

Modelowanie pracy sieci trakcyjnej na potrzeby budowy stanowiska badawczego z superkondensatorowym zasobnikiem energii

Piotr Chudzik, Andrzej Radecki, Rafał Nowak

1. Wstęp

Współczesnym układom napędowym pojazdów trakcyjnych stawia się coraz wyższe wymagania dotyczące oszczędności energii. Jednym ze sposobów obniżenia strat jest stosowanie zasobników superkondensatorowych, które pozwalają na magazynowanie energii wytwarzanej podczas hamowania dynamicznego. Energia ta w pojeździe bez zasobnika, na skutek ograniczonej możliwości oddawania prądu do sieci, w dużej części musi być wytracona na rezystorach hamowania. Zauważalną korzyścią płynącą ze stosowania zasobnika jest również ograniczenie amplitudy prądów zasilania pojazdu płynących podczas intensywnego rozruchu i hamowania. Mniejsze prądy rozruchowe korzystnie wpływają na żywotność elementów obwodu zasilania pojazdu oraz powodują, że zmniejszają się straty przesyłowe w sieci zasilającej. Dokładne określenie korzyści energetycznych płynących z lokalnego gromadzenia energii jest jednak dość złożonym zagadnieniem, ponieważ wymaga znajomości parametrów i struktury całej sieci wraz z pojazdami, które aktualnie biorą udział w wymianie energii. Trudna jest również bezpośrednia ocena efektywności działania stosowanych algorytmów. Aby umożliwić porównanie różnych metod sterowania zasobnikiem w warunkach jak najbardziej odpowiadających rzeczywistości, autorzy artykułu zbudowali stanowisko laboratoryjne, składające się z modelu toru zasilania odwierciedlającego zachowanie rzeczywistej sieci trakcyjnej, układu zasobnika energii i modelu pojazdu trakcyjnego.

2. Rola zasobników superkondensatorowych w układach zasilania pojazdów trakcyjnych

Napędy elektryczne tramwajów i trolejbusów zasilane są za pomocą sieci trakcyjnych, które w większości polskich miast są sieciami bez zdolności zwracania energii oddawanej przez pojazdy do sieci energetycznej. Taki stan rzeczy powoduje, że oddawanie energii hamowania jest możliwe tylko pod warunkiem obecności na danym odcinku sieci pojazdu, który jest w stanie ją „skonsumować”. Jeżeli nie znajdzie się taki pojazd, nadmiar energii zostaje bezpowrotnie wytracony na rezystorach hamowania. Udział tego typu strat w ogólnym bilansie energii zależy od wielu czynników. Jednym z ważniejszych jest natężenie ruchu pojazdów na danym obszarze. W dużych miastach i aglomeracjach (Warszawa, Poznań, Śląsk) w godzinach szczytu oddawanie energii do sieci nie sprawia takich problemów jak w małych miastach, takich jak Elbląg czy Grudziądz, gdzie często na danej sekcji zasilania znajduje się tylko jeden pojazd. Na znaczenie strat powstających podczas hamowania

Streszczenie: W artykule przedstawiono strukturę stanowiska badawczego przeznaczonego do prowadzenia badań nad algorytmami sterowania superkondensatorowymi zasobnikami energii, stosowanymi w pojazdach trakcyjnych dla podniesienia sprawności energetycznej ich układów napędowych. Opisano problematykę ograniczania strat przesyłowych i strat powstających na skutek braku możliwości oddania do sieci energii odzyskanej podczas hamowania dynamicznego układu napędowego. Zaproponowano wykorzystanie do badań nad algorytmami sterowania zasobnikiem rzeczywistych danych pomiarowych, zarejestrowanych podczas jazdy tramwajów i trolejbusów w kilku polskich miastach. Przedstawiono metodę identyfikacji parametrów sieci trakcyjnej i zamieszczono przykładowe wyniki obrazujące zmienność parametrów układów zasilania pojazdu w funkcji czasu na skutek obecności na tym samym odcinku zasilania innych pojazdów. Opisano budowę stanowiska badawczego oraz omówiono zasady działania poszczególnych jego części składowych. W artykule został przedstawiony zakres badań możliwych do wykonania z wykorzystaniem opracowanego stanowiska laboratoryjnego oraz zamieszczono przebiegi wybranych prądów i napięć obrazujące działanie urządzenia.

🇬🇧 LABORATORY TESTS OF SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE DESIGNED FOR ENERGY LOSS REDUCTION

Abstract: In this article a laboratory test-stand designed for development and study of traction power losses optimization algorithms of ultracapacitor control was presented. Described in article a laboratory test-stand allows to model a traction power grid with motor drive load and controlled super-capacitor energy storage. It was proposed to use real measurements recorded in traction vehicles on their typical working profiles to use for identification of traction power grid parameters and drive load. Waveforms showing a working state of modeled grid traction with drive load was included in article.

w ogólnym bilansie energii ma również wpływ udział nowych napędów z możliwością zwrotu energii w stosunku do pojazdów starego typu, które nie posiadają takiej zdolności (105N – do dzisiaj jeden z najpopularniejszych pojazdów w polskich miastach). Różne jest znaczenie możliwości oddawania energii

w przypadku napędów trolejbusów i tramwajów. W tych pierwszych, na skutek wyraźnie wyższych strat związanych z oporami ruchu, ilość „nadmiarowej” energii jest o wiele niższa i sprawia, że przy obecnych cenach zasobników i ich żywotności „oszczędzanie” energii pozyskanej podczas hamowania nie jest uzasadnione ekonomicznie [1].

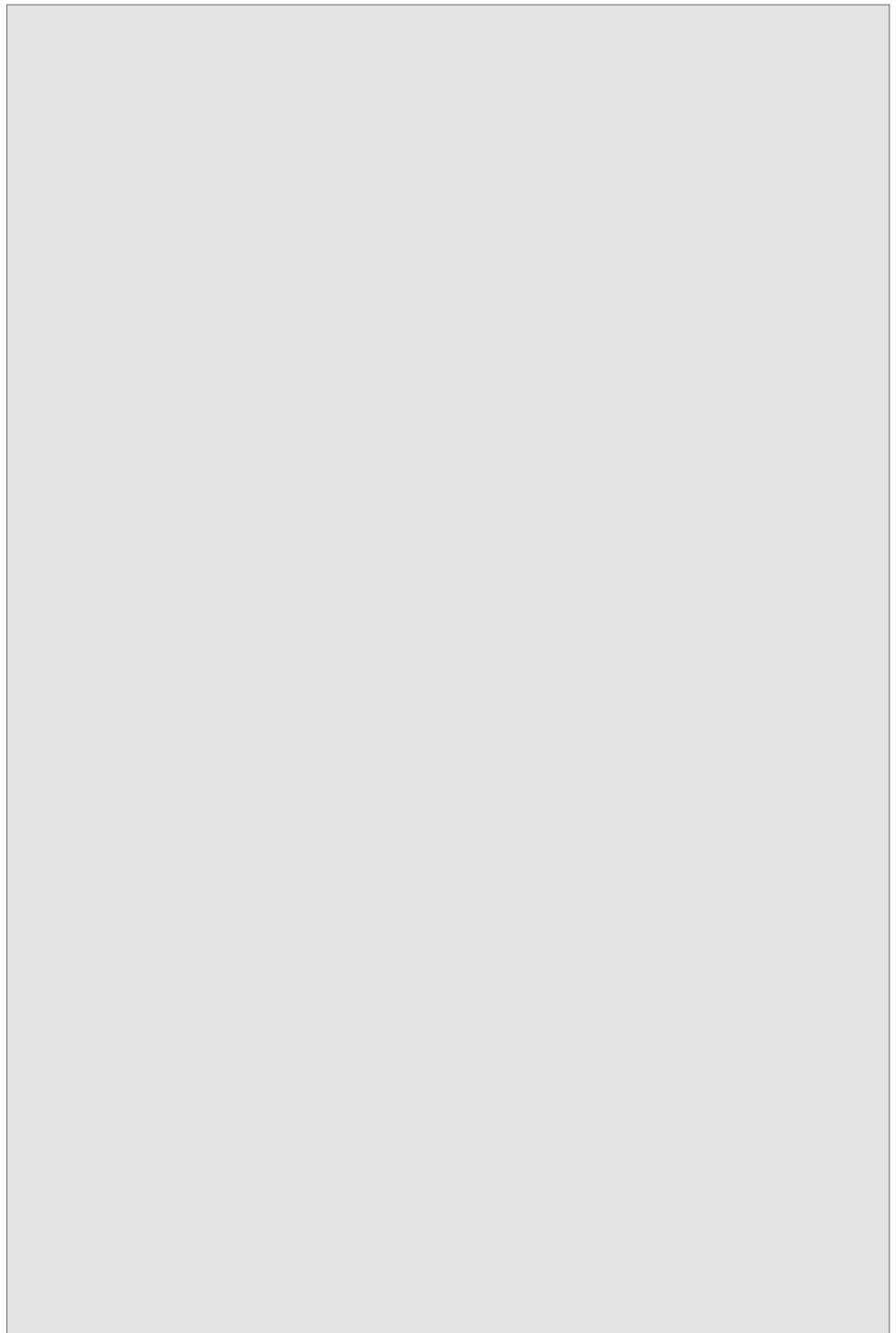
Stosowanie zasobników superkondensatorowych, poza zdolnością magazynowania energii odzyskanej podczas hamowania, niesie ze sobą korzyść polegającą na znacznym ograniczeniu szczytowych prądów pobieranych z sieci trakcyjnej lub oddawanych do niej podczas intensywnego rozruchu i hamowania [3]. Duże amplitudy tych prądów przyspieszają zużycie elementów obwodów zasilania pojazdów oraz wywołują straty przesyłowe. Ze względu na zależność strat na rezystancji przewodów od kwadratu amplitudy prądu możliwe jest ograniczenie tych strat poprzez zmniejszenie amplitudy dzięki zastosowaniu zasobnika energii. Ograniczanie strat przesyłowych poprzez załączanie zasobnika nie może być jednak realizowane w oderwaniu od strat samego układu przekształtnik – zasobnik, który umożliwia współpracę układu z baterią superkondensatorów. Straty powstające podczas ładowania i rozładowania zasobnika wynikają z niezerowych rezystancji wewnętrznych ogniw i strat powstających w elementach energoelektronicznych. Ich wartości są zależne od amplitudy prądu zasobnika i aktualnego napięcia na baterii. Straty te są tym wyższe, im bateria ma mniejsze napięcie, ponieważ ten sam prąd zasobnika osiąga się zarówno w przetwornicy podwyższającej, jak i obniżającej, kosztem wyższego prądu baterii. Taki charakter strat powoduje, że zasobnik wraz z obniżaniem napięcia zmniejsza swoją sprawność, co powoduje konieczność uwzględnienia tego faktu w algorytmach sterowania minimalizujących straty.

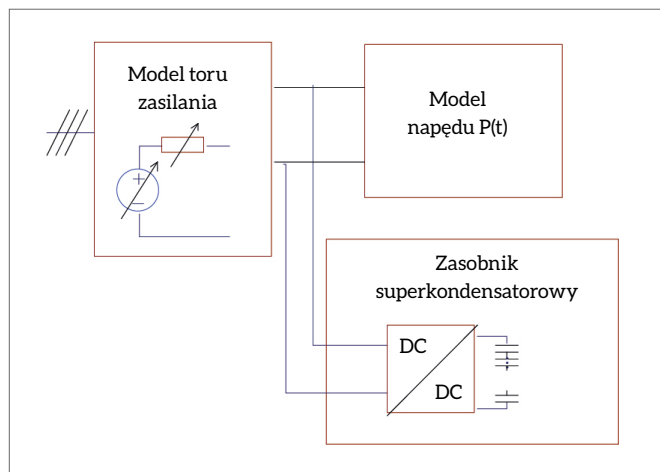
3. Stanowisko laboratoryjne do badania algorytmów minimalizacji strat energii w pojazdach trakcyjnych z zasobnikami energii

Sformułowanie zasad sterowania zasobnikiem, zapewniających ograniczenie strat energii w całym układzie: podstacja – sieć trakcyj-

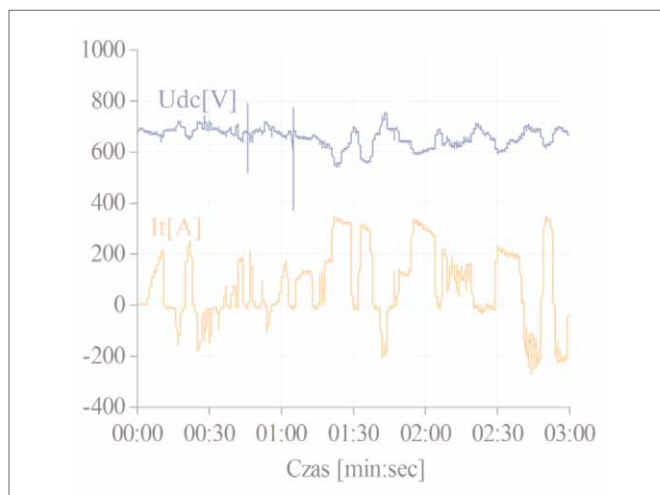
na – pojazd, jest zadaniem złożonym, ponieważ na charakter strat ma wpływ wiele elementów niezależnych od stanu pojazdu, takich jak aktualne napięcie sieci, obecność innych pojazdów na tym samym odcinku zasilania czy brak możliwości przewidzenia zdarzeń, które w najbliższym czasie będą miały wpływ na zachowanie pojazdu [2]. W celu określenia wpływu poszczególnych czynników na ogólne straty napędu wykonano analizę danych pomiarowych pozyskanych w kilku polskich miastach, a zebrane dane pomiarowe wykorzystano jako zbiór sygnałów wejściowych dla stanowiska badawczego. Na rys. 1 zamieszczono schemat blokowy stanowiska. Głównymi jego częściami składowymi są: układy modelujące sieć trakcyjną

reklama

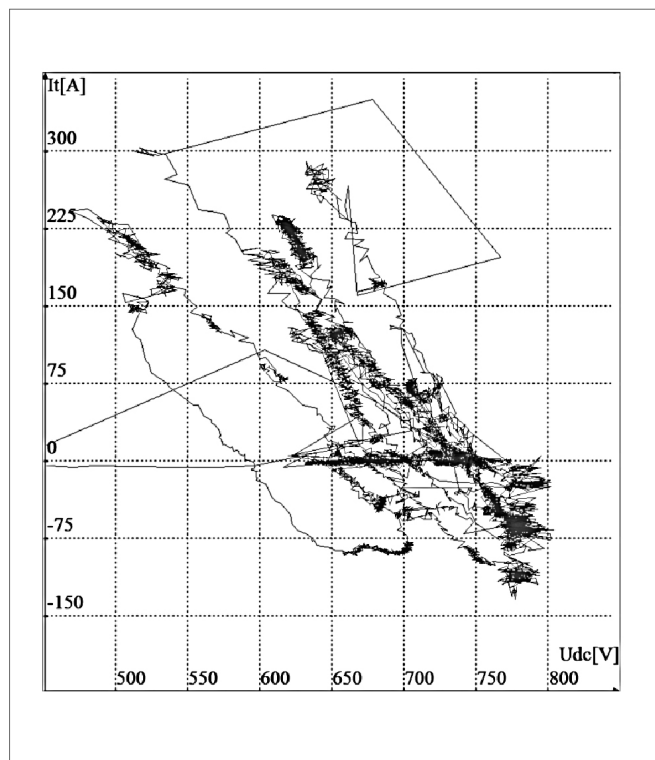




Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska laboratoryjnego do badania algorytmów sterowania zasobnikowymi napędami trakcyjnymi



Rys. 2. Przykładowy przebieg napięcia sieci i pobieranego przez pojazd prądu



Rys. 3. Trajektorie prądowo-napięciowe napędu zarejestrowane podczas typowej jazdy ulicznej tramwaju

i napęd oraz układ zasobnika energii z baterią superkondensatorów wyposażony w przekształtnik umożliwiający ładowanie i rozładowywanie baterii.

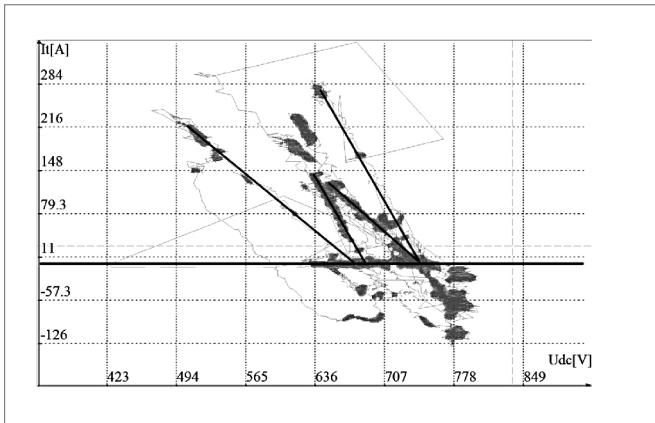
3.1. Model toru zasilania pojazdu trakcyjnego

Wartości strat przesyłowych zależą przede wszystkim od rezystancji sieci trakcyjnej, która wykazuje tendencję do zmiany w szerokim zakresie, w zależności od lokalizacji podstacji. Na wartość strat przesyłowych mają wpływ inne pojazdy, które znajdują się na wspólnym odcinku zasilania. Sytuacja najmniej korzystna, pod względem strat przesyłowych, powstaje, gdy dwa pojazdy oddalone od podstacji jednocześnie pobierają moc lub jednocześnie ją oddają. Może się zdarzyć, że na odcinku o dużej rezystancji sieci w niewielkiej odległości od siebie jeden pojazd hamuje a drugi rusza. W takiej sytuacji rezystancja związana ze stratami przesyłowymi, jest znikoma zarówno dla jednego jak i drugiego pojazdu, dzięki czemu przesyłanie energii między pojazdami jest bardzo efektywne. Aby możliwe było

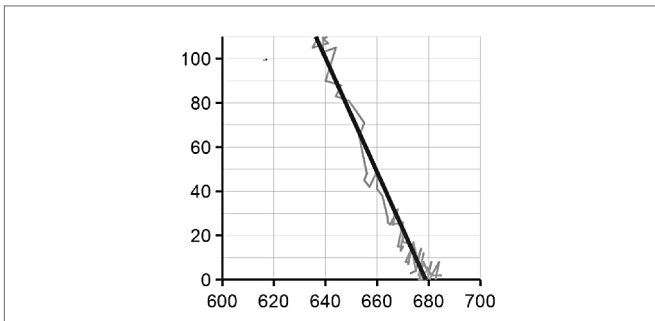
dokonanie oceny efektywności różnych algorytmów sterowania obniżających straty przesyłowe, konieczne było wykonanie badań w powtarzalnych warunkach testu. W tym celu opracowane zostało stanowisko laboratoryjne umożliwiające modelowanie sieci trakcyjnej w taki sposób, w jaki jest ona widziana od strony pojazdu. Przyjęto, że sieć będzie reprezentowana jako źródło napięcia ze zmienną wartością siły elektromotorycznej, zadaną programowo jako funkcja czasu, oraz skończoną, również zadaną jako funkcja czasu, wartością rezystancji szeregowej.

Mierzone wartości napięcia sieci trakcyjnej na pantografie i prądu pobieranego przez pojazd zostały przetworzone na wielkości napięcia zastępczego idealnego źródła napięciowego i jego rezystancji szeregowej. Na rys. 2 przedstawiono przykładowy przebieg zarejestrowanego napięcia sieci trakcyjnej i prądu pobieranego przez pojazd podczas jazdy w ruchu miejskim.

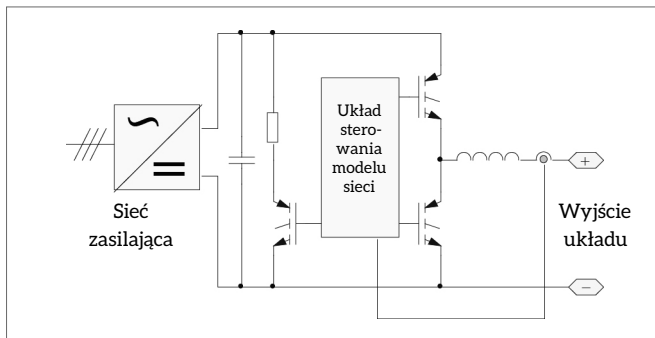
Przyjęcie uproszczonego modelu obwodu zasilania pojazdu jako idealnego źródła napięcia z szeregową rezystancją, które miałyby reprezentować podstację wraz z wpływem pojazdów znajdujących się w okolicy, sprowadza się do wyznaczenia zastępczej siły elektromotorycznej i zastępczej rezystancji szeregowej. Ze względu na złożony charakter danych pomiarowych uzyskanie jednoznacznej informacji o poszukiwanych wielkościach jest często niemożliwe. Można podjąć próbę rozwiązania tego zadania, wykonując analizę danych zebranych w trakcie typowych przejazdów uwzględniających rozruch, hamowanie oraz jazdę wybiegiem. Dane te wyznaczają trajektorie prądowo-napięciowe, które zostały przedstawione na rysunku 3. Do estymacji parametrów sieci trakcyjnej (jej napięcia oraz rezy-



Rys. 4. Trajektorie z wyselekcjonowanymi obszarami o większym prawdopodobieństwie występowania pomiarów rejestrowanych zestalym okresem impulsowania i naniesionymi liniami pozwalającymi na wyodrębnienie parametrów sieci



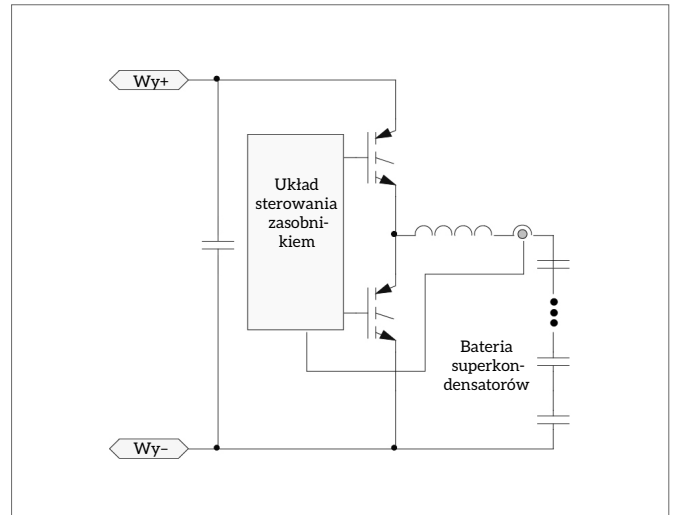
Rys. 5. Interpolacja liniowa trajektorii prądowo-napięciowej wykorzystana do wyznaczenia rezystancji szeregowej i napięcia sieci trakcyjnej



Rys. 6. Struktura modelu toru zasilania

stacji szeregowej) zostały przyjęte wyselekcjonowane zakresy pomiarów prądowo-napięciowych z trajektoriami układającymi się w wyraźne trendy liniowe. Pozwala to założyć, że są one wynikiem głównie spadku napięcia na rezystancji szeregowej sieci trakcyjnej (rys. 4). Oznacza to również, że zaburzenie napięcia sieci – wprowadzane przez inne pojazdy bądź będące efektem zmiany napięcia podstacji – jest w analizowanym okresie stałe.

Można zatem na podstawie jednej takiej trajektorii wyznaczyć jednocześnie oba poszukiwane parametry: napięcie sieci trakcyjnej niezaburzone przez obciążenie oraz rezystancję szeregową sieci. Wyznaczone parametry dla analizowanych przy-



Rys. 7. Struktura układu zasobnika

padków zależne były od warunków pracy napędu i dla dwóch badanych sytuacji (rys. 5) wynosiły odpowiednio $R_s = 387 \text{ m}\Omega$ $U_L = 679 \text{ V}$ oraz $R_s = 433 \text{ m}\Omega$ $U_L = 752 \text{ V}$. Zastosowanie przedstawionej powyżej metody do analizy danych pomiarowych prowadzi do otrzymania zbioru danych reprezentujących chwilowe wartości zastępczego napięcia i rezystancji sieci.

Ponieważ obie te wielkości zmieniają się w czasie w stosunkowo szerokich granicach, układ modelujący sieć został zrealizowany jako sterowane źródło napięciowe, na którego zaciskach utrzymywana jest wartość napięcia będąca funkcją zadanego w postaci funkcji czasu napięcia U_{SEM} , rezystancji sieci (zadanej funkcją czasu) oraz pobieranego przez pojazd prądu.

$$U_{wy}(t) = U_{SEM}(t) - I_{wy}(t) * R(t) \quad (1)$$

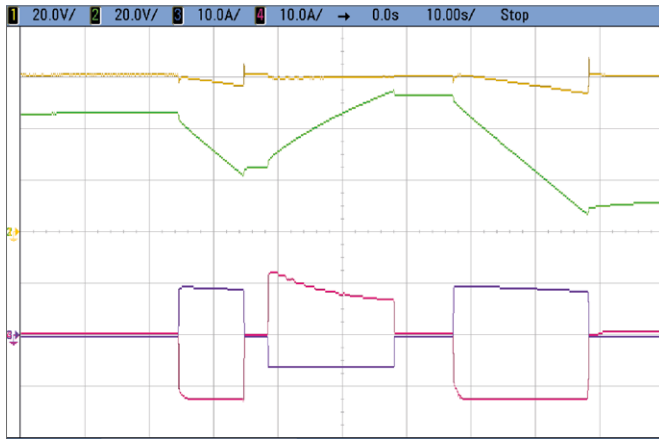
Uproszczony schemat ideowy układu zamieszczono na rysunku 6.

3.2. Superkondensatorowy zasobnik energii

Model laboratoryjny zasobnika zbudowano zgodnie z konstrukcją rzeczywistego urządzenia w pomniejszonej skali. Składa się z baterii 10 szeregowo połączonych ogniw LSUM 016R8L o pojemności 56 F każda i sumarycznym napięciu 150 V. Część energoelektroniczną zasobnika stanowi dwukierunkowa przetwornica DC/DC z układami regulacji prądu i nadzoru nad napięciami ogniw. Algorytm sterowania urządzeniem został podporządkowany regulacji prądu zadanego zasobnika i umożliwia użycie go do badania algorytmów sterowania wymianą energii między siecią, napędem i zasobnikiem, które pozwalają na minimalizację strat energii w przewodach sieci trakcyjnej poprzez ograniczanie amplitud tych prądów.

3.3. Modelowanie przesyłowych strat mocy pojazdu trakcyjnego z zasobnikiem superkondensatorowym

Duże znaczenie dla rzetelności badań algorytmów sterowania mających na celu zminimalizowanie strat energii w linii trakcyjnej i samym zasobniku ma przyjęcie odpowiedniej skali wartości prądów, napięć i mocy w modelu odzwierciedlającym rzeczy-



Rys. 8. Oscylogramy napięcia obwodu zasilania pojazdu (pantograf) (kolor żółty), napięcia baterii superkondensatorów (kolor zielony), prądu falownika (kolor fioletowy) i prądu baterii (kolor czerwony).

wisty pojazd. W ramach badań zachowano następujące proporcje: napięcie rzeczywistej sieci trakcyjnej (600 V) jest reprezentowane przez wartość napięcia w modelu równą 200 V, prąd 100 A pobierany przez pojazd reprezentowany jest przez prąd 10 A, moc wejściowa pojazdu $P = U \cdot I = 600 \cdot 100 = 60 \text{ kW}$ jest reprezentowana przez moc 2000 W, straty mocy na przewodach sieci trakcyjnej o rezystancji 300 m Ω wynikające z prądu 100 A wynoszą 3 kW.

Aby straty mocy na rezystancji zastępczej modelu sieci stanowiły 5% strat mocy pobieranej, rezystancja zastępcza modelu sieci powinna wynosić 1 Ω . Jako rezystancję zastępczą baterii ogniów przyjęto wartość 1,5 Ω , reprezentującą straty w przekształtniku (szeregowa rezystancja samych ogniów jest pomijalnie mała). Na rysunku 8 zamieszczono oscylogramy wybranych prądów i napięć w modelu układu napędowego z zasobnikiem superkondensatorowym, który zasilono z modelu sieci trakcyjnej.

4. Podsumowanie

Przedstawione rozwiązanie modelu układu zasilania pojazdu przyjmuje znaczne uproszczenia zjawisk zachodzących w rzeczywistości, ale pozwala na weryfikację algorytmów sterowania zasobnikowym pojazdem trakcyjnym w stanach zbliżonych do rzeczywistych, ze szczególnym uwzględnieniem stanów dynamicznych. Zaletą rozwiązania jest możliwość wykonywania badań porównawczych dla różnych metod sterowania zasobnikiem poprzez zapewnienie każdorazowo powtarzalnych warunków zasilania napędu. Taka właściwość jest szczególnie cenna ze względu na potrzebę poszukiwania rozwiązań algorytmów sterowania obejmujących pracę napędu w warunkach zmieniających się w czasie w nieprzewidywalny sposób.

5. Literatura

- [1] KOBOS W., CIĄĆKA M., CHUDZIK P.: *Trolejbusowy napęd trakcyjny z zasobnikiem superkondensatorowym*. „Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne” 2(95)/2012, wyd. BOBRME Komel, s. 39–44.
- [2] RADECKI A., CHUDZIK P.: *Optymalizacja strat energii w torze zasilania napędu trakcyjnego z zasobnikiem superkondensatorowym*. „Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne” 2(94)/2012, wyd. BOBRME Komel, s. 43–48.
- [3] GIZIŃSKI P., GIZIŃSKI Z.: *Kondensatorowy zasobnik energii dla pojazdów trakcji elektrycznej*. Czasopismo Techniczne. „Elektrotechnika” Nr R. 104, z. 1-E, Wydawnictwo PK, Kraków 2007, s. 43–48.

Informacje dodatkowe

Praca naukowa oraz badania finansowane z projektu MNiSW nr N N510 699440 nt. „Optymalizacja zużycia energii w trakcyjnych układach napędowych z wykorzystaniem zasobników superkondensatorowych” – kierownik projektu dr inż. Piotr Chudzik.

 **Piotr Chudzik, Andrzej Radecki, Rafał Nowak** – Politechnika Łódzka

artykuł recenzowany