

Włodzimierz Jefimowski, Radosław Burak-Romanowski

## Badania laboratoryjne nad wpływem podstacji trakcyjnej prądu przemiennego z transformatorem Scotta na jakość energii elektrycznej w sieci zasilającej

Niniejszy artykuł przedstawia wyniki badań wpływu autotransformatorowego systemu zasilania 2 x 25 kV z transformatorem Scotta na jakość energii elektrycznej w publicznej sieci zasilającej. Badania oparte były na laboratoryjnym modelu fizycznym autotransformatorowego systemu 2 x 25 kV. Model fizyczny składa się z modelu podstacji trakcyjnej z transformatorem Scotta, indukcyjnościami sieci trakcyjnej, szyn i dodatkowego zasilacza, autotransformatorów i 2 typów pociągów. Badania obejmują jednocześnie wszystkie czynniki mające wpływ na jakość energii elektrycznej, mianowicie asymetrię prądową, zawartość wyższych harmonicznych i zmiany mocy pobieranej.

Systemy zasilania prądu przemiennego mają zaburzający wpływ na jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych zasilających te systemy. Jest to spowodowane kilkoma czynnikami. Pierwszy z nich, przez wielu badaczy i inżynierów rozpatrywany jako najbardziej istotny w systemach prądu przemiennego, to asymetria obciążenia [1, 2, 7–12, 14].

Istnieje wiele rozwiązań łagodzących wpływ asymetrii obciążenia na parametry jakości energii elektrycznej. Najbardziej rozpowszechnionym rozwiązaniem, ze względu na koszty, jest zastosowanie transformatora Scotta lub transformatora V. Specyfika tych rozwiązań była badana przez wielu autorów [3, 15]. Innym czynnikiem mającym wpływ na jakość energii elektrycznej jest zawartość harmonicznych w prądzie pobieranym przez pojazdy trakcyjne; a w wielu krajach zdecydowana część elektrycznego taboru wyposażona jest w prostowniki diodowe lub tyrystorowe [16]. Ostatnim czynnikiem, będącym jednocześnie charakterystycznym dla wszystkich systemów trakcji elektrycznej, jest wysoka i ciężka do przewidzenia wartość mocy szczytowej [13]. Większość opublikowanych badań na temat wpływu systemów zasilania prądu przemiennego na jakość energii elektrycznej skupia się tylko na jednym wybranym zjawisku, podczas gdy zjawiska te występują jednocześnie w tych samych systemach.

Należy nadmienić, że wpływ każdego z wyżej wymienionych czynników zależy od mocy zwarciowej w punkcie przyłączenia podstacji trakcyjnej do sieci elektroenergetycznej. Zatem rozwiązania łagodzące oddziaływanie wyżej wymienionych czynników na jakość energii są stosowane wówczas, gdy moc zwarciowa jest zbyt niska, aby spełnione były kryteria dotyczące parametrów jakości energii w punkcie przyłączenia podstacji trakcyjnej. Na terenie Unii Europejskiej obowiązują normy dotyczące parametrów jakości energii elektrycznej: EN 50160 [4] oraz IEC 61000-3-6.

### Model zelektryfikowanej linii jako odbioru zakłócającego

W niniejszym rozdziale przedstawiono model systemu zasilania prądu przemiennego jako źródła zakłóceń z punktu widzenia publicznej sieci zasilającej. Całość systemu składa się z podsystemów – modelu linii zasilającej, transformatora trakcyjnego i pojazdu.

### Model podstacji trakcyjnej jako odbiór niesymetryczny

Sieć trakcyjna w systemach prądu przemiennego jest zasilana przez jednofazowe źródło napięcia, podczas gdy sieć zasilająca jest źródłem trójfazowym. Zatem w ogólności podstacja trakcyjna przekształca moc systemu trójfazowego na moc systemu jednofazowego. W rozdziale zawarto analizę transformatora jednofazowego i transformatora Scotta. Rys. 1a i 1b przedstawiają odpowiednio schemat transformatora jednofazowego i transformatora Scotta.

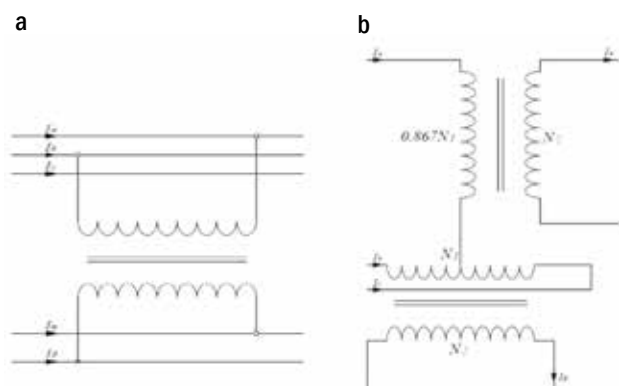
### Transformator jednofazowy

Transformator jednofazowy jest powszechnie stosowany na podstacjach trakcyjnych prądu przemiennego ze względu na niskie koszty. Transformator ten pobiera prąd z 2 faz; składowa przeciwna w prądzie pobieranym przez ten transformator jest równa składowej zgodnej, zatem współczynnik zniekształcenia w prądzie pobieranym przez ten transformator może być wyrażona wzorem 1 [15]. Z punktu widzenia asymetrii pobieranego prądu jest to najmniej korzystne rozwiązanie.

$$\varepsilon = \frac{I_2}{I_1} = 1 \quad (1)$$

### Transformator Scotta

Transformator Scotta jest najpowszechniejszym rozwiązaniem prowadzącym do zmniejszenia zawartości składowej przeciwniej w prądzie pobieranym przez podstację trakcyjną. Transformator ten składa się z 2 transformatorów jednofazowych: M i T. Wartości skuteczne napięć w uzwojeniach wtórnych transformatora Scotta są takie same, natomiast przesunięcie fazowe między nimi wynosi 90°, stosunek przekładni transformatora M i T wynosi  $\sqrt{3}/2$ . Współczynnik zniekształcenia pobieranego prądu może być wyrażony wzorem 2 [15]. Reprezentacja graficzna wzoru (2) została przedstawiona na rys. 2.



Rys. 1. Schemat transformatora: a) jednofazowego, b) Scotta

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{1 + \eta^2 - 2\eta \cos(\varphi_\alpha - \varphi_\beta)}}{\sqrt{1 + \eta^2 + 2\eta \cos(\varphi_\alpha - \varphi_\beta)}} \quad (2)$$

gdzie:  
 $\eta$  – stosunek obciążenia obydwu uzwojeń wtórnych;  
 $\varphi_\alpha, \varphi_\beta$  – kąty przesunięcia fazowego między napięciem  $U_a$  po stronie pierwotnej a napięciami po stronie wtórnej.

Jeśli mamy dane wartości skuteczne prądów lub napięć poszczególnych faz, to współczynnik asymetrii może być wyznaczony przy pomocy wzoru [7]:

$$\varepsilon_U = \frac{U_2}{U_1} = \sqrt{\frac{U_{L1}^2 + U_{L2}^2 + U_{L3}^2 - 4\sqrt{3}s}{U_{L1}^2 + U_{L2}^2 + U_{L3}^2 + 4\sqrt{3}s}} \quad (3)$$

gdzie:

$$s = \sqrt{b(b - U_{L1})(b - U_{L2})(b - U_{L3})} \quad (4)$$

gdzie:

$$b = \frac{1}{2}(U_{L1} + U_{L2} + U_{L3}) \quad (5)$$

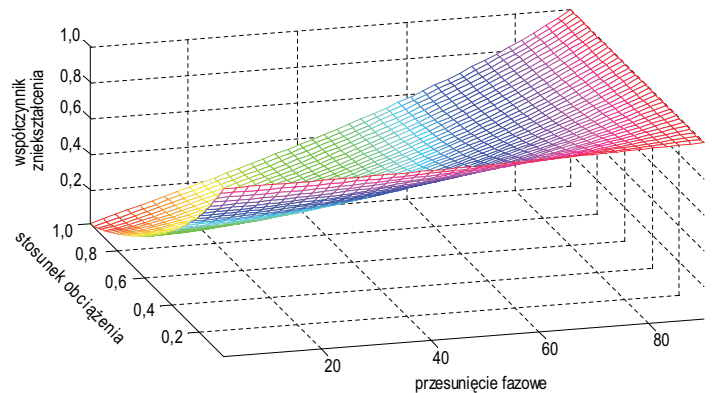
### Model pojazdu trakcyjnego, jako źródło harmonicznych prądu

Zawartość harmonicznych w prądzie pobieranym przez pojazd trakcyjny jest ściśle związana z typem danego pojazdu [5]. Locomotywy nowych generacji z przekształtnikiem 4QS i silnikami asynchronicznymi pobierają prąd o stosunkowo niskiej zawartości harmonicznych [10], podczas gdy starsze lokomotywy z prostownikiem diodowym lub tyrystorowym pobierają prąd o znacznie większej zawartości harmonicznych [5].

### Model laboratoryjny

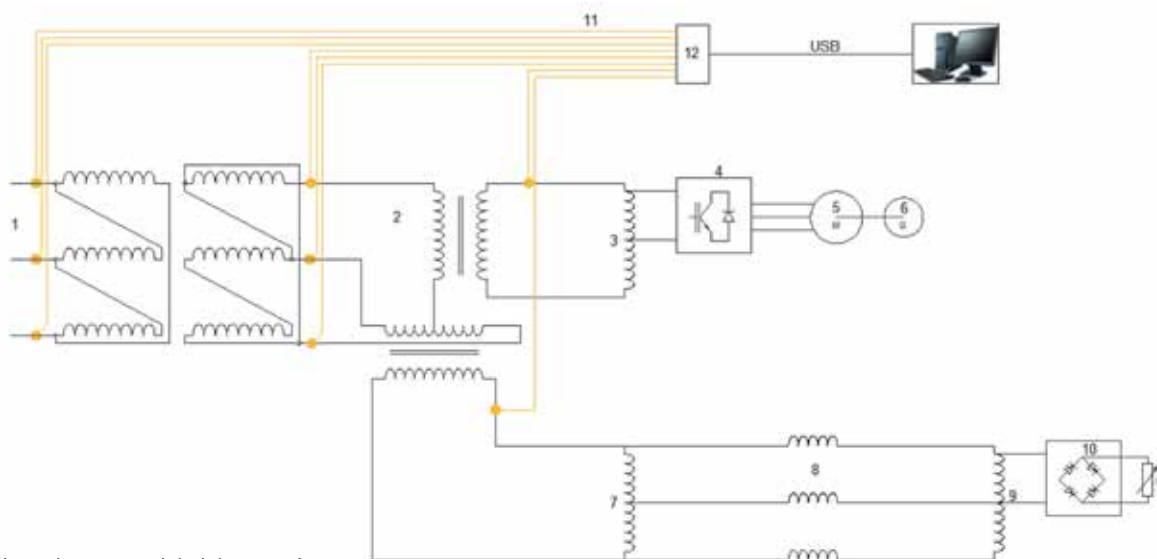
Fizyczny model laboratoryjny odwzorowuje autotransformatory system 2 x 25 kV z 2 typami pojazdów trakcyjnych – z prostownikiem diodowym i przekształtnikiem IGBT. Ogólny schemat modelu przedstawiono na rys. 3.

Model składa się z transformatora obniżającego napięcie (1) Dd0 o napięciach znamionowych 400/230 V i mocy znamionowej 2,7 kVA. Do strony wtórnej tego transformatora przyłączony jest transformator Scotta (2) 230/230 V o mocy znamionowej 2,7 kVA; wyposażony jest w zaczepekową regulację napięcia na

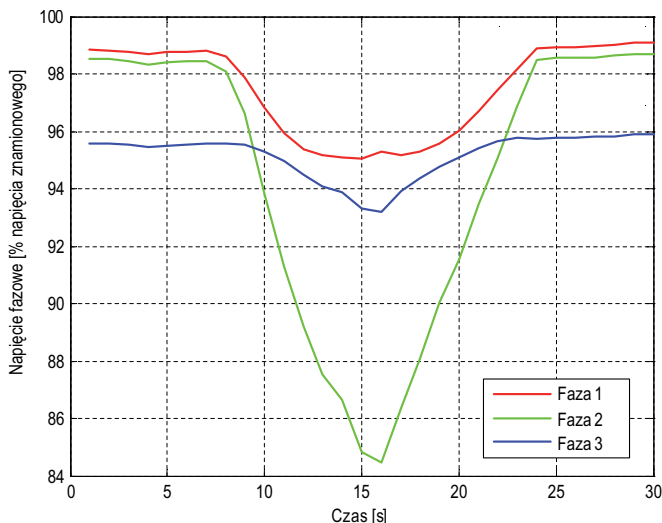


Rys. 2. Współczynnik asymetrii prądowej w transformatorze Scotta

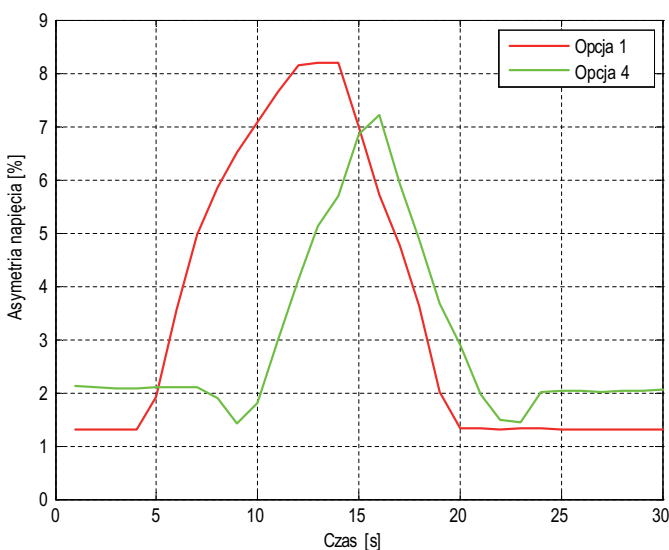
uzwojeniach pierwotnych. Pierwsze z uzwojeń wtórnych transformatora Scotta przyłączone jest do autotransformatora AT1 (3), który zasila przekształtnik (4) z trójfazowym silnikiem asynchronicznym (5) sprzężonym mechanicznie z prądnicą prądu stałego (6). Obciążenie mechaniczne silnika może być zmieniane poprzez zmianę prądu wzbudzenia prądnicy, a prędkość obrotowa sterowana jest przekształtnikiem (4). To uzwojenie transformatora Scotta zasila odbiór, jakim jest pojazd nowej generacji z silnikiem asynchronicznym, znajdującym się przy podstacji trakcyjnej. Drugie uzwojenie wtórne transformatora Scotta przyłączone jest do pary autotransformatorów AT2 (7) i AT3 (9), pomiędzy którymi przyłączone są dławiki (8) modelujące reaktancje sieci trakcyjnej, szyn i dodatkowego zasilacza odpowiednio. Indukcyjności dławików dobrane są w ten sposób, aby w skali modelu odpowiadały reaktancji elementów o długości 10 km między autotransformatormi. Autotransformator AT3 podłączony jest do prostownika diodowego obciążonego rezystorem o zmiennej rezystancji. Model wyposażony jest w system pomiarowy i zbierania danych, pozwalający na pomiar napięć i prądów w punktach zaznaczonych na rys. 3. Pomiar wielkości elektrycznych jest dokonywany przy pomocy przetworników LEM. Sygnały pomiarowe z tych przetworników są wysyłane do wejść analogowych karty pomiarowej (12), która jest przyłączona do komputera osobistego przy pomocy przewodu USB. Oprogramowanie zainstalowane na komputerze pozwala na automatyczne zapisywanie wyników pomiarowych, jak również na podstawową obróbkę danych po-



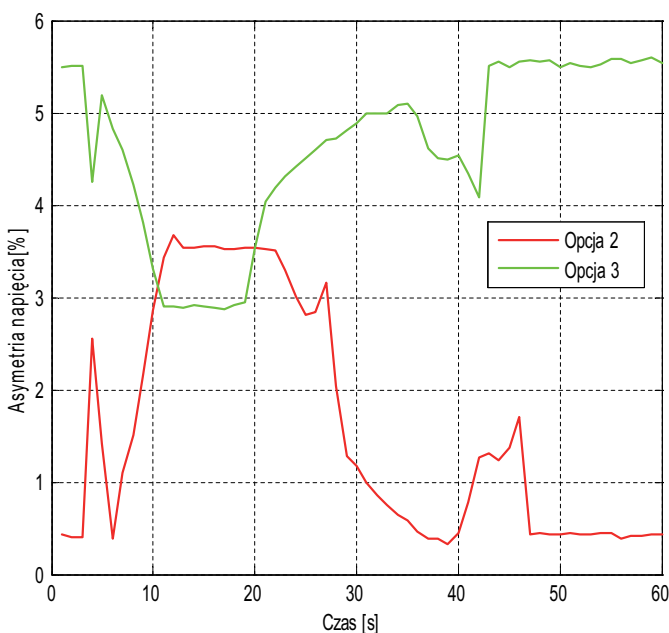
Rys. 3. Ogólny schemat modelu laboratoryjnego



Rys. 4. Przebieg wartości skutecznej napięcia w czasie



Rys. 5. Współczynnik zniekształcenia w opcji 1 i 4



Rys. 6. Współczynnik zniekształcenia w opcji 2 i 3

miarowych, w szczególności wyznaczanie współczynników asymetrii prądowej i napięciowej w oparciu o wzór (3).

## Wyniki badań

Pomiary były wykonywane w różnych wariantach pracy systemu, odwzorowujących charakterystyczne sytuacje w ruchu pociągów, w szczególności:

- 1) prostownik diodowy jest wyłączony, falownik wykonuje cykl pracy odwzorowujący cykl ruchu pojazdu – tryb przyspieszania, jazdy ze stałą prędkością, hamowania;
- 2) falownik jest wyłączony, prostownik diodowy wykonuje cykl pracy zgodny z cyklem ruchu pociągu;
- 3) falownik pracuje, pobierając stałą moc, prostownik diodowy wykonuje cykl pracy zgodny z cyklem ruchu pociągu;
- 4) prostownik pracuje ze stałą mocą, podczas gdy falownik wykonuje cykl pracy odwzorowujący cykl ruchu pojazdu.

Powyższe sytuacje są typowe również z punktu widzenia obciążenia transformatora Scotta. Podczas pierwszej i drugiej opcji tylko jedno uzwojenie wtórne jest obciążone przez odbiór trakcyjny, zaś drugie uzwojenie jest obciążone jedynie prądem jałowym autotransformatorów. Natomiast w opcji trzeciej i czwartej obydwa uzwojenia są obciążone, jednocześnie zmienia się stosunek obciążeń 2 uzwojeń.

Niniejszy artykuł skupia się na parametrach jakości energii elektrycznej, które były mierzone w punkcie przyłączenia transformatora Scotta (2) do transformatora obniżającego napięcie (1). Miejsce to zostało wybrane jako punkt przyłączenia podstacji trakcyjnej do systemu elektroenergetycznego, również ze względu na stosunkowo niską moc zwarciovą w tym punkcie. Wyniki zostały przedstawione jako parametry jakości energii elektrycznej [zob. 4].

## Wahania napięcia

Najniższa wartość napięcia została zanotowana w opcji 3. Na rys. 4 przedstawiono przebieg czasowy napięcia w tej opcji. Najniższa wartość napięcia wyniosła 84,4% napięcia znamionowego.

## Asymetria napięciowa

Rys. 5–6 przedstawiają porównanie współczynnika zniekształcenia pomiędzy parami opcji, obliczonego według wzoru (3).

## Harmoniczne napięcia

Rys. 7–8 przedstawiają przebiegi czasowe harmonicznym napięcia w pierwszej fazie w czasie w opcjach 2 i 3.

## Wnioski

Należy zaznaczyć, że czynniki w systemie trakcji elektrycznej prądu przemiennego, wymienione w rozdz. 2, oraz efekty przez nie wywołane są wzajemnie zależne.

Współczynnik asymetrii napięciowej w badanych sytuacjach nie jest zależny od stosunku prądów uzwojeń wtórnych transformatora Scotta, zgodnie ze wzorem (2). Świadczy o tym między innymi przykład, w którym w opcji 3 maksymalny współczynnik asymetrii napięciowej wynosi 7,1 %, podczas gdy w opcji 1 wynosi 3,7 %. Sytuacja ta występuje w warunkach, kiedy stosunek obciążeń uzwojeń wtórnych transformatora Scotta jest bliski jedności w opcji 3, podczas gdy w opcji 4 jest bliski zeru. Wskazuje to, że przy wysokiej zawartości harmonicznym prądu pobieranego przez pojazdy trakcyjne model transformatora Scotta oparty o wzór (2) powinien być uzupełniony.

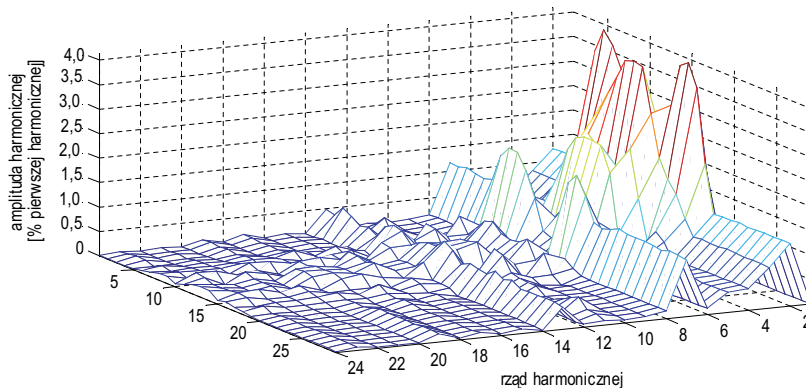
Przedstawione wyniki zawartości harmonicznym w napięciu zasilania wskazują, że harmoniczne pochodzące z różnych źródeł

wzajemnie się kompensują. Świadczy o tym na przykład fakt, iż druga harmoniczna napięcia w opcji 3 jest mniejsza podczas maksymalnej mocy prostownika diodowego niż podczas niepełnego obciążenia.

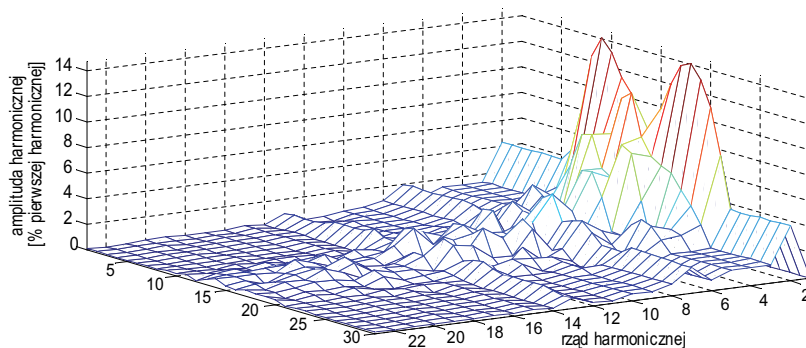
W dalszych planach przewiduje się budowę modelu komputerowego systemu rzeczywistego i systemu laboratoryjnego opisanego w niniejszym artykule. Model laboratoryjny ma służyć do sprawdzenia poprawności modelu komputerowego, który wówczas będzie wykorzystany do dalszych badań dotyczących wpływu systemu zasilania prądu przemiennego z transformatorem Scotta na jakość energii elektrycznej.

### Bibliografia:

- Altus J., Novak M., Otcenasova A., Pokorny M., Szelać A., *Quality parameters of electricity supplied to electric railways*, „Scientific Letters of the University of Žilina-Communications” 2001, No. 2–3.
- Barnes R., Wong K. T., *Unbalance and harmonic studies for the Channel Tunnel railway system*, „Electric Power Applications, IEE Proceedings B” 1991, Vol. 138, No. 2.
- Chenxi D., Yuanyuan S., *Investigation of the Imbalance Current Compensation for Transformers Used in Electric Railways*, Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Asia-Pacific 2010.
- EN 50160:2010 – *Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks*.
- Firpo P., Fracchia M., Savio S., *Locomotive drive harmonic pollution in AC traction systems*, Conference Proceedings, IEEE International Symposium, Budapest 1993.
- IEEE Standard 1159-2005, *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5154067&filter=AND%28p\\_Publication\\_Number:5154052%29](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5154067&filter=AND%28p_Publication_Number:5154052%29) (dostęp z dnia 12.10.2015 r.).
- Kowalski Z., *Jakość energii elektrycznej*, Politechnika Łódzka, Łódź 2008.
- Matta V., Kumar G., *Unbalance and voltage fluctuation study on AC traction system*: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=6857933> (dostęp z dnia 12.10.2015 r.).
- Ogunsola A., Mariscotti A., *Electromagnetic Compatibility in Railways. Analysis and Management*, Springer, Berlin 2013.
- Shu-ming L., Dong-xin C., Qiong-lin L., Xiao-dong Z., Xiao-peng Y., *The Impact of 350 km/h High-Speed Railway to Grid Power Quality*, Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Asia-Pacific 2012.
- Szelać A., Mierzejewski L., *Ground Transportation Systems*, [in:] *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. Supplement 1*, John Wiley & Sons Inc., 1999.
- Szelać A., Patoka M., *Some aspects of impact analysis of a planned new 25 kV AC railway lines system on the existing 3 kV DC railway system in a traction supply transition zone*, SPEEDAM, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion Ischia, 2014.
- Takeuchi H., Goodman C., Sone S., *Peak demand reduction techniques when starting under moving block signaling*, Developments in Mass Transit Systems, International Conference, London 1998.



Rys. 7. Przebieg harmonicznych napięcia w czasie w opcji 2



Rys. 8. Przebieg harmonicznych napięcia w czasie w opcji 3

- Tien-Trung V., Paleček J., Kolář V., *Influence of AC Electric Traction on Harmonic Distortion in 110 kV Supply Voltage Network: Measurement and Simulation*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2013, No. 89.
- Wang H., Tian Y., Qin-chang G., *Evaluation of negative sequence current injecting into the public grid from different traction substation in electrical railways*, Electricity Distribution – Part 1, CIRED, 20th International Conference and Exhibition, Prague 2009.
- Zupan A., Teklic A. T., Filipovic-Grcic B., *Modeling of 25 kV electric railway system for power quality studies*, EUROCON, IEEE, Zagreb 2013.

### Autorzy:

mgr inż. **Włodzimierz Jefimowski** – Zakład Trakcji Elektrycznej, Instytut Maszyn Elektrycznych, Politechnika Warszawska  
mgr inż. **Radosław Burak-Romanowski** – Biuro Energetyki, PKP Polskie Linie Kolejowe SA

### Laboratory tests on the influence of the power substation with Scott transformer on the energy quality in the supplying grid

The paper presents investigation of the influence of the AC autotransformer power supply system on the energy quality in public grid. The research includes construction of a laboratory model of AC autotransformer railway power supply system. The model consists of power substation with Scott transformer, overhead catenary system with the inductances of the contact wire, parallel feeder and running rails, autotransformers and two trains. The first one with the inverter-asynchronous drive and the second with the diode rectifier and DC motor drive. The influence of the AC autotransformer system on the public grid considering all types of the disturbing influence including voltage unbalance, voltage harmonic generation and power fluctuation in aggregated.