

## BADANIE JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ NA SZYNACH ZBIORCZYCH SN W PODSTACJACH TRAKCYJNYCH

Wojciech DZIENIS<sup>1</sup>

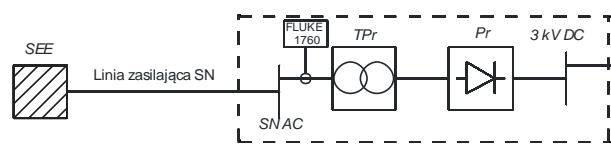
1. PKP Energetyka S.A. Zakład Wschodni, ul. Hetmańska 103, 15-727 Białystok, tel: 085 652 62 70, fax: 085 652 00 20, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Zakład Elektroenergetyki, ul. Wiejska 45 D, 15-351 Białystok, tel: 085 746 94 28, fax: 085 746 94 00 e-mail: w.dzienis@pkpenergetyka.pl

**Streszczenie:** Podstacje trakcyjne (PT) przyłączone do sieci rozdzielczej SN wprowadzają zakłócenia. Podstacje te są jednym z odbiorów, które powodują odkształcenie krzywej prądu i w efekcie – napięcia. W artykule pokazano, że nie tylko PT są przyczyną odkształcenia napięcia. Obliczone zostały współczynniki korelacji. Wykonano analizę kierunku przepływu harmonicznych mocy czynnej.

**Słowa kluczowe:** podstacja trakcyjna, wyższe harmoniczne prądu i napięcia.

### 1. WSTĘP

Ocena warunków pracy podstacji trakcyjnych (PT) wymaga przeprowadzenia analizy pracy układu zasilania z systemu elektroenergetycznego (SEE) oraz obciążeń zespołów prostownikowych. Od parametrów systemu elektroenergetycznego takich jak: moce zwarciove, rodzaje, długości, przekroje i napięcia linii zasilających oraz wyposażenia podstacji trakcyjnych w zakresie zainstalowanej aparatury, w tym przede wszystkim: typy i liczba zespołów prostownikowych, zależy wpływ pracy podstacji trakcyjnej na jakość energii elektrycznej w SEE. Informacje te dla badanych PT zamieszczono w tabelicy 1. Natomiast na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy podstacji trakcyjnej systemu prądu stałego o napięciu 3 kV.



Rys. 1. Schemat blokowy podstacji trakcyjnej

SEE – system elektroenergetyczny, SN AC – szyny zbiorcze rozdzielni średniego napięcia w podstacji trakcyjnej, FLUKE 1760 – rejestrator jakości energii elektrycznej, TPr – transformator prostownikowy, Pr – prostownik, 3 kV DC – szyny zbiorcze rozdzielni prądu stałego 3 kV

System trakcji elektrycznej prądu stałego jako odbiornik dużej mocy nie tylko uzależniony jest od pracy SEE, ale również ma znaczący wpływ na pracę tego SEE. Zespoły prostownikowe opisane są nieliniową charakterystyką prądowo – napięciową i powodują generację wyższych harmonicznych do SEE. Wyższe harmoniczne prądu odbiornika powodują powstawanie na impedancji linii spadków napięć o częstotliwości danej harmonicznej, które odkształcają napięcie systemu elektroenergetycznego [1, 2, 3]. W związku z tym składowe harmoniczne rozprzestrzeniają się dalej jako harmoniczne napięcia.

Tabela 1. Charakterystyka układu elektroenergetycznego wybranych do badań podstacjach trakcyjnych

L.p.	Obiekt	Seksja	$S_{kPT}''$ MV·A	Linia zasilająca			Liczba i typ zespołów prostownikowych	
				oznaczenie linii	długość $l$ m	rezystancja $R_L$ $\Omega$		reaktancja $X_L$ $\Omega$
1	PT nr 1	1	45,5	PKP1	10000	1,26	1,10	2 × PD-12/3,3
		2	59,9	PKP2	10000	1,26	1,10	
2	PT nr 2	1	88,1	PKP1	580	0,07	0,06	2 × PD-12/3,3
		2	90,0	PKP2	580	0,07	0,06	
3	PT nr 3	1	47,0	PKP1	8740	1,10	0,96	2 × PD-12/3,3
		2	59,0	PKP2	8740	1,10	0,96	
4	PT nr 4	1	128,9	PKP1	2180	0,27	0,24	2 × PD-12/3,3
		2	143,0	PKP2	2180	0,27	0,24	
5	PT nr 5	1	134,9	PKP1	950	0,12	0,10	2 × PD-12/3,3
		2	138,0	PKP2	950	0,12	0,10	
6	PT nr 6	1	134,5	PKP1	200	0,02	0,02	2 × PD-16/3,3 + PD-12/3,3
		2	134,5	PKP2	200	0,02	0,02	
7	PT nr 7	1	142,0	PKP1	860	0,11	0,09	2 × PD-17/3,3
		2	133,9	PKP2	860	0,11	0,09	

Tablica 2. Dopuszczalne procentowe wartości odkształcenia prądu w sieci dystrybucyjnej o napięciu znamionowym od 120 do 69000 V [7]

L.p.	$I_{sc}/I_L$	$< 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD	
1		-				%		
2	$< 20$	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0	
3	$20 \div 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0	
4	$50 \div 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0	
5	$100 \div 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0	
6	$> 1000$	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0	

Przeprowadzono w kilku reprezentatywnych PT badania obciążenia, harmonicznych prądu i napięcia oraz kierunku przepływu harmonicznych mocy czynnej. Pomiary przeprowadzono analizatorem parametrów jakości energii elektrycznej FLUKE 1760 klasy A.

## 2. BADANIA HARMONICZNYCH PRĄDU

Wymagania odnośnie poziomów generacji harmonicznych prądu znormalizowane są obecnie w Polsce jedynie dla odbiorników przyłączanych do sieci nn. Odbiorniki sklasyfikowano w dwóch przedziałach znamionowego prądu fazowego:  $\leq 16$  A [4] oraz  $> 16$  A [5]. W oparciu o normy [4, 5] operatorzy systemu dystrybucyjnego w swoich instrukcjach ruchu i eksploatacji sieci dystrybucyjnej [6] zamieścili dopuszczalne poziomy emisji harmonicznych prądu jako obligatoryjne. W przypadku sieci o napięciu znamionowym wyższym od 1 kV, brak jest wymagań w zakresie dopuszczalnych poziomów generacji harmonicznych prądu. Z uwagi na brak krajowych unormowań dotyczących poziomu harmonicznych prądu oraz współczynnika odkształcenia prądu  $THD_1$  (total harmonic distortion) na poziomie SN – w celu porównawczym – można posłużyć się postanowieniami standardu [7]. W dokumencie tym wyszczególniony jest przedział napięć od 0,12 kV do 69 kV. Podane są również przedziały stosunku prądu zwarciovego  $I_{sc}$  (w Polsce odpowiednikiem jest  $I_k''$ ) do średniego prądu obciążenia  $I_L$  w punkcie wspólnego przyłączenia PT. Jako średnią wartość prądu obciążenia standard IEEE 519-1992 [7] zaleca stosować średni prąd w okresie maksymalnie do 12 miesięcy. W tablicy 2 przedstawiono dopuszczalne wartości harmonicznych prądu oraz współczynnika odkształcenia prądu TDD (total demand distortion). Harmoniczne prądu odnoszone są do składowej podstawowej, natomiast współczynnik TDD odnoszony jest do wartości skutecznej prądu obejmującej wszystkie harmoniczne do 50 rzędu. Wartości te obliczane są jako średnia za okres 15- lub 30-minutowy. Wartości zawarte w tablicy 2 nie powinny zostać przekroczone w sieci zasilającej prostowniki 6-pulsowe przy maksymalnym średnim 15- lub 30-minutowym obciążeniu. Natomiast dla prostowników 12-pulsowych wartości charakterystycznych harmonicznych prądu mogą być zwiększone o  $\sqrt{q/6}$  razy, gdzie  $q$  – liczba pulsów prostownika. Warunkiem jest jednak

to, że harmoniczne niecharakterystyczne dla prostownika 12-pulsowego muszą osiągać wartości mniejsze o 25% w stosunku do przedstawionych w tablicy 2 [7].

W badanych podstacjach przyjęto średni prąd w okresie 1 tygodnia. W tablicy 3 zamieszczono wartości średnie prądów  $I_L$  zasilających zespoły prostownikowe, wartości prądów zwarciovych  $I_{sc}$  oraz wartości ilorazów  $I_{sc}/I_L$ .

Z zestawienia wynika (tab. 3), że w stosunku do sześciu podstacji trakcyjnych należy zastosować dopuszczalne wartości procentowe harmonicznych prądu z przedziału ilorazu  $I_{sc}/I_L$  100 ÷ 1000. Jedynie w przypadku PT nr 5 można zastosować przedział ilorazu  $I_{sc}/I_L$  powyżej 1000 (tab. 3, poz. 5).

Tablica 3. Zestawienie prądów obciążenia, prądów zwarciovych  $I_{sc}$  oraz wartości ilorazów  $I_{sc}/I_L$  w badanych podstacjach trakcyjnych

L.p.	Obiekt	$I_L$	$I_{sc}$	$I_{sc}/I_L$
		A	kA	
1	PT nr 1	17,21	1,75	101,76
2	PT nr 2	4,91	3,39	690,63
3	PT nr 3	6,97	1,81	259,55
4	PT nr 4	9,51	4,96	521,70
5	PT nr 5	4,85	5,19	1070,58
6	PT nr 6	32,62	5,18	158,70
7	PT nr 7	11,98	5,47	456,23

W tablicy 4 zestawiono wartości procentowych harmonicznych prądu niecharakterystycznych dla 12-pulsowych zespołów prostownikowych przy maksymalnym 15-minutowym obciążeniu mocą czynną. Z przeprowadzonych badań i zestawionych wyników (tab. 4) można stwierdzić, że w żadnym z rozpatrywanych przypadków nie występuje przekroczenie dopuszczalnej procentowej zawartości harmonicznych niecharakterystycznych prądu. Oznacza to, że wartości dopuszczalne charakterystycznych harmonicznych prądu mogą być zwiększone o  $\sqrt{q/6}$  razy, gdzie  $q = 12$ .

W tablicy 5 zestawiono wartości procentowe charakterystycznych harmonicznych prądu oraz współczynnika TDD przy maksymalnym 15-minutowym obciążeniu 12-pulsowych zespołów prostownikowych. Wybrane zostały maksymalne wartości procentowe spośród trzech wartości fazowych.

Tablica 4. Zestawienie wartości procentowych harmonicznych prądu niecharakterystycznych dla 12-pulsowego zespołu prostownikowego przy maksymalnym 15-minutowym obciążeniu mocą czynną

L.p.	Obiekt	$P_{SN}$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$
		MW	%				
1	PT nr 1	1,20	$I_7 = 4,64$	$I_{15} = 0,27$	$I_{17} = 0,42$	$I_{29} = 0,32$	$I_{41} = 0,21$
2	PT nr 2	1,37	$I_5 = 1,30$	$I_{15} = 0,31$	$I_{21} = 0,22$	$I_{27} = 0,17$	$I_{39} = 0,10$
3	PT nr 3	1,28	$I_2 = 2,40$	$I_{15} = 0,08$	$I_{17} = 0,18$	$I_{29} = 0,12$	$I_{41} = 0,07$
4	PT nr 4	1,24	$I_7 = 0,75$	$I_{15} = 0,18$	$I_{17} = 0,24$	$I_{29} = 0,15$	$I_{41} = 0,11$
5	PT nr 5	0,91	$I_5 = 5,90$	$I_{15} = 0,30$	$I_{17} = 0,20$	$I_{29} = 0,18$	$I_{39} = 0,19$
6	PT nr 6	2,68	$I_2 = 1,72$	$I_{15} = 0,18$	$I_{17} = 1,05$	$I_{29} = 0,71$	$I_{41} = 0,37$
7	PT nr 7	1,54	$I_7 = 1,90$	$I_{15} = 0,18$	$I_{17} = 0,51$	$I_{29} = 0,32$	$I_{41} = 0,23$

Tablica 5. Zestawienie wartości procentowych harmonicznych prądu charakterystycznych dla 12-pulsowego zespołu prostownikowego oraz współczynnika  $TDD$  przy maksymalnym 15-minutowym obciążeniu mocą czynną

L.p.	Obiekt	$P_{SN}$	$I_{11}$	$I_{13}$	$I_{23}$	$I_{25}$	$I_{35}$	$I_{37}$	$I_{47}$	$I_{49}$	$TDD$
		MW	%								
1	PT nr 1	1,20	1,34	0,48	0,25	0,23	0,11	0,11	0,13	0,14	11,40
2	PT nr 2	1,37	7,42	5,67	2,16	1,77	0,78	0,69	0,51	0,45	9,38
3	PT nr 3	1,28	5,98	4,03	1,78	1,52	0,68	0,59	0,44	0,38	8,43
4	PT nr 4	1,24	7,45	5,61	1,92	1,56	0,84	0,72	0,48	0,42	8,23
5	PT nr 6	2,68	7,62	5,39	1,60	1,24	0,43	0,31	0,19	0,18	10,29
6	PT nr 7	1,54	7,52	5,74	2,07	1,76	0,87	0,77	0,51	0,46	10,45
Wartości dopuszczalne dla PT z poz. 1 ÷ 6			7,78		2,83		1,41			15	
7	PT nr 5	0,91	8,66	5,88	2,59	2,12	1,06	0,94	0,63	0,56	9,60
Wartości dopuszczalne dla PT z poz. 7			9,90		3,54		1,98			20	

Z zestawienia (tab. 5) wynika, że jedynie w PT nr 6 wartość procentowa 11 harmonicznej prądu wynosi około 98% wartości dopuszczalnej. W pozostałych PT procentowe zawartości harmonicznych prądu osiągają wartości znacznie mniejsze niż dopuszczalne przez [7]. W przypadku współczynnika odkształcenia prądu  $TDD$  w każdej z badanych PT występują wartości nie przekraczające 76% wartości dopuszczalnej (tab. 5 poz. 1).

Należy podkreślić, że przedstawione wymagania nie stanowią żadnej podstawy prawnej do określenia dopuszczalnych poziomów harmonicznych w prądzie w polskich sieciach rozdzielczych SN. W niniejszej pracy służą one jako punkt odniesienia do wyników badań przeprowadzonych w podstacjach trakcyjnych.

### 3. BADANIA HARMONICZNYCH NAPIĘCIA

Zespoły prostownikowe zainstalowane w PT są urządzeniami nieliniowymi. Pobierają z sieci elektroenergetycznej odkształcony prąd. Spadki napięcia na impedancji sieci zasilającej są przyczyną odkształcenia napięcia w punkcie przyłączenia odbiornika oraz w głębi sieci. Na poziomie SN do analizy zagadnienia wyższych harmonicznych napięcia jako składowe impedancji układu zasilającego należy przyjmować rezystancję oraz indukcyjność [8, 9]. Zatem punkt przyłączenia linii zasilającej PT oraz linię można łącznie traktować jako dwójnik szeregowy  $RL$  o parametrach skupionych. Przepływ prądu wyższej harmonicznej przez taką impedancję wywoła spadek napięcia o częstotliwości odpowiedniej dla danej harmonicznej prądu.

Obowiązujące obecnie w Polsce akty prawne definiują

w sposób jednoznaczny dla sieci SN dopuszczalne poziomy zawartości harmonicznych w przebiegu napięcia zasilającego. Charakteryzowane są one w dwojaki sposób [2, 10]:

- indywidualnie, przez względną wartość napięcia danej harmonicznej – w normalnych warunkach pracy [2] w ciągu każdego tygodnia, 95% ze zbioru 10-minutowych średnich wartości skutecznych dla każdej harmonicznej napięcia zasilającego,
- łącznie, przez całkowity współczynnik odkształcenia harmonicznymi napięcia  $THD_U$ , uwzględniający wszystkie harmoniczne do rzędu  $h = 40$ .

Dopuszczalne poziomy harmonicznych napięcia dla sieci SN pracującej bez zakłóceń zamieszczono w tablicy 6.

W tablicy 6 zestawiono również wyniki badań procentowej zawartości harmonicznych napięcia z wybranej PT. Są to percentyle 95% z okresu jednego tygodnia rejestracji.

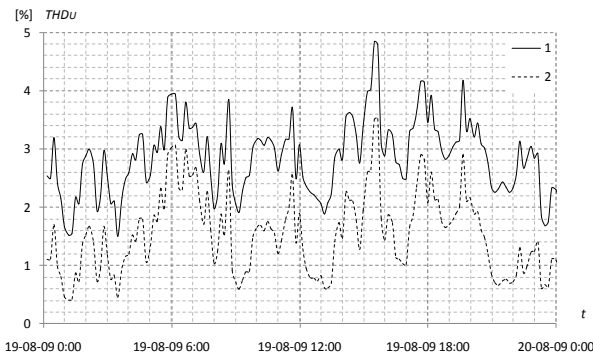
Z analizy wyników badań (tab. 6) procentowej zawartości harmonicznych napięcia wynika, że spełnione są wymagania normy [11] i rozporządzenia [2]. Wartości pomiarowe stanowią przy tym do 79% wartości dopuszczalnych, co ma miejsce w przypadku 11 harmonicznej napięcia (tab. 7).

Na podstawie [2, 11] nie można jednoznacznie wyznaczyć odpowiedzialności odbiorcy o powodowanie odkształcenia napięcia. Natomiast odbiorca może żądać od dostawcy energii elektrycznej utrzymania parametrów napięcia zasilającego w granicach określonych przez [2, 11]. Warunkiem utrzymania parametrów napięcia zasilającego jest pobieranie przez odbiorcę mocy czynnej nie większej od mocy umownej, przy współczynniku  $\text{tg}\phi$  nie większym niż 0,4 [2].

Tablica 6. Dopuszczalne wartości harmonicznych napięcia w sieci SN [2, 11] oraz wartości harmonicznych napięcia pomierzone na szynach zbiorczych SN w PT nr 6

L.p.	Harmoniczne nieparzyste						Harmoniczne parzyste		
	niebędące krotnością 3			będące krotnością 3			Rząd harmonicznej ( $h$ )	Wartość względna napięcia w procentach składowej podstawowej ( $u_h$ )	
	Rząd harmonicznej ( $h$ )	Wartość względna napięcia w procentach składowej podstawowej ( $u_h$ )		Rząd harmonicznej ( $h$ )	Wartość względna napięcia w procentach składowej podstawowej ( $u_h$ )			dopuszczalna	pomierzona
		dopuszczalna	pomierzona		dopuszczalna	pomierzona			
1	5	6%	2,15%	3	5%	0,37%	2	2%	0,03%
2	7	5%	2,01%	9	1,5%	0,16%	4	1%	0,03%
3	11	3,5%	2,76%	15	0,5%	0,08%	>4	0,5%	0,04%
4	13	3%	1,68%	>15	0,5%	0,06%			
5	17	2%	0,30%						
6	19	1,5%	0,33%						
7	23	1,5%	0,20%						
8	$THD_U$	8%	4,29%						

Na rysunku 2 przedstawiono przebiegi współczynnika  $THD_U$  odpowiadające obciążeniu z rysunku 3. Zamieszczono przebieg współczynnika  $THD_U$  obejmujący harmoniczne rzędów od 2 do 40 oraz przebieg obejmujący jedynie harmoniczne charakterystyczne dla 12-pulsowego zespołu prostownikowego.

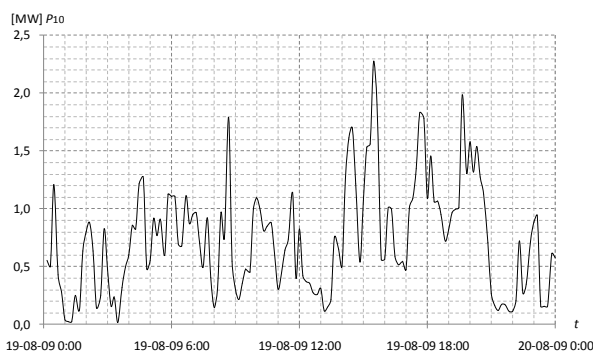


Rys. 2. Dobowy przebieg współczynnika  $THD_U$  (wartość średnia 10-minutowa) na szynach SN w PT nr 6. 1 – przebieg współczynnika  $THD_U$  obejmujący wszystkie harmoniczne do 40 rzędu, 2 – przebieg współczynnika  $THD_U$  obejmujący harmoniczne charakterystyczne dla 12-pulsowego prostownika

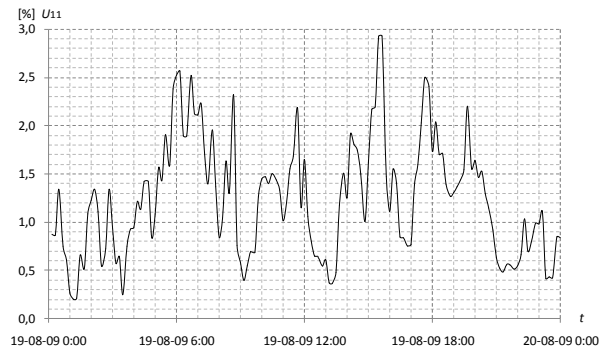
Przebieg współczynnika  $THD_U$ , obejmujący harmoniczne rzędów od 2 do 40, osiąga wartości większe niż wynika to z obecności harmonicznych charakterystycznych. Występują zatem, harmoniczne napięcia spowodowane przepływem harmonicznych prądu niecharakterystycznych dla 12-pulsowego prostownika trakcyjnego. Oznacza to, że PT nie stanowi jedynego źródła zakłóceń wprowadzanych do publicznej sieci rozdzielczej w punkcie przyłączenia.

#### 4. KORELACJA POMIĘDZY ODKSZTAŁCENIEM NAPIĘCIA A OBCIĄŻENIEM PODSTACJI TRAKCYJNEJ

Opisując wpływ podstacji trakcyjnej na jakość energii elektrycznej w punkcie jej przyłączenia, należy obserwować jednocześnie krzywą napięcia w układzie zasilającym oraz stopień obciążenia podstacji [12, 13]. W badanych PT zainstalowane są zespoły prostownikowe 12-pulsowe. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono dobowe przebiegi wartości średniej 10-minutowej mocy czynnej, pobieranej przez zespół prostownikowy PD-16/3,3 w PT nr 6 oraz odpowiadające im wartości średnie 11 harmonicznej napięcia na szynach SN tej PT. Natomiast współczynnik korelacji obliczono dla wyników rejestracji w okresie tygodniowym.



Rys. 3. Dobowy przebieg obciążenia mocą czynną 10-minutową  $P_{10}$  zespołu prostownikowego PD-16/3,3 w PT nr 6



Rys. 4. Dobowy przebieg wartości średniej 10-minutowej 11 harmonicznej napięcia  $U_{11}$  na szynach SN w PT nr 6

Z porównania przebiegów (rys. 3 i 4) wynika, że przy zwiększaniu się obciążenia wzrasta również i procentowa zawartość 11 harmonicznej napięcia. Przy braku obciążenia, co ma miejsce w godzinach nocnych (rys. 3), 11 harmoniczna również występuje [14]. Ale można wówczas przyjąć, że jej źródłem są również inni odbiorcy, którzy są przyłączeni do szyn SN tego rejonowego punktu rozdzielczego (RPZ).

Do oceny ilościowego wpływu obciążenia na odkształcenie napięcia można użyć współczynnika korelacji [12, 13, 15]. Na podstawie przeprowadzonych badań w PT, została określona wartość tego współczynnika dla harmonicznych napięcia będących wynikiem przepływu harmonicznych prądu charakterystycznych dla prostownika 12-pulsowego. Dodatkowo obliczony został współczynnik korelacji dla 5 i 7 harmonicznej napięcia (jako najbardziej znaczących) oraz dla współczynnika odkształcenia napięcia  $THD_U$ . Poniżej przedstawione są zależności, z których korzystano podczas obliczeń współczynnika korelacji.

Współczynnik korelacji jest opisany zależnością [15]:

$$r_{P_{10}, U_h} = \frac{\text{cov}(P_{10}, U_h)}{\sigma(P_{10})\sigma(U_h)} \quad (1)$$

gdzie kowariancja  $\text{cov}(P_{10}, U_h)$  [15]:

$$\text{cov}(P_{10}, U_h) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{10i} - \overline{P_{10}})(U_{hi} - \overline{U_h}) \quad (2)$$

oraz odchylenia standardowe  $\sigma(P_{10})$  i  $\sigma(U_h)$  [15]:

$$\sigma(P_{10}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{10i} - \overline{P_{10}})^2} \quad (3)$$

$$\sigma(U_h) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_{hi} - \overline{U_h})^2} \quad (4)$$

w których:  $\overline{U_h}$  – średnia arytmetyczna  $h$ -tej harmonicznej napięcia [%],  $\overline{P_{10}}$  – średnia arytmetyczna mocy czynnej 10-minutowej pobieranej przez zespół prostownikowy [W],  $\sigma(P_{10})$  – odchylenie standardowe mocy czynnej 10-minutowej pobieranej przez zespół prostownikowy [W],  $\sigma(U_h)$  – odchylenie standardowe  $h$ -tej harmonicznej napięcia [%],  $\text{cov}(P_{10}, U_h)$  – kowariancja,  $N$  – liczba zmierzonych próbek 10-minutowych

Wyniki obliczeń współczynników korelacji zestawiono w tabelicy 7.

Tablica 7. Wartości współczynnika korelacji pomiędzy harmonicznymi napięciami, współczynnikiem  $THD_U$  a obciążeniem zespołu prostownikowego

L.p.	Zależność korelacyjna	Współczynnik korelacji						
		PT nr 1	PT nr 2	PT nr 3	PT nr 4	PT nr 5	PT nr 6	PT nr 7
1	$P_{10}, U_5$	0,258	-0,111	0,08	-0,11	0,15	0,683	-0,255
2	$P_{10}, U_7$	-0,181	-0,058	0,28	0,10	-0,08	0,770	0,143
3	$P_{10}, U_{11}$	0,727	0,727	0,84	0,63	0,49	0,826	0,684
4	$P_{10}, U_{13}$	0,558	0,688	0,93	0,85	0,69	0,855	0,705
5	$P_{10}, U_{23}$	0,692	0,909	0,84	0,86	0,93	0,754	0,119
6	$P_{10}, U_{25}$	0,705	0,919	0,85	0,81	0,83	0,650	0,289
7	$P_{10}, U_{35}$	0,859	0,865	0,69	0,78	0,56	0,658	0,220
8	$P_{10}, U_{37}$	0,904	0,816	0,68	0,58	0,55	0,723	0,304
9	$P_{10}, THD_U$	0,267	-0,048	0,89	0,07	0,14	0,895	0,034

Z wyników obliczeń współczynnika korelacji (tab. 7) dla wszystkich PT wynika wyraźny związek korelacyjny pomiędzy harmonicznymi napięciami wynikającymi z przepływu charakterystycznych harmonicznymi prądu a mocą obciążenia zespołu prostownikowego. Wyjątkiem jest PT nr 6, gdzie występuje wyraźny związek korelacyjny również dla 5 i 7 harmonicznymi napięciami. Współczynnik korelacji w tej PT dla 7 harmonicznymi wynosi 0,77. Powodowane jest to równoległą pracą 6- i 12-pulsowego zespołu prostownikowego. Maksymalna wartość współczynnika  $THD_U$  na szynach SN tej PT w badanym okresie osiąga wartość 5,37%.

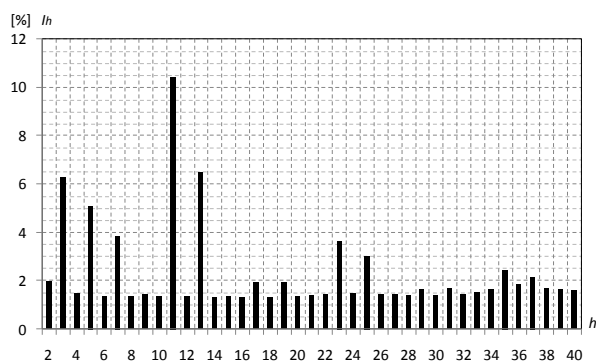
Widoczny jest natomiast zupełny brak związku pomiędzy współczynnikiem  $THD_U$  a mocą obciążenia w pięciu badanych obiektach. Przyczyną jest występowanie innych odbiorów zakłócających. Zmiany odkształcenia, szczególnie w zakresie 5 i 7 harmonicznymi napięcia, co ma wpływ na wartość  $THD_U$  powodowane przez inne odbiory, są na tyle znaczne, że brak jest związku pomiędzy zmianą współczynnika  $THD_U$  a obciążeniem zespołu prostownikowego w PT. W dwóch pozostałych podstacjach – nr 3 oraz nr 6, związek ten jest wyraźny. Spowodowane jest to znacznym udziałem mocy zainstalowanych zespołów prostownikowych w PT w stosunku do mocy transformatora WN/SN w RPZ. W przypadku PT nr 3, moc pracującego zespołu prostownikowego stanowi 70% mocy transformatora WN/SN, a w PT nr 6 moc pracujących zespołów prostownikowych – 100%.

## 5. KIERUNEK PRZEPLYWU HARMONICZNYCH MOCY CZYNNEJ

Wpływ pracy zespołów prostownikowych można również określić analizując kierunek przepływu harmonicznymi mocy czynnej [16]. Dany rodzaj odbiornika charakteryzuje się widmem pobieranego prądu definiowanych jako harmonicznymi charakterystyczne. W przypadku zespołu prostownikowego 12-pulsowego harmonicznymi charakterystyczne prądu liniowego są rzędów  $12n \pm 1$ . Na rysunku 5 przedstawiono z wybranej PT spektrum harmonicznymi prądu jako wartości średnie 1-tygodniowe.

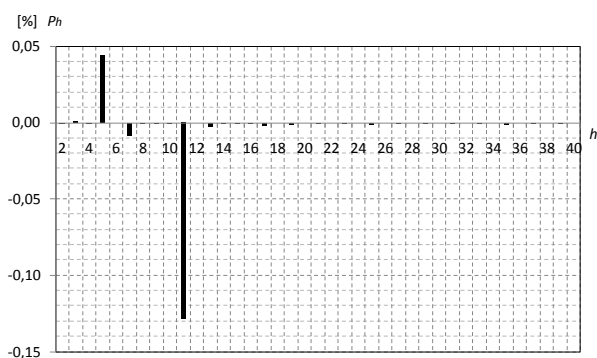
Jak wykazują wyniki badań (rys. 5), występują również harmonicznymi niecharakterystyczne dla danego typu odbiornika. Ich amplitudy są znacznie niższe w porównaniu do tych charakterystycznych. Na podstawie amplitudy harmonicznymi prądu nie można określić, które harmonicznymi prądu generowane są przez pracujący w PT zespół prostownikowy. Kierunek generacji zakłóceń można w przybliżony sposób określić analizując kierunek przepływu harmonicznymi mocy czynnej [16]. W oparciu o przeprowadzone badania w PT, wykonana została analiza kierunku przepływu kolejnych rzędów harmonicznymi mocy czynnej. Przyjęta została następująca konwencja znakowania [16]:

- znak „+” oznacza przepływ mocy czynnej  $h$ -tej harmonicznymi od dostawcy (źródło zasilania) do odbiorcy (zespół prostownikowy),
- znak „-” określa przepływ mocy czynnej  $h$ -tej harmonicznymi od odbiorcy (zespół prostownikowy) na stronę dostawcy energii elektrycznej (źródło zasilania).



Rys. 5. Widmo harmonicznymi prądu jako wartość średnia z jednego tygodnia rejestracji w polu zespołu prostownikowego PD-16/3,3 w PT nr 6

Dla wybranej PT na rysunku 6 przedstawiono spektrum harmonicznymi mocy czynnej rzędów  $2 \leq h \leq 40$  z uwzględnieniem kierunku ich przepływu. Są to wartości średnie obliczone spośród zarejestrowanych próbek 10-minutowych w okresie 1 tygodnia.



Rys. 6. Widmo harmonicznymi mocy czynnej jako wartość średnia z jednego tygodnia rejestracji z uwzględnieniem kierunku przepływu zarejestrowane w polu zespołu prostownikowego PD-16/3,3 w PT nr 6. Moc czynna harmonicznymi podstawowej  $P_1 = 706$  kW

Z przedstawionego widma harmonicznymi mocy czynnej (rys. 6) wynika, że dla harmonicznymi charakterystycz-

nych 12-pulsowego zespołu prostownikowego kierunku przepływu mocy czynnej występuje od odbiornika do źródła zasilania (wartość ujemna). Dla harmonicznych niecharakterystycznych, w szczególności 5 harmonicznej, kierunek jest przeciwny i moc czynna przepływa od źródła zasilania do zespołu prostownikowego. Wyjątkiem jest 7 harmoniczna mocy czynnej, której kierunek przepływu jest od zespołu do dostawcy energii elektrycznej. Jednak w porównaniu do 5 harmonicznej jest to wartość nieznaczna i stanowi tylko około 16% jej amplitudy (rys. 6). Pracujący zespół prostownikowy jest źródłem tylko harmonicznych charakterystycznych dla konfiguracji 12-pulsowej. Natomiast harmoniczne rzędów niecharakterystycznych zespół prostownikowy „pochłania” z sieci elektroenergetycznej. Oznacza to, że 12-pulsowe zespoły prostownikowe w badanych PT są źródłem jedynie harmonicznych charakterystycznych. Pozostałe, występujące harmoniczne niecharakterystyczne mocy czynnej pochodzą od sieci rozdzielczej, do której przyłączona jest dana PT.

## 6. WNIOSKI

Uzyskane wyniki badań harmonicznych prądu pokazują, że spełnione są wymagania nieobowiązującego w Polsce standardu IEEE [7]. Uzyskane wyniki osiągają stosunkowo znaczne wartości i stanowią do 98% wartości dopuszczalnej.

Z wykonanych badań harmonicznych napięcia wynika, że spełnione są wymagania krajowych przepisów w zakresie odkształcenia napięcia zasilającego [2, 11]. Pokazano również, że nie tylko praca podstacji trakcyjnej przyłączonej do szyn SN RPZ-tu wpływa na odkształcenie napięcia. Także inni odbiorcy są przyczyną powstawania odkształcenia napięcia, co wyraźnie widać przy braku obciążenia w PT. Dla potwierdzenia tego faktu obliczone zostały również współczynniki korelacji, których wartości potwierdzają, że nie tylko praca PT przyczynia się do powstawania odkształcenia napięcia. Jedynie w przypadku PT nr 6 oraz PT nr 3 współczynnik korelacji pomiędzy współczynnikiem  $THD_U$  a mocą obciążenia  $P_{10}$  osiąga wartość 0,89 co świadczy o znacznym udziale podstacji trakcyjnych w odkształceniu napięcia. W pozostałych pięciu podstacjach trakcyjnych występuje słaby związek korelacyjny pomiędzy współczynnikiem  $THD_U$  a mocą obciążenia  $P_{10}$  co świadczy, że głównym źródłem zakłóceń są inni odbiorcy.

Otrzymane w wyniku badań kierunki przepływu harmonicznych mocy czynnej, również potwierdzają, że PT jest źródłem jedynie harmonicznych charakterystycznych dla danego typu zespołu prostownikowego.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. Barlik R., Nowak M.: Jakość energii elektrycznej – stan obecny i perspektywy, *Przegląd Elektrotechniczny* 2005 Nr 7-8, s. 1-12, ISSN 0033-2097
2. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjo-

- nowania systemu elektroenergetycznego. Dz.U. 2007 nr 93, poz. 623, s. 5666-5667
3. Vlahinić S., Bronobić D., Vučetić D.: Measurement and analysis of harmonic distortion in power distribution systems, *Electric Power Systems Research* 2009 Nr 79, s. 1121-1126, ISSN 0378-7796
4. PN-EN 61000-3-2:1997 Kompatybilność elektromagnetyczna. Dopuszczalne poziomy. Dopuszczalne poziomy emisji harmonicznych prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika  $\leq 16$  A), s. 10, ISBN 83-236-0288-3
5. PN-EN 61000-3-12:2007 Kompatybilność elektromagnetyczna. Poziomy dopuszczalne. Poziomy dopuszczalne emisji harmonicznych prądu dla odbiorników o znamionowym prądzie fazowym  $> 16$  A i  $<$  lub  $= 75$  A przyłączonych do publicznej sieci zasilającej niskiego napięcia, s. 12-15, ISBN 978-83-251-3049-7
6. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej. Zakład Energetyczny Białystok Dystrybucja sp. z o.o., Białystok 2008, s. 70-72
7. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. *ANSI/IEEE Std 519-1992*, s. 78-79, ISBN 1-55937-239-7
8. Korzycki E., Mazurek P., Świątek H., Zymmer K.: Analiza oddziaływania wielopulsowych prostowników na sieć elektroenergetyczną, *Przegląd Elektrotechniczny* 2006 Nr 7-8, s. 101-104, ISSN 0033-2097
9. Wdowiak J., Mierzejewski L., Szelaż A.: Projektowanie układów zasilania trakcji elektrycznej systemu prądu stałego. Podstacje trakcyjne, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993, s. 98-105
10. Markiewicz H., Klajn A.: Wpływ odchyłek wybranych parametrów napięcia zasilającego na pracę odbiorników energii elektrycznej. *Elektroinstalator* 2001 Nr 2, s. 4-14, ISSN 1231-2355
11. PN-EN 50160:2002 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych, s. 13-15, ISBN 83-236-2376-7
12. Brociek W., Wilanowicz R.: Higher harmonics and voltage flickers estimation in transformer station supplying nonlinear load with 12-pulse converter, *Przegląd Elektrotechniczny* 2005 Nr 2, s. 29-32, ISSN 0033-2097
13. Wilanowicz R., Brociek W.: Wpływ podstacji trakcyjnej na jakość energii elektrycznej, *JAWĘ* 2001, s. 48-53
14. Skliński R., Dzienis W.: Obliczanie odkształcenia prądu i napięcia na szynach zbiorczych SN podstacji trakcyjnej z 12-pulsowymi zespołami prostownikowymi. *Wiadomości Elektrotechniczne* 2010 Nr 8, s. 3-9, ISSN 0043-5112
15. Sobczyk M.: Statystyka, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2004, s. 237-239, ISBN 83-01-14134-4
16. Bigaj D., Hanzelka Z.: Metody lokalizacji źródeł wyższych harmonicznych w sieciach zasilających. *Elektrotechnika i Elektronika* 2004, tom 23 zeszyt 1, s. 1-13, ISSN 1640-7202

## INVESTIGATION OF POWER QUALITY AT MV BUS-BARS OF TRACTION SUBSTATIONS

**Key-words:** traction substation, higher harmonics current and voltage

Traction substations connected to power network distribution of MV initiate distortions. They are one from loads which cause distortion of curve of current and in effect voltage. This article was showed was traction substations not only are the cause of distortion of voltage. The correlation coefficient between the active power and harmonics voltage. The direction of generated harmonics active power have been analysis.