

Barbara Kulesz, Marian Pasko, Andrzej Sikora
 Politechnika Śląska, Gliwice

WYKORZYSTANIE DŁAWIKÓW W WIELOPULSOWYCH UKŁADACH PRZETWARZANIA NAPIĘCIA DLA POTRZEB SIECI TRAKCYJNEJ

USE OF CHOKES IN TRACTION VOLTAGE MULTI-PULSE TRANSFORMATION CIRCUITS

Abstract: Dc voltage obtained by rectifying ac power grid voltage with the help of diode bridges, always contains higher harmonics. These harmonics are „transferred” to the supply current as well. Using multi-phase transformation circuits, consisting of two 6-phase transformers instead of one three-phase transformers should produce less harmonics in dc voltage and supply current. However, in case of distorted supply voltage this cannot be true. The paper deals with the problem, how introduction of cathode chokes into load circuit influences higher harmonics of dc voltage and ac supply current. Several supply voltage waveforms were analysed, with THD not higher than standardised 8%, but with different phase angles of 5th and 7th harmonics. 6-pulse system was used as a reference, and 24-pulse systems were investigated with rectifiers connected either in parallel or in mixed fashion (series-parallel).

Wstęp

Trakcyjne układy przekształtnikowe, mające zapewnić w sieci trakcyjnej tramwajowej napięcie wyprostowane, składają się z wielofazowych transformatorów i mostków prostownikowych diodowych.

Napięcie wyprostowane zawsze zawiera wyższe harmoniczne, nie jest to zjawisko korzystne, gdyż pulsujące napięcie powoduje m.in. pulsacje momentu elektromagnetycznego silników trakcyjnych, oddziałuje na urządzenia energoelektroniczne podstacji i urządzenia sterujące, powoduje zakłócenia w odbiorze RTV. Wyższe harmoniczne prądu obciążenia podstacji powodują dodatkowe spadki napięcia w sieci zasilającej podstację, wobec czego napięcie wypadkowe zawsze jest odkształcone, procesy te są dynamiczne. Moce trakcyjnych zespołów prostownikowych są stosunkowo duże w porównaniu z mocami zwarciovymi energetycznych linii zasilających w miejscu przyłączenia tych zespołów [6]. Stąd wynika potrzeba minimalizacji zawartości harmoniczných w prądzie zasilania transformatorów przekształtnikowych. Przykładowo układy mostkowe 6-pulsowe generują do sieci harmoniczne rzędu 5,7,11,13 o poziomie nawet 20% składowej podstawowej. Podobne zjawisko występuje zresztą w układach pośredniczących (dc) falowników zasilających silniki trakcyjne prądu przemiennego. Dla ograniczenia harmoniczných można stosować np. trójfazowe dławiki prądu przemien-

nego po stronie napięcia zasilania. Dławik taki podwyższa reaktancję linii zasilającej dla wszystkich harmoniczných, przy okazji niejako oddziałując również na czasy komutacji zaworów w mostkach diodowych, jak również obniża napięcie układu pośredniczącego.

Na prąd obciążenia podstacji wpływ ma odbiorca poprzez zastosowanie układów o większej liczbie pulsów, (a więc poprzez zmniejszenie pulsacji napięcia wyprostowanego) negatywny wpływ na napięcie sieci zasilającej powinien zostać ograniczony. Proponuje się stosowanie np. układów 18- i 24-pulsowych, z jednakowymi 6-diodowymi mostkami prostownikowymi dołączanymi do izolowanych galwanicznie od siebie uzwojeń strony wtórnej [6], przy czym poza ogólnie stosowanymi kryteriami THD napięcia wyprostowanego i prądu zasilania autorzy pracy [6] sugerują, że kryterium wyboru powinna określać specyfika danej linii zasilającej i danej podstacji. Uważają też, że przy odpowiednim doborze układu prostownikowego dławiki będą niepotrzebne.

W sieciach PKP [1] stosuje się standardowo urządzenia wygładzające w postaci filtrów pasywnych. Filtr taki zbudowany w układzie gamma składa się z gałęzi szeregowej i gałęzi równoległej bocznikującej sieć trakcyjną. Zwykle są to filtry rezonansowe lub aperiodyczne. Filtry LC włącza się na wyjście podstacji i dostraja do częstotliwości występują-

cych harmonicznym. Filtry te odznaczają się jednak pewnymi wadami, w tym zmianą charakterystyki w czasie, co powoduje konieczność ich okresowego strojenia [1]. Ponadto występuje w takim filtrze możliwość wzmocnienia określonych harmonicznym, zwykle pośrednich między rezonansowymi. Obecnie na PKP dla podstacji zasilanych napięciem średnim (poziom 15, 20 30 kV) stosuje się filtry rezonansowe, tłumiące harmoniczne 6, 12, 18, 24, złożone z dławika 4 mH i kondensatora 50 μ F, a dla zespołów 12-pulsowych dławiki 1,8 mH i kondensatory 100 μ F.

W pracy [2] autorzy przeprowadzili serie pomiarów napięć zasilających podstacje trakcyjne z prostownikami 12-pulsowymi i centralnym urządzeniem wygładzającym (dławik 1,8 mH) dla częstotliwości 600 i 1200 Hz, stwierdzając przekroczenie wartości zakłócającego równoważnego napięcia w sieci trakcyjnej (dwu, a nawet trzykrotnie) i obecność w napięciu i prądzie harmonicznym 300 Hz. Przeanalizowali warunki przetwarzania energii, w szczególności wymagania dotyczące transformatora prostownikowego wyciągając wniosek, że nierównomierność napięć zwarcia uzwojeń wtórnych powoduje ich nierównomierne obciążenie się i stąd obecność harmonicznym 300 Hz. W innych pracach autorzy zwracają uwagę na występowanie harmonicznym niecharakterystycznych w układach przetwarzania 24-pulsowych.

Alternatywą dla filtrów pasywnych są filtry aktywne, działające na zasadzie generowania sygnałów przeciwnych w fazie do harmonicznym generowanych na wyjściu przekształtnika, co powoduje kompensację danej harmonicznym. Zwykle takie filtry konstruuje się jako hybrydowe. Odznaczają się one jednak wyższą ceną, znacznie większym stopniem złożoności i koniecznością stosowania dodatkowych układów zabezpieczeń. Mają jednak mniejsze gabaryty i znacznie lepsze własności tłumiące od filtrów pasywnych [7,8].

Poza układami filtrów dławiki używane są też do wyrównywania obciążeń pomiędzy poszczególnymi grupami mostków (prądy wyrównawcze) i zespołów prostownikowych. Zazwyczaj montowane są w grupach katodowych prostowników.

Na jakość napięcia wyprostowanego, określaną poprzez sumaryczny współczynnik THD, największy wpływ mają harmoniczne rzędu 6, 12, 18 i 24. W trakcie poprzednich badań dyskusjo-

wano m.in. wpływ asymetrii napięcia zasilającego i wpływ odkształcenia napięcia zasilającego od idealnej sinusoidy [5]. Udowodniono też, że poza współczynnikiem THD napięcia zasilającego zespół, opierającym się na wartościach skutecznych (amplitudach) poszczególnych wyższych harmonicznym, decydującą rolę odgrywają też kąty fazowe poszczególnych wyższych harmonicznym napięcia zasilającego [3]. Różne jest też zachowanie układów przy połączeniach prostowników równoległym, szeregowym, szeregowo-równoległym (które z nich jest możliwe, o tym decyduje połączenie uzwojeń transformatora prostownikowego po stronie wtórnej).

Badając problemy przetwarzania energii w układach 24-pulsowych, obserwuje się zjawisko zanikania składowej $24f$ w napięciu wyprostowanym (f - częstotliwość napięcia sieci energetycznej). Składowa ta jest obecna, gdy zespół prostownikowy pracuje jałowo, ale przy obciążeniu układów jej rolę przejmuje składowa $6f$ i układ zachowuje się jak 6-pulsowy. Związane to jest z komutacją prądów w uzwojeniach transformatorów, w którym czynnikiem wydłużającym przepływ prądu w danym uzwojeniu (i tym samym w gałęzi mostka) są reaktancje uzwojeń transformatora. Komutacyjne spadki napięć w mostku są w głównej mierze funkcją reaktancji transformatora. Przewodzenie prądu przez daną gałąź, trwające w sumie tyle, ile wynosi czas przewodzenia diod i czas komutacji diod, ma konsekwencję taką, że na wyjściu mostka napięcie fazowe danego uzwojenia obecne jest dłużej, niż przy pracy jałowej transformatora. Stąd też obserwowana zmiana kształtu napięcia wyprostowanego pociągająca za sobą zmianę zawartości harmonicznym.

Reasumując: zespół prostownikowy 24-pulsowy generuje napięcie wyprostowane o liczbie pulsów i współczynniku tętnienia (zawartości harmonicznym) zależnym nie tylko od układu połączeń transformatora i liczby diod mostków prostownikowych, ale również od:

- układu połączeń mostków prostownikowych
- współczynnika THD napięcia zasilającego
- kształtu napięcia zasilającego.

Stosowanie układów 24-pulsowych wiąże się również oczywiście z podwyższeniem gabarytów transformatora (transformatorów) zespołu prostownikowego. Analiza dla układów wielopulsowych w porównaniu z układem

6-pulsowym była przedstawiona w artykule [4]. Analiza ta w skrócie dotyczy zwiększenia masy danego transformatora wielofazowego w stosunku do układu 3-fazowego Yd, przeliczono również wzrost strat mocy samego transformatora. Układy te były jednak analizowane przy ściśle sinusoidalnym napięciu zasilania, czyli dla sytuacji wyidealizowanej, nie mającej pokrycia w rzeczywistości.

W obecnym artykule próbujemy odpowiedzieć na kilka pytań:

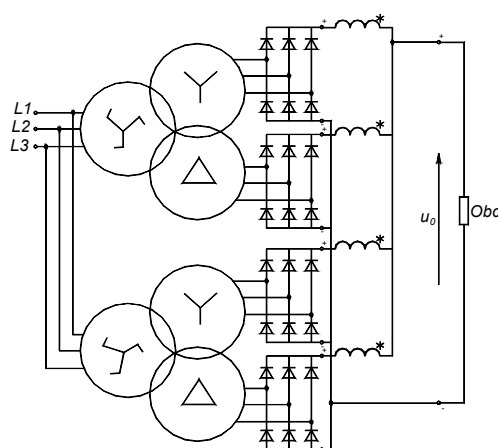
- jaki jest wzrost strat mocy układu przetwarzania energii wielofazowego przy napięciu zasilania odbiegającym od sinusoidalnego i różnych kształtach tego napięcia,
- czy można w stanie obciążenia zespołu prostownikowego 12-fazowego doprowadzić do zmniejszenia tętnienia napięcia wyprostowanego, czyli doprowadzić do zmniejszenia harmonicznej rzędu 6 i zwiększenia harmonicznej rzędu 24 przy pomocy dławików po stronie napięcia wyprostowanego,
- czy zastosowanie dławików po stronie napięcia wyprostowanego umożliwia zmniejszenie generacji wyższych harmonicznych do sieci zasilającej?

Analizowane układy prostownikowe

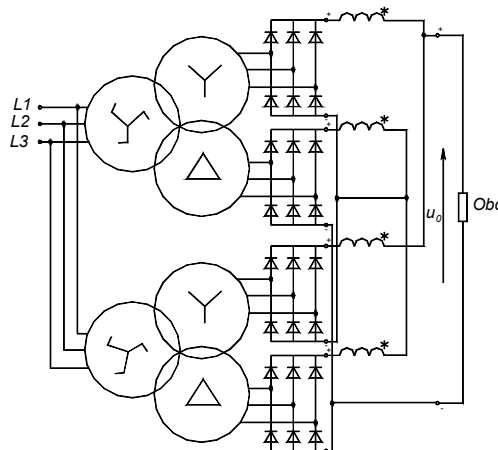
Postanowiono przeanalizować pracę zespołów prostownikowych 24-pulsowych, zbudowanych na bazie transformatora w układzie $2(Y_{Z}Yd)$ (dwa identyczne transformatory 6-fazowe, o dwóch uzwojeniach wtórnych każdy, uzwojenia pierwotne w układzie zygzaka), w którym napięcia fazowe (sprawdzić) stron wtórnych przesunięte są między sobą o kąty kolejno 15° , 15° , 75° , 15° itd. Układ prostujący jest złożony standardowo z prostowników mostkowych diodowych, z tym, że prostowniki te mogą być łączone albo równoległe, albo w układzie mieszanym – szeregowo-równoległym (p. rys.1 a,b). Jako układ odniesienia przyjęto transformator Yd z prostownikiem, czyli układ 6-pulsowy. Obliczenia prowadzono metodą symulacji komputerowych, w programie TCAD. Układy obciążono mocą prądu stałego 10 kW, zaś zasilano napięciem albo sinusoidalnym, albo odkształconym. Odkształcenie napięcia zasilania przyjęto następujące: całkowity THD na poziomie 7,81%, przy czym obecne są 5. i 7. harmoniczna napięcia na poziomie odpowiednio 6% i 5% wartości skute-

cznej harmonicznej podstawowej. Dodatkowo przyjęto, że kąty fazowe harmonicznej 5 i 7 wynoszą $\varphi_5 = 0^\circ$ i $\varphi_7 = 180^\circ$ albo $\varphi_5 = 180^\circ$ i $\varphi_7 = 180^\circ$. Przesunięcia fazowe tych harmonicznych skutkują zmianą kształtu napięcia zasilającego [7]. Przy założeniu niezmienności napięcia zasilania (sztywna sieć) obliczono przebiegi napięcia wyprostowanego, prądów zasilania i spektra harmonicznych tych wielkości.

a)



b)

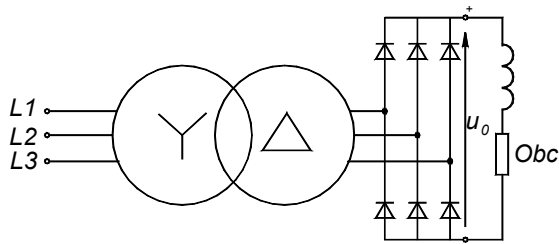


Rys. 1. Transformator prostownikowy w układzie $2(Y_{Z}Yd)$ z prostownikami połączonymi a) równoległe, b) szeregowo równoległe i z dławikami wygładzającymi katodowymi

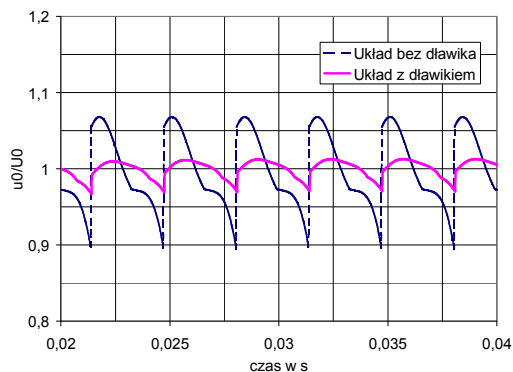
Praca układu 6-pulsowego

Dla 6-pulsowego układu prostującego obserwuje się duże pulsacje napięcia wyprostowanego, rzędu ok. 20% (p. tabela 1). Dla zmniejszenia pulsacji zastosowano dławik włączony szeregowo z obciążeniem (rys.2), o wartości 20 mH. Spowodowało to mniej więcej

czterokrotne zmniejszenie tętnienia napięcia wyprostowanego - p.rys.3.



Rys. 2. Układ prostownikowy z transformatorem Yd i dławikiem wygładzającym



Rys. 3. Przebieg napięcia wyprostowanego w układzie prostownikowym Yd bez i z dławikiem wygładzającym (zasilanie napięciem odkształconym)

Zestawienie wyników symulacji – wartości tętnień, THD i poszczególnych znaczących harmonicznych napięcia wyprostowanego oraz THD i znaczących harmonicznych prądu sieci obrazują tabele 1 i 2.

Zmniejszenie pulsacji napięcia wyprostowanego i prądu wyprostowanego powoduje nieznaczne zwiększenie odkształcenia prądu zasilania transformatora (przyrost do 5%). W porównaniu z układem bez dławika przy zasilaniu sinusoidalnym, straty w uzwojeniach transformatora wzrastają o co najwyżej 0,5%, zaś w rdzeniu transformatora o co najwyżej 1,4%.

Tabela 1. Parametry napięcia wyprostowanego, układ Yd

Zasilanie*	Napięcie wyprostowane					
	pulsacja	Harmoniczne				
		THD w %	n=6 w %	n=12 w %	n=18 w %	n=24 w %
1	0,2068	5,74	5,09	1,30	1,16	0,85
2	0,304	11,41	11,19	1,43	1,17	0,94
3	0,1725	4,59	3,76	1,91	1,26	0,87
4	0,0475	1,31	1,25	0,30	0,10	0,10
5	0,0806	2,78	2,75	0,31	0,13	0,12
6	0,0457	1,15	1,03	0,40	0,19	0,13

- *1 – zasilanie sinusoidalne
- 2 – zasilanie napięciem odkształconym, $\varphi_5 = 0^\circ$, $\varphi_7 = 180^\circ$
- 3 – zasilanie napięciem odkształconym, $\varphi_5 = 180^\circ$, $\varphi_7 = 180^\circ$
- 4,5,6 – odpowiednio jak 1, 2, 3, ale z dławikiem

Tabela 2. Parametry prądu zasilania, układ Yd

Zasilanie*	Prąd sieci						
	Harmoniczne						
	THD w %	n=5 w %	n=7 w %	n=11 w %	n=13 w %	n=17 w %	n=19 w %
1	22,33	18,50	10,52	4,64	4,01	1,35	1,45
2	24,50	22,24	7,60	5,22	3,59	1,83	1,36
3	21,90	18,67	9,51	4,70	3,15	1,83	1,44
4	25,60	19,40	12,78	7,39	5,70	3,60	2,84
5	25,78	20,08	12,06	7,30	5,69	3,63	2,89
6	25,99	19,44	12,90	7,64	6,03	3,96	3,21

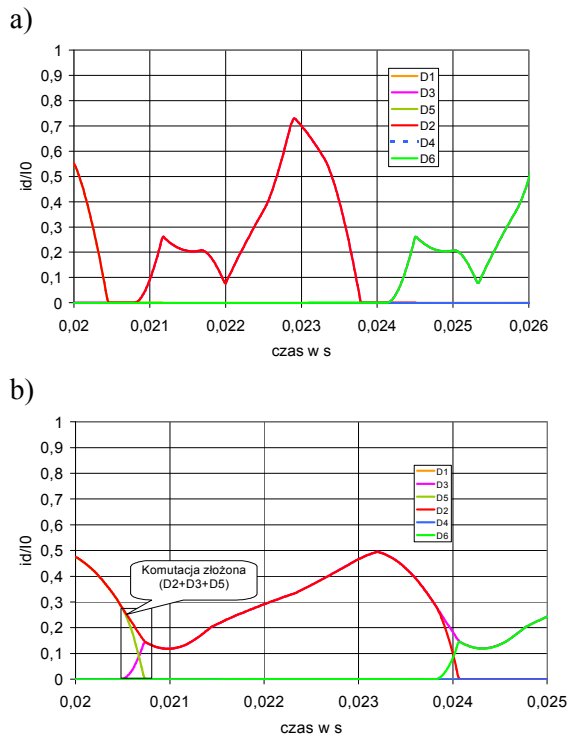
*Oznaczenia jak w Tab.1

Praca układu 24-pulsowego

W układzie 24-pulsowym, złożonym z dwóch transformatorów Yd, zastosowano dławiki po stronie napięcia wyprostowanego. Dławiki te są sprzężone magnetycznie każdy z każdym w układzie równoległym (rys.1a) i w poszczególnych grupach prostowników – dla prostowników łączonych równoległe (rys.1b). Wartość pojedynczego dławika wynosi w układzie równoległym 20 mH, w szeregowo-równoległym 10 mH. Jak poprzednio, oszacowano parametry napięcia wyprostowanego, prądu zasilania i wzrost strat mocy w uzwojeniach i rdzeniu w stosunku do transformatora zasilanego napięciem sinusoidalnym. Wyniki zamieszczono w tabelach 3 i 4 i na rys.5.

Wpływ dławików na komutację diod zobrazowano na rys.4 a i b, dla połączenia równoległego prostowników. Włączenie dużej reaktancji w obwód komutacyjny powoduje wydłużenie czasu przewodzenia diod i przejście z komutacji prostej w komutację złożoną.

Po zastosowaniu dławików pulsacja napięcia wyprostowanego znacząco spada, współczynnik THD jest niezależnie od rodzaju zasilania trzykrotnie niższy niż w układzie bez dławików. Włączenie dławików nieznacznie pogarsza oddziaływanie transformatora prostownikowego na sieć; wzrastają praktycznie wszystkie harmoniczne, ale wzrost ten wynosi ok. 2,3 punktu procentowego dla układu równoległego i 1,3 punktu procentowego dla układu szeregowo-równoległego.



Rys. 4. Przebieg prądów diod w pierwszym mostku prostownikowym, układ z prostownikami łączonymi równolegle; a) bez dławika, b) z dławikiem

Przyrost strat mocy w uzwojeniach transformatora w stosunku do układu nie pracującego na prostownik wynosi w najgorszym przypadku (zasilanie odkształconym napięciem, $\varphi_s = 180^\circ$, $\varphi_r = 180^\circ$) 131%, ale po włączeniu dławików już tylko 72%. Przy każdym rodzaju zasilania i dla każdego układu prostowników włączenie dławików zmniejsza straty w uzwojeniach. Przyrosty strat mocy w rdzeniu zależne od wartości skutecznych i częstotliwości poszczególnych harmonicznnych, znów w porównaniu z transformatorem nie pracującym na układ prostownikowy, wahają się od 35% dla zasilania sinusoidalnego i 167% dla zasilania odkształconym napięciem w układzie równoległym i od 85% przy zasilaniu sinusoidalnym do 216% dla zasilania napięciem odkształconym w układzie szeregowo-równoległym. Włączenie dławików zmniejsza te straty pięciokrotnie.

Należy zauważyć, że niezależnie od tego, czy dławiki pracują czy nie, odkształcenie napięcia zasilania powoduje natychmiastowe przejście układu w stan pracy 6-pulsowej.

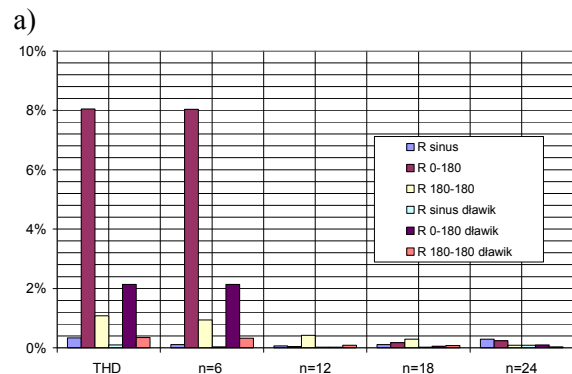
Tabela 3. Parametry napięcia wyprostowanego; przyrosty strat mocy transformatora w stosunku do układu pracującego bez prostownika

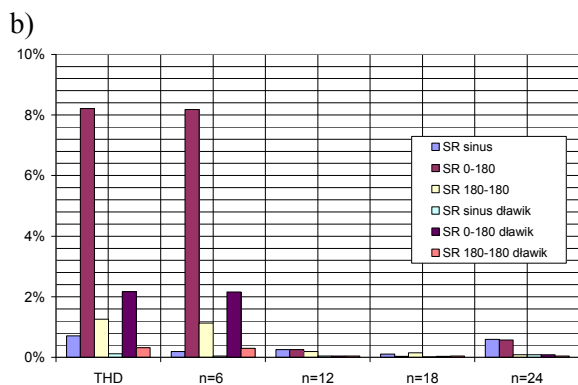
Prostowniki, zasilanie	THD w %	n=6 w %	n=12 w %	n=18 w %	n=24 w %	ΔP_{Fe} w %	ΔP_{Cu} w %	
R	1	0,34	0,11	0,07	0,11	0,29	35,2	0,00
	2	8,04	8,03	0,05	0,17	0,24	167,1	-7,8
	3	1,08	0,94	0,42	0,29	0,09	42,7	131,3
	4	0,10	0,03	0,02	0,02	0,09	7,1	-98,3
	5	2,14	2,14	0,02	0,06	0,10	33,9	-101,7
	6	0,35	0,32	0,09	0,08	0,03	8,2	71,9
SR	1	0,71	0,19	0,26	0,11	0,59	84,8	0,0
	2	8,21	8,18	0,26	0,03	0,57	215,8	-11,1
	3	1,26	1,13	0,19	0,15	0,09	28,0	-16,4
	4	0,12	0,04	0,04	0,01	0,09	7,2	-72,6
	5	2,17	2,16	0,04	0,03	0,09	32,3	-71,6
	6	0,32	0,30	0,05	0,05	0,04	6,5	-72,2

Tabela 4. Parametry prądu zasilania

Prostowniki, zasilanie	THD ₁ w %	n=5 w %	n=7 w %	n=11 w %	n=13 w %	n=17 w %	n=19 w %	
R	1	3,89	1,96	1,34	0,50	0,39	0,47	0,42
	2	8,05	7,48	1,02	0,47	0,35	0,73	0,68
	3	11,72	8,93	7,10	1,45	1,62	0,88	0,66
	4	5,24	3,31	2,33	0,45	0,36	1,09	0,96
	5	7,97	6,33	3,46	0,26	0,18	1,60	1,35
	6	14,09	10,55	8,37	2,14	2,19	0,51	0,19
SR	1	1,55	0,08	0,23	1,09	0,81	0,19	0,12
	2	5,46	4,30	3,01	1,10	0,82	0,17	0,08
	3	7,00	5,19	4,56	0,72	0,34	0,37	0,29
	4	2,81	0,48	0,33	0,88	0,68	0,08	0,06
	5	3,29	1,70	0,75	0,88	0,67	0,32	0,30
	6	7,65	5,19	5,08	1,04	0,84	1,04	0,77

*Oznaczenia jak w Tab.1, R – równoległe, SR – szeregowo-równoległe połączenie prostowników





Rys. 5. Zestawienie parametrów napięcia wyprowadzonego dla układów zasilanych różnymi napięciami, sinusoidalnymi i odkształconymi w dwóch wariantach; a) prostowniki połączone równolegle, b) prostowniki połączone szeregowo-równolegle

Literatura

- [1]. Mierzejewski L., Szelaż A.: *Analiza efektywności filtrów wygładzających w podstacjach trakcji kolejowej 3 kV dc przy zakłóceniach napięcia zasilającego*. Materiały 8. Międzynarodowej Konferencji Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe (MET) Warszawa 2007.
- [2]. Czuchra W., Kowalczewski M., Zając W.: *Analiza przyczyn odkształceń napięć wyjściowych prostownika 12-pulsowego na podstacji trakcyjnej*. Materiały konferencji MET 2003.
- [3]. Sikora A., Kulesz B.: *Wpływ procesów komutacyjnych na pracę transformatora prostownikowego o nietypowym układzie połączeń*. Zeszyty Problemowe BOBRME Komel, 86/2010, str. 47-52. Wyd. BOBRME Komel, Katowice.
- [4]. Sikora A., Kulesz B.: *Transformatory prostownikowe podstacji trakcyjnej – poszukiwanie najkorzystniejszego rozwiązania*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 83/2009r. BOBRME Komel, Katowice.
- [5]. Sikora A., Kulesz B.: *Wpływ kształtu napięcia zasilania na pracę transformatorów prostownikowych 24-pulsowych*. Materiały XIV Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej Trakcji Elektrycznej i VI Szkoły Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie SEMTRAK 2010, Kraków 2010.
- [6]. Korzycki E., Mazurek P., Świątek H., Zymmer K.: *Uwarunkowania i zalety stosowania w trakcji elektrycznej 18 i 24-pulsowych zespołów prostownikowych*. Materiały konferencji SEMTRAK 2006.
- [7]. Kurowski T.: *Dopasowanie elektromagnetyczne przekształtników statycznych w obwodach dużej mocy. Zarys filtrów hybrydowych*. Materiały konferencji MET 1997.

[8]. Płatek T., Niewiadomski M., Baranecki A.: *Filtry aktywne ze sterowaniem DSP*. Materiały konferencji MET 2003.