

Andrzej Radecki, Piotr Chudzik
Politechnika Łódzka, Łódź

OPTIMALIZACJA STRAT ENERGII W TORZE ZASILANIA NAPĘDU TRAKCYJNEGO Z ZASOBNIKIEM SUPERKONDENSATOROWYM

OPTIMIZATION OF ENERGY LOSSES IN TRACTION VEHICLE POWER SUPPLY CIRCUIT WITH SUPERCAPACITOR

Abstract: A concept of controlling energy flow in power supply circuit with supercapacitor of traction vehicle, designed to minimize energy losses, was presented in this article. To optimize use of energy in traction vehicle, a typical working profile of drive inverter was assumed. Waveforms of energy losses in power supply circuit with using proposed control method of supercapacitor were included.

1. Wstęp

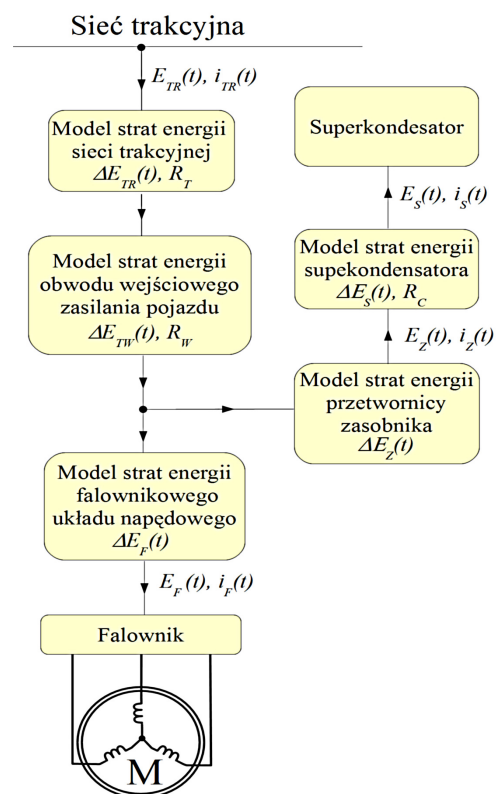
Problematyka magazynowania energii odzyskiwanej z energii mechanicznej w czasie hamowania jest dobrze znana i szeroko stosowana w pojazdach z napędem elektrycznym i hybrydowym [1]. Zastosowanie w tym przypadku odpowiednich baterii ogniów pozwala w znaczny sposób podnieść sprawność pojazdu, a tym samym zwiększyć długość odcinka jaki pokonuje pojazd między kolejnymi ładowaniami. Przyjęcie za kryterium oceny efektywności energetycznej, bilansu energii pojazdu, jest w takim przypadku właściwe. Podobne rozumowanie w odniesieniu do pojazdów trakcyjnych nie prowadzi jednak do oczekiwanej poprawy sprawności pojazdu ani układu podstacja zasilania - pojazd. W przypadku nowoczesnych napędów elektrycznych zasilanych za pomocą sieci trakcyjnej istnieje możliwość oddawania, bezpośrednio do sieci, energii odzyskiwanej podczas hamowania. W całkowitym bilansie energetycznym pojazdu część oddana do sieci nie stanowi zatem strat i nie jest uzasadnione jej lokalne magazynowanie. Uzasadnieniem dla aktualnie stosowanych zasobników energii w trakcji jest możliwość lokalnego gromadzenia energii w chwilach, gdy sieć trakcyjna nie jest w stanie jej odebrać [2].

W artykule zaproponowano wykorzystanie zasobnika superkondensatorowego do poprawy efektywności energetycznej pojazdu trakcyjnego postrzeganego w sposób kompleksowy, łącznie z odcinkiem sieci trakcyjnej, przy założeniu możliwości oddawania energii do sieci. Zmniejszenie zużycia energii przez elektryczne układy napędowe jest istotnym zagadnieniem gospodarczym [3]. Celowym jest przy tym

opracowanie metody sterowania przepływem energii w torze zasilania pojazdu mającej na celu minimalizację jej strat.

2. Straty mocy i energii w trakcyjnych układach napędowych

Uproszczony model przepływu energii w układzie zasilania pojazdu trakcyjnego, z możliwością oddawania energii do sieci, przedstawiono na rysunku 1.



Rys.1. Przepływ energii w układzie zasilania pojazdu trakcyjnego

Bilans energii w takim układzie można zapisać jako:

$$\begin{aligned}\overline{E_T(t)} &= \overline{E_F(t)} - \overline{E_S(t)} \\ \overline{E_T(t)} &= E_{TR}(t) - \Delta E_{TR}(t) - \Delta E_{TW}(t) \\ \overline{E_F(t)} &= E_F(t) - \Delta E_F(t) \\ \overline{E_S(t)} &= E_S(t) - \Delta E_S(t) - \Delta E_Z(t)\end{aligned}, \quad (1)$$

gdzie:

E_{TR} - energia pobierana z sieci trakcyjnej,

ΔE_{TR} - straty energii na rezystancji R_T sieci trakcyjnej,

ΔE_{TW} - straty energii w układach wejściowych napędu trakcyjnych o rezystancji zastępczej R_W ,

E_F - energia pobierana przez napęd falownikowy do realizacji zadanego profilu pracy silnika,

ΔE_F - straty energii w falowniku i silniku związane z zadanym profilem pracy silnika,

E_S - energia pobrana do superkondensatora,

ΔE_S - straty energii w superkondensatorze,

ΔE_Z - straty energii w przetwornicy zasobnika superkondensatorowego.

Straty występujące w falownikowym układzie napędowym ΔE_F są niezależne od przyjętych algorytmów sterowania zasobnikiem superkondensatorowym i wynikają wyłącznie z realizowanego profilu pracy przez falownikowy układ napędowy przy danym napięciu obwodu pośredniczącego.

Zakładając, dla uproszczenia kolejnych rozważań, stałą wartość napięcia w sieci trakcyjnej i w układzie pośredniczącym falownika napędu trakcyjnego można przyjąć, że przepływ energii w torze zasilania pojazdu jest proporcjonalny do całki z przepływów prądów, a jej straty proporcjonalne do całki z kwadratów wartości chwilowych tych prądów. Przy założeniu, że łączne straty energii można opisać w oparciu o rezystancje zastępcze poszczególnych podukładów, otrzymujemy:

$$\begin{aligned}\Delta E(t) &\sim \int_{-\infty}^t R_{TR} \cdot i_{TR}^2(\tau) d\tau + \\ &+ \int_{-\infty}^t R_{TW} \cdot i_{TR}^2(\tau) d\tau + \int_{-\infty}^t R_Z \cdot i_Z^2(\tau) d\tau, \quad (2) \\ i_{TR}(t) &= i_Z(t) + i_F(t)\end{aligned}$$

gdzie:

i_{TR} - prąd w sieci trakcyjnej związany zasilaniem pojazdu trakcyjnego,

i_F - prąd falownika napędu,

i_Z - prąd zasobnika energii,

R_{TR} - rezystancja odcinka sieci trakcyjnej od podstacji do pojazdu,

R_{TW} - rezystancja obwodów wejściowych pojazdu trakcyjnego,

R_{TR} - zastępcza szeregowo rezystancja zasobnika energii.

Rezystancja odcinka sieci trakcyjnej R_{TR} , mierzona od podstacji do punktu położenia pojazdu jest zmienna i zawiera się w przedziale od zera do pojedynczych omów.

3. Optymalizacja strat energii

Zadanie minimalizacji strat energii sprowadza się do określenia takich warunków pracy zasobnika superkondensatorowego, dla których wystąpi minimalizacja wyrażenia (2). Zakłada się, że poszukiwanie rozwiązania optymalnego będzie dotyczyło przypadku dla stałej postaci funkcji $E_F(t)$ i $\Delta E_F(t)$, czyli stałego profilu jazdy pojazdu trakcyjnego oraz stałych wartości rezystancji strat R_T , R_{TW} , R_Z .

W przypadku założenia bezstratnej i nieograniczonej możliwości magazynowania i oddawania energii z zasobnika, zadanie minimalizacji strat energii sprowadza się do eliminacji składnika E_{TR} (napęd zasilany wyłącznie z superkondensatora), a tym samym do eliminacji czynników ΔE_{TR} i ΔE_{TW} . W praktycznych zastosowaniach nie jest możliwe wykorzystanie tak dużych zasobników, dlatego należy przyjąć ograniczenie zdolności gromadzenia energii E_{ZMAX} . Przy uwzględnieniu zadanego zapotrzebowania napędu na energię $E_F(t)$ w zadanym czasie i ograniczeniu energii superkondensatora E_S , uzyskanie minimalnego poziomu strat energii w układzie zasilania pojazdu trakcyjnego wiąże się z przyjęciem ściśle określonej postaci funkcji prądu zasobnika energii $i_Z(t)$. Minimalizacji podlega zatem wyrażenie:

$$\min_{i_Z(t)} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} (R_{TR} + R_{TW}) \cdot (i_Z(\tau) + i_F(\tau))^2 d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} R_Z \cdot i_Z^2(\tau) d\tau \right\}, \quad (3)$$

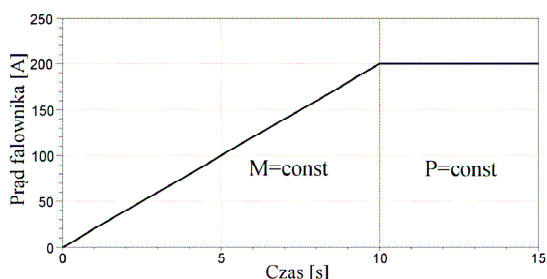
przy ograniczeniu energii superkondensatora za jeden cykl pracy:

$$\int_{t_a}^{t_b} U_p \cdot i_z(\tau) d\tau \leq E_{ZMAX},$$

gdzie:

U_p - napięcie układu pośredniczącego.

Typowy profil jazdy pojazdu trakcyjnego obejmuje zbiór powtarzalnych cykli pracy związanych z rozruchem, jazdą wybiegiem oraz hamowaniem. Wyidealizowany przebieg prądu falownika $i_F(t)$, pobierany w trakcie realizacji fragmentu cyklu napędowego związanego z rozruchem (zakładającym pracę dwustrefową napędu), wyznaczony dla silnika indukcyjnego o mocy 125W, został pokazany rysunku 2.



Rys. 2. Przebieg prądu falownika dla typowego rozruchu napędu trakcyjnego

Zadany przebieg prądu falownika $i_F(t)$ stanowi element stały minimalizowanej funkcji (3).

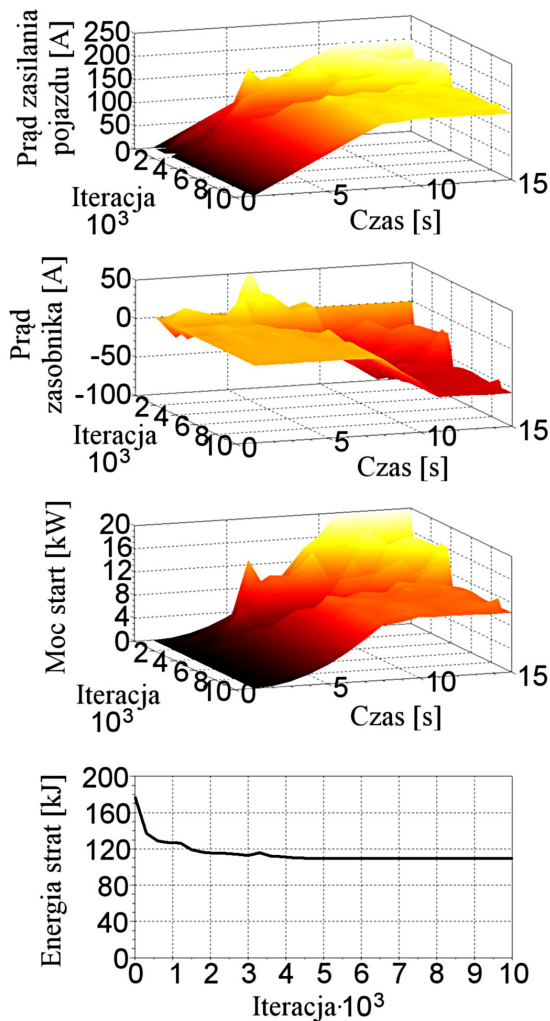
4. Optymalizacja strat energii metodą Nelder-Meada

Poszukiwanie optymalnego przebiegu prądu zasobnika $i_z(t)$ może zostać przeprowadzone przy założeniu pożądanej krzywej prądu falownika (rys.2), parametrów linii trakcyjnej i obwodów wejściowy falownika ($R_T=0.2\Omega$, $R_{TW}=0.3\Omega$, $R_Z=0.05\Omega$) oraz maksymalnej wartości energii, którą może zgromadzić i oddać zasobnik superkondensatorowy ($E_{ZMAX}=174kJ$) w jednym cyklu pracy i wartości napięcia pośredniczącego $U_p=600V$.

Założono, że zdyskretyzowana dziedzina funkcji $i_z(t)$, będzie stanowiła przestrzeń, w której poszukiwane będzie rozwiązanie optymalne. Założono ponadto, że w chwili rozruchu superkondensator miał zgromadzoną maksymalną wartość energii. Jako punkt startowy w optymalizacji, przyjęta została zerowa krzywa prądu zasobnika.

Na rysunku 3 został pokazany proces poszukiwania rozwiązania optymalnego z wykorzy-

staniem metody Nelder-Meada. Zaczynając od zerowej krzywej prądu zasobnika, w kolejnych iteracjach, poszukiwane były kolejne przybliżenia prądu $i_z(t)$, minimalizującego wyrażenie (3). Metoda po pięciu tysiącach iteracji znajduje rozwiązanie suboptymalne i kolejne iteracje nie powodują już istotnych zmian pozostając w znalezionym minimum lokalnym funkcji.



Rys. 3. Ilustracja procesu poszukiwania optymalnej krzywej prądu zasobnika minimalizującego straty energii w torze zasilania pojazdu trakcyjnego z wykorzystaniem metody Nelder-Meada

5. Optymalizacja strat energii w klasie funkcji prądu zasobnika przedziałami liniowego

Optymalizacja globalna w przestrzeni wielu zmiennych bardzo często prowadzi do znalezienia rozwiązania lokalnego, które może być dalekie od rozwiązania pożądanego. Korzystne jest ograniczenie wymiaru przestrzeni, nawet

kosztem znalezienia jedynie rozwiązania suboptymalnego.

Poszukiwaną funkcję prądu zasobnika proponuje się interpolować z wykorzystaniem dwóch odcinków prostoliniowych, zgodnie z zależnością:

Dla $t_1 < t_2$

$$i_Z(t) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t \leq t_1 \\ (t - t_1) \frac{i_{ZMAX}}{i_2 - t_1} & \text{dla } t \in (t_1, t_2), \\ i_{ZMAX} & \text{dla } t \geq t_2 \end{cases} \quad (4)$$

gdzie:

$$i_{ZMAX} = \frac{E_{ZMAX}}{U_P \cdot ((t_{max} - t_2) + 0.5 \cdot (t_2 - t_1))}$$

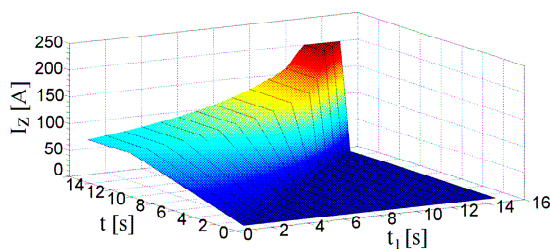
oraz dla $t_1 \geq t_2$

$$i_Z(t) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t < t_1 \\ i_{ZMAX} & \text{dla } t \geq t_1 \end{cases}, \quad (5)$$

gdzie:

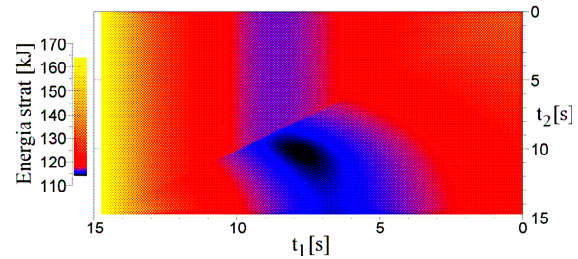
$$i_{ZMAX} = \frac{E_{ZMAX}}{U_P \cdot (t_{max} - t_1)}$$

Dwa współczynniki t_1 i t_2 występujące w wyrażeniach (4) i (5) tworzą klasę funkcji (rys.4), w której poszukiwane będzie rozwiązanie suboptymalne.



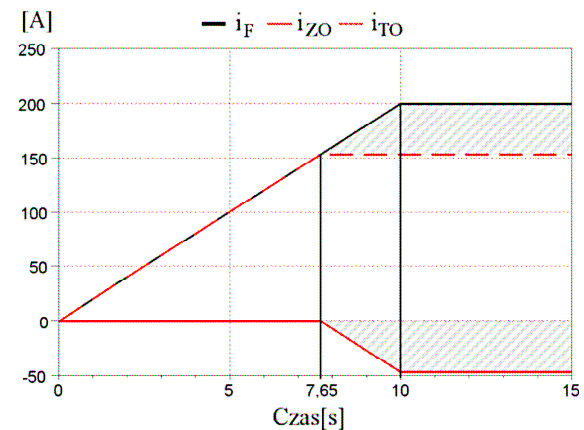
Rys.4. Rodzina krzywych (4) prądu zasobnika i_Z dla parametru $t_2=12s$.

Na rysunku 5 przedstawiono powierzchnię strat energii w trakcie rozruchu tramwaju dla różnych parametrów t_1 i t_2 , przy założeniu typowego profilu pracy napędu falownikowego.



Rys.5. Straty energii w torze zasilania pojazdu trakcyjnego w funkcji parametrów t_1 i t_2 prądu zasobnika $i_Z(t)$.

Optymalny punkt na tej powierzchni odpowiada krzywej prądu zasobnika, która została przedstawiona na rysunku 6. W wyniku badań zostało ustalone, że punkt ten (t_1 , t_2) jest niezależny od parametrów R_T , R_{TW} , R_Z , a zależy od parametru E_{ZMAX} i krzywej prądu $i_Z(t)$.



Rys.6. Prądy w układzie zasilania pojazdu trakcyjnego z optymalnym przebiegiem prądu zasobnika superkondensatorowego i_{ZO} i optymalnym przebiegiem prądu zasilania pojazdu z sieci trakcyjnej i_{TO} .

6. Optymalna postać prądu zasobnika dla dowolnego profilu pracy napędu trakcyjnego

Na podstawie analizy zależności strat energii w funkcji krzywej prądu $i_T(t)$ można uogólnić rozwiązanie problemu optymalizacyjnego dla dowolnych krzywych prądu falownika $i_F(t)$ poprzez wyznaczenie takiej funkcji $i_Z(t)$, która będzie spełniała nierówność:

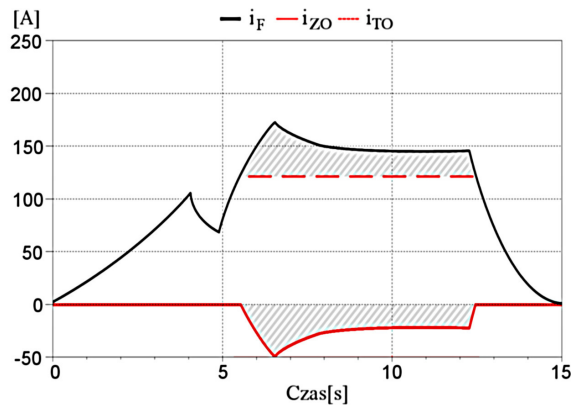
$$\max_t \{i_T(t)\} \leq i_{TMAX}, \quad (6)$$

gdzie i_{TMAX} jest stałą minimalizującą wartość szczytową prądu sieci trakcyjnej i jest powiązana ze zdolnością gromadzenia energii w zasobniku:

$$\int_{t_a}^{t_b} U_P(\tau) \cdot i_Z(\tau) d\tau = -E_{ZMAX}, \quad (7)$$

gdzie:

$$i_Z(t) = \begin{cases} -i_F(t) + i_{TMAX} & \text{dla } i_F(t) - i_{TMAX} > 0 \\ 0 & \text{dla } i_F(t) - i_{TMAX} \leq 0 \end{cases}$$

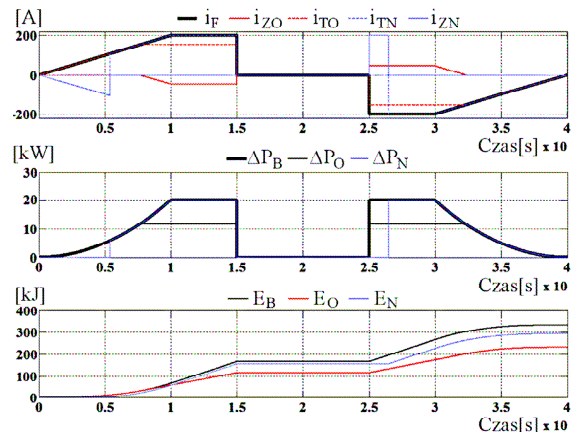


Rys. 7. Optymalny przebieg prądu zasobnika minimalizujący straty energii dla zadanego prądu falownika.

Na rysunku 8 pokazano optymalny przebieg prądu zasobnika $i_Z(t)$, dla przykładowego profilu rozpędzania o zmiennym momencie napędowym, spełniający nierówność (6).

7. Wyniki badań wykorzystania algorytmów optymalizacji strat energii

Badania symulacyjne strat energii w torze zasilania pojazdu trakcyjnego obejmowały pełny cykl jego pracy (rozruch, jazda wybiegiem, hamowanie). Na rysunku 8 zostały przedstawione przebiegi porównawcze prądów, mocy i strat energii w pojeździe trakcyjnym dla przypadku braku zasobnika energii (i_F , ΔP_B , E_B), z wykorzystaniem zasobnika realizującego optymalną krzywą prądu $i_Z(t)$ dla założonych warunków pracy napędu (i_{TO} , i_{ZO} , ΔP_O , E_O) oraz z wykorzystaniem zasobnika energii sterowanym za pomocą algorytmu typowego (i_{TN} , i_{ZN} , ΔP_N , E_N). Jako typowy algorytm sterowania superkondensatorem została przyjęta metoda, w której zasobnik w trakcie rozruchu pokrywa całe zapotrzebowanie napędu na energię do chwili osiągnięcia założonej wartości minimalnej energii w zasobniku, a w trakcie hamowania pobiera całą energię oddawaną przez napęd do chwili osiągnięcia dopuszczalnej wartości maksymalnej energii.



Rys. 8. Straty mocy i energii w trakcie pojedynczego cyklu rozruchu i hamowania pojazdu trakcyjnego

Oszczędność energii związana ze zmniejszeniem jej strat na skutek wykorzystania proponowanego algorytmu sterowania zasobnikiem energii wynosi (dla typowego cyklu pracy i przyjętych wartości parametrów falownikowego napędu trakcyjnego) odpowiednio: około 30% w porównaniu z układem bez zasobnika i około 20% w porównaniu z układem z zasobnikiem sterowanym algorytmem typowym.

8. Podsumowanie

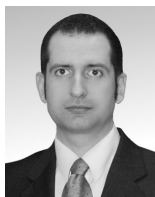
W artykule przedstawiono koncepcję sterowania przepływem energii w układzie zasilania pojazdu trakcyjnego z zasobnikiem superkondensatorowym. Przyjęta strategia sterowania zakłada minimalizację strat energii poprzez ustalenie optymalnego przebiegu prądu zasobnika energii dla zadanego profilu przejazdu tramwaju, w trakcie którego występuje etap rozpędzania, jazda wybiegiem oraz hamowanie. W artykule przedstawiono sposób wyznaczenia krzywej prądu zasobnika, minimalizujący straty energii dla dowolnego przebiegu prądu falownika.

9. Literatura

- [1]. Fieć R., Setlak Z.: *Napęd hybrydowy pojazdów miejskich z podwójnym zasobnikiem energii elektrycznej*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 79, 2008, wyd. BOBRME Komel, s. 139-144.
- [2]. Kobos W: *Trakcyjny napęd asynchroniczny o podwyższonej sprawności energetycznej z wykorzystaniem pojemnościowego zasobnika energii*. Pojazdy Szynowe, Nr 4, 2009, s. 30-34.
- [3]. Pyka M., Liszka S.: *Potencjał oszczędności energii w napędach elektrycznych oraz europejskie mechanizmy promocji jego wykorzystania*. Zeszyty

Problemowe Maszyny Elektryczne nr 78, 2007,
wyd. BOBRME Komel, s. 7-12.

Autorzy



dr inż. Andrzej Radecki
Politechnika Łódzka,
Instytut Automatyki,
ul. Stefanowskiego 18/22,
90-924 Łódź,
andrzej.radecki@p.lodz.pl



dr inż. Piotr Chudzik, Politech-
nika Łódzka,
Instytut Automatyki,
ul. Stefanowskiego 18/22,
90-924 Łódź,
piotr.chudzik@p.lodz.pl

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.