

DOI: 10.5604/20830157.1159325

## KONCEPCJA TRAKCYJNEJ PODSTACJI PROSTOWNIKOWO-FALOWNIKOWEJ W KOLEJOWYM SYSTEMIE ZASILANIA TRAKCYJNEGO 3 KV DC

Włodzimierz Kruczek

Instytut Kolejnictwa, Zakład Elektroenergetyki

**Streszczenie.** Kolejowe podstacje trakcyjnego systemu zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego wyposażone są w prostowniki, których zadaniem jest przekształcanie, napięcia przemiennego o częstotliwości krajowego systemu energetycznego na napięcie stałe. Są to przekształtniki nie sterowane o jednokierunkowym przesyśle mocy. W ostatnich latach praktycznie wszystkie nowo produkowane i wprowadzane do eksploatacji elektryczne pojazdy trakcyjne, to pojazdy wyposażone w silniki asynchroniczne i mające możliwość zwrotu energii do kolejowej sieci trakcyjnej podczas hamowania rekuperacyjnego. Zwrot energii jest jednak możliwy tylko w przypadku gdy w tym samym czasie w pobliżu znajduje się inny pojazd, który jest w fazie rozruchu lub jazdy z prądem, w takiej sytuacji energia ta może być wykorzystana przez ten pojazd. W każdym innym przypadku energia elektryczna pochodząca od procesu hamowania rekuperacyjnego wytracana jest w specjalnych rezystorach hamowania. Zwrot odzyskanej energii do systemu energetycznego byłby możliwy w przypadku zastosowania w kolejowych podstacjach trakcyjnych zamiast prostowników, przekształtniki dwukierunkowych czyli rodzaju przekształtnika półprzewodnikowego, mającego zdolność dwukierunkowego przesyłu mocy. Niniejszy artykuł przedstawia zarys problemów technicznych z jakimi należy się uporać przy próbie modelowania, projektowania i budowy takiego przekształtnika. Intencją autora jest rozpoczęcie przewodu doktorskiego, w którym zostanie wykonane modelowanie komputerowe, ocena możliwości, sensowności technicznej i ekonomicznej zastosowania takiego przekształtnika w kolejowych podstacjach trakcyjnych 3 kV DC. Promotorem tej rozprawy doktorskiej będzie prof. dr hab. inż. Grzegorz Skarpetowski.

**Słowa kluczowe:** zasilanie trakcyjne, pojazdy elektryczne

### TRACTION RECTIFIER-INVERTER SUBSTATION CONCEPT FOR 3 KV DC RAILWAY TRACTION SYSTEM

**Abstract.** In recent years, all newly manufactured and put into operation electric rail vehicles are equipped with asynchronous motors and have the opportunity to return the energy to the overhead contact line system during regenerative braking. This energy obtained from the regenerative braking process can be fed back only if on the same OHCL section there is another electric vehicle that is simultaneously generating traction force. In this case this energy can be reused by this second vehicle. In any other case the energy generated by the regenerative braking process is dissipated on braking resistors. Moreover, the energy recuperation and transmission to the local power distribution system could be possible, if the traction substations were equipped with traction rectifier-inverter substation converters instead of traditional rectifiers. Converters are a type of converter semiconductor capable of bi-directional power transmission. This article outlines the technical problems which need to be solved while trying to model, design and to build such an inverter.

**Keywords:** traction power supplies, electric vehicles

### Wstęp

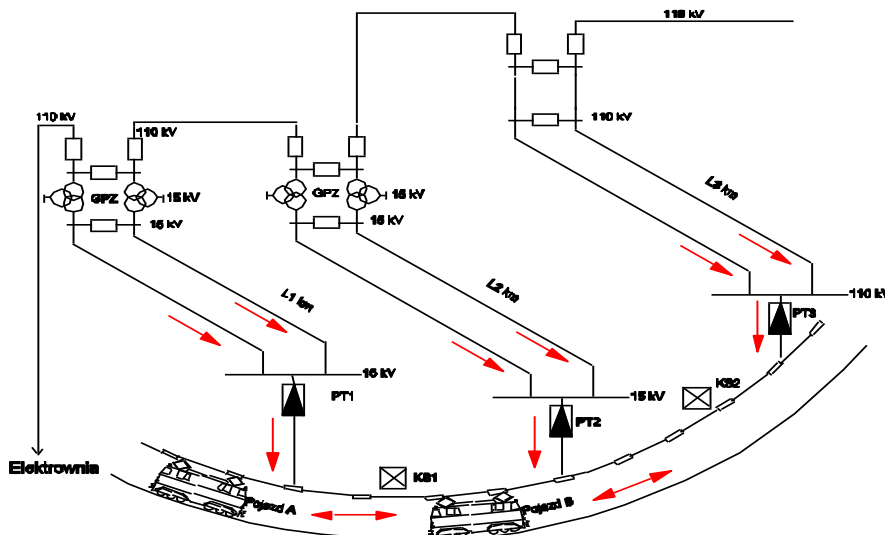
Układ zasilania w systemie zasilania trakcyjnego 3 kV DC jest to obwód elektryczny o określonej strukturze, służący do zasilania pojazdów trakcyjnych poruszających się po linii kolejowej. W skład systemu zasilania wchodzi: zasilający krajowy system elektroenergetyczny, podstacje trakcyjne, sieć trakcyjna, kabiny sekcyjne. Odbiornikami w tym obwodzie są pojazdy trakcyjne. Schemat klasycznego układu zasilania przedstawiono na rysunku 1. Na rysunku tym zaznaczono możliwe kierunki przepływu energii elektrycznej.

Przepływ energii elektrycznej w kierunku przeciwnym do kierunku zasilającego jest możliwy tylko w obszarze sieci trakcyjnej i przy spełnieniu następujących warunków:

- pojazd trakcyjny A jest pojazdem z możliwością hamowania rekuperacyjnego i hamuje w ten sposób,
- pojazd trakcyjny B znajduje się wystarczająco blisko pojazdu trakcyjnego A i jest w stanie jazdy z prądem lub w stanie rozruchu.

Odpowiedni układ i stan pracy pojazdów trakcyjnych umożliwia przekazywanie mocy elektrycznej pochodzącej z procesu hamowania rekuperacyjnego z pojazdu A do pojazdu B. Nie ma możliwości przekazywania mocy elektrycznej poza obszar sieci trakcyjnej.

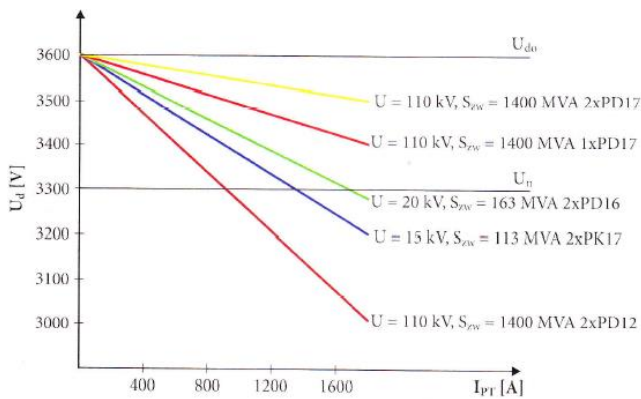
Elementem uniemożliwiającym przepływ mocy dwukierunkowo w całym obszarze zasilania trakcyjnego jest prostownik trakcyjny.



Rys. 1. Klasyczny układ zasilania w systemie zasilania trakcyjnego 3 kV DC

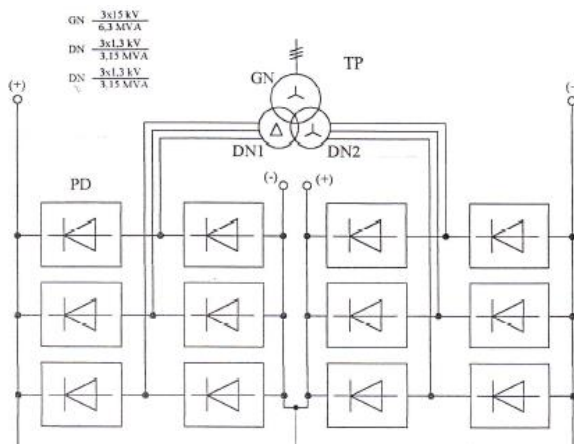
Aktualnie ze względu na większe moce pojazdów trakcyjnych istnieje tendencja do zwiększania wydajności energetycznych podstacji trakcyjnych. Stosuje się więc jednostopniową transformację napięcia. W rozwiązaniu tym napięcie do zasilania transformatora prostownikowego doprowadzane jest bezpośrednio z linii wysokiego napięcia 110 kV. Pomijana jest więc cała infrastruktura energetyczna 110/15 kV znajdująca się w GPZ-tach. W podstacjach trakcyjnych napięcie 110 kV transformowane jest jednostopniowo do poziomu wymaganego przez prostownik trakcyjny. Innym starszym rozwiązaniem o mniejszej wydajności energetycznej jest zasilanie podstacji trakcyjnej średnim napięciem 15 kV z GPZ i powtórna transformacja tego napięcia w podstacji trakcyjnej do poziomu odpowiadającego prostownikowi trakcyjnemu. Ważnym zagadnieniem jest również jakość napięcia i zmniejszenie oddziaływania prostowników na sieć zasilającą, istnieje więc tendencja do stosowania prostowników wielopulsowych [5].

Wydajność energetyczną podstacji trakcyjnej można określić za pomocą charakterystyki zewnętrznej  $U_d(I_{PT})$  (rys. 2). Na podstawie przeprowadzonych pomiarów oraz za literaturą branżową np. [8], można powiedzieć, że przy zastosowaniu transformacji jednostopniowej i odpowiednich prostowników trakcyjnych, spadki napięcia na szynach 3 kV DC mają dwu lub trzykrotnie mniejszą wartość jak przy zasilaniu 15 kV.



Rys. 2. Przykładowe charakterystyki zewnętrzne  $U_d(I_{PT})$  podstacji trakcyjnej zasilanej liniami 15 kV lub 110 kV [1]

W obu przedstawionych rozwiązaniach zasilania podstacji trakcyjnej wykorzystywane są diodowe prostowniki trakcyjne. W typowym układzie prostownika trakcyjnego (dwa mostki trójfazowe połączone szeregowo - rysunek 2) nie ma możliwości przepływu energii elektrycznej od systemu DC do krajowego systemu energetycznego.



Rys. 3. Prostownik trakcyjny w układzie mostka szeregowego

W opisywanym koncepcyjnym rozwiązaniu, przekształtnik diodowy o jednokierunkowym przepływie mocy, został zastąpiony przekształtnikiem dwukierunkowym, czyli urządzeniem energoelektronicznym o możliwym dwukierunkowym przepływie mocy. Urządzenie w zależności od istniejącego poziomu napięcia w sieci trakcyjnej, miało możliwość przechodzenia z pracy prostowniczej na pracę falownikową i odwrotnie.

Innym rozwiązaniem również umożliwiającym zwrot energii hamowania rekuperacyjnego do krajowego systemu energetycznego opisywanym w literaturze branżowej np. [2] jest wprowadzenie do podstacji trakcyjnych falowników które pracowałyby równolegle z istniejącymi prostownikami niesterowanymi a załączałyby się tylko gdy napięcie w sieci trakcyjnej przekroczy ustalony poziom.

Aktualnie trwają prace nad efektywnym wykorzystaniem energii pochodzącej z hamowania rekuperacyjnego [3]. Takie firmy jak ABB (system ENVILINETM), Alstom (tzw. HESOP) proponuje swoje systemy do podstacji trakcyjnych w komunikacji miejskiej [7].

## 1. Oszacowanie możliwej do odzyskania energii elektrycznej

Nowoczesny pojazd trakcyjny w procesie hamowania rekuperacyjnego stara się przekazać wytworzoną w procesie hamowania energię elektryczną do sieci trakcyjnej. Jeżeli pomimo zwiększania się napięcia na pantografie do poziomu 3600 V, nie następuje przepływ prądu z pojazdu trakcyjnego do sieci trakcyjnej, energia wytracana jest w rezystorze hamowania. Maksymalny długotrwały poziom napięcia w sieci trakcyjnej 3 kV DC nie może przekraczać wartości 3,6 kV [10], dlatego też pojazdy trakcyjne podczas procesu hamowania rekuperacyjnego nie mogą podwyższać napięcia ponad tą wartość.

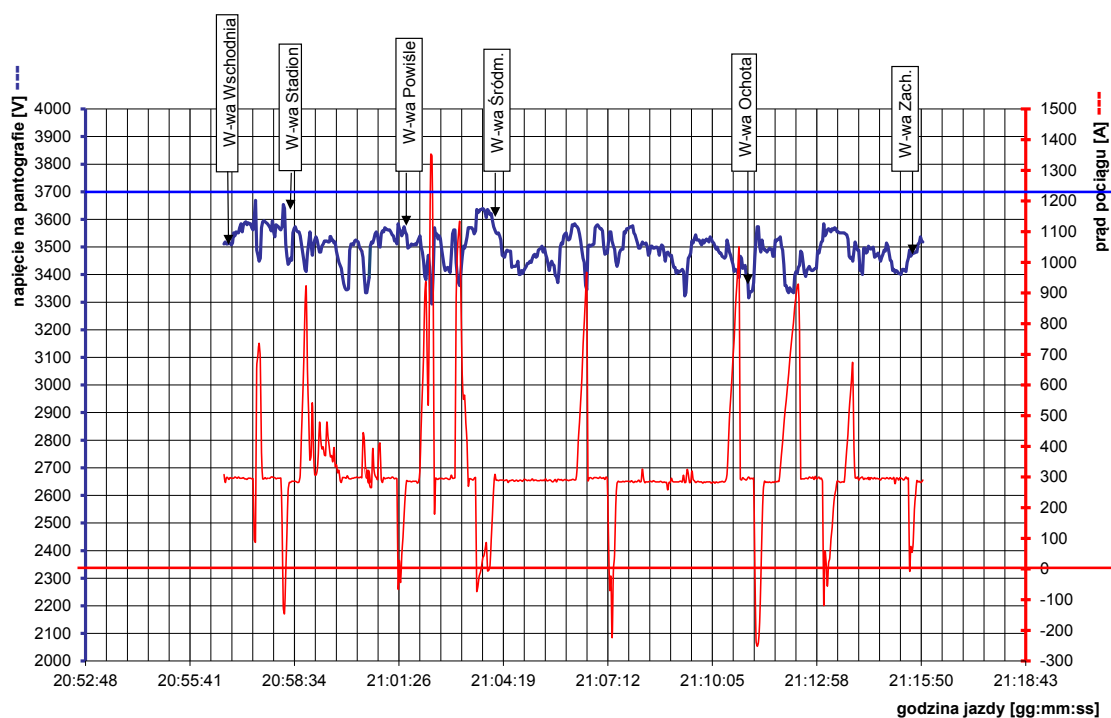
Na potrzeby niniejszego artykułu oszacowano energię wytracaną w rezystorach hamowania pojazdu trakcyjnego, na podstawie zarejestrowanego przebiegu prądu pociągu składającego się z dwóch jednostek ER75, kursującego na odcinku Warszawa Zachodnia Mińsk Mazowiecki (rysunek 4 i 5). Jeżeli wartość prądu ma znak ujemny, oznacza to, że moc pobierana jest ujemna i byłaby ona wytracana w rezystorach hamowania. Ponieważ przedstawione przebiegi były rejestrowane w jednostce trakcyjnej o celowo przeregulowanym poziomie napięcia, przy którym pojazd może jeszcze zwracać energię do sieci trakcyjnej z 3,6 kV do 3,7 kV, cała moc jest zwracana do sieci trakcyjnej. Przy prawidłowo ustawionym poziomie napięcia, moc ta byłaby wytracana na rezystorach hamowania. Opisany sposób jest zastępczy, w pracy docelowej moc tracona na rezystorach hamowania, zostanie zmierzona przez bezpośrednią rejestrację prądu w rezystorach hamowania, przy prawidłowo wyregulowanym poziomie napięcia granicznego na pantografie.

Z załączonych przebiegów prądu (rysunki 4 i 5), można wnioskować, że w obszarach gdzie ruch pociągów jest częsty np. odcinek Warszawa Zachodnia – Warszawa Wschodnia, praktycznie cała moc pochodząca z hamowania rekuperacyjnego może być wykorzystywana przez inne pojazdy, w obszarach których ruch pociągów nie jest tak częsty np. odcinek Warszawa Wesoła - Cisie moc ta jest wytracana w rezystorach hamowania.

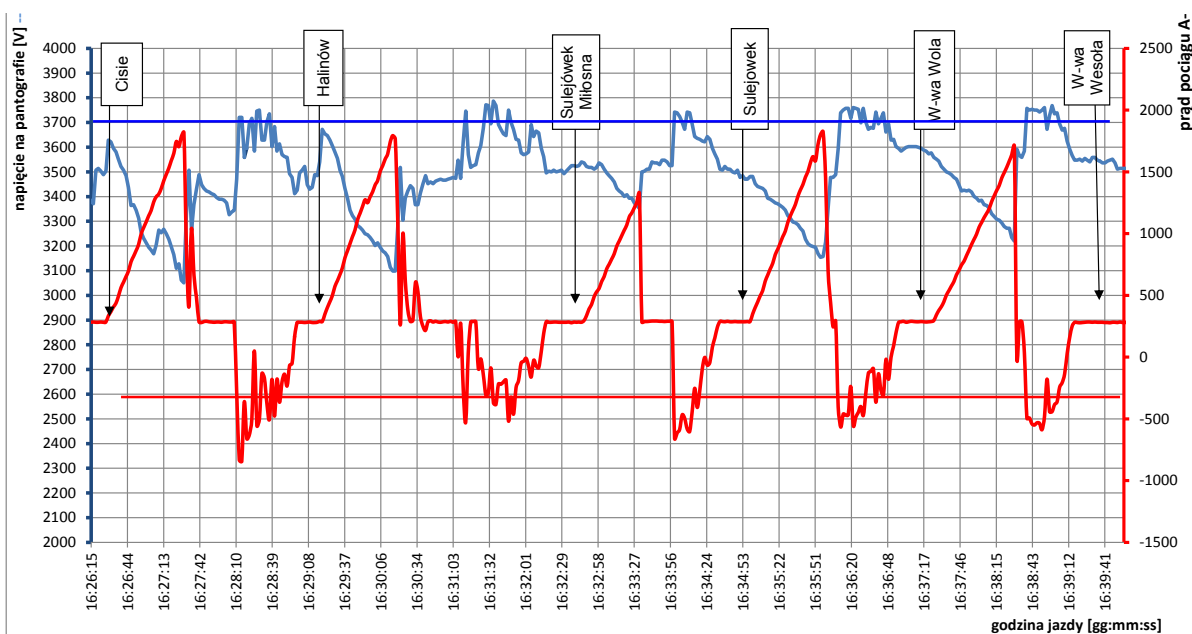
Energia pobrana przez element w przedziale czasu ( $t_1$ ,  $t_2$ ), jest to całka z mocy chwilowej pobieranej przez ten element.

$$w(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \quad (1)$$

Na analizowanym odcinku o długości 12 km wytracona energia w rezystorach hamowania wynosi 170 kWh.



Rys. 4. Wartość napięcia i prądu pociągu złożonego z jednostek trakcyjnych 2 x ER75 na odcinku Warszawa Zachodnia – Warszawa Wschodnia



Rys. 5. Wartość napięcia i prądu pociągu złożonego z jednostek trakcyjnych 2 x ER75 na odcinku Warszawa Wesola – Cisie

Znając energię traconą w rezystorach hamowania, na podanym odcinku można oszacować dobowe straty energii elektrycznej w rezystorach hamowania na całym odcinku Warszawa Wesola – Mińsk Mazowiecki. Na odcinku tym w ciągu doby uruchamianych jest 53 pary pociągów Kolei Mazowieckich. Z prostych przeliczeń wynika że dla tego odcinka równego 24 km dobowe straty energii w rezystorach hamowania wyniosą.

$$\Delta W_{Rh} = 170 \cdot 2 \cdot 106 \quad (2)$$

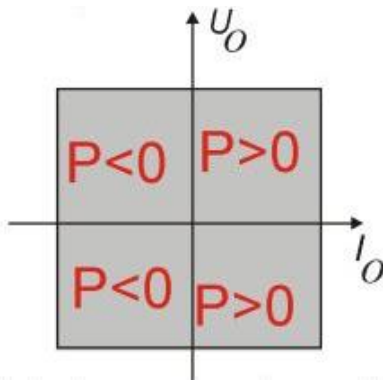
$$\Delta W_{Rh} = 36040 \text{ kWh}$$

Oczywiście nie można tutaj mówić o dokładnym wyliczeniu, gdyż część tej energii zostałaby na pewno wykorzystana przez inne pojazdy trakcyjne, duże znaczenie ma również kierunek jazdy, jest to więc przybliżony szacunek, według autora zachęcający jednak do zajęcia się problemem, zwłaszcza w dobie nawoływania i uświadamiania do konieczności oszczędzania energii.

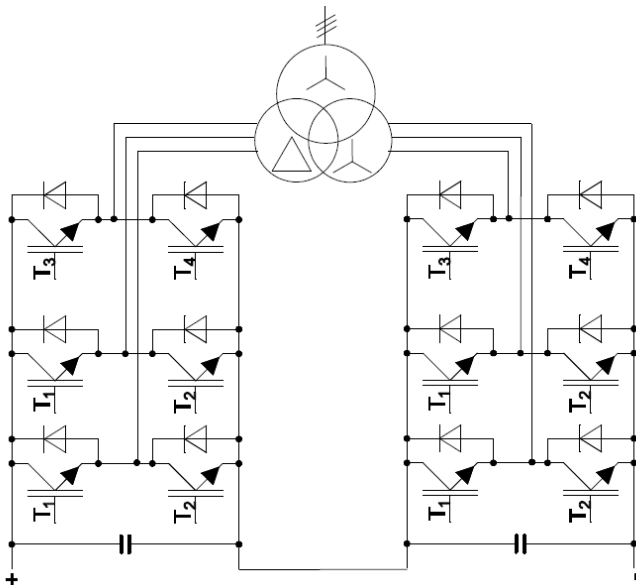
## 2. Przekształtnik dwukierunkowy

Klasyfikację układów przekształtnikowych można wykonać w oparciu o usytuowanie obszaru mocy przekształtnika w układzie współrzędnym prąd i napięcie wyjściowe. Dla przekształtnika czterokwadrantowego możliwy obszar mocy zawiera się w czterech ćwiartkach płaszczyzny I-U (rysunek 6).

Obecnie energoelektronika umożliwia już budowę przekształtników sterowanych, opartych o tranzystory IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) o mocach wystarczających do zastosowań w podstacjach trakcyjnych. Łącząc strukturę dwóch mostków trójfazowych w układ szeregowy, powstanie struktura która mogłaby być wykorzystana w przekształtniku do podstacji trakcyjnych (rysunek 7).

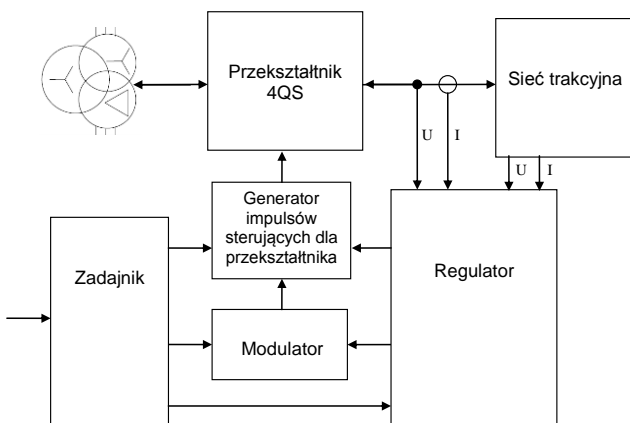


Rys. 6. Przyporządkowanie kwadrantów pracy w przekształtniku dwukierunkowym przepływie mocy na płaszczyźnie I-U



Rys. 7. Proponowana struktura przekształtnika do podstacji trakcyjnej

Na rysunku 8 przedstawiono proponowany schemat blokowy kompletnego przekształtnika trakcyjnego dla podstacji trakcyjnych.



Rys. 8. Schemat blokowy przekształtnika dwukierunkowego

### 3. Modelowanie przekształtnika

W pracy docelowej zostanie przeprowadzone modelowanie przekształtnika dwupoziomowego i trójpoziomowego. W przekształtniku dwupoziomowym istnieje tylko możliwość przełączania pomiędzy maksymalnym i minimalnym napięciem. Modelowanie i budowa takiego przekształtnika jest prostsza od trójpoziomowego, jednak posiada wady z których najważniejsza to wysoka zawartość harmonicznych. Energia oddawana do sieci publicznej musi spełniać wymagania jakościowe podane w [11], z których najważniejszym parametrem jest współczynnik zawartości harmonicznych THD. Przy pracy prostownikowej urządzenie pracowałoby w trybie prostownika 12-pulsowego, który jest wystarczający do zastosowań trakcyjnych. Należy również rozpatrywać rezystancję wewnętrzną, gdyż zgodnie z charakterystyką zewnętrzną podstacji trakcyjnej (rysunek 2), rodzaj zastosowanego przekształtnika ma podstawowe znaczenie na sztywność charakterystyki. Zgodnie z charakterystyką zewnętrzną, pomimo transformacji jednostopniowej i dużej mocy zwarciowej, przy zastosowaniu prostownika o dużej rezystancji wewnętrznej, kształt charakterystyki ma największe nachylenie.

### 4. Opis proponowanej metody modelowania

Wyniki przykładowego modelowania przekształtnika przedstawiono na rysunkach 9, 10, 11. Przebiegi przedstawiają pracę falownikową. Modelowanie wykonane w pakiecie Mathcad wykorzystując algorytm kształtowania harmonicznej podstawowej z zastosowaniem funkcji opisanej w patencie [9].

Metoda ta jest metodą alternatywną wytwarzania impulsów sterujących w stosunku do metod takich jak: PPM (Pulse Phase Modulation) – modulacja fazy (położenia) impulsu, PAM (Pulse Amplitude Modulation) – modulacja amplitudy impulsu, PFM (Pulse Frequency Modulation) – modulacja częstotliwości impulsów, PWM (Pulse Width Modulation) – modulacja szerokości impulsu. Wszystkie te metody są szeroko opisane w literaturze branżowej np. [1, 6].

Wspomniana tutaj metoda alternatywna polega na wyliczaniu przebiegu sterującego jako dystrybucji złożonej z szeregu zmodulowanych amplitudowo harmonicznych. Równanie generacji przebiegu dla przekształtnika dwupoziomowego przyjmuje postać:

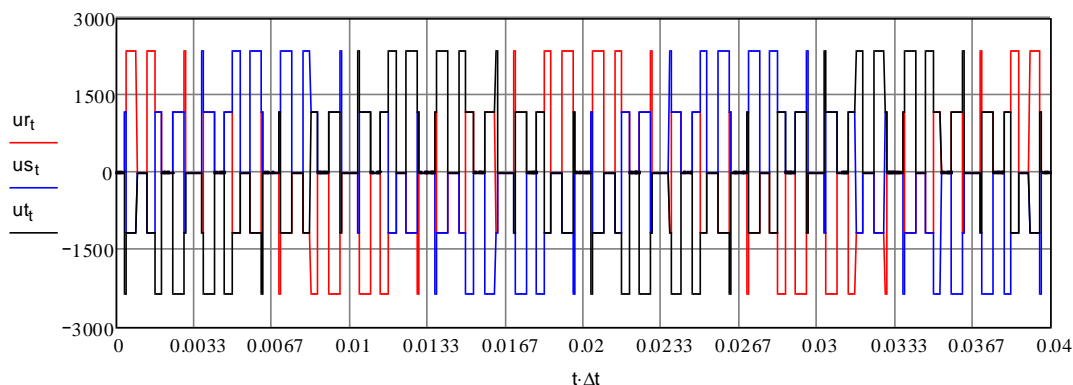
$$m(t) = m_0 + 0,5m_1 \cos(\omega t - \phi - \Psi)$$

$$tsd(t) = m(t) + \frac{2}{\pi} \sum_n \frac{\sin(n \cdot \pi \cdot m(t))}{n} \cdot \cos[n \cdot k \cdot (\omega \cdot t - \Psi - \varepsilon)] \quad (3)$$

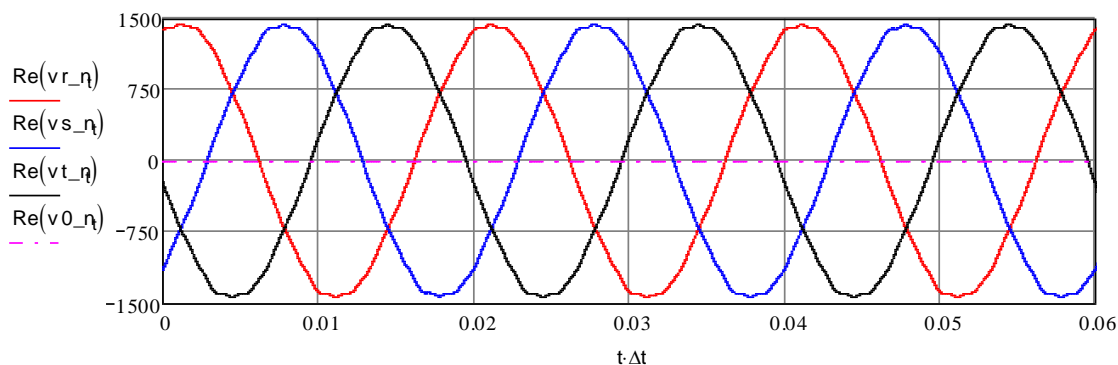
gdzie  $m(t)$  jest funkcją modulującą, która jest zarazem zadaniem kształtem sygnału wyjściowego przekształtnika,  $t$  - czas,  $\omega$  - pulsacja żądanego przebiegu,  $k$  - ilość impulsów przebiegu PWM na jeden okres przebiegu żądanego,  $m_0$  - składowa stała funkcji modulującej – wpływa na składową stałą sygnału wyjściowego,  $m_1$  - amplituda składowej zmiennej,  $\phi$  - kąt przesunięcia fazowego przebiegu wyjściowego,  $\Psi$  - kąt przesunięcia fazowego przebiegu wyjściowego razem z impulsami przekształtnika,  $\varepsilon$  - kąt przesunięcia fazowego impulsów przekształtnika,  $n$  - ilość harmonicznych składających się na prostokąt.

Zaprezentowane przebiegi (rysunki 9 i 10) przedstawiają modelowanie jednej połówki przykładowego przekształtnika. Na rysunku 11 przedstawiono analizę w dziedzinie częstotliwości otrzymanych przebiegów prądu i napięcia.

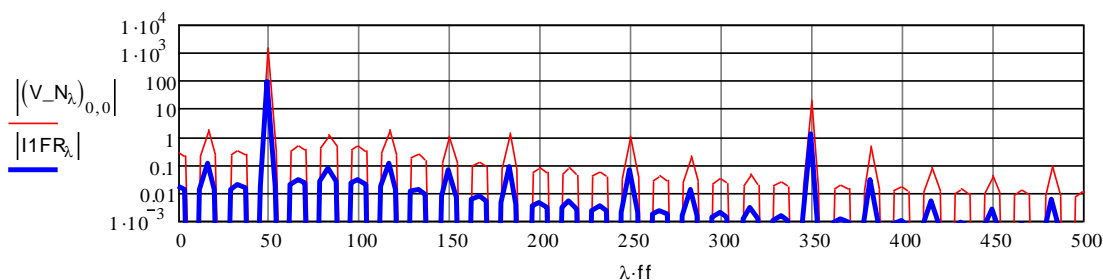
Podczas próby modelowania powstaje szereg problemów, które należy rozwiązać, między innymi odpowiednia synchronizacja pracy obu części przekształtnika, dobór filtrów, sposób wyłączania ewentualnych zwarć w sieci trakcyjnej. Ponieważ przekształtnik wymaga dużej pojemności, powstałe zwarcie musiałoby być wyłączane bardzo szybko, dotychczasowe czasy wyłączania wyłączników szybkich rzędu 20, 30 ms nie są wystarczające.



Rys. 9. Przebiegi czasowe bez filtrów i obciążenia napięcia przekształtnika w trybie pracy falownikowej



Rys. 10. Przebiegi czasowe harmonicznej podstawowej napięcia w trybie pracy falownikowej



Rys. 11. Spektrum napięcia i prądu 1 fazy

## 5. Wnioski

W niniejszym artykule przedstawiono koncepcję zastosowania przekształtnika dwukierunkowego w kolejowych podstacjach trakcyjnych systemu zasilania trakcyjnego 3 kV DC. Z przedstawionych wstępnych oszacowań możliwej do odzyskania energii elektrycznej autor uważa, że problemem warto się zająć, podjąć próbę modelowania a w przypadku zachęcających wyników, próbę budowy takiego przekształtnika.

## Literatura

- [1] Barlik R., Nowak M.: Poradnik inżyniera energoelektronika. WNT, Warszawa 1998.
- [2] Bael C.H., Han M.S., Kim Y.K., Choi C.Y.: Korea Railroad Research Institute. [www.researchgate.net/publication/4214376\\_Simulation\\_Study\\_of\\_Regenerative\\_Inverter\\_for\\_DC\\_Traction\\_Substation](http://www.researchgate.net/publication/4214376_Simulation_Study_of_Regenerative_Inverter_for_DC_Traction_Substation) [02.15.2015].
- [3] Cornic D.: Alstom Transport. [www.researchgate.net/publication/224204695\\_Efficient\\_recovery\\_of\\_braking\\_energy\\_through\\_a\\_reversible\\_dc\\_substation](http://www.researchgate.net/publication/224204695_Efficient_recovery_of_braking_energy_through_a_reversible_dc_substation) [02.15.2015].
- [4] Januszewski S., Świątek H., Zymmer K.: Półprzewodnikowe przyrządy mocy. Właściwości i zastosowania. WKiŁ, Warszawa, 1999.
- [5] Korzycki E., Mazurek P., Świątek H., Zymmer K.: Uwarunkowania i zalety stosowania w trakcji elektrycznej 18-24 pulsowych zespołów prostownikowych. Czasopismo Techniczne E. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. 1-E/2007, 95-109.
- [6] Nowak M., Barlik R.: Układy sterowania i regulacji urządzeń energoelektronicznych, WSiP Warszawa 2008.

- [7] Raulin B.: HESOP – innowacyjna podstacja trakcyjna z możliwością zwrotu energii rekuperacji do sieci elektroenergetycznej. Materiały XVI Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2014, Zakopane 2014.
- [8] Szelaż A.: Wpływ napięcia w sieci trakcyjnej 3 kV DC na parametry energetyczno-trakcyjne zasilanych pojazdów. Instytut Naukowo-Wydawniczy "SPATIUM", Warszawa 2013.
- [9] Skarpetowski G.: Sposób sterowania elektrycznym zaworem przekształtnika, Rzeczpospolita Polska, Patent nr 168286.
- [10] PN - EN 50163. Zastosowania kolejowe Napięcia zasilania systemów trakcyjnych.
- [11] PN - EN 50160. Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.

Mgr inż. Włodzimierz Kruczek  
e-mail: wkruczek@ikolej.pl

Od 2007 r. pracownik Zakładu Elektroenergetyki Instytutu Kolejnictwa. Specjalista w zakresie miernictwa elektrycznego, pomiarów termowizyjnych, ochrony przeciwporażeniowej w systemach trakcyjnych, pojazdach trakcyjnych i wagonach osobowych. Od 2010 r. kierownik sekcji laboratoryjno pomiarowej w Zakładzie Elektroenergetyki. Zajmuje się również badaniami wyłączników szybkich, przetwornic statycznych, sieci trakcyjnej i odbieraków prądu pojazdów trakcyjnych i ich współpracy z siecią trakcyjną. Uczestnik studiów doktoranckich niestacjonarnych w Instytucie Elektrotechniki.

otrzymano/received: 23.09.2014

przyjęto do druku/accepted: 15.02.2015

