

dr inż. GRZEGORZ WIŚNIEWSKI  
dr inż. MARCIN HABRYCH  
Politechnika Wrocławska

prof. dr hab. inż. BOGDAN MIEDZIŃSKI  
dr inż. ARTUR KOZŁOWSKI  
mgr inż. JULIAN WOSIK  
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG

# Praca transformatorów przekształtnikowych zasilających kopalniane maszyny wyciągowe

*W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących zmian wartości wielkości elektrycznych transformatorów zasilających kopalnianą maszynę wyciągową podczas różnych warunków pracy wyciągu klatkowego. Szczególną uwagę zwrócono na zakres odkształceń przebiegów prądowych i napięciowych oraz związane z nimi wartości strat mocy w transformatorach, powodowanych wpływem wyższych harmonicznych, jak również oddziaływaniem generowanych harmonicznych na sieć zasilającą. Sformułowano odpowiednie wnioski praktyczne.*

## 1. WSTĘP

---

Zastosowanie transformatorów mocy do zasilania układów przekształtnikowych związane jest zawsze z ich narażeniem na oddziaływanie wyższych harmonicznych zarówno prądu, jak i napięcia. Transformator bowiem w takich przypadkach spełnia rolę filtru zaporowego ze wszystkimi tego konsekwencjami energetycznymi wpływającymi w sposób degradujący na jego trwałość użytkową [1, 3, 4, 5, 6]. Szczególnie wrażliwe są coraz powszechniej stosowane transformatory „suche” (żywiczne) z wymuszonym chłodzeniem powietrznym po przekroczeniu określonej wartości temperatury, odpowiednio niższej od dopuszczalnej długotrwale dla izolacji uzwojeń (np. 130°C). Znaczne i pojawiające się często gradienty temperatury podczas pracy maszyny wyciągowej wpływają niekorzystnie nie tylko na właściwości izolacyjne uzwojeń i rdzenia, lecz również są źródłem znacznych naprężeń mechanicznych w materiałach współpracujących ze sobą elementów uzwojeń i rdzenia. Jest to szczególnie istotne przy wzroście zawartości wyższych harmonicznych i może w efekcie doprowadzić do przedwczesnego uszkodzenia się transformatora [1, 6, 2]. Dobór transformatora tzw.

„przewymiarowanego” (tj. o wartości mocy znamionowej wyższej od wymaganej dla układu napędowego) rozwiązuje problem tylko częściowo, a przy tym jest on bardzo kosztowny. Nie zapobiega ponadto przenoszeniu się wyższych harmonicznych do sieci zasilającej [2].

Badania wykonano dla wybranego kopalnianego wyciągu klatkowego w warunkach jego stosunkowo niewielkiego obciążenia, nieprzekraczającego ok. 50% mocy znamionowej. Związane to było z dostępnością wyciągu do badań jedynie w dniu wolnym od pracy.

Szczególną uwagę zwrócono na zakres i charakter odkształceń przebiegów prądowych i napięciowych oraz związane z nimi wartości strat mocy w transformatorach, jak również na efekt przenoszenia wyższych harmonicznych do sieci zasilającej. Sformułowano odpowiednie wnioski praktyczne.

## 2. ZAKRES I SPOSÓB PRZEPROWADZENIA BADAŃ

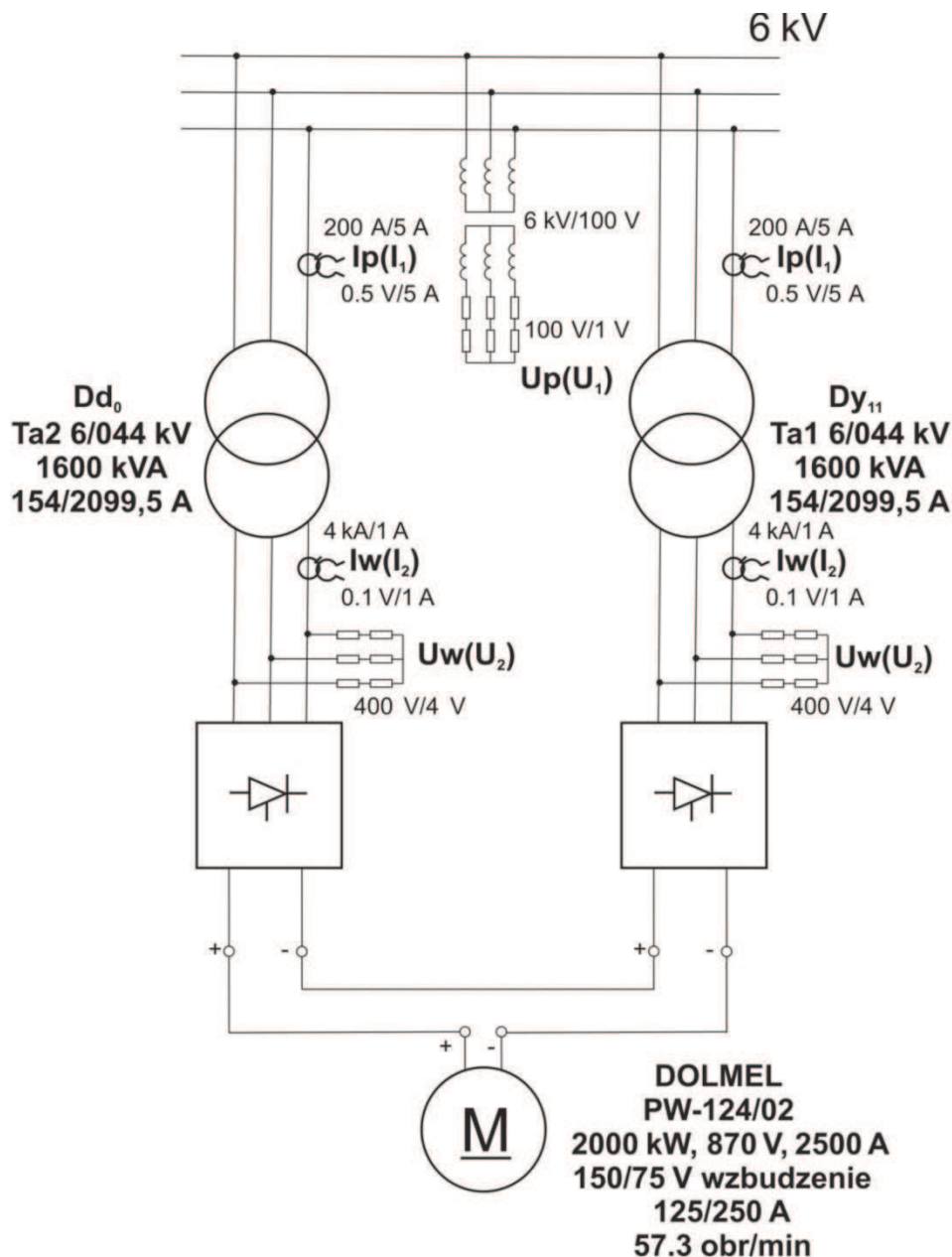
---

Do badań wytypowano układ zasilania maszyny wyciągowej klatkowej składający się z dwóch transformatorów suchych o takich samych parametrach

znamionowych prądów i napięć (i takim samym okresie eksploatacji), ale o różnych grupach połączeń, wynoszących odpowiednio  $Dd_0$  oraz  $Dy_{11}$ . Napęd maszyny wyciągowej stanowił silnik prądu stałego obcowzbudny, zasilany z szeregowo połączonych przekształtników [7]. Napięcia fazowe i prądy fazowe mierzono i rejestrowano przy pomocy karty pomiarowej oraz układu komputerowego w jednej i tej samej fazie po obu stronach transformatorów, tak jak pokazano to na rys. 1.

Z uwagi na możliwość rewersyjnej pracy maszyny wyciągowej badania wykonano dla jazdy klatki za-

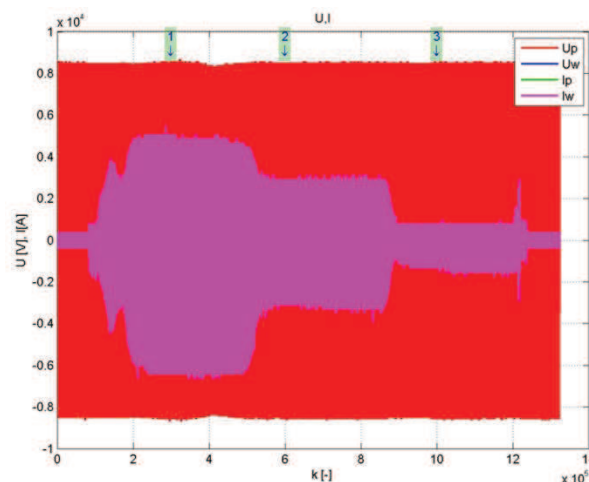
równo w dół, jak i do góry dla trzech ustalonych wartości prędkości, wynoszących odpowiednio 1 m/s (tzw. prędkość rewizyjna), 6 m/s oraz 12 m/s (prędkość maksymalna). Analizę zawartości wyższych harmonicznych w prądach i napięciach wraz z obliczeniami wartości współczynników  $THD_u$  oraz  $THD_i$  przeprowadzano w warunkach występowania w miarę ustalonych przebiegów mierzonych wielkości fizycznych. Podczas badań wyłączona była kompensacja mocy biernej po stronie zasilania układu napięciem 6 kV.



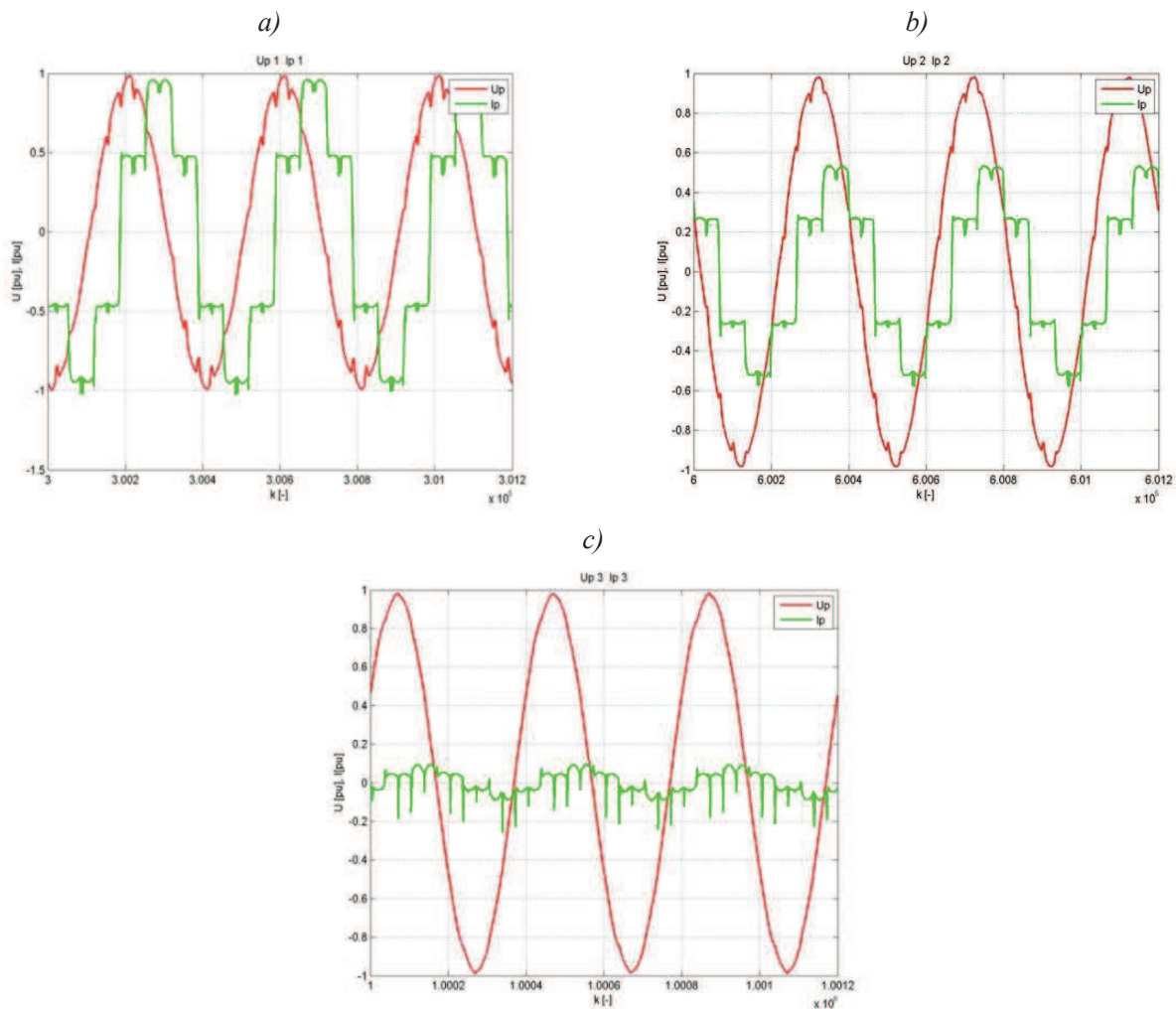
Rys. 1. Uproszczony schemat elektryczny połączeń układu zasilania i układu pomiarowego maszyny wyciągowej klatkowej;  $I_p(I_1)$ ,  $I_w(I_2)$  – prąd mierzony po stronie pierwotnej i wtórnej transformatorów,  $U_p(U_1)$ ,  $U_w(U_2)$  – napięcie po stronie pierwotnej i wtórnej transformatora [opracowanie własne]

### 3. WYNIKI BADAŃ I WNIOSKI

Przebiegi wartości chwilowych prądów i napięć fazowych w wybranej fazie w transformatorze TA.1 ( $Dy_{11}$ ) podczas cyklu pracy obejmującego rozruch, jazdę ustaloną z prędkością 12 m/s do góry oraz hamowanie pokazano dla przykładu na rys. 2. Wynika z nich wyraźnie, iż największe odkształcenie przebiegu napięcia pierwotnego ma miejsce podczas rozruchu i praktycznie zanika podczas hamowania napędu. Intensywność zaś odkształcenia przebiegu prądowego zmienia się w odwrotnej kolejności (rys. 3).



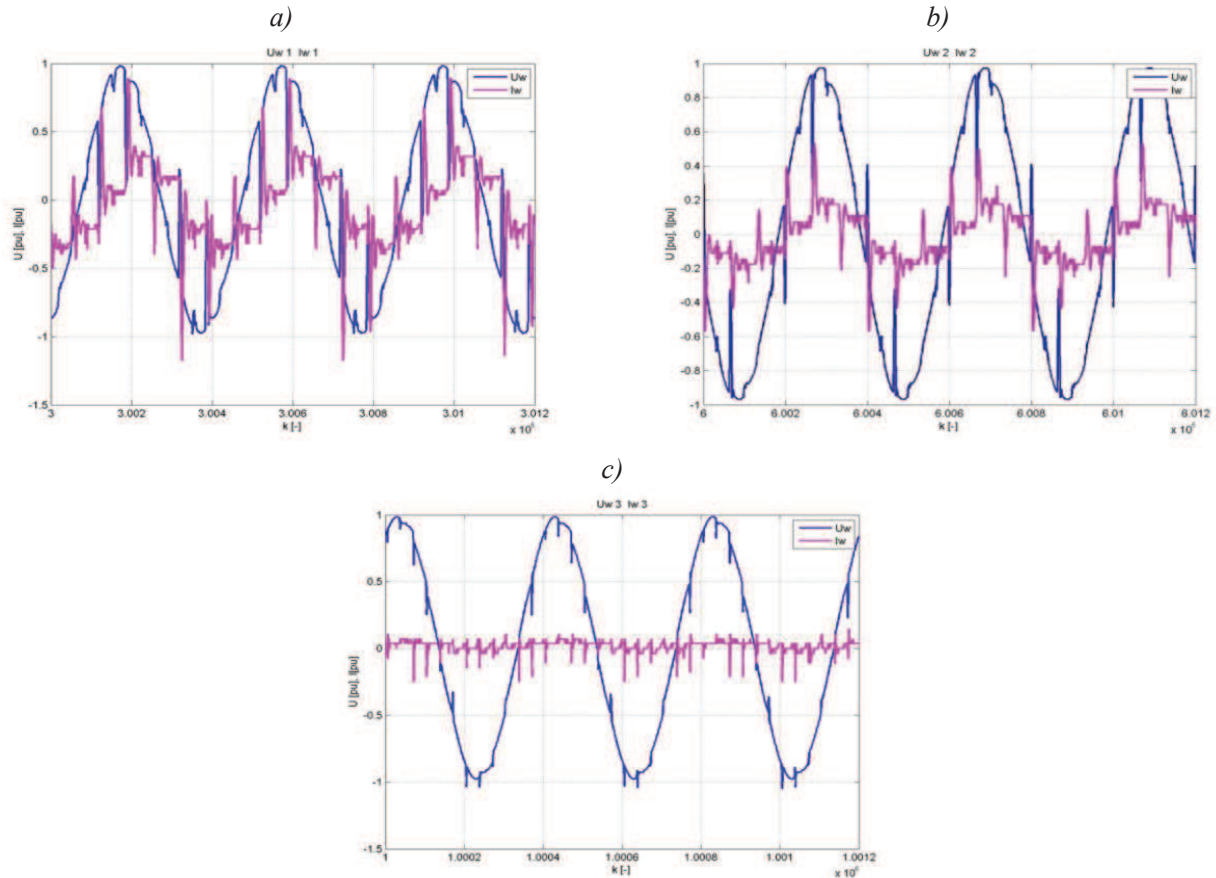
Rys. 2. Przebiegi prądów i napięć fazowych w transformatorze TA.1 ( $Dy_{11}$ ) podczas jazdy klatki do góry (rozruch, prąd ustalony, hamowanie) z prędkością 12 m/s; 1, 2, 3 –punkty pomiarowe wybrane do analizy,  $I_p$ ,  $I_w$  – prąd mierzony po stronie pierwotnej i wtórnej transformatora,  $U_p$ ,  $U_w$  – napięcie [opr. własne]



Rys. 3. Przebiegi prądów i napięć fazowych po stronie pierwotnej w transformatorze TA.1 ( $Dy_{11}$ ) podczas jazdy klatki do góry z prędkością 12 m/s; 1, 2, 3 –punkty pomiarowe wybrane do analizy, a – rozruch, b – praca ustalona, c – hamowanie [opracowanie własne]

W przebiegach wartości prądów i napięć po stronie wtórnej transformatora widać natomiast zmianę

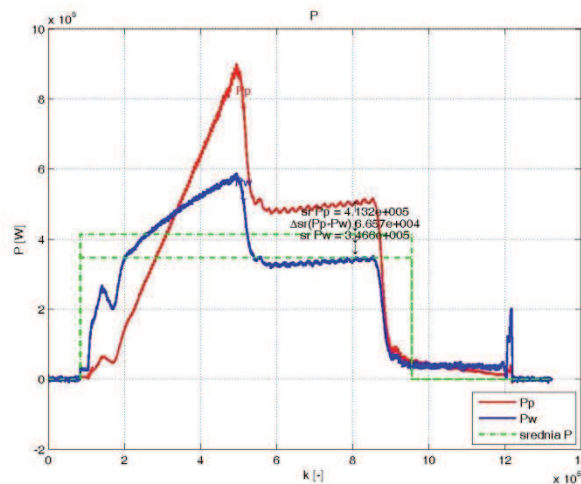
odkształcenia obu wielkości fizycznych, ale przede wszystkim – przebiegu prądowego (rys. 4).



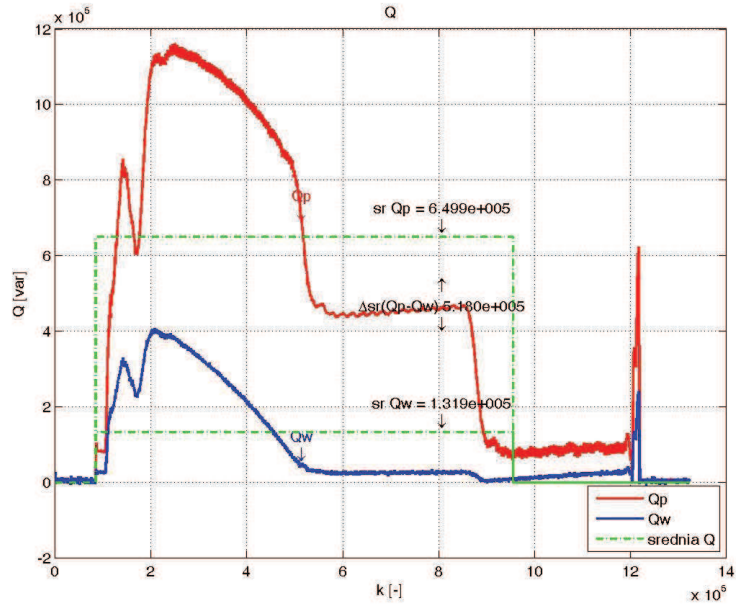
Rys. 4. Przebiegi prądów i napięć fazowych po stronie wtórnej w transformatorze TA.1 ( $Dy_{11}$ ) podczas jazdy klatki do góry z prędkością 12 m/s; 1, 2, 3 – punkty pomiarowe wybrane do analizy: a) – rozruch, b) – praca ustalona, c) – hamowanie [opracowanie własne]

Z przebiegów mocy (zwłaszcza czynnej) można zauważyć częściowo rewersyjny w tym przypadku charakter pracy układu napędowego, charakteryzujący się w takich momentach większą wartością mocy wtórnej  $P_w$  nad pierwotną  $P_p$  (rys. 5). Straty

mocy czynnej i biernej w transformatorze są znaczne i obliczone dla przyjętego przedziału czasowego (jak zaznaczono na rys. 5. i 6.) wynoszą około 66 kW i ok. 518 kVAr w jednej fazie.



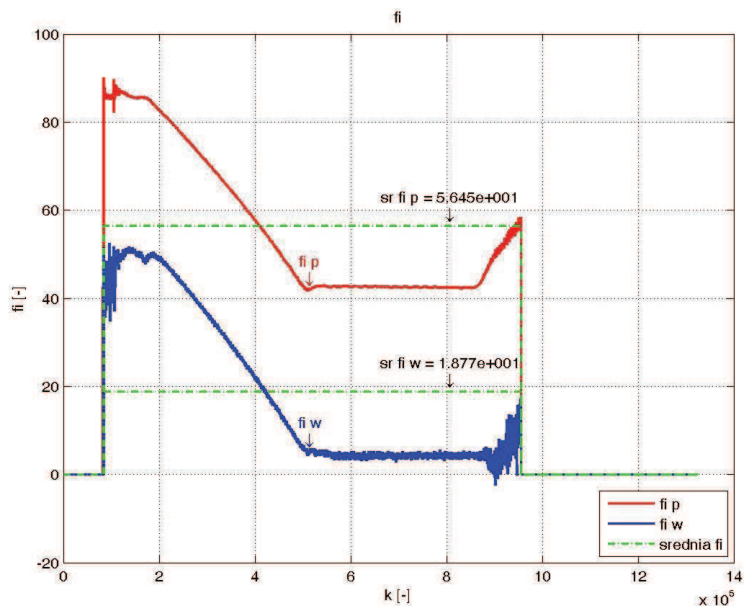
Rys. 5. Zmiana wartości mocy czynnej (w jednej fazie) transformatora TA.1 ( $Dy_{11}$ ) podczas cyklu pracy jak na rys. 2.;  $P_p$ ,  $P_w$  – moc czynna pierwotna i wtórna [opracowanie własne]



Rys. 6. Zmiana wartości mocy biernej (w jednej fazie) transformatora TA.1 ( $Dy_{11}$ ) podczas cyklu pracy jak na rys. 2.;  $Q_p$ ,  $Q_w$  – moc bierna po stronie pierwotnej i wtórnej [opracowanie własne]

W efekcie zmiany wartości mocy czynnej i biernej podczas pracy napędu kąt przesunięcia fazowego pomiędzy napięciem i prądem pierwotnym (podobnie wtórnym) ulega również odpowiedniej zmianie (rys. 7), w efekcie czego transformator (widziany z zacisków pierwotnych) stanowi dla źródła zasilania

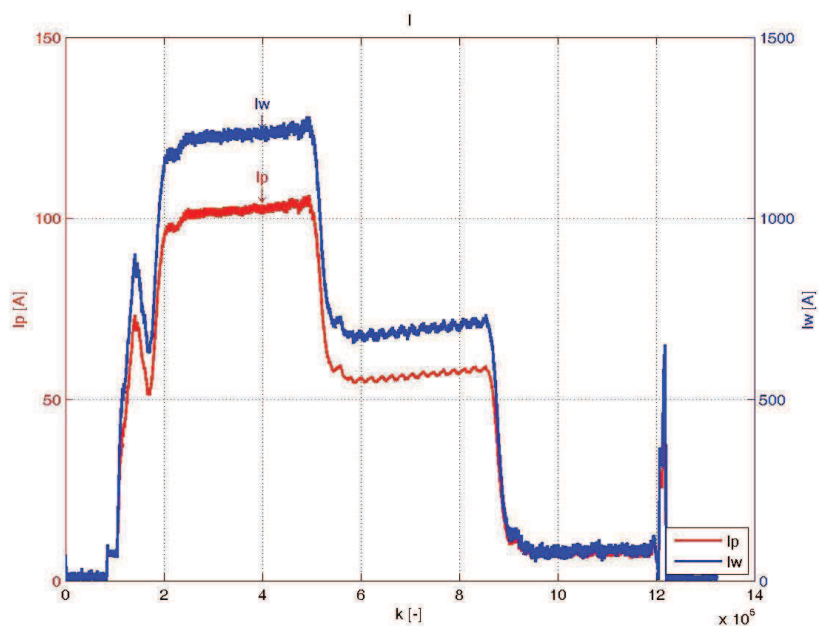
odbiornik indukcyjny, ale o zmiennej w czasie pracy wartości indukcyjności (poboru mocy biernej). Jest to ważne z punktu widzenia realizacji efektywnej kompensacji mocy biernej układu zasilającego średniego napięcia.



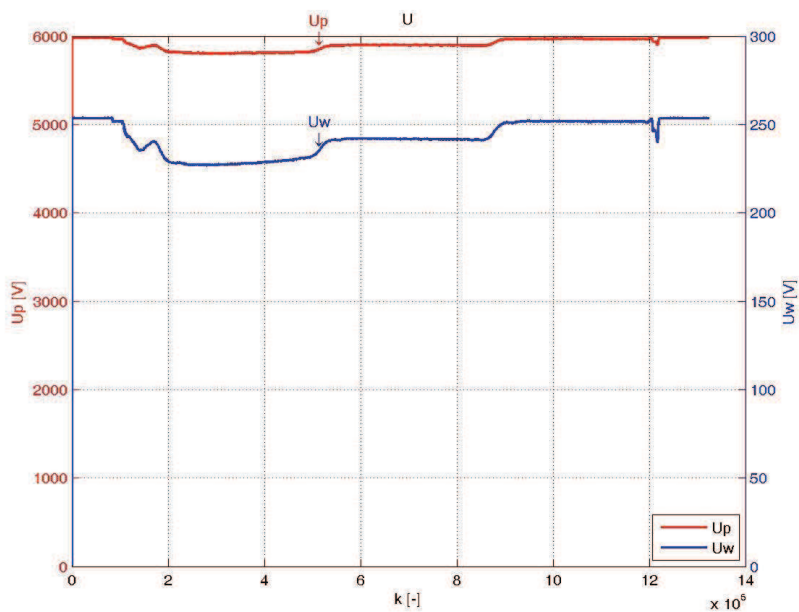
Rys. 7. Zmiana kąta przesunięcia fazowego po stronie pierwotnej  $\varphi_p$  i wtórnej  $\varphi_w$  transformatora TA.1 ( $Dy_{11}$ ) podczas cyklu pracy, jak na rys. 2. [opracowanie własne]

Zmianę wartości skutecznej prądu obciążenia (w jednej fazie) transformatora TA.1 ( $Dy_{11}$ ) po stronie pierwotnej i wtórnej (dla analizowanego cyklu pracy napędu z rys. 2.) pokazano dla przykładu na rys. 8. Odpowiadające temu zmiany wartości napię-

cia zasilającego transformatora oraz napięcia zasilającego przekształtnik można prześledzić na rys. 9. Napięcie zasilające na szynach 6 kV zmalało, jak widać, o około 4% (przy wyłączonym układzie kompensacji mocy biernej).



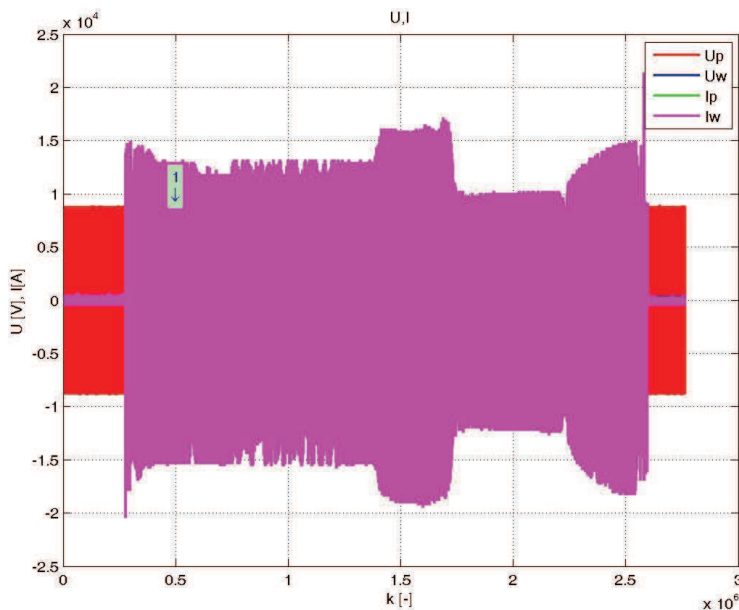
Rys. 8. Zmiana wartości skutecznej prądu pierwotnego  $I_p$  i wtórnego  $I_w$  w jednej fazie transformatora TA.1 podczas jazdy klatki do góry z prędkością 12 m/s (cykl pracy jak na rys. 2.) [opracowanie własne]



Rys. 9. Zmiana wartości skutecznej napięcia międzyfazowego pierwotnego  $U_p$  na szynach rozdzielni i napięcia fazowego  $U_w$  po stronie wtórnej transformatora TA.1 ( $Dy_{11}$ ) podczas cyklu pracy jak na rys. 2. [opracowanie własne]

Przebiegi prądów i napięć transformatora TA.2 ( $Dd_0$ ) dla ciągłej pracy rewersyjnej układu, co ma miejsce na przykład podczas jazdy klatki w dół

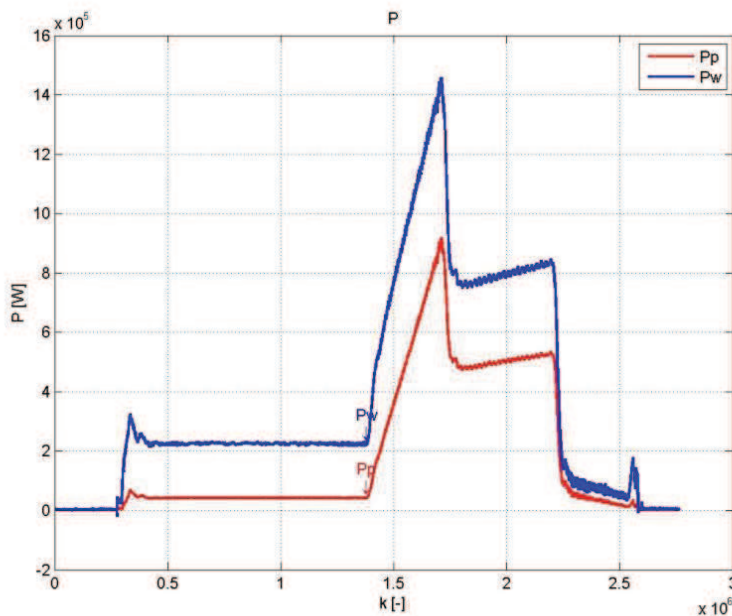
z prędkością 12 m/s, pokazano dla przykładu na rys. 10.



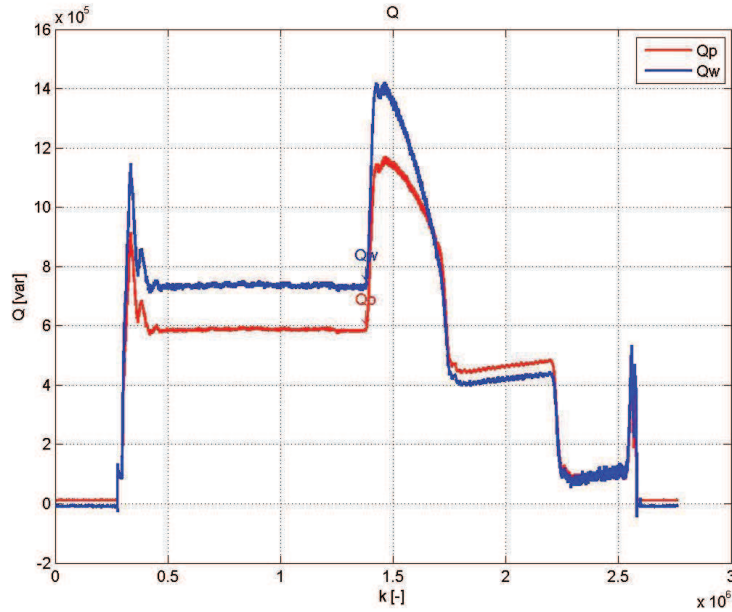
Rys. 10. Przebiegi prądów i napięć w transformatorze TA.2 podczas jazdy klatki w dół z prędkością 12 m/s; 1 – punkt pomiarowy wybrany do analizy,  $I_p, I_w$  – prąd mierzony po stronie pierwotnej i wtórnej transformatora,  $U_p, U_w$  – napięcie pierwotne i wtórne [opracowanie własne]

Wartości mocy czynnej i biernej po stronie pierwotnej transformatora są niższe niż po stronie wtórnej (rys. 11 i 12). Wyższe są jednak wartości strat obu mocy w transformatorze – o około 5% w porównaniu do strat w warunkach pracy silnikowej układu

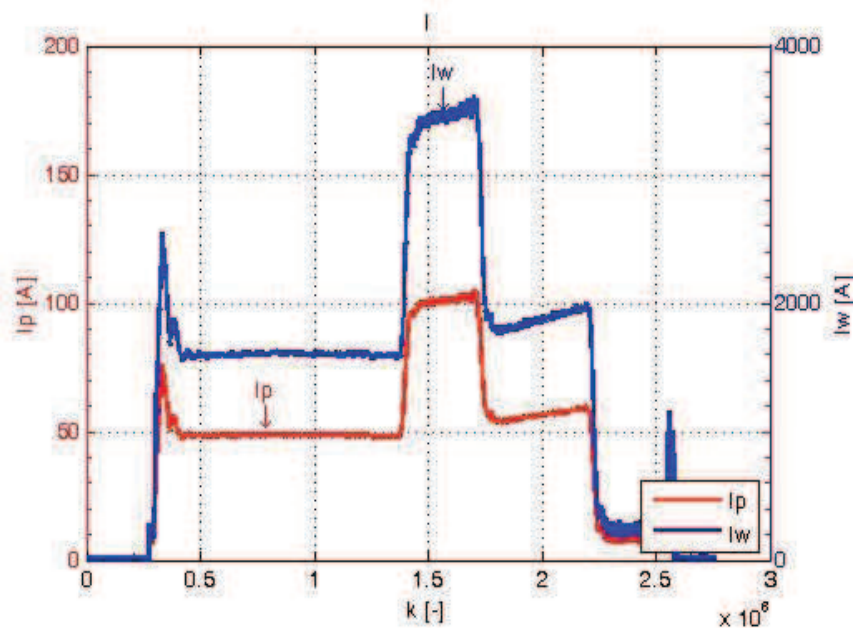
napędowego. Efekt rewersji widać wyraźnie również wtedy, gdy porównuje się wartości prądu pierwotnego i wtórnego, co dla przypadku pracy z rys. 10. pokazano na rys. 13.



Rys. 11. Zmiana wartości mocy czynnej w czasie (w jednej fazie) transformatora TA.2 ( $Dd_0$ ) podczas jazdy klatki w dół z prędkością 12 m/s;  $P_p, P_w$  – moc czynna pierwotna i wtórna, cykl pracy jak na rys. 10. [opracowanie własne]



Rys. 12. Zmiana wartości mocy biernej jednej fazy transformatora TA.2 ( $Dd_0$ ) w czasie jazdy klatki w dół z prędkością 12 m/s;  $Q_p$ ,  $Q_w$  – moc po stronie pierwotnej i wtórnej, cykl pracy jak na rys. 10. [opracowanie własne]

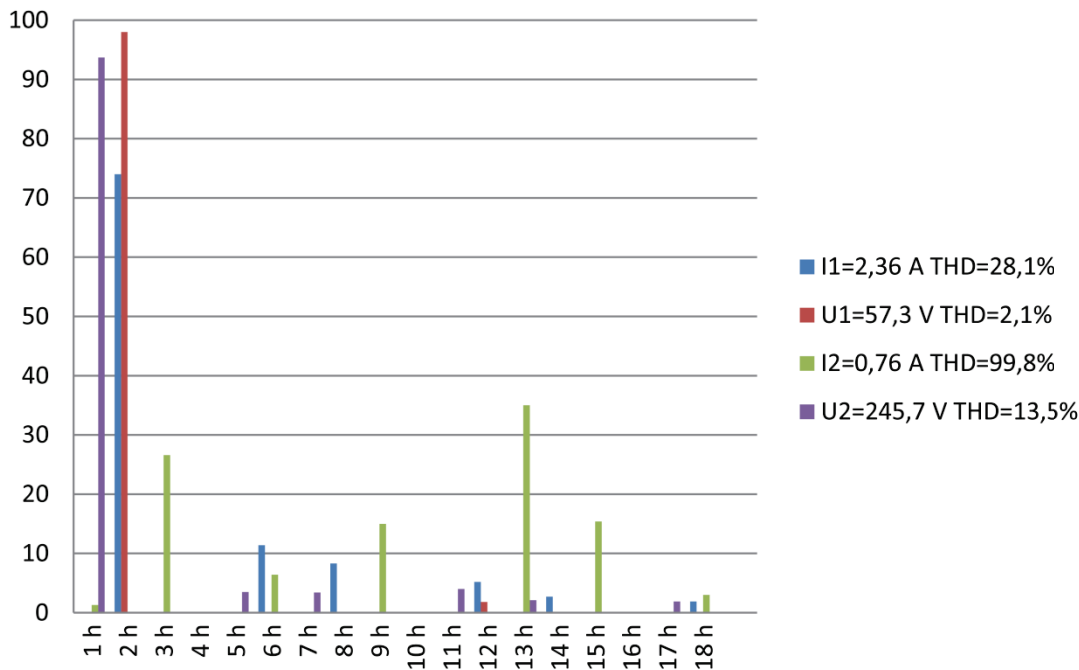


Rys. 13. Zmiana wartości prądu pierwotnego  $I_p$  i wtórnego  $I_w$  (w jednej fazie transformatora TA.2) podczas jazdy klatki w dół z prędkością 12 m/s, cykl pracy jak na rys. 10. [opracowanie własne]

Pomiary i analiza wyższych harmonicznych wykazały, że w napięciu pierwotnym występuje głównie harmoniczna podstawowa, zaś współczynnik  $THD_u$  nie przekracza 3%, niezależnie ani od kierunku ruchu (górze, dół), ani od prędkości jazdy (1-12 m/s) wyciągu klatkowego. Podobnie dominujący udział w prądzie

pierwotnym ma harmoniczna podstawowa (ok. 95%), zaś współczynnik  $THD_I$  nie osiąga wartości wyższych od 29%, przy czym w prądzie tym występują tylko harmoniczne nieparzyste rzędu 5, 7, 11, 13, 15 itp., co ilustruje rys. 14.



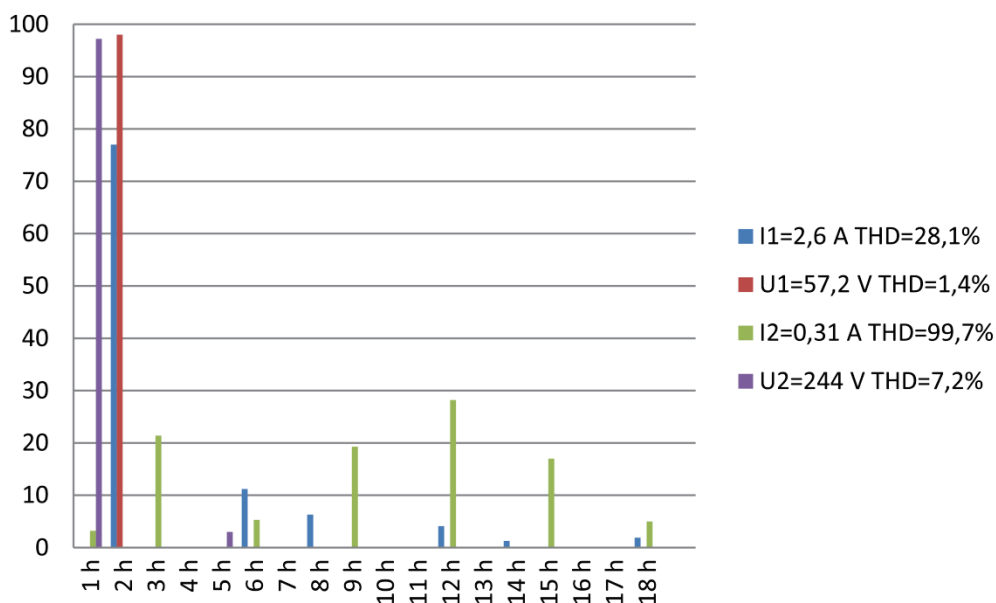


Rys. 14. Średnia zawartość wyższych harmonicznych w prądzie oraz napięciu pierwotnym i wtórnym transformatorów podczas jazdy klatki do góry i/lub w dół z prędkością 12 m/s [opracowanie własne]

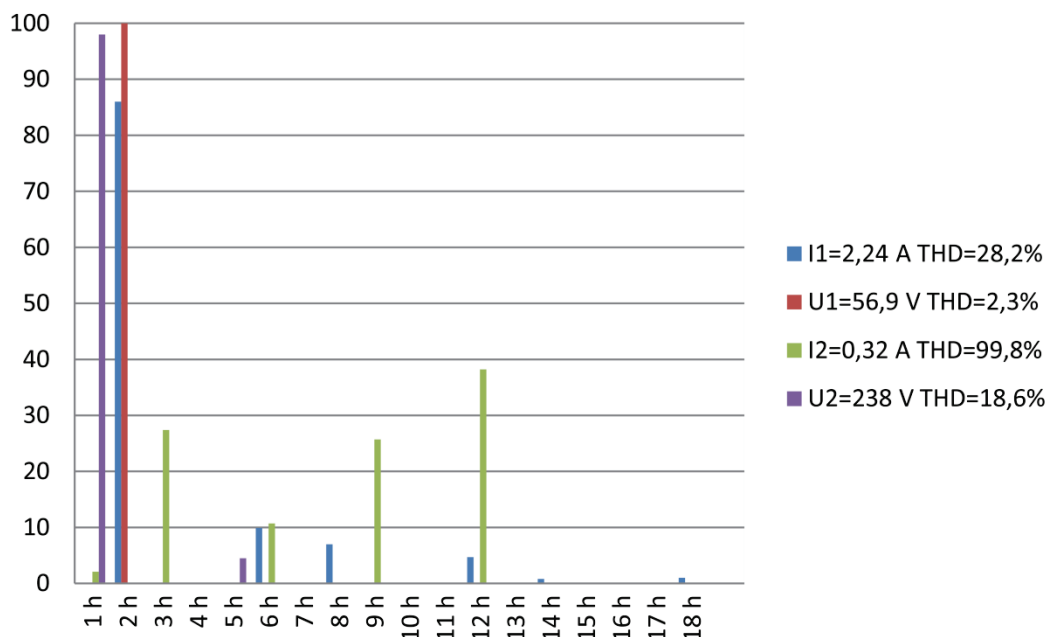
W napięciu wtórnym również przeważający udział ma harmoniczna podstawowa (około 90%) w związku z obecnością harmonicznych nieparzystych (5, 7...). Wartość współczynnika THD<sub>u</sub> nie przekracza tutaj 19%. Przebieg zaś prądu wtórnego jest odkształcony w bardzo istotny sposób (THD<sub>i</sub> ≈ 99,8%) w związku z zawartością harmonicznych podzielnych przez 3, tj. 3, 6, 9, 12 itp. (rys. 15, 16).

Udział wyższych harmonicznych w prądzie wtórnym praktycznie nie ulega zmianie w zależności ani

od prędkości ruchu, ani od kierunku jazdy. Jak wynika z przeprowadzonych pomiarów, wyższe harmoniczne zawarte w prądzie wtórnym (tj. 3, 6, 9, 12, 15, 18 itd.) w ogóle nie są transformowane do obwodu pierwotnego ( $I_1$ ) transformatorów z uwagi na ich wytlumienie w uzwojeniach połączonych w trójkąt. Harmoniczne zaś występujące w prądzie pierwotnym  $I_1$  (5, 7, 11, 13, 17...) generowane są pod wpływem harmonicznych występujących w przebiegach napięcia wtórnego  $U_2$ .



Rys. 15. Średnia zawartość wyższych harmonicznych w prądzie oraz napięciu pierwotnym i wtórnym transformatorów podczas jazdy klatki do góry i/lub w dół z prędkością 6 m/s [opracowanie własne]



Rys. 16. Średnia zawartość wyższych harmonicznych w prądzie oraz napięciu pierwotnym i wtórnym transformatorów podczas jazdy klatki do góry i/lub w dół z prędkością 1 m/s [opracowanie własne]

#### 4. PODSUMOWANIE

Wartości strat mocy czynnej w transformatorach zasilających moduły przekształtnikowe maszyny wyciągowej, powodowane oddziaływaniem wyższych harmonicznych zawartych w prądach i napięciach, są dość znaczące (zwiększają się z czasem trwania eksploatacji) i zmieniają się podczas cyklu pracy maszyny. Można przyjąć, że dla badanych transformatorów są one równe 10% mocy znamionowej podczas pobierania energii z sieci zasilającej (zazwyczaj jazda klatki do góry) i około 15% podczas jej oddawania do sieci (głównie jazda klatki w dół).

Moduły przekształtnikowe podczas pracy maszyny wyciągowej nie zawsze obciążają się równomiernie (zwłaszcza przy małych prędkościach maszyny). Związane z tym jest nieznaczne nierównomierne obciążanie się współpracujących transformatorów, czemu towarzyszą odpowiednie fluktuacje przepływu mocy w ich obwodach pierwotnych i wtórnych.

Napięcie zasilające obwody pierwotne transformatorów (6 kV) praktycznie zawiera tylko harmoniczną podstawową. Wartość  $THD_u$  nie przekracza 3% niezależnie od mocy obciążenia maszyny wyciągowej oraz kierunku i prędkości ruchu klatki. W prądzie pierwotnym występują harmoniczne rzędu 5, 7, 11, 13 itp., generowane pod wpływem wyższych harmonicznych widocznych w przebiegach napięcia wtórnego, natomiast harmoniczne zawarte w prądzie wtórnym  $I_2$  nie są w ogóle transformowane do obwodu pierwotnego z uwagi na ich wytłumienie w uzwojeniach połączonych w trójkąt.

Ograniczenie wartości strat mocy czynnej (w transformatorach przekształtnikowych) powodowanych wyższymi harmonicznymi jest możliwe jedynie przy zastosowaniu odpowiednich nadążnych aktywnych filtrów mocy zainstalowanych po stronie wtórnej (niskiego napięcia), z której zasilane są przekształtniki. Zastosowanie filtrów aktywnych umożliwi również wytłumienie efektu przenoszenia przez transformatory wyższych harmonicznych prądów (i napięć) do sieci zasilającej średniego napięcia.

#### Literatura

1. Girgis A., Maleram E., Nims J.: *Evaluation of temperature rise of distributed transformer in the presence of harmonic distortion*. Electric Power System Research, vol. 20, 1990, no 1, pp. 15-22.
2. IEEE C57.96, *Guide for loading dry-type distribution and power transformer*.
3. Jayla K., Rak J., Gala M., Kepinski M.: *Loss in power transformers supplying heavy industrial receivers* (in polish). Elektroenergetyka 2011, no 3 (191), pp. 46-56.
4. Kefalas T.D., Kladas A.G.: *Harmonic impact and distribution transformer no-load loss*. IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 57, 2010, no 1, pp. 193-200.
5. Sadati S.B., Yousefi H., Darvishi B., Tahani A.: *Comparison of distribution transformer loss and capacity under linear and harmonic loads*, Proc. 2nd PECon08, Johor Baharu, Malaysia, December 2008.
6. Said D.M., Nor K.M.: *Effect of harmonics and distribution transformer*, Proc. AUPEC 08, 2008, paper P-107, pp. 1-5.
7. Szklarski L., Zarudzki J.: *Electric hoisting machines* (in polish), PWN, Warszawa-Kraków 1998.
8. Wosik J., Kozłowski A., Kalus M., Miedzinski B.: *The efficiency of the active power filters in high power DC drive systems*, Proc. Int.Conf. on Power Systems, Energy, Environment-PSEE 2014, 22-24 February 2014, Interlaken, Switzerland.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.