metodą najmniejszych kwadratów. Wyniki działania modelu starzenia akumulatora LFP zaprezentowano na rys. 3. Maksymalne odchylenie modelu od wartości pomiarowych wynosi ok. 2%. Należy zaznaczyć, że po utracie 20% pojemności akumulator wchodzi w fazę nieliniowego starzenia i proces ten



Rys. 3. Weryfikacja działania modelu starzeniowego

znacząco przyspiesza. Efekt nieliniowości jest tym większy, im większy jest prąd obciążenia akumulatora [3]. Stąd pojawia się pytanie, którą z wartości prądu przyjąć w badaniu długości życia akumulatorów, maksymalną czy skuteczną? Wyniki zaprezentowane przez Simon F. Schuster i innych w [3] związane z efektem nieliniowości starzenia akumulatorów wskazują na uwzględnienie wartości maksymalnej, zwłaszcza w układach, gdzie często osiągnięta jest wartość maksymalna prądu. Z drugiej strony badania przeprowadzone przez Nassim Rizoug i innych w [4] świadczą o tym, że akumulator może wykonać więcej cykli przy obciążeniu typowym dla pojazdu, niż wskazywałaby na to maksymalna wartość prądu. W tym przypadku korzystniejsze byłoby wykorzystanie wartości skutecznej prądu akumulatora. Biorąc pod uwagę obie przesłanki, w pracy zaprezentowano wyniki obliczeń zarówno dla wartości maksymalnej, jak i skutecznej prądu obciążenia akumulatorów LFP.

Dane dotyczące starzenia superkondensatora, podane przez producenta, mówią o 1 mln możliwych do wykonania cykli ładowania i rozładowania. Wyniki prac pomiarowych prezentowanych w [5] potwierdzają ich prawdziwość. Ilość cykli zmniejsza się jednak w wysokiej temperaturze, co pokazują wyniki badań prezentowane w [6]. W związku z tym, że w obliczeniach wykonano założenie stałości temperatury na poziomie 23 °C, przyjęta ilość cykli wykonanych przez superkondensatory wynosiła 1 mln.

### Konfiguracja zasobników

Analizę dla tramwaju wykonano przy założeniu, że musi on pokonać skrzyżowanie bez zasilania z sieci. Przyjęto, że odcinek ten może wynosić do 2 km ze względu na fakt, że zasilanie sieci powinno być odłączone, kiedy odbierak tramwaju dotyka sieci. Porównano ze sobą jednolity zasobnik akumulatorowy wykonany z akumulatorów, zasobnik hybrydowy oraz jednolity zasobnik superkondensatorowy. Szczegółowe parametry zasobników podano w tab. 1. W obliczeniach kosztów wykorzystano ceny ogniw podanych przez jednego dystrybutora. Cenę całego pakietu oszacowano na podstawie kosztów składania modułów i pakietów zasobników podanych w raporcie Boston Consulting Group [7]. Masę komponentów pakietu przyjęto na poziomie 24% masy ogniw na podstawie danych przedstawionych w [8].

Tab. 1. Parametry zasobników energii

Pojazd	AK TRAM	HESS TRAM	SC TRAM
Masa pojazdu (bez pasażerów) [kg]	45 908	45 288	45 971
Moc silników [kW]	500	500	500
Liczba przejazdów dziennie	8	8	8
Napięcie DC [V]	600	600	600
Moc potrzeb własnych [kW]	5	5	5
<b>Moduł akumulatorowy</b>			
Typ ogniwa	LFP	LFP	–
Liczba ogniw połączonych szeregowo	186	186	0
Liczba ogniw połączonych równolegle	30	6	0
Zgromadzona energia [kWh]	178,5	35,7	0
Masa ogniw [kg]	1 841	368	0
Masa pakietu [kg]	2 283	457	0
Napięcie znamionowe [V]	595,2	595,2	0
Koszt ogniw [\$]	117 180	23 436	0
Koszt pakietu [\$]	164 052	32 810	0
Moc znamionowa dla 2 000 cykli (I=0.5C) [W]	89 280	17 856	0
Maksymalna moc ładowania [W]	357 120	71 424	0
Maksymalna moc rozładowania [W]	535 680	107 136	0
<b>Moduł superkondensatorowy</b>			
Liczba ogniw połączonych szeregowo	0	222	222
Liczba ogniw połączonych równolegle	0	3	12
Napięcie znamionowe [V]	0	599,4	599,4
Pojemność [F]	0	40,54	162,16
Masa ogniw [kg]	0	339,7	1 358,6
Masa pakietu [kg]	0	421,18	1 684,71
Koszt ogniw [USD]	0	39 960,0	159 840,0
Koszt pakietu [USD]	0	55 944	223 776
Energia zgromadzona [Wh]	0	2 024,6	8 098,6
Energia użyteczna [Wh]	0	1 518,5	6 073,9
Moc znamionowa [kW]	0	377,6	1 510,5
Moc maksymalna [kW]	0	2 003,994	8 016
<b>Przekształtniki DC/DC</b>			
Liczba przekształtników	1	2	1
Cena jednostkowa [\$/kWh]	50	50	50
Koszt przekształtników [\$]	5 000	25 000	25 000
Masa przekształtników [kg]	25	125	125
<b>Strategia zarządzania energią</b>			
Metoda	–	GBS	
A	–	1,1	
B	–	0,05	
C	–	0,5	
D	–	0,1	
<b>Podsumowanie</b>			
Masa zasobnika [kg]	2 308	1 003	1 810
Koszt budowy zasobnika [USD]	169 052	113 754	248 776

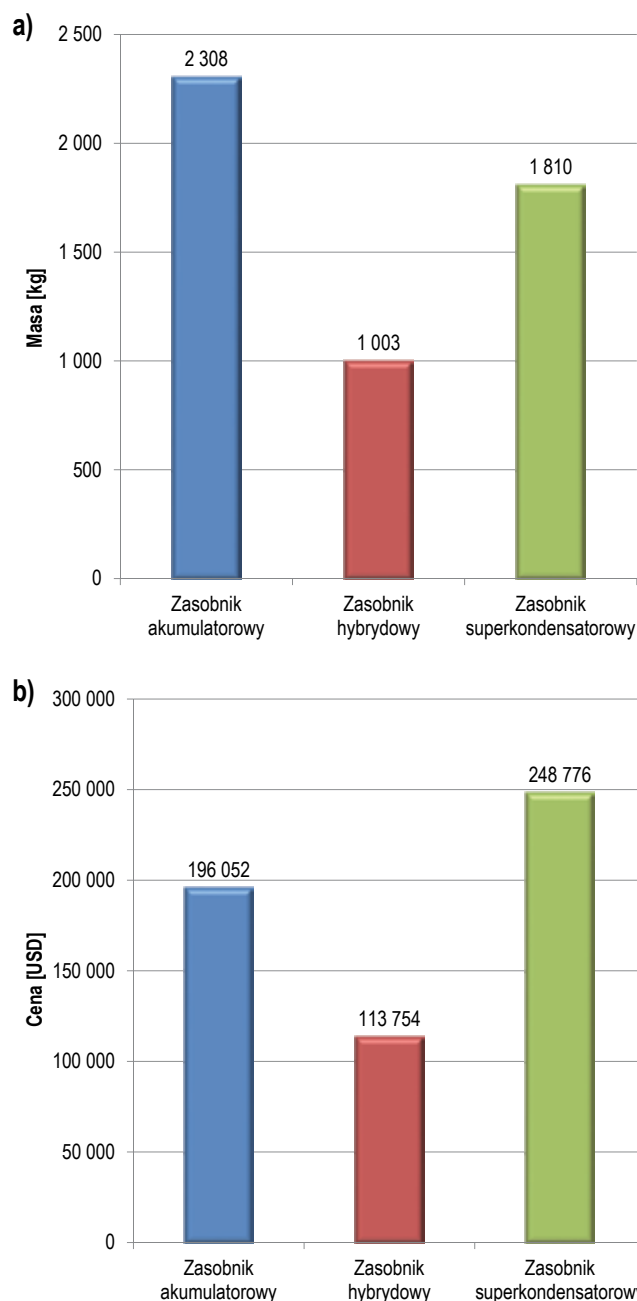
W przypadku jednolitego zasobnika akumulatorowego parametrem decydującym o ostatecznej wielkości zasobnika jest moc maksymalna. Z tego względu pojemność energetyczna jest znacznie większa niż zapotrzebowanie. Dobierając zasobnik superkondensatorowy, kierować się należy przede wszystkim po-

jemnością energetyczną pakietu. Z uwagi na znacznie większą gęstość mocy superkondensatorów niż akumulatorów litowych, moc zasobnika superkondensatorowego będzie znacząco większa niż potrzeba.

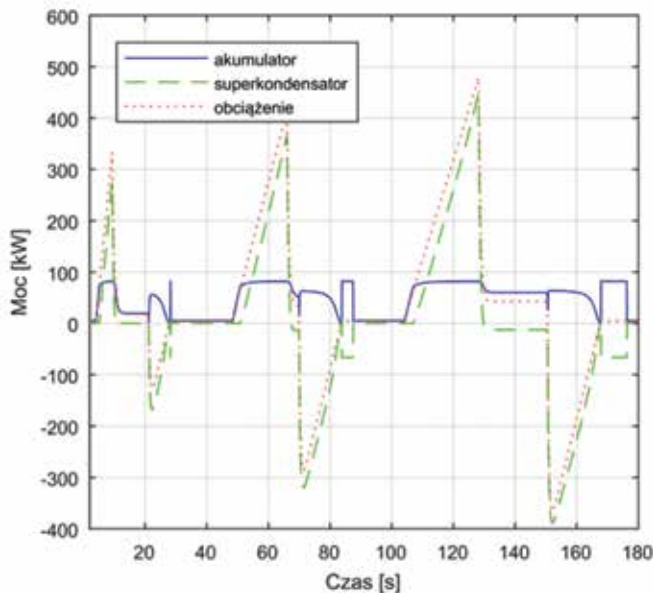
Przy doborze parametrów zasobnika hybrydowego przyjęto następujące założenia:

- ♦ moduł superkondensatorów powinien pozwalać na zgromadzenie całej energii hamowania odzyskowego;
- ♦ moduł akumulatorów dobrany został tak, aby zapewnić energię na przejazd do 2 km i zapewnić różnicę mocy obciążenia i superkondensatora podczas przyspieszenia.

Z porównania mas i kosztów zasobników (rys. 4) wynika, że zasobnik hybrydowy jest najlepszym rozwiązaniem dla prezentowanej aplikacji. Najcięższym rozwiązaniem jest zasobnik



Rys. 4. Porównanie a) mas i b) cen poszczególnych zasobników energii w tramwaju



Rys. 5. Przebieg mocy podczas jazdy autonomicznej

akumulatorowy. Jego masa jest o 130% wyższa niż zasobnika hybrydowego. Masa zasobnika superkondensatorowego jest odpowiednio o 80% wyższa niż masa zasobnika hybrydowego. Ceny zasobników akumulatorowego i superkondensatorowego są wyższe o odpowiednio 49% i 119% niż cena zasobnika hybrydowego.

### Strategia zarządzania energią i trwałość zasobników

W obliczeniach wykorzystano strategię GBS opisaną przez autorów w [9]. Parametry strategii zostały dobrane tak, aby maksymalnie obniżyć prąd akumulatora i jednocześnie nie dopuścić

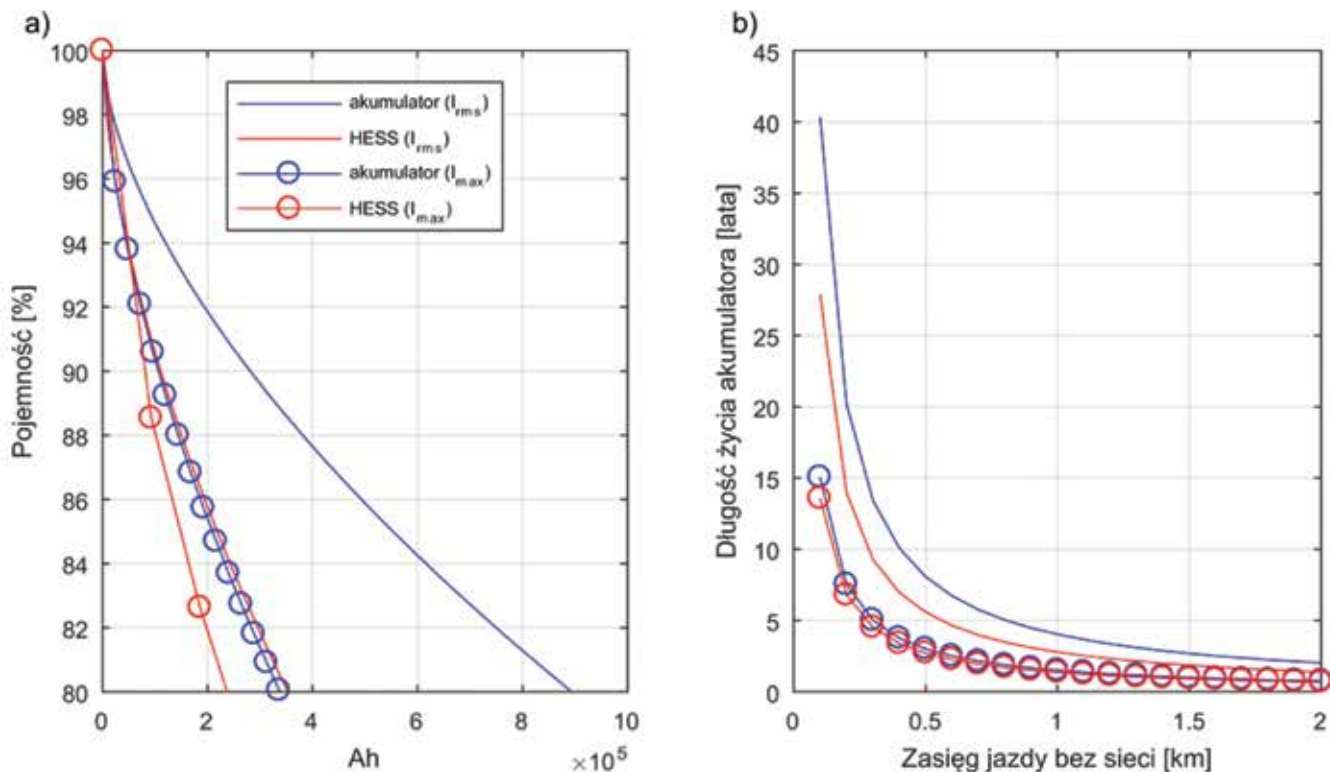
do pełnego rozładowania superkondensatora (tab. 1), co skutkowałoby wysokim poborem mocy z akumulatora. Dlatego zarówno podczas hamowania odzyskowego oraz na postoju superkondensatory są doładowywane z modułu akumulatorowego, jeżeli ich stan naładowania jest mniejszy niż 100% (rys. 5).

W obliczeniach długości życia pakietów akumulatorowych założono, że tramwaj pokonuje trasę 8 razy w ciągu doby. Na jego trasie znajduje się 6 skrzyżowań, przez które musi przejechać bez zasilania z sieci górnej.

Na rys. 6a porównano szybkość utraty pojemności modułów akumulatorowych w zasobniku jednolitym i hybrydowym. Wyniki, jak wspomniano wcześniej, zostały zaprezentowane dla wersji pesymistycznej (dla maksymalnego prądu akumulatora) i optymistycznej (dla skutecznego prądu akumulatora). Ze względu na większą rozbieżność pomiędzy wartością maksymalną i skuteczną prądu w zasobniku akumulatorowym, jednoznaczne określenie utraty pojemności jest trudniejsze. Dla wersji optymistycznej przez pakiet akumulatorów w zasobniku jednolitym może przepłynąć 2,5 razy większy ładunek niż przez pakiet akumulatorów w zasobniku hybrydowym, pomimo że pakiet w zasobniku jednolitym jest aż 5 razy większy. Na rys. 6b pokazano zależność długości życia akumulatorów od długości odcinka jazdy bez sieci. Można zauważyć, że krzywa ta ma charakter wykładniczy. Ma to związek z tym, że liczba cykli w życiu akumulatora jest odwrotnie proporcjonalna do głębokości rozładowania [10]. Z charakterystyki wynika również, że dla obydwu rozwiązań trwałość pakietów akumulatorów dla przejazdów powyżej 250 m wynosi poniżej 5 lat. Dla odcinków jazdy bez sieci krótszych niż 100 m minimalna trwałość zasobników to ok. 15 lat.

### Wnioski

Wyniki obliczeń zaprezentowane w niniejszym artykule wskazują na możliwość zastąpienia skrzyżowań sieci górnej tramwajowej



Rys. 6. Porównanie zużycia akumulatorów a) w funkcji całkowitego przepływającego przez nie ładunku i b) w funkcji długości odcinka jazdy bez sieci

przez zasobniki energii elektrycznej. Porównanie zaprezentowane w artykule pozwala stwierdzić, że najkorzystniejszym rozwiązaniem pod względem ceny i masy, a jednocześnie zapewniającym wysoką trwałość rozwiązania, jest zasobnik hybrydowy. Spadek ceny zasobników energii elektrycznej oraz wzrost kosztów pracy związanej z serwisem skrzyżowań sieci trakcyjnej będą powodowały wzrost opłacalności przedstawionego rozwiązania.

### Bibliografia:

1. Wang J., Liu P., Hicks-Garner J., Sherman E., Soukiazian S., Verbrugge M., Tataria H., Musser J., Finamore P., *Cycle-life model for graphite-LiFePO<sub>4</sub> cells*, „Journal Power Sources” 2011, vol. 196, no. 8, pp. 3942–3948.
2. Song Z., Li J., Han X., Xu L., Lu L., Ouyang M., Hofmann H., *Multi-objective optimization of a semi-active battery/supercapacitor energy storage system for electric vehicles*, „Appl. Energy” 2014, vol. 135, pp. 212–224.
3. Schuster S. F., Bach T., Fleder E., Müller J., Brand M., Sextl M., Jossen A., *Nonlinear aging characteristics of lithium-ion cells under different operational conditions*, „Journal of Energy Storage” 2015, vol. 1, pp. 44–53.
4. Rizoug N., Sadoun R., Mesbahi T., Bartholomeus P., Le Moigne P., *Aging of High power Li-ion cells during real use of electric vehicles*, „JET Electr. Syst. Transp.” 2017, vol. 7, no. Vppc 2015, pp. 1–24.
5. Gualous H., Gallay R., Al Sakka M., Oukaour A., Tala-Ighil B., Boudart B., *Calendar and cycling ageing of activated carbon supercapacitor for automotive application*, „Microelectron. Reliab.” 2012, vol. 52, no. 9–10, pp. 2477–2481.
6. Kreczanik P., Venet P., Hijazi A., Clerc G., *Study of supercapacitor aging and lifetime estimation according to voltage, temperature, and RMS current*, „IEEE Trans. Ind. Electron.” 2014, vol. 61, no. 9, pp. 4895–4902.
7. The Boston Consulting Group, *Focus Batteries for Electric Cars*, „Outlook” 2010, no. 1, pp. 1–18.
8. Miller P., *Automotive Lithium-ion Batteries*, „Johnson Matthey Technol. Rev” 2015., vol. 59, no. 1, pp. 4–13.
9. Wieczorek M., Lewandowski M., *A mathematical representation of an energy management strategy for hybrid energy storage system in electric vehicle and real time optimization using a genetic algorithm*, „Appl. Energy” 2017, vol. 192.
10. Omar N., Abdel M., Firouz Y., Salminen J., Smekens J., Hegazy O., Gaulous H., Mulder G., Van Den Bossche P., Coosemans T., *Lithium iron phosphate based battery – Assessment of the aging parameters and development of cycle life model*, „Appl. Energy” 2014, vol. 113, pp. 1575–1585.
11. Szelać A., Drażek Z., Maciołek T., *Elektroenergetyka miejskiej trakcji elektrycznej*, Instytut Naukowo-Wydawniczy SPATIUM, Radom 2017.

### Autorzy:

mgr inż. **Maciej Wieczorek** – Politechnika Warszawska Wydział Elektryczny

dr hab. inż. **Mirosław Lewandowski** – Politechnika Warszawska Wydział Elektryczny

### Energy storage enabling a tramway to drive through intersection without catenary

The current, dynamic development of electric energy storage devices such as lithium-ion batteries and supercapacitors allows their widespread use in electric traction. In this article, consideration was given to the possibility of liquidating intersections in the tramway traction network and crossing the tram by crossing with the use of an energy reservoir. Three possible configurations of the reservoir were considered – a lithium-ion battery, a supercapacitor and a hybrid container using both technologies. The analysis covered the costs of the bins, their mass and durability of the proposed solutions.

**Key words:** energy storage system, supercapacitor, battery.



**Adam Szelać, Zbigniew Drażek, Tadeusz Maciołek**

**Elektroenergetyka miejskiej trakcji elektrycznej**

ISBN 978-83-62805-42-6

Liczba stron: 338

Format: B5

Oprawa: twarda

Rok wydania: 2017

Cena 100,00 zł (w tym 5% VAT)

Monografia stanowi podsumowanie wieloletnich prac naukowo-badawczych i wdrożeniowych oraz zajęć dydaktycznych prowadzonych przez autorów w Zakładzie Trakcji Elektrycznej Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej w zakresie elektroenergetyki miejskiego transportu elektrycznego. Omówiono typowe rozwiązania stosowane w miejskiej trakcji elektrycznej przede wszystkim wśród najbardziej rozpowszechnionych systemów tramwajowych, trolejbusów i metra.

Pełna oferta wydawnicza:

[www.inw-spatium.pl](http://www.inw-spatium.pl)