

Marcin Drozd*, Witold Kobos*, Piotr Chudzik**
*ZEP Enika, Łódź, ** Politechnika Łódzka, Łódź

TRAMWAJ Z SUPERKONDENSATOROWYM ZASOBNIKIEM ENERGII - OCENA EFEKTYWNOŚCI ALGORYTMU STEROWANIA

TRAM WITH ULTRA-CAPACITOR STORAGE – RATING OF STEERING ALGORITHM EFFECTIVITY

Streszczenie: W artykule przedstawiono strukturę superkondensatorowego zasobnika energii przeznaczonego do ograniczania strat w napędach pojazdów trakcyjnych, który został zamontowany w zmodernizowanym tramwaju 105N w Łodzi. Omówiono założenia algorytmu sterowania oraz zamieszczono przebiegi wybranych prądów i napięć zasobnika oraz pojazdu. W pracy zamieszczono analizę wybranych stanów pracy urządzenia i wyjaśniono metodykę dokonywanych pomiarów.

Abstract: Article presents structure of a ultracapacitor energy storage designed to reduce energy losses in drives of traction vehicles, which was installed in the modernised tram 105N type in the city of Lodz. Article also discusses the assumptions of the control algorithm and contains waveforms of selected currents and voltages of the storage and the vehicle. The following paper presents analysis of selected operating conditions and explains the methodology of the measurements carried out.

Słowa kluczowe: zasobniki superkondensatorowe, sprawność, napędy trakcyjne
Keywords: ultracapacitor storage, power efficiency, traction drives

1. Wstęp

Na przestrzeni ostatnich kilku lat superkondensatory stały się elementem powszechnie stosowanym w rozproszonych systemach energetyki odnawialnej oraz w układach napędów pojazdów hybrydowych i elektrycznych. Coraz częściej można je spotkać również w systemach „start – stop” w samochodach osobowych z silnikami spalinowymi oraz w układach rozruchowych lokomotyw spalinowych. We wszystkich tych zastosowaniach superkondensatory, o wiele lepiej niż inne urządzenia pełnią rolę magazynu energii o bardzo dużej gęstości mocy. Rzadko jednak sama ich obecność jest w stanie zapewnić odpowiednie warunki pracy dla układu, któremu mają dostarczać lub z którego mają pobierać energię. W większości wymienionych przypadków obok baterii superkondensatorów niezbędne jest zastosowanie układów umożliwiających jej ładowanie i rozładowanie. Rolę takich elementów pełnią zwykle dwukierunkowe przetwornice DC/DC, które pozwalają na transfer energii, niezależnie od wartości napięć baterii superkondensatorów i źródeł zasilania oraz stanu napędu czy źródła energii odnawialnej. Poza samymi rozwiązaniami sprzętowymi bardzo ważną rolę w zapewnieniu zakładanej funkcjonalności pełnią algorytmy regulacji stosowane do sterowania

przepływem energii. Niekiedy algorytmy te są bardzo skomplikowane, ponieważ realizując zadania przekazywania energii z jednego obiektu do drugiego, muszą jednocześnie zapewnić, że taki a nie inny sposób sterowania jest najbardziej efektywny energetycznie. W przypadku układów sterowania napędami pojazdów poruszających się w warunkach ulicznych nie ma możliwości określenia, tak jak to jest w kolei i metrze, sekwencji stanów napędu (rozruch i rozpędzanie- jazda wybiegiem, hamowanie), ponieważ na ruch pojazdu mają wpływ inni użytkownicy dróg, światła sygnalizacji ulicznej i bardzo często spotykane w centrach miast korki. W tej sytuacji algorytmy sterowania zasobnikami mogą jedynie poprawiać efektywność energetyczną pojazdu, bez możliwości zapewnienia, że ta poprawa jest optymalna [1].

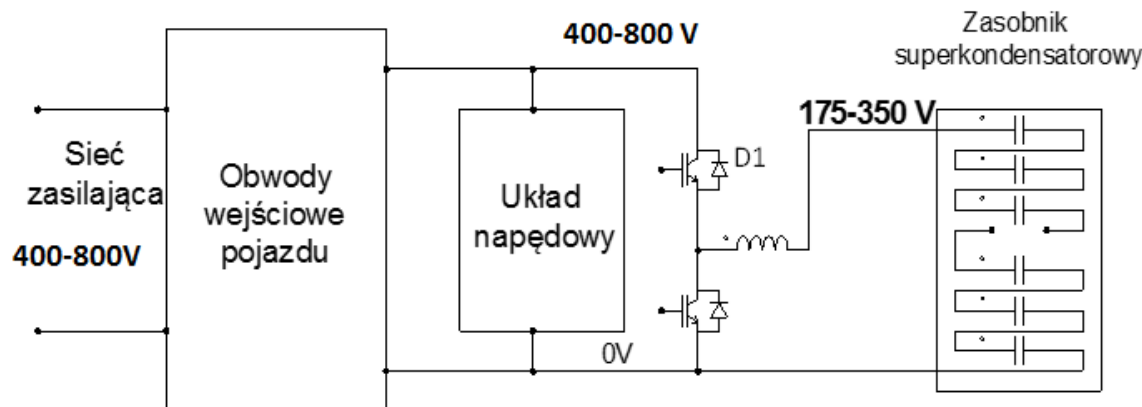
2. Struktura układu napędowego z zasobnikiem superkondensatorowym

Typowy falownikowy napęd pojazdu trakcyjnego czerpie energię z sieci zasilającej za pośrednictwem wejściowego filtra LC. Oznacza to, że napięcie falownika zmienia się w takim zakresie jak zmieniają się napięcia w sieci trakcyjnej. W typowych rozwiązaniach sieci tramwajowych jest to zakres od 400 V do 800V. Za-

sobnik energii, który ma współpracować z falownikiem układu napędowego musi mieć zdolność transferu energii w obie strony, niezależnie od aktualnej wartości napięcia sieci oraz stanu rozładowania baterii. Zaprojektowanie układu spełniającego to wymaganie w postaci przetwornicy DC/DC wykorzystującej transformator jest teoretycznie zadaniem stosunkowo łatwym. Niestety rozmiary elementów indukcyjnych dla takiego rozwiązania są zbyt duże, aby możliwe było w praktyce jego stosowanie. Technicznie akceptowalne jest za to rozwiązanie z dławikową przetwornicą podwyższająco – obniżającą (buck-boost). Takie rozwiązanie jest tanie, charakteryzuje się stosunkowo wysoką sprawnością i jest bardzo proste konstrukcyjnie. Dla zapewnienia kontroli nad dwukierunkowym przepływem energii wymagane jest jednak spełnienie warunku, że napięcie po stronie „niskiej” nie może w chwili osiągnięcia swojej wartości maksymalnej przekroczyć minimalnego napięcia strony „wysokiej” aby nie popłynął diodą D1 (rys.1) niekontrolowany niczym prąd. Ograniczenia wynikające z takiej konstrukcji powodują, że podłączony jako strona „niska” superkondensator nie może być naładowany do napięcia wyższego niż 400 V (najniższe przyjęte w ramach projektu napięcie w sieci, nie powodujące konieczności odłączenia od niej obwodów zasilania pojazdu). Ze względu na przyjęcie dodatkowych założeń wynikających z rzeczywistych napięć spotykanych w sieciach trakcyjnych oraz zapewnienie odpowiedniej funkcjonalności napędu w tych stanach przyjęto, że napięcie baterii superkondensatorów zostanie ograniczone do 350 V. Jest to niestety ograniczenie bardzo niekorzystnie wpływające na sprawność układu przetwarzania energii w stanach, w których bateria jest rozładowana. Gdy jej napięcie obniży się do wartości 175 V (1/2 napięcia

maksymalnego) w zasobniku znajduje się jeszcze 25% całkowitej energii superkondensatorów. Aby wymieniać wtedy energię z falownikiem na poziomie mocy takim jak w przypadku baterii całkowicie naładowanej, prąd płynący przez ogniwa, dławik i elementy półprzewodnikowe musi mieć wartość dwukrotnie większą w stosunku do prądu przy ogniwach w pełni naładowanych. Alternatywą dla przedstawionego rozwiązania jest przyjęcie odwrotnego „usytuowania” elementów. Ustawienie obwodu falownika w roli napięcia „niskiego”, a baterii superkondensatorów w roli napięcia „wysokiego” zmniejsza co prawda prądy w bateriach i elementach przetwarzania, ale prowadzi do konieczności stosowania dodatkowych układów przekształtnikowych między obwodem pośredniczącym falownika i siecią zasilającą. Niezależnie jednak od przyjętego rozwiązania sposobu dołączenia zasobnika, ograniczenia jego mocy wynikające z maksymalnego dopuszczalnego prądu baterii pojawiają się w stanach dynamicznych, w których zapotrzebowanie jest największe. Gdy pojazd hamuje intensywnie (duża prędkość i duży moment) bateria, aby przejąć jego energię powinna być w niskim stanie naładowania. Gdy napięcie ogniw jest równe połowie napięcia maksymalnego, ilość mocy odbieranej przez baterię jest ograniczona do połowy mocy maksymalnej. Podobnie w stanach rozpędzania. Gdy na początku bateria jest naładowana w pełni, pojazd przy niskiej prędkości nie pobiera znacznej mocy. Po zwiększeniu prędkości moc pobierana wzrasta, ale wtedy zmniejszająca się wartość napięcia baterii ogranicza jej moc wyjściową.

Magazyn, którego zadaniem jest przejęcie energii uzyskanej podczas hamowania, bez konieczności jej wytracania na rezystorach, nawet w najgorszym przypadku, kiedy sieć wcale nie odbiera energii, powinien więc pozwalać na



Rys. 1. Schemat dołączenia zasobnika do układu napędowego tramwaju

zgromadzenie takiej jej ilości, jaka odpowiada maksymalnej energii kinetycznej pojazdu. Ze względu na przyjęcie założenia, że zasobnik powinien mieć możliwość zgromadzenia całej energii kinetycznej powstającej podczas hamowania z maksymalnej prędkości ustalono, że jego zdolność gromadzenia energii musi przekraczać 1 MJ[2]. Uwzględnienie wszystkich omówionych ograniczeń i wymagań doprowadziło do wybrania baterii ogniów o pojemności 21 F i napięciu maksymalnym 350 V, co daje energię całkowitą 1347500 J. Zakres napięć pracy baterii przyjęto od 150 V do 350 V. Zastosowane elementy mocy i dławik dobrano na prąd maksymalny 250 A, co daje w najgorszych warunkach pracy (najmniejsze napięcie) moc na poziomie 37,5kW, a w warunkach najwyższego napięcia 87,5kW. Moc zasobnika w przyjętym rozwiązaniu nie pokrywa maksymalnej mocy jaką układ napędowy jest w stanie generować podczas intensywnego hamowania lub rozpędzania przy wysokich prędkościach. W przypadku badanego w niniejszym artykule dwuwagonowego tramwaju z napędem składającym się z czterech silników na jeden wagon o mocy maksymalnej każdego z nich dochodzącej do 100 kW (przy dwukrotnym przeciążeniu w stosunku do wartości znamionowej) zasobnik powinien umożliwiać pobieranie i oddawanie mocy na poziomie 800 kW. Oczywiście taka moc zasobnika nie ma uzasadnienia ekonomicznego. Stany, w których pojazd hamuje z maksymalnym momentem z bardzo dużej prędkości, przy całkowitym braku możliwości oddawania energii do sieci zdarzają się niezwykle rzadko.

3. Algorytm sterowania zasobnikiem superkondensatorowym

Jednym z najczęściej wymienianych argumentów przemawiających za stosowaniem zasobników superkondensatorowych w pojazdach zasilanych z sieci trakcyjnej jest możliwość uniknięcia wytracania energii powstającej podczas hamowania odzyskowego w sytuacjach, w których nie jest możliwe jej oddanie do sieci zasilającej. Gdy pojazd hamuje dynamicznie staje się źródłem energii i dostarcza do sieci prąd o wartości zależnej od mocy jaką generuje napęd. Gdy moc dostarczana do sieci (zwykle zasilanej z układów prostownikowych) przekracza jej pobór przez inne, sąsiednie pojazdy, dostarczanie energii powoduje wzrost napięcia w sieci. Aby nie dopuścić do przekroczenia maksymalnych dopuszczalnych przez przepis wartości

napięcia na przewodach sieci trakcyjnej i jednocześnie nie osłabiać lub przerywać hamowania (co jest niedopuszczalne ze względów bezpieczeństwa) uruchamia się „rezystory hamowania” i nadmiar energii zamienia się w ciepło. Ilości tak traconej energii potrafią być znaczne. Autorzy [3] pokazali, że możliwość oszczędzenia energii przy użyciu zasobników waha się w bardzo szerokich granicach i jest zależna od wielu różnorodnych czynników. Poza możliwością ograniczania strat energii powstających w rezystorach hamowania zasobniki superkondensatorowe pozwalają na znaczne obniżenie strat związanych z przesyłaniem energii z podstacji do pojazdu dzięki obniżeniu maksymalnych wartości amplitud prądów pobieranych lub oddawanych do sieci. W pracy [4] została omówiona tematyka możliwości oceny tego typu strat i zasad sterowania zasobnikiem, w taki sposób, aby łączne straty we wszystkich elementach przetwarzania energii były jak najniższe.

W prezentowanym w niniejszym artykule pojeździe zastosowano algorytm sterowania uzależniający prąd zasobnika od następujących wielkości:

- prądu pobieranego przez pojazd z sieci trakcyjnej,
- napięcia sieci,
- napięcia baterii superkondensatorów,
- stanu pojazdu (prędkość, moment realizowany w układzie napędowym).

Uwzględnienie każdej z wymienionych wielkości pozwala na uniknięcie następujących stanów, w których działanie zasobnika przynosi większe straty niż korzyści:

- pobierania do ładowania baterii energii z sieci, gdy nie pochodzi ona z procesu hamowania,
- pobierania do ładowania baterii energii z hamowania w warunkach, w których można oddawać energię do sieci trakcyjnej,
- oddawania energii z zasobnika do napędu podczas jazdy z niewielką mocą (oddając energię w stanach dużego poboru mocy zmniejsza się straty powstające na przewodach zasilających pojazd).

Najważniejszym zadaniem układu realizującego algorytm sterowania zasobnikiem jest wyznaczenie zadanego prądu baterii superkondensatorów oraz zapewnienie, poprzez układy regulacji realizacji tego prądu w sposób stabilny i eliminujący stany groźne dla elementów układu napędowego.

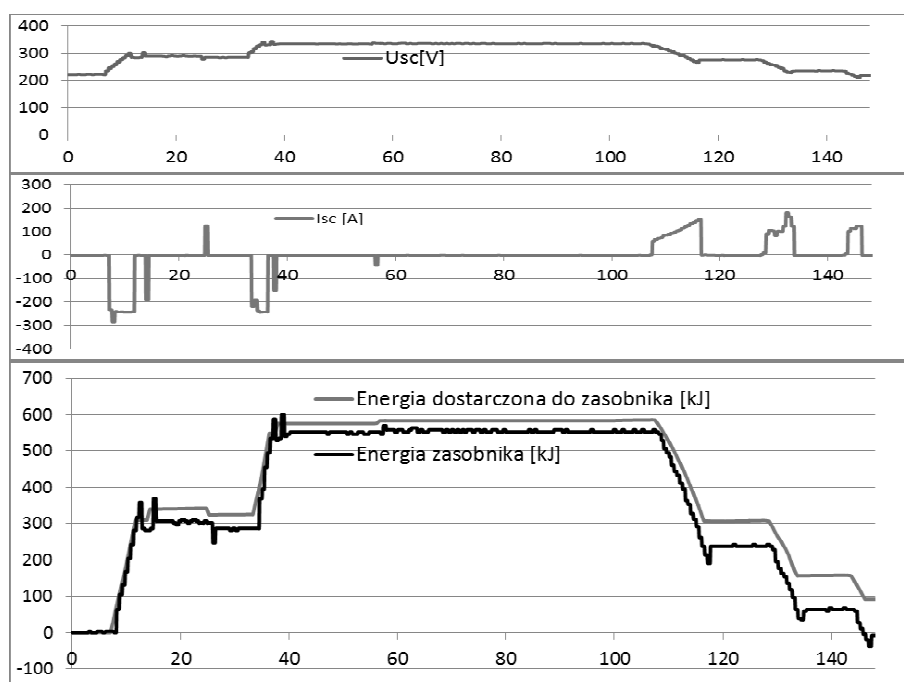
4. Analiza wyników badań pojazdu

Prezentowane w niniejszym artykule badania zostały przeprowadzone na dwuwagonowym zmodernizowanym tramwaju 105N z napędem asynchronicznym. W pierwszym wagonie został zamontowany zasobnik superkondensatorowy o pojemności 21F. W ramach badań pojazdu dokonano wyznaczenia strat energii występujących w poszczególnych układach pojazdu oraz oszacowano wartość energii jaką „uchroniono” od wytracenia na rezystorach hamowania. Oszacowano również wartość energii o jaką zostały zmniejszone straty przewodzenia. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki badań sprawności baterii superkondensatorów. Wyznaczenie sprawności baterii zostało wykonane za pomocą pomiaru prądu wpływającego i wypływającego z baterii oraz napięcia na baterii. Badanie polegało na obliczeniu energii jaką dostarczono do baterii, podczas jej cyklu pracy począwszy od pewnego napięcia początkowego do chwili, w której napięcia na baterii osiągnie ponownie tę samą wartość. Łączne straty energii w baterii związane z jej naładowaniem

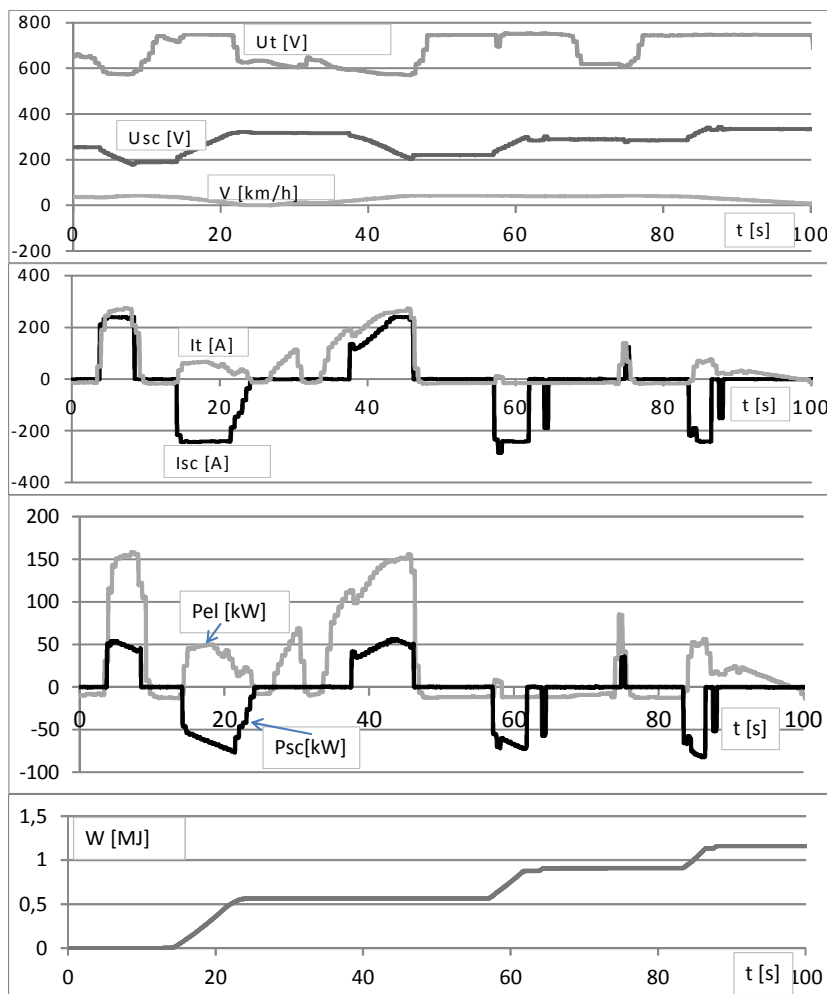


Fot. 1. Badany tramwaj typu 105N z zasobnikiem superkondensatorowym

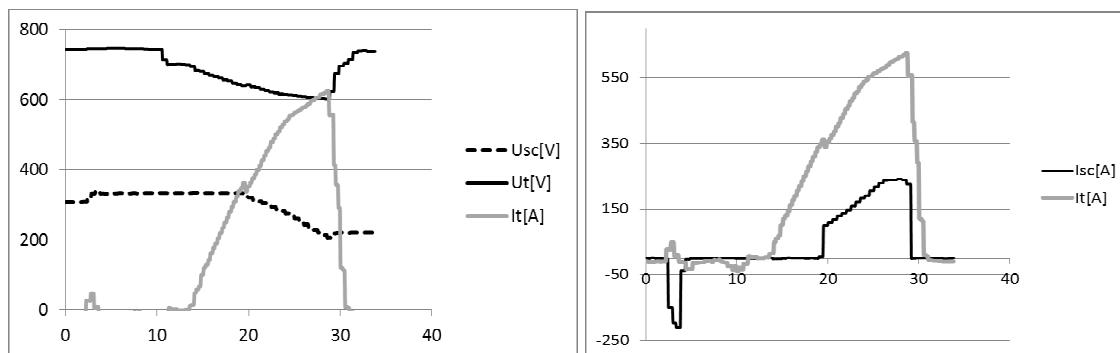
energiją 550kJ, a następnie rozładowanie do początkowej wartości napięcia wyniosły 100kJ, co daje sprawność wymiany energii na poziomie 84%. (sprawność podczas ładowania i rozładowania liczona osobno wynosi 92%).



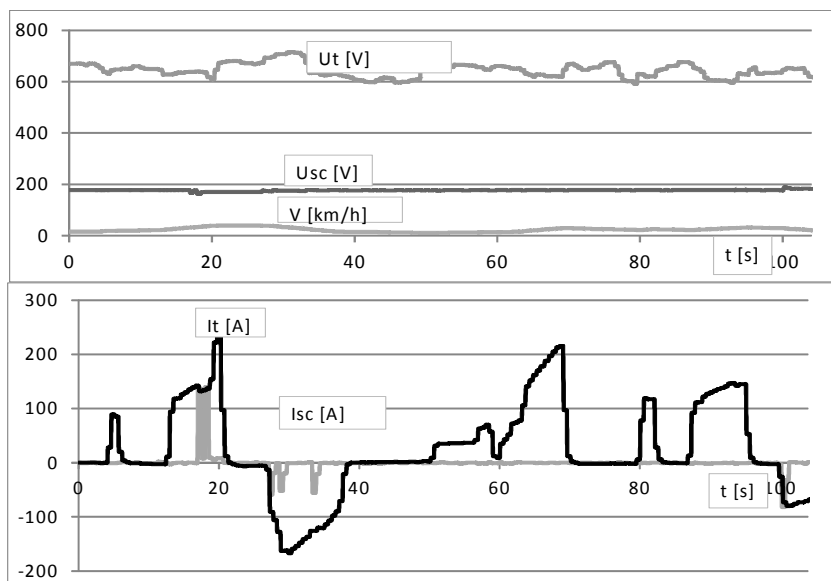
Rys. 2. Przebiegi napięcia baterii, prądu baterii (wartość dodatnia oznacza rozładowanie) oraz energii dostarczonej do zasobnika (całki z mocy) oraz energii wyliczonej w oparciu o napięcie i pojemność ogniw



Rys. 3. Przebiegi napięcia baterii U_{sc} , napięcia sieci trakcyjnej - U_t , prędkości pojazdu V , prądu wagonu z zasobnikiem I_t , prądu baterii superkondensatorów I_{sc} oraz obliczonych wartości mocy: P_{el} - moc elektryczna pobierana przez wagon, P_{sc} - moc oddawana przez zasobnik (wartość dodatnia oznacza rozładowanie), W - energia pobrana przez zasobnik w stanach braku odbioru prądu przez sieć trakcyjną



Rys. 4. Przebiegi napięcia baterii U_{sc} , napięcia sieci trakcyjnej - U_t , prądu pojazdu I_t , prądu baterii superkondensatorów I_{sc} .



Rys. 5. Przebiegi napięcia baterii U_{sc} , napięcia sieci trakcyjnej - U_t , prędkości pojazdu V , prądu wagonu z zasobnikiem I_t , prądu baterii superkondensatorów I_{sc}

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki badań efektywności algorytmu sterowania zasobnikiem. Jako kryterium oceny efektywności przyjęto wyznaczenie wartości energii jaką w danych warunkach pojazd musiałby stracić na rezystorach hamowania, gdyby nie zgromadził jej w zasobniku.

Wielkościami mierzonymi były: napięcie sieci trakcyjnej, prąd wejściowy wagonu wyposażonego w zasobnik, prąd baterii, napięcie baterii. Na podstawie tych danych wyznaczono moce i energie pobierane i oddawane przez pojazd i zasobnik. W trakcie przedstawionej na rysunku 3 próby zasobnik zgromadził energię 1,16MJ (0,32kWh), którą następnie oddał pojazdowi w chwilach rozpędzania. Bardzo ważnym elementem działania algorytmu jest również ograniczanie strat powstających w sieci trakcyjnej podczas pobierania prądów o znacznych wartościach. Na rysunku 4 zostały pokazane przebiegi napięć i prądów pojazdu podczas intensywnego przyspieszania. Pobierana przez napęd z sieci energia dochodziła do 370kW. Zasobnik dostarczał około 50kW. Dzięki zasobnikowi prąd pobierany z sieci został zmniejszony o około 70A, co przy rezystancji sieci przyjętej na poziomie $0,125 \Omega$ (wyznaczonej jako iloraz spadku napięcia i prądu, który ten spadek wywołał) daje zmniejszenie mocy strat w sieci o około 60kW. Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi prądów i napięć pojazdu i baterii superkondensatorów podczas przejazdów na odcinku sieci o dużej zdolności

odbioru energii z hamowania i małej rezystancji obwodów doprowadzających napięcie zasilania od podstacji do pojazdu. W tym przypadku wymiana energii z zasobnikiem praktycznie nie zachodziła, ponieważ algorytm sterowania nie pozwala na „używanie” zasobnika, gdy możliwa jest efektywniejsza dwukierunkowa wymiana energii z siecią zasilającą.

5. Podsumowanie

Jednym z najważniejszych parametrów układów mających na celu zwiększanie efektywności energetycznej jest oczywiście ich sprawność. Zasobnik superkondensatorowy jako urządzenie składające się z baterii ogniw i układów przekształtnikowych pozwala na gromadzenie energii ze sprawnością przekraczającą 80% (licząc pobranie i oddanie energii). Nadaje się więc doskonale do ochrony energii wytracanej podczas hamowania na rezystorach. Pełni również bardzo ważną rolę w pojazdach poruszających się na odcinkach o znacznych rezystancjach sieci. W tym zastosowaniu zasobnik pojazdowy o wiele lepiej pomaga w podniesieniu efektywności energetycznej niż zasobnik stacyjny, który nie jest w stanie eliminować strat energii powstających w przewodach sieci trakcyjnej. W przypadku obszarów o dobrej infrastrukturze sieciowej korzyści płynące ze stosowania zasobnika są niewielkie i ograniczają się tylko do możliwości „ocalenia” energii z hamowania dynamicznego, której sąsiednie pojazdy nie są w stanie przejąć.

6. Literatura

- [1]. A. Radecki , P. Chudzik: "Algorytm sterowania zasobnikiem superkondensatorowym pojazdu trakcyjnego minimalizujący przesyłowe straty mocy uwzględniający stany pracy sieci trakcyjnej", Przegląd Elektrotechniczny 06/2014, str.127-132.
- [2]. W. Kobos, M. Ciąćka, P.Chudzik: "Trolejbusowy napęd trakcyjny z zasobnikiem superkondensatorowym, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, Nr 2 str.29-44, 2012.
- [3]. M. Bartłomiejczyk, L. Jarzębowicz: "Energy avings by application of supercapacitor storage in trolleybus supplying station – analysis of experimental results“, Mat. konf.- SEMTRAK2014, Pólitechnika Krakowska, Zakopane 2014.
- [4]. A. Radecki, P. Chudzik: "Optymalizacja strat energii w torze zasilania napędu trakcyjnego z zasobnikiem superkondensatorowym", Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 1, str.43-48,2012.