

Barbara Kulesz, Andrzej Sikora  
Politechnika Śląska, Gliwice

## WYRÓWNYWANIE OBCIĄŻEŃ UZWOJEŃ TRANSFORMATORA PROSTOWNIKOWEGO PODSTACJI TRAKCYJNEJ

### BALANCING THE WINDING LOADS OF TRACTION SUBSTATION RECTIFIER TRANSFORMER

**Streszczenie:** Jeśli w pojeździe trakcyjnym są zastosowane silniki asynchroniczne zasilane z falowników, to fakt ten nie wpłynie znacząco na jakość ich pracy ze względu na odfiltrowanie napięcia wejściowego falownika w obwodzie pośredniczącym (filtre wejściowym) falownika. Niemniej występujące w napięciu wyjściowym prostownika wyższe harmoniczne napięcia, zależne nie tylko od liczby pulsów układu przekształcającego transformator-prostownik, ale i od parametrów jakościowych napięcia zasilania transformatora (w sensie np. poziomu THD) powodują odkształcenie prądów pobieranych z sieci przez transformator, dając de facto efekt „wstrzyknięcia” do sieci wyższych harmonicznych prądu, co z kolei powoduje dalsze odkształcenie napięcia sieciowego. W artykule proponuje się pewną procedurę wyrównywania obciążeń prądowych poszczególnych uzwojeń wtórnych transformatora, co w efekcie powinno zapewnić zmniejszenie wartości THD prądu pobieranego z sieci. Procedura ta wymaga dostosowywania napięć strony wtórnej transformatora do bieżących warunków zasilania.

**Abstract:** If inverter-fed asynchronous motors are used in drive system of a traction vehicle (e.g. tram), then motor performance will not be significantly influenced by distorted input voltage, since this voltage is filtered in DC link circuit of the inverter. However, voltage higher harmonics which are present in rectifier's output circuit (which depend on number of pulses of transformation circuit consisting of multi-phase transformer and rectifier as well as quality parameters of transformer's supply voltage, such as THD coefficient) cause deformation of network currents. This means that power network is "injected" with higher current harmonics and this in turn results in further deformation of network voltage. The authors propose a certain procedure for balancing the loading of rectifier transformer's secondary windings, this helps to attenuate THD coefficient in network current. This procedure requires that transformer's secondary voltages are adjusted to existing supply conditions.

**Słowa kluczowe:** trakcja elektryczna, transformator prostownikowy, napięcie odkształcone, wyrównywanie obciążeń

**Keywords:** electric traction, rectifier transformer, distorted voltage, load balancing

### 1. Wstęp

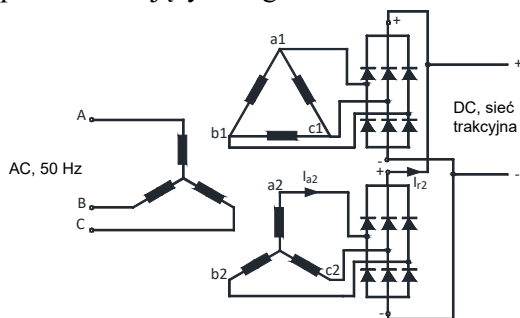
Zainstalowane na podstacji trakcyjnej zespoły przetwarzania energii składają się z wielofazowych transformatorów i dostosowanych do nich prostowników mostkowych. Przykładowy taki układ dla podstacji tramwajowej zawiera 4 transformatory suche typ TZM3T1200/15 ( $S_N = 1200 \text{ kV}\cdot\text{A}$  ( $2 \times 600$ ),  $U_{GN} = 15,75 \text{ kV}$ ,  $U_{DN} = 0,525 \text{ kV}/0,525 \text{ kV}$ , zakres regulacji  $+4 \times 2,5/-2 \times 2,5\%$ , Yd11y0,  $\Delta P_0 = 2000 \text{ W}$ ,  $\Delta P_{Cu}$  ( $75^\circ\text{C}$ ) =  $13800 \text{ W}$ ,  $u_{z\%} = 11/11$ , izolacja kl. F, masa ok.  $4100 \text{ kg}$ , wykonanie zgodnie z EN60076-1, IEC146, stopień ochrony IP00) i 12-pulsowe prostowniki PD-12/0,8dd (klasa przeciążalności V, połączone równolegle,  $U_N = 6 \times 525 \text{ V}$ ,  $U_{0N} = 660 \text{ V}$ ,  $I_{0N} = 1200 \text{ A}$ ,  $\Delta P_{(N)} \approx 3000 \text{ W}$ ,  $I_z(\text{dc}) = 12 \text{ kA} / 200\text{ms}$ , stopień ochrony IP20). Przy trójfazowym napięciu

zasilania o częstotliwości  $50 \text{ Hz}$ , w napięciu wyprostowanym pojawiają się składowe zmienne o częstotliwościach stanowiących wielokrotność liczby pulsów prostownika i częstotliwości podstawowej (czyli np. dla układu 6-pulsowego  $300 \text{ Hz}$  jako częstotliwość wiodąca, potem  $600 \text{ Hz}$  itd.). Odkształcenie napięcia zasilania poprzez wprowadzenie doń dodatkowych wyższych harmonicznych powoduje, że w napięciu wyprostowanym pojawiają się pewne „nieregularności”, czyli kolejne wyższe harmoniczne. Jeśli zastosowany jest układ przekształtnikowy 12-pulsowy, taki jak przywołany wyżej, to transformator prostownikowy ma dwa uzwojenia wtórne, połączone odpowiednio w konfigurację trójkąta i gwiazdy. Do każdego z nich jest dołączony oddzielny prostownik. Jeśli napięcia

międzyfazowe tych uzwojeń nie są równe (co może być spowodowane np. specyfiką nawinięcia uzwojeń – liczby zwojów muszą być całkowite, zaś między liczbą zwojów uzwojenia połączonego w trójkąt i gwiazdę powinna być zależność liniowa  $N_1 = \sqrt{3}N_2$ , to napięcie wyprostowane podlega dalszemu odkształceniu, co z kolei ma wpływ na symetrię obciążeń uzwojeń transformatora i odkształcenie prądu pobieranego z sieci.

## 2. Praca układu transformator-prostownik

Analiza pracy układu transformatora prostownikowego (rys.1) zostanie przeprowadzona dla kilku wybranych przypadków, w przejrzysty sposób ilustrujących zagadnienie.



Rys. 1. Schemat układu transformatora prostownikowego 6-fazowego w układzie Yzd, z prostownikami łączonymi równolegle

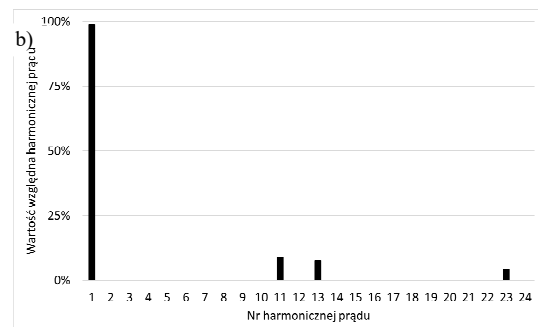
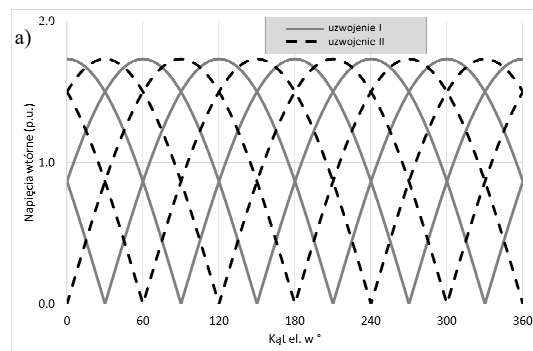
### 2.1. Praca przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym i zbilansowanych uzwojeniach wtórnych

Do celów analizy zakładamy równość napięć międzyfazowych uzwojeń wtórnych transformatora połączonych w trójkąt i gwiazdę (rys.1). Zakładamy również, że komutacja diod prostownikowych jest natychmiastowa. Zakładamy również obciążenie układu silnikiem szeregowym prądu stałego (typowy silnik stosowany w napędach trakcyjnych tramwajowych), co pociąga za sobą, że prąd obciążenia prostownika jest stały. Przebiegi napięć na wyjściu prostownika i spektrum harmonicznych prądu zasilania transformatora przedstawione są na rys.2.

Między prądami fazowymi uzwojeń połączonych w gwiazdę i trójkąt zachodzi zależność:

$$I_{2f} = \sqrt{3}I_{1f} \quad (1)$$

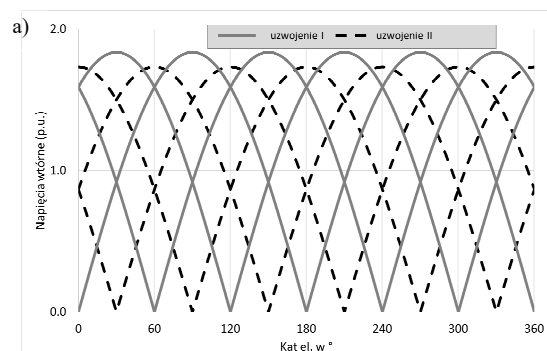
gdzie indeks „1” odnosi się do uzwojenia połączonego w trójkąt, a „2” do uzwojenia połączonego w gwiazdę.

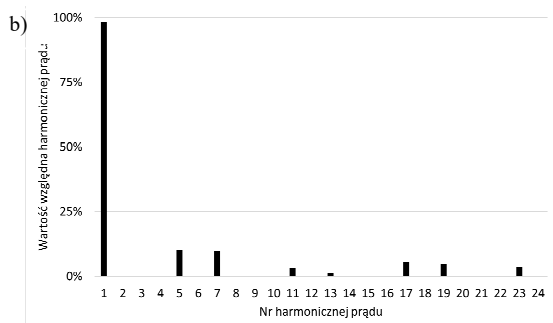


Rys. 2. a) Napięcia międzyfazowe stron wtórnych transformatora – oba uzwojenia -po wyprostowaniu, b) widmo harmonicznych prądu zasilania transformatora. Zasilanie układu napięciem sinusoidalnym, uzwojenia zrównoważone

### 2.2. Praca przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym i niezbilansowanych uzwojeniach wtórnych

Zakładamy, że napięcia fazowe (i międzyfazowe) uzwojenia połączonego w trójkąt i gwiazdę różnią się między sobą o kilka procent. Przykładowe przebiegi napięć na wyjściu prostownika i spektrum harmonicznych prądu zasilania transformatora przedstawione są na rys.3.





Rys. 3. a) Napięcia międzyfazowe stron wtórnych transformatora – oba uzwojenia -po wyprostowaniu, b) widmo harmonicznych prądu zasilania transformatora. Zasilanie układu napięciem sinusoidalnym, uzwojenia niezrównoważone,  $k=1.06$

### 2.3. Praca przy zasilaniu transformatora napięciem odkształconym i zbilansowanych uzwojeniach wtórnych

Do celów analizy założono, że poza podstawową harmoniczną w napięciu zasilania występują jeszcze harmoniczne rzędu  $n=5$  i  $n=7$ , przy czym wartości napięć skutecznych tych harmonicznych wynoszą odpowiednio  $U_5 = 0,06 U_1$  i  $U_7 = 0,05 U_1$ , gdzie  $U_1$  – napięcie skuteczne harmoniczej podstawowej. Współczynnik THD napięcia zasilania, zdefiniowany jako

$$THD = \left( \sqrt{\sum_{v=2}^{40} U_v^2} / U_1 \right) \cdot 100 \quad (2)$$

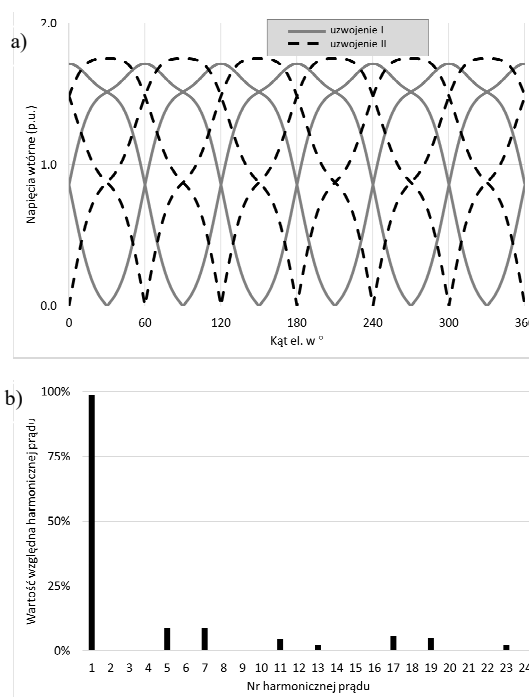
wynosi więc 7,81%, czyli mieści się w granicach określonych przez rozporządzenie [1] dla podmiotu zaliczanego do grupy przyłączeniowej III (przyłączenie bezpośrednie do sieci o napięciu znamionowym wyższym od 1 kV, ale niższym niż 110 kV).

Kształt fali tak zdefiniowanego napięcia odbiega dość znacznie od sinusoidy, przy czym zależy jeszcze dodatkowo od kąta przesunięcia fazowego wyższych harmonicznych. Z tego względu, przy pracy sześciu faz uzwojeń wtórnych transformatora, fragmenty napięcia „wycinane” przez pracujące diody z fal napięć międzyfazowych transformatora różnią się między sobą. Punkty naturalnej komutacji są przesunięte w czasie w stosunku do punktów występujących dla zasilania sinusoidalnego (przypadek 1), co powoduje wydłużanie/skracanie czasu przewodzenia prądu przez poszczególne diody i w rezultacie zmianę wartości skutecznej prądu płynącego przez uzwojenia wtórne transforma-

tora. Wartość skuteczną prądu definiuje się bowiem standardowo jako

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (3)$$

Przykładowe przebiegi napięć na wyjściu prostownika i widmo harmonicznych prądu zasilania transformatora dla tego przypadku pracy przedstawione są na rys.4.

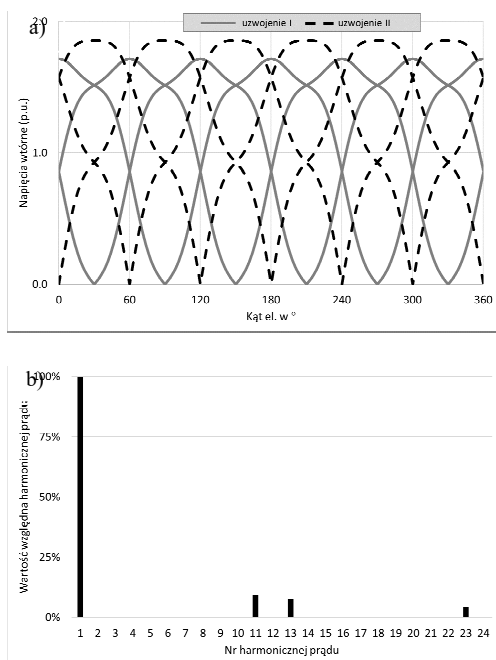


Rys. 4. a) Napięcia międzyfazowe stron wtórnych transformatora – oba uzwojenia -po wyprostowaniu, b) widmo harmonicznych prądu zasilania transformatora. Zasilanie układu napięciem odkształconym, uzwojenia zrównoważone

### 3. Próba poprawy warunków pracy transformatora

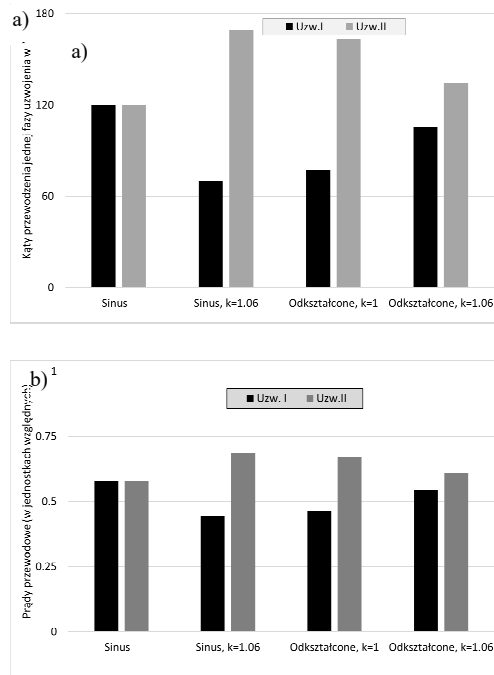
Spróbujemy zmodyfikować nieco napięcia jednego z uzwojeń wtórnych transformatora. Zmiana polega na odpowiednim podwyższeniu lub obniżeniu napięcia fazowego, co można przeprowadzić stosując regulację np. regulatorem podobciążeniowym. Wynik takiego działania - dla zasilania napięciem sinusoidalnym – pokazano na rys. 3a (przebiegi czasowe). Wiadać, że podwyższenie napięcia jednego uzwojenia powoduje pojawienie się harmoniczej napięcia  $n=6$  w napięciu wyprostowanym. Działając „w drugą stronę” można spróbować obniżyć tę harmoniczną, która pojawia się w napięciu odkształconym jak na rys.4a. Pod-

wyższając liczbę zwojów jednego uzwojenia otrzymujemy przebiegi (czasowe) jak na rys.5a.



Rys. 5. a) Przebiegi napięć wtórnych międzyfazowych transformatora (po wyprostowaniu) po zastosowaniu regulacji przełącznikiem zacze- pów ( $k=1,06$ ), b) widmo harmonicznych prądu zasilania transformatora. Zasilanie układu napięciem odkształconym.

Regulacja wartości napięcia wtórnego powoduje przesuwanie się punktów naturalnej komutacji diod i w rezultacie zmianę wartości skutecznej prądów obciążenia faz transformatora. Na rys. 6a pokazano kąty przewodzenia prądu (przewodowego) dla uzwojeń wtórnych transformatora dla różnych przypadków: zasilania napięciem sinusoidalnym, sinusoidalnym z podwyższonym sztucznie napięciem jednego z uzwojeń wtórnych (regulacja przełącznikiem zacze- pów), odkształconym i odkształconym z regulacją napięcia jednego z uzwojeń wtórnych. Na rys. 6b pokazano zaś efekt – wartości względne skuteczne prądów przewodowych stron wtórnych transformatora dla przypadków zasilania wymienionych powyżej. Podwyższenie napięcia jednego z uzwojeń wtórnych transformatora skutkuje zmniejszeniem różnicy w prądach przewodowych (i tym samym fazowych) dla uzwojeń wtórnych, to samo dotyczy obciążenia prostowników.



Rys. 6. a) Kąty przewodzenia prądu w uzwoje- niach wtórnych transformatora, b) wartości względne prądów przewodowych stron wtórnych transformatora. Warianty zasilania opisane są w tekście.

#### 4. Oddziaływanie transformatora na sieć

Wyrównanie obciążeń wtórnych uzwojeń transformatora zmienia zawartość harmonicznych w prądzie zasilania sieci. W tabeli 1 przedstawiono wybrane wartości opisujące widmo harmonicznych prądu.

Tabela 1. Wybrane wartości ze spektrum harmonicznych prądu zasilania

	Nr wariantu zasilania*			
	I	II	III	IV
THD w %	13.7%	17.2%	16.5%	13.8%
Rząd harmo- nicznej	Wartości w %			
5	0,1	10,2	9,0	0,1
7	0,1	9,7	8,7	0,1
11	9,0	3,3	4,6	9,1
13	7,6	1,2	2,6	7,7
17	0,1	5,6	5,8	0,1
19	0,1	4,6	5,1	0,1
23	4,3	3,4	2,4	4,3
25	4,0	3,6	2,8	4,0

\* I – zasilanie sinusoidalne, II – zasilanie sinusoidalne, wprowadzone niezrównoważenie uzwojeń,  $k=1,06$ ,

III – zasilanie napięciem odkształconym  
( $THD = 7.81\%$ ,  $U_5 = 0.06U_1$ ,  $U_7 = 0.05U_1$ ),  
IV – jak III, wprowadzone niezrównoważenie  
uzwojeń,  $k=1.06$

## 5. Wnioski

Odkształcenie napięcia zasilania układu transformator – prostownik powoduje, że w wyprostowanym napięciu ujawniają się wyższe harmoniczne, przede wszystkim rzędu  $n = 6$ . Jedną z możliwości poprawy THD w napięciu wyprostowanym jest sztuczne doregulowanie napięcia jednego z uzwojeń wtórnych transformatora. Taką metodę postępowania, w odniesieniu do transformatora 6-fazowego Yyd pracującego na układ dwóch prostowników niesterowanych połączonych równolegle przedstawiono w artykule. Do regulacji napięcia można użyć np. podobciążeniowego przełącznika zaczepów. Wykazano, że poza poprawą THD w napięciu wyprostowanym, regulacja taka wpływa również na prąd zasilania transformatora, redukując w znacznym stopniu harmoniczne rzędów  $n = 5$  i  $n = 7$ . Z punktu widzenia jakości napięcia sieci taka poprawa jest bardzo korzystna.

## 6. Literatura

- [1]. PN-EN 60076-1:2011 - wersja angielska. "Transformatory. Wymagania ogólne". Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny.
- [2]. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dn. 4 maja 2007r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania system elektroenergetycznego, Dziennik Ustaw 2007, nr 93, poz.623
- [3]. Sikora A.; Kulesz B.; Grzenik R. Dwunastopulsowe i dwudziestoczwieropulsowe układy przetwarzania napięcia przemiennego na napięcie stałe. *Prace Naukowe Politechniki Śląskiej. Elektryka*, 2015, 3: 29–64.
- [4]. Sikora A., Kulesz B.: *Racjonalne przetwarzanie napięcia - czy budować układy 24-pulsowe?*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe Komel-BOBRME Nr 2/2014, Katowice 2014, str. 29-34.