

Dr inż. Artur Rojek

Centrum Naukowo-Techniczne Kolejnictwa

JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ W KOLEJOWYM SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM

SPIS TREŚCI

1. Wstęp
2. Jakość energii elektrycznej prądu przemiennego
3. Jakość energii elektrycznej prądu stałego
4. Oddziaływanie wzajemne części kolejowego systemu elektroenergetycznego
5. Podsumowanie

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono problematykę dotyczącą jakości energii elektrycznej w części przemiennie- i stałoprądowej kolejowego systemu elektroenergetycznego. Zestawiono dokumenty zawierające wymagania stawiane w zakresie jakości energii elektrycznej. Wskazano na rozbieżności oraz braki występujące w normach. Przedstawiono również czynniki wpływające na jakość energii elektrycznej oraz wzajemne oddziaływanie obydwu części kolejowego systemu elektroenergetycznego.

1. WSTĘP

Kolejowy system elektroenergetyczny jest bardzo rozległy. Obejmuje on praktycznie cały kraj. W odróżnieniu od systemu energetyki zawodowej, kolejowy system elektroenergetyczny w Polsce składa się z dwóch części: przemiennoprądowej i stałoprądowej, które połączone są ze sobą poprzez zespoły prostownikowe w podstacjach trakcyjnych.

Podstawową rolą kolejowego systemu elektroenergetycznego jest zasilanie pojazdów trakcyjnych. Dodatkowo system ten w części przemiennoprądowej zasila odbiory nietrakcyjne. Do niedawna odbiorami nietrakcyjnymi były urządzenia i obiekty kolejowe, jednak w ostatnim okresie, system ten zaczął dostarczać energię elektryczną również innym odbiorcom, nie związanym z koleją, których liczba sukcesywnie rośnie.

Energia elektryczna stała się towarem, który oprócz swej ceny musi spełniać określone wymagania pod względem jakości. Wymagania te dotyczą zarówno energetyki zawodowej, jak również energetyki kolejowej. Z tego powodu zostały ustalone wymagania jakościowe, jakimi powinna charakteryzować się energia elektryczna prądu przemiennego oraz stałego, dostarczana do odbiorów.

W niniejszym artykule zagadnienia jakości energii elektrycznej prądu przemiennego opisano dla poziomu napięć średnich (od 1 kV do 35 kV), przy czym parametry jakościowe dla napięć niskich (poniżej 1 kV) są takie same jak dla napięć średnich, z tą różnicą, że dla części parametrów dopuszcza się inne wartości.

2. JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ PRĄDU PRZEMIENNEGO

Obecnie w Polsce obowiązują trzy dokumenty dotyczące wymagań jakościowych energii elektrycznej prądu przemiennego. Do dokumentów tych należą: *Rozporządzenie Ministra Gospodarki* z dnia 25.09.2000 r. [12] oraz normy PN-EN 61000-2-4 [7] i PN-EN 50160 [5]. Dokumenty te podają w sumie 14 parametrów jakościowych, przy czym nie wszystkie dokumenty określają wartości wszystkich tych parametrów. Najwięcej parametrów (12) określa norma PN-EN 50160, następnie norma PN-EN 61000-2-4 (9 parametrów), natomiast *Rozporządzenie* [12] zawiera wymagania tylko dla sześciu parametrów jakościowych dla napięcia średniego.

Norma PN-EN 61000-2-4 rozgranicza trzy klasy poziomów kompatybilności środowiska elektromagnetycznego. Najistotniejsze są wymagania dla klasy II, określające

parametry kompatybilności dla sieci publicznych. Natomiast norma PN-EN 50160 i *Rozporządzenie* [12] dotyczą wymagań jakości energii elektrycznej tylko w sieciach publicznych.

Wartości parametrów jakościowych energii elektrycznej, które zostały określone we wspomnianych dokumentach, zestawiono w tablicy 1. Jako uzupełnienie tablicy 1 część parametrów podano w tablicach 2 i 3 oraz na rysunku 1.

Analizując zawartość tablic 1 i 2 można stwierdzić, że wymagania jakościowe zawarte w normach PN-EN 61000-2-4 (klasa II) i PN-EN 50160 są w większości przypadków zgodne (biorąc pod uwagę te parametry, które są określone jednocześnie w obydwu normach). Różnice występują w wymaganiach dotyczących zapadów napięcia oraz dopuszczalnych poziomów harmonicznych, rzędu 12, 14, 15, 16, 18, 20, 21, 22, 24 i powyżej 25.

W *Rozporządzeniu Ministra* [12] w stosunku do norm są stawiane ostrzejsze wymagania dla wartości parametrów jakościowych. Wyjątkiem są tu wartości poszczególnych harmonicznych. *Rozporządzenie* to dopuszczając 3% wartości harmonicznych wszystkich rzędów jest pod tym względem łagodniejsze niż normy (nie dotyczy to harmonicznych rzędu 3, 5, 7 i 11, dla których wymagania zapisane w *Rozporządzeniu* są ostrzejsze). Jednocześnie w *Rozporządzeniu* znajduje się zapis, że podane wartości obowiązują wówczas, gdy dostawca i odbiorca energii elektrycznej nie określi innych wartości w umowie sprzedaży.

Zestawienie parametrów określających jakość energii elektrycznej w publicznych sieciach rozdzielczych SN

Lp.	Parametr	Wartość				
		PN-EN 61000-2-4 [7]			PN-EN 50160 [5]	Rozporządzenie Min. Gosp. [12]
		Klasa I	Klasa II	Klasa III		
1.	Odchylenia częstotliwości sieciowej	$\pm 1 \%$	$\pm 1 \%$	$\pm 2 \%$	$\pm 1 \%$ przez 95 % tygodnia $+ 4 / - 6 \%$ przez 100 % tygodnia	$- 0,5 \div + 0,2 \%$
2.	Wartość napięcia	Deklarowana wartość napięcia uzgodniona przez dostawcę i odbiorcę [U_c]				
3.	Zmiany napięcia zasilającego	$\pm 8 \% U_c$	$\pm 10 \% U_c$	$- 10 \div + 15 \% U_c$ przez 60 s $\pm 10 \% U_c$ stale	$\pm 10 \% U_c$	$- 10 \div + 5 \% U_c$
4.	Szybkie zmiany napięcia	X	X	X	$4 \% U_c$ $6 \% U_c$ w wyjątkowych okolicznościach	X
5.	Zapady napięcia	$10 \div 100 \% U_c$ $t \leq 10 \text{ ms}$	$10 \div 100 \% U_c$ $10 \text{ ms} \leq t < 3000 \text{ ms}$		do $60 \% U_c$ $t < 1000 \text{ ms}$	X
6.	Krótkie przerwy w zasilaniu	Nie dopuszcza się	---	3 przerwy o $t \leq 60 \text{ s}$	70 % przerw w roku o $t < 1 \text{ s}$	X
7.	Długie przerwy w zasilaniu (nie dotyczy przerw planowanych)	X	X	X	od 10 do 50 w roku $t > 3 \text{ min}$	wg umowy

Lp.	Parametr	Wartość				
		PN-EN 61000-2-4 [7]			PN-EN 50160 [5]	Rozporządzenie Min. Gosp. [12]
		Klasa I	Klasa II	Klasa III		
8.	Dorywcze przepięcia o częstotliwości sieciowej między przewodami pod napięciem a ziemią	X	X	X	170 % U_c – sieci z punktem neutralnym uziemionym bezpośrednio lub przez impedancję 200 % U_c – sieci z punktem neutralnym izolowanym	X
9.	Przejściowe przepięcia między przewodami pod napięciem a ziemią	X	X	X	---	X
1	2	3	4	5	6	7
10.	Asymetria napięć	2 %	2 %	3 %	2 %	X
11.	Całkowity współczynnik odkształcenia napięcia (THD)	5 %	8 %	10 %	8 %	5 %
12.	Wartości poszczególnych harmoniczných napięć	wg tablicy 2.				
13.	Interharmoniczne napięcia	wg tablicy 3			---	X
14.	Sygnaly napięciowe transmisji nałożone na napięcie zasilające	X	X	X	wg rysunku 1	X

X – dokument nie uwzględnia tego parametru; --- – nie określono wartości

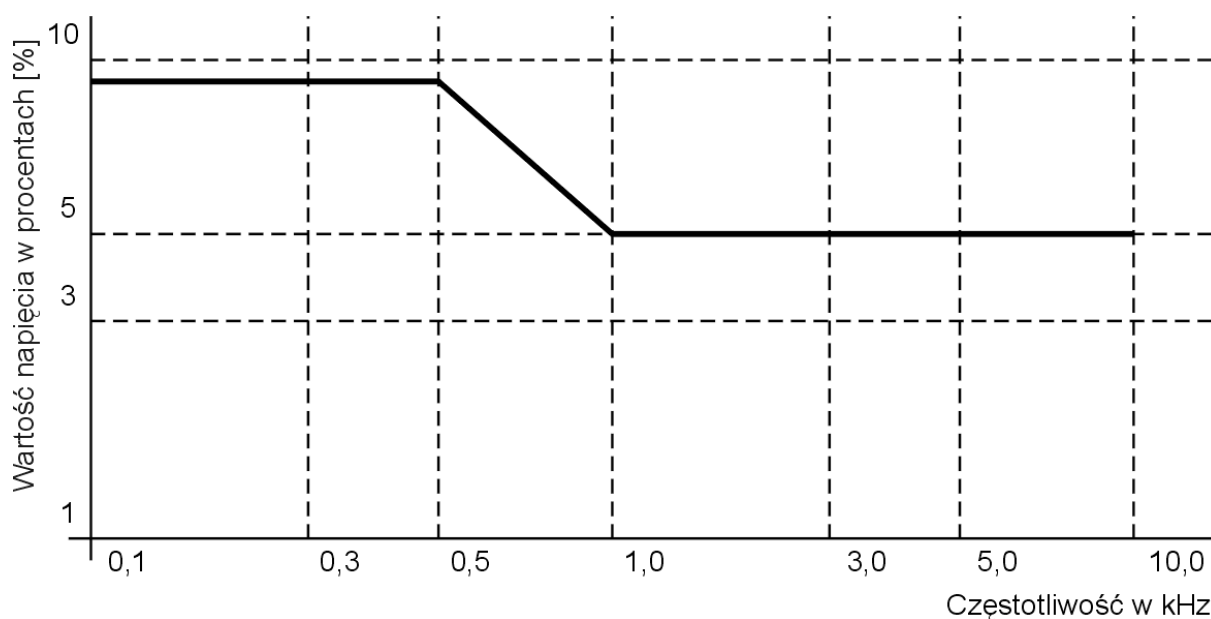
**Dopuszczalne wartości wyższych harmonicznych napięcia w publicznych sieciach
rozdzielczych SN**

Rząd h	PN-EN 61000-2-4 [7] U_h [%]			PN-EN 50160 [5] U_h [%]	Rozporządzenie Ministra Gospodarki [12] U_h [%]
	Klasa I	Klasa II	Klasa III		
2	2	2	3	2	3
3	3	5	6	5	
4	1	1	1,5	1	
5	3	6	8	6	
6	0,5	0,5	1	0,5	
7	3	5	7	5	
8	0,5	0,5	1	0,5	
9	1,5	1,5	2,5	1,5	
10	0,5	0,5	1	0,5	
11	3	3,5	5	3,5	
12	0,2	0,2	1	0,5	
13	3	3	4,5	3	
14	0,2	0,2	1	0,5	
15	0,3	0,3	2	0,5	
16	0,2	0,2	1	0,5	
17	2	2	4	2	
18	0,2	0,2	1	0,5	
19	1,5	1,5	4	1,5	
20	0,2	0,2	1	0,5	
21	0,2	0,2	1,75	0,5	
22	0,2	0,2	1	0,5	
23	1,5	1,5	3,5	1,5	
24	0,2	0,2	1	0,5	
25	1,5	1,5	3,5	1,5	
>25	0,2 + 12,5/h *	0,2 + 12,5/h *	$5x\sqrt{\frac{11}{h}}$ *	nie podano wartości	
	0,2 **	0,2 *	1 **		

* rzędy nieparzyste z wyłączeniem rzędów będących krotnością 3; ** pozostałe rzędy.

Interharmoniczne składowe napięcia

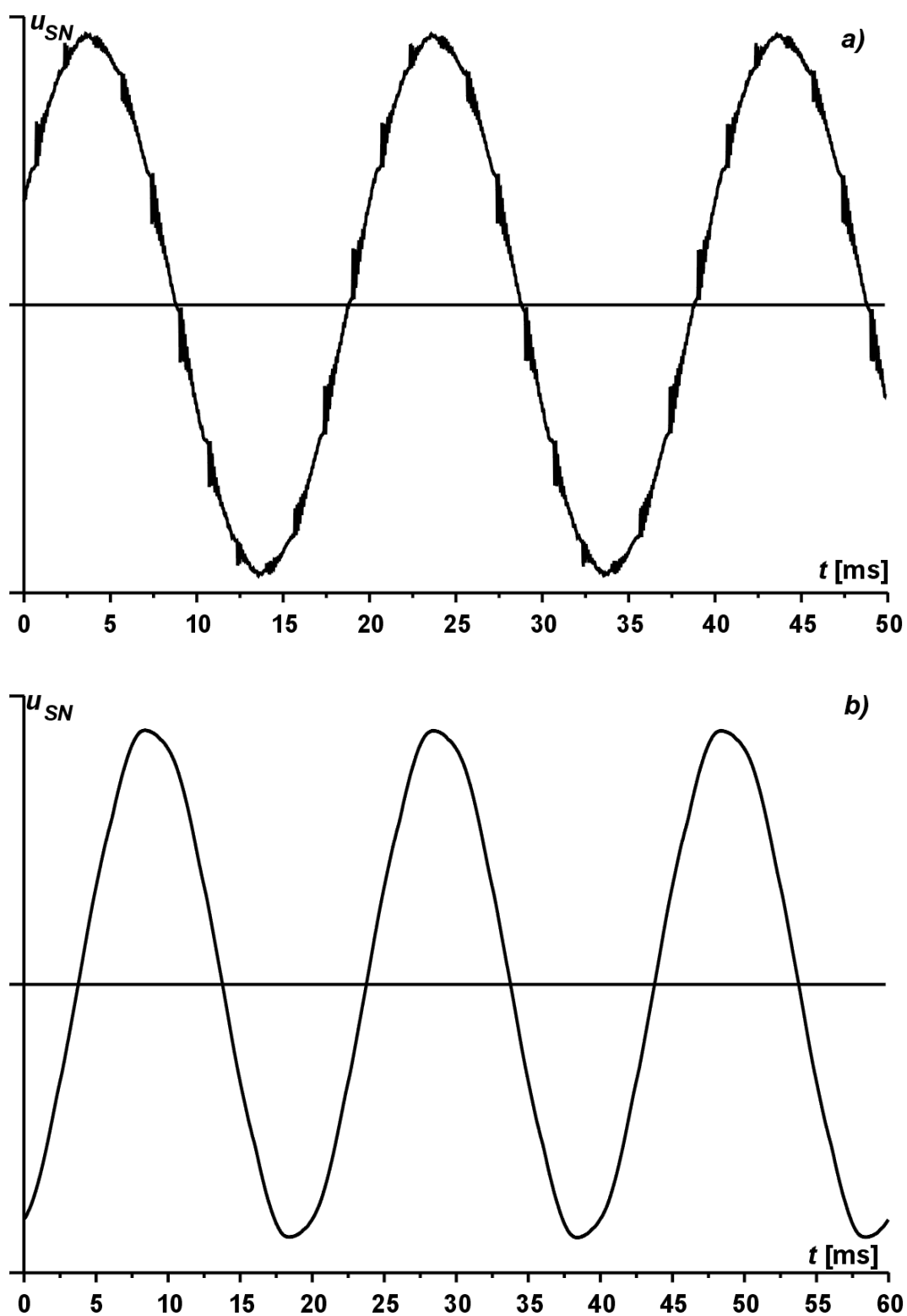
Rząd h (pasmo o szerokości 10 Hz)	Klasa 1 U_h [%]	Klasa 2 U_h [%]	Klasa 3 U_h [%]
<11	0,2	0,2	2,5
zawartość w przedziale od 11 do 13	0,2	0,2	2,25
zawartość w przedziale od 13 do 17	0,2	0,2	2
zawartość w przedziale od 18 do 19	0,2	0,2	2
zawartość w przedziale od 19 do 23	0,2	0,2	1,75
zawartość w przedziale od 23 do 25	0,2	0,2	1,5
>25	0,2	0,2	1,0



Rys. 1. Dopuszczalne poziomy napięcia sygnałów w funkcji częstotliwości w publicznych sieciach rozdzielczych SN

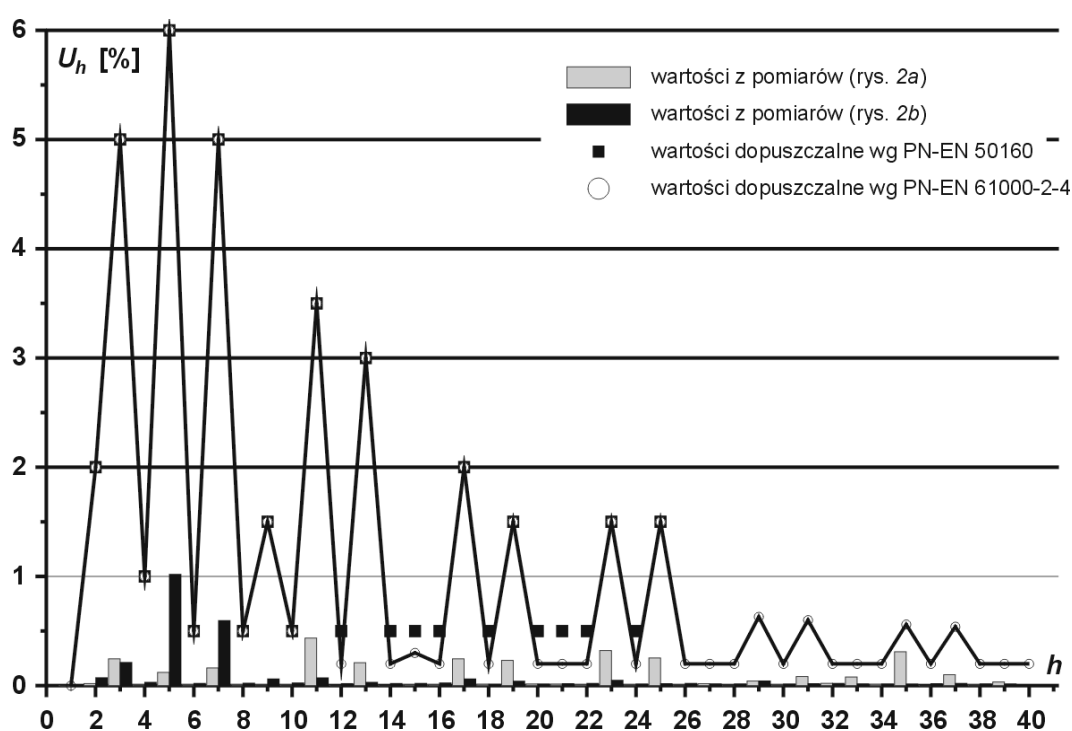
Wszystkie omawiane dokumenty określają dopuszczalną wartość odkształcenia napięcia, uwzględniając wyższe harmoniczne do rzędu 40, natomiast nie wspominają nic o harmonicznym wyższych rzędów. Prowadzi to do sytuacji, w której przebieg napięcia, znacznie odkształcony sygnałem o częstotliwości powyżej 2000 Hz, ma taki sam współczynnik THD jak napięcie wolne od tego rodzaju zakłócenia. Zjawisko to ilustruje rysunek 2, na którym przedstawiono dwa przebiegi napięcia o $THD = 1,12\%$, lecz o różnej

zawartości poszczególnych harmonicznych. Rozkład tych napięć na wyższe harmoniczne ($h \leq 40$) przedstawiono na rysunku 3.



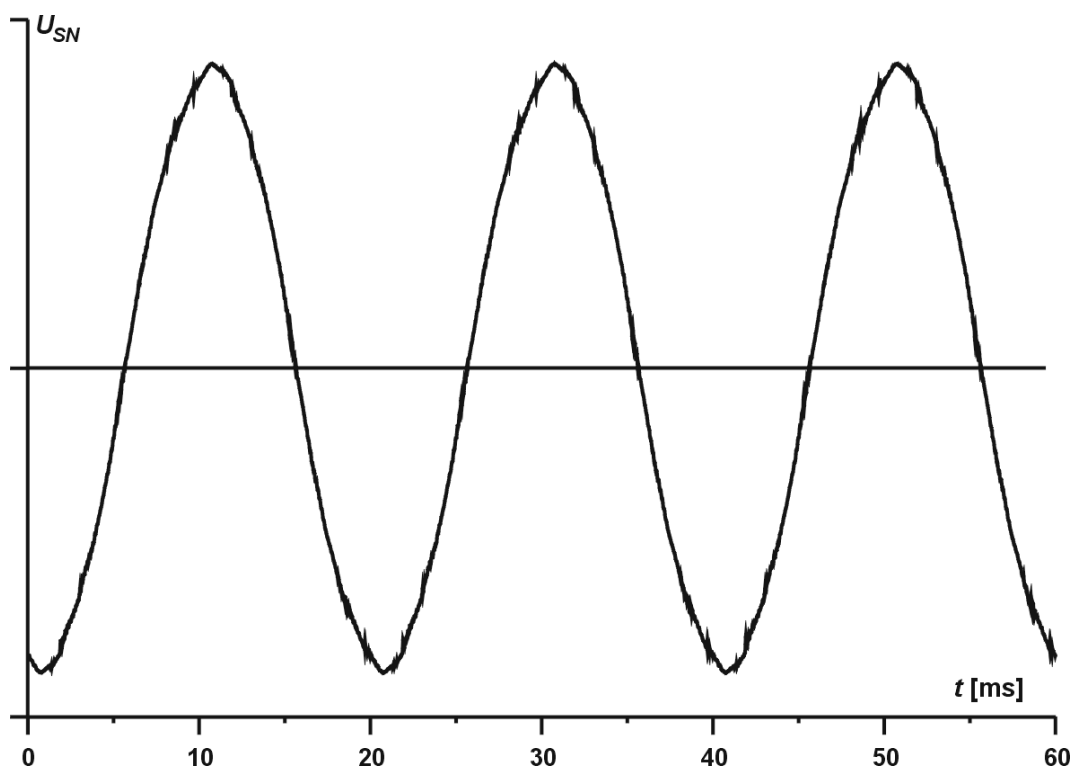
Rys. 2. Przebiegi napięcia o THD = 1,12 %

Z rysunku 3 wynika, że obydwa przebiegi napięcia przedstawione na rysunku 2 spełniają wymagania norm w zakresie wartości wyższych harmonicznych, pomimo tego, że przebieg *a*) jest wyraźnie odkształcony zakłóceniami o częstotliwości około 9 kHz. Zakłócenia o wysokich częstotliwościach w przebiegu napięcia są niebezpieczne dla urządzeń automatyki oraz izolacji aparatów elektrycznych, która stanowi układ pojemnościowy. Zakłócenia te również wpływają na wzrost strat (zamienianych w ciepło) w liniach zasilających oraz uzwojeniach transformatorów i silników.

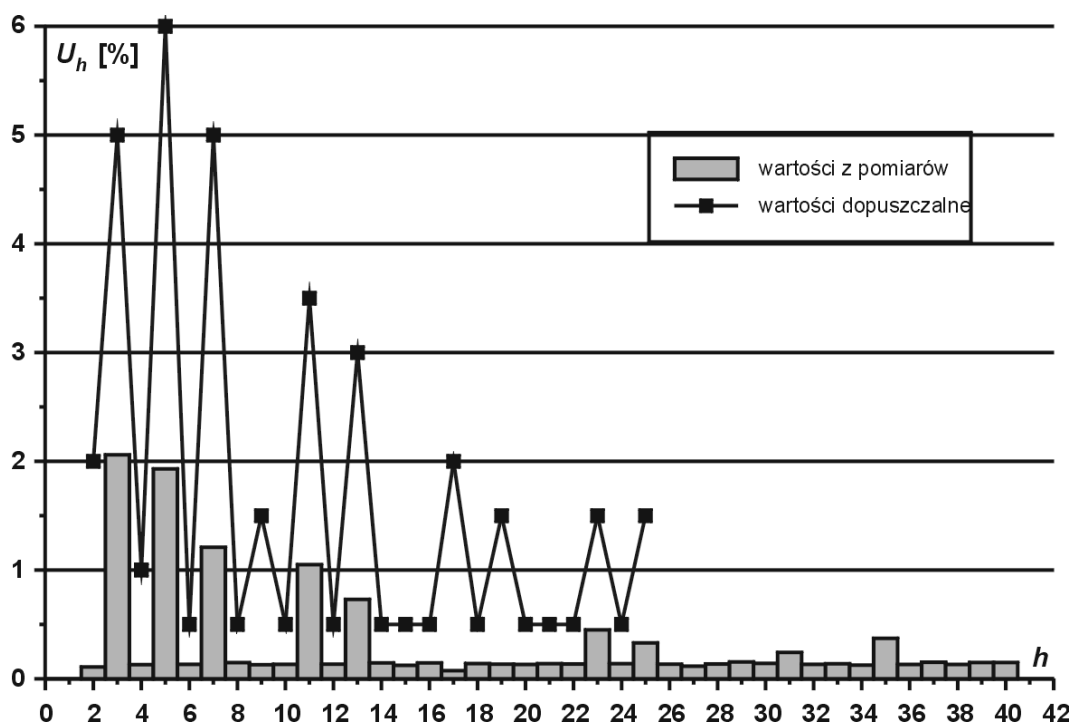


Rys. 3. Rozkład przebiegów napięć z rysunku 2 na wyższe harmoniczne

Istotnym brakiem norm [5, 7] i *Rozporządzenia* [12] jest to, że żaden z tych dokumentów nie definiuje kto i w jakim zakresie jest odpowiedzialny za odkształcenia napięcia w sieci elektroenergetycznej prądu przemiennego. W wyniku tego do odbiorcy może trafiać napięcie już wstępnie odkształcone. Z przeprowadzonych badań [8] wynika, że współczynnik THD napięcia dostarczanego przez energetykę zawodową może przekraczać 3 % (rys. 4 i 5), co powoduje, że aby dotrzymać wymagania zawarte w *Rozporządzeniu* ($THD \leq 5\%$), odbiorca energii elektrycznej praktycznie nie może już wprowadzić do sieci żadnych odkształceń.



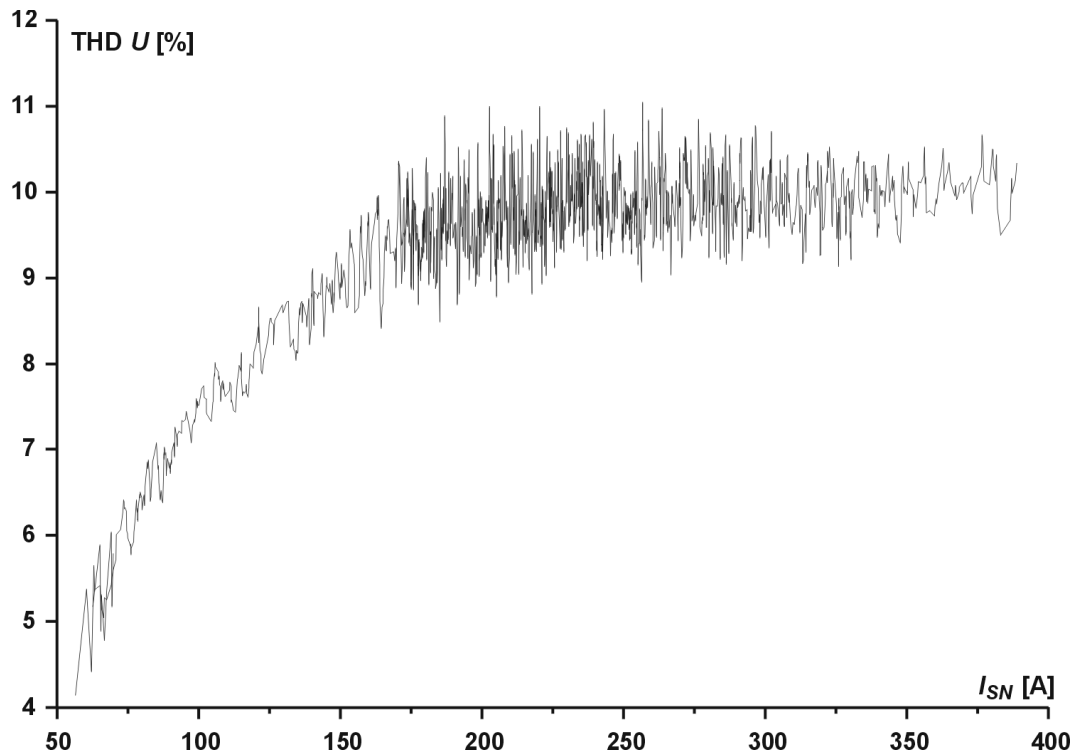
Rys. 4. Przebieg napięcia dostarczanego przez energetykę zawodową (THD = 3,48 %)



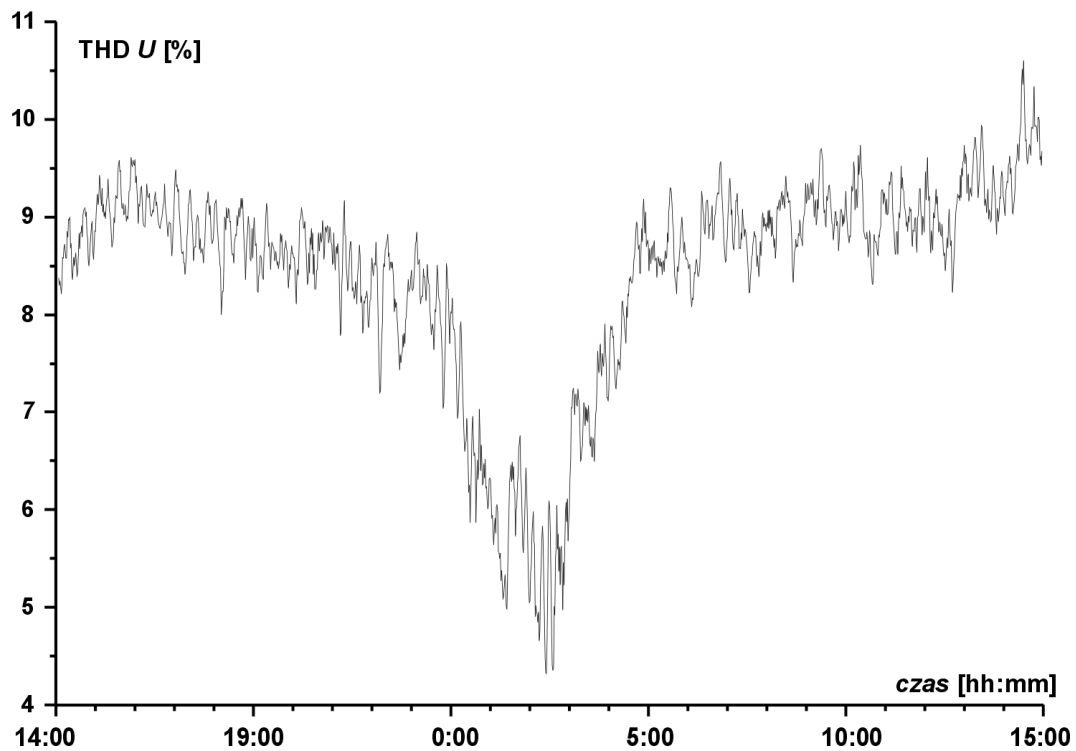
Rys. 5. Rozkład przebiegu napięcia z rysunku 4 na wyższe harmoniczne

Z tego powodu często dochodzi do sytuacji, w której odkształcenie napięcia w określonym punkcie sieci elektroenergetycznej jest wyższe od dopuszczalnego, pomimo tego, że napięcie dostarczane spełnia wymagania jakościowe, a odbiorca wprowadza do sieci

odkształcenia o dopuszczalnej wartości. Zjawisko to ilustrują rysunki 6 i 7, na których przedstawiono wartości odkształceń w zależności od prądu pobieranego z linii zasilającej oraz pory doby, zarejestrowanych na jednym z badanych obiektów.



Rys. 6. Wartość współczynnika odkształcenia napięcia THD w funkcji pobieranego prądu ISN, zarejestrowanego na jednym z odbiorów zasilanych napięciem średnim



Rys. 7. Zmiany dobowe wartości współczynnika odkształcenia napięcia zarejestrowanego na jednym z odbiorów zasilanych napięciem średnim

Z rysunków tych wynika, że nawet przy niewielkim obciążeniu sieci elektroenergetycznej (I_{SN} około 50 A lub pora nocna) wartości współczynnika odkształceń są zbliżone do poziomu dopuszczalnego. Wynika to z faktu, że odbiór ten jest zasilany napięciem odkształconym, choć współczynnik tego odkształcenia nie przekracza 5 %.

3. JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ PRĄDU STAŁEGO

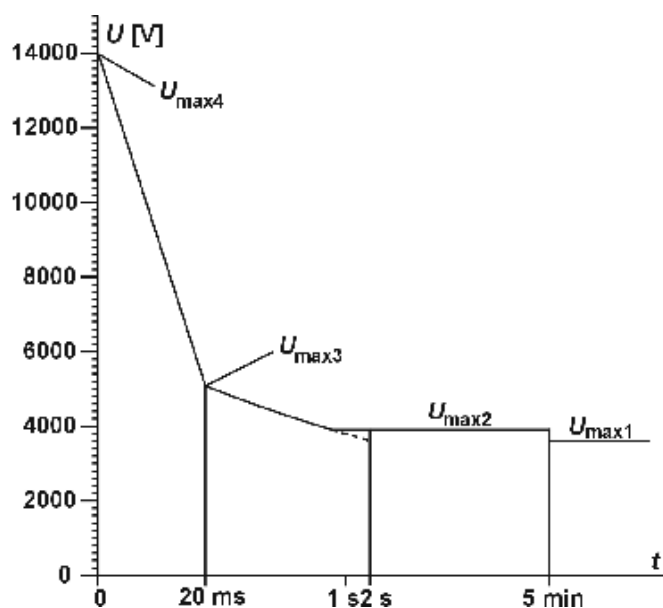
Oceniając jakość energii elektrycznej prądu stałego należy brać pod uwagę następujące parametry:

- poziom napięcia w sieci trakcyjnej,
- maksymalna wartość prądu, jaką można dostarczyć do pojazdu trakcyjnego,
- wydolność układu (kryterium mocy),
- odkształcenia napięcia trakcyjnego i zakłócenia nimi wywołane.

W przeciwieństwie do napięcia przemiennego, dla napięcia stałego nie istnieje jeden dokument określający wymagania dla wszystkich wymienionych parametrów jakościowych. Wymagania dla każdego z tych parametrów są zawarte w innym dokumencie.

Dopuszczalne poziomy napięcia w sieci trakcyjnej określone są w dwóch dokumentach: normie PN-EN 50163 [6] i karcie UIC 550 [1]. Oba te dokumenty określają dopuszczalne poziomy napięcia w sieci trakcyjnej w przedziałach wartości maksymalnych i minimalnych.

Wartości maksymalne napięcia, mogące występować w sieci trakcyjnej w systemie zasilania trakcji napięciem stałym 3 kV, w sposób graficzny przedstawiono na rysunku 8, natomiast wartości napięć zestawiono w tabelicy 4.



Rys. 8. Dopuszczalne wartości napięć maksymalnych w sieci trakcyjnej w systemie 3 kV DC w zależności od czasu w jakim się utrzymują

Wartości napięć maksymalnych dla systemu zasilania trakcji 3 kV DC

Lp.	Oznaczenie poziomu napięcia	PN-EN 50163	karta UIC 550
1.	$U_{\max 1}$ [V]	3600	3600
2.	$U_{\max 2}$ [V]	3900	3900
3.	$U_{\max 3}$ [V]	5075	5075
4.	$U_{\max 4}$ [kV]	---	14

Analizując zapisy normy PN-EN 50163 i karty UIC 550, dotyczące poziomów napięć maksymalnych można stwierdzić, że obydwa dokumenty są zgodne. Jedyna różnica jaka występuje dotyczy napięcia $U_{\max 4}$. W normie PN-EN 50163 jest jedynie wzmianka o występowaniu przepięć średnio i krótkotrwałych, natomiast karta UIC 550 określa najwyższą wartość przepięć mogących występować w sieci trakcyjnej na poziomie $U_{\max 4} = 14$ kV.

Omawiane dokumenty określają również wartości minimalne napięcia w sieci trakcyjnej na poziomie $U_{\min 1} = 2000$ V. Dodatkowo karta UIC 550 dopuszcza spadek napięcia w sieci trakcyjnej do wartości $U_{\min 2} = 1800$ V, przy czasie jego trwania nie większym niż 10 minut. Tak niskie dopuszczalne wartości napięć nie stanowią większego problemu dla pojazdów trakcyjnych z rozruchem rezystorowym, eksploatowanych obecnie w Polsce. Jednak dla pojazdów z rozruchem energoelektronicznym są one stanowczo za niskie. Pojazdy tego typu wymagają, aby minimalne napięcie w sieci trakcyjnej nie było niższe niż 2800 – 3000 V, w przeciwnym przypadku moc tych pojazdów jest ograniczona, a w skrajnych przypadkach nie są one w stanie jechać.

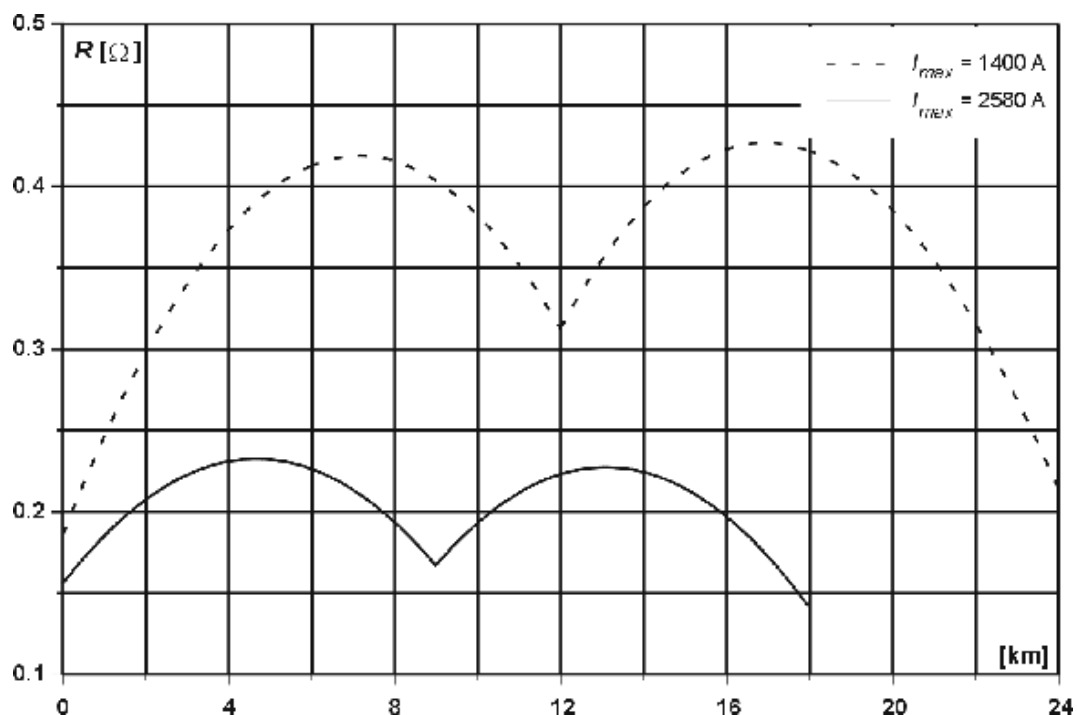
Maksymalna wartość prądu, jaką układ elektrotrakcyjny może dostarczyć do pojazdu trakcyjnego nie jest unormowana¹. Wartość tę limitują:

- nastawy wyłączników szybkich w podstacjach trakcyjnych i kabinach sekcyjnych,
- poziom napięcia w punkcie odbioru prądu przez pojazd trakcyjny – wartości spadków napięcia w układzie wywołane przepływem pobieranego prądu.

¹ Przy projektowaniu sieci trakcyjnej przyjmuje się jej obciążalność na poziomie 6 A/mm².

Nastawy wyłączników szybkich są zależne od warunków wyłączalności prądów zwarciovych. Dla długich odcinków zasilania, mających stosunkowo dużą rezystancję pętli zwarciovwej może się zdarzyć, że wartości prądów zwarciovych i roboczych będą porównywalne. Waga tego zjawiska wzrośnie wówczas, gdy na polskiej sieci kolejowej będą poruszały się pojazdy trakcyjne o mocy 6 MW lub większej, których prąd roboczy wynosi około 2,5 kA. Poziom nastaw wyłączników szybkich nie jest znormalizowany. Istnieje tylko praca CNTK [3], w której stwierdzono, że nastawa wyłącznika szybkiego powinna być mniejsza o 300 A od minimalnej wartości prądu zwarcia. Wcześniej ten warunek był uwzględniany zwyczajowo.

W systemie zasilania napięciem stałym 3 kV, ze względu na stosunkowo niską wartość napięcia, przesyłane są do pojazdów trakcyjnych znaczne wartości prądu. Wartości te, oprócz nastaw wyłączników szybkich, są ograniczane również spadkami napięcia w układzie, tak aby na odbieraku prądu napięcie w sieci trakcyjnej miało określoną wartość (2800 – 3000 V). Na poziom spadków napięcia, obok wartości prądu, wpływa rezystancja zastępcza układu zasilania elektrotrakcyjnego. Rysunek 9 przedstawia dwie przykładowe krzywe rezystancji układu zasilania R , wyznaczone na podstawie pomiarów [13] na dwóch różnych odcinkach linii kolejowej.



Rys. 9. Rezystancja zastępcza układu zasilania elektrotrakcyjnego dla dwóch odcinków linii kolejowej widziana z punktu odbioru prądu przez pojazd trakcyjny

Na poziom rezystancji zastępczej układu zasilania wpływ mają:

- charakterystyka zewnętrzna (rezystancja zastępcza) podstacji trakcyjnych,

- przekrój i materiał sieci trakcyjnej,
- przekrój szyn i rodzaj połączeń,
- odległości pomiędzy podstacjami oraz kabiną sekcyjną.

Wymienione parametry mają również wpływ na wartości prądów zwarciovych, czyli na możliwe nastawy wyłączników szybkich.

Zwiększanie wartości prądu dostarczanego do pojazdu trakcyjnego jest możliwe po ograniczeniu spadków napięć w układzie zasilania oraz po zwiększeniu nastaw wyłączników szybkich, z zapewnieniem wyłączalności wszystkich prądów zwarciovych. Można to uzyskać przez zmniejszenie rezystancji zastępczych podstacji trakcyjnych i odległości między nimi, zwiększenie przekroju sieci trakcyjnej oraz należytą dbałość o stan torów i łączników szynowych.

W zakresie wydolności układu zasilania trakcji elektrycznej (kryterium mocy) jedyne unormowania są zawarte tylko w karcie UIC 795 [2]. Karta ta określa wartość mocy zainstalowanej w zależności od parametrów linii oraz następstwa i mocy pociągów. Niestety, karta ta określa wymagania dotyczące jedynie linii o prędkościach maksymalnych, większych lub równych 200 km/h i zasilanych napięciem przemiennym 25 kV 50 Hz lub 15 kV 16 ²/₃ Hz.

Obecnie w Polsce nie ma takich linii. Pomijając napięcie zasilania, charakterystyka niektórych linii (np. CMK) jest zbliżona do kategorii określonej w karcie UIC 795 jako IVh ($v_{\max} = 200$ km/h, następstwo pociągów – 5 min, moc szczytowa na odbieraku prądu – 6 ÷ 10 MW). Dla tej kategorii linii moc zainstalowana w układzie zasilania powinna wynosić 0,5 MVA/km szlaku. Wymaganie to w większości przypadków jest spełnione, jednak nie ze względu na wymagania karty, lecz z potrzeby spełnienia warunków wyłączalności zwarć oraz utrzymania w sieci trakcyjnej określonego poziomu napięcia.

Odształcenia napięcia generowane przez układy energoelektroniczne (prostowniki, przetwornice statyczne itp.) powodują zakłócenia w obwodach sterowania ruchem, systemach łączności oraz w układach automatyki.

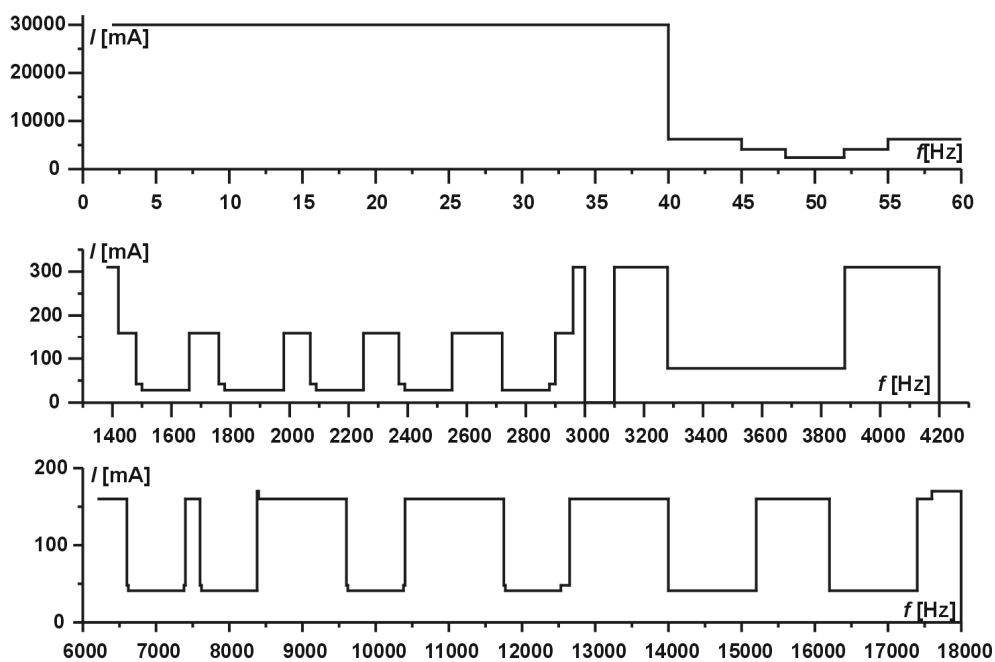
Jedno z wymagań PKP, obowiązujące od wielu lat, dopuszcza napięcie zakłócające w sieci trakcyjnej na poziomie 0,5 % U_{dn} (dla napięcia 3,3 kV odpowiada to 16,5 V). Napięcie zakłócające jest to pierwiastek z sumy kwadratów iloczynów poszczególnych wyższych harmonicznych i współczynnika psofometrycznego ważkości. Wartość tego współczynnika jest zależna od częstotliwości sygnału zakłócającego – harmonicznej. Współczynnik psofometryczny został wprowadzony w celu określenia, jakie zakłócenia

spowoduje harmoniczna w porównaniu z sygnałem o częstotliwości 800 Hz. Jak już wspomniano, wymaganie to zostało wprowadzone wiele lat temu, gdy większość sygnałów sterujących i łączności była prowadzona miedzianymi kablami, najczęściej równoległe do toru.

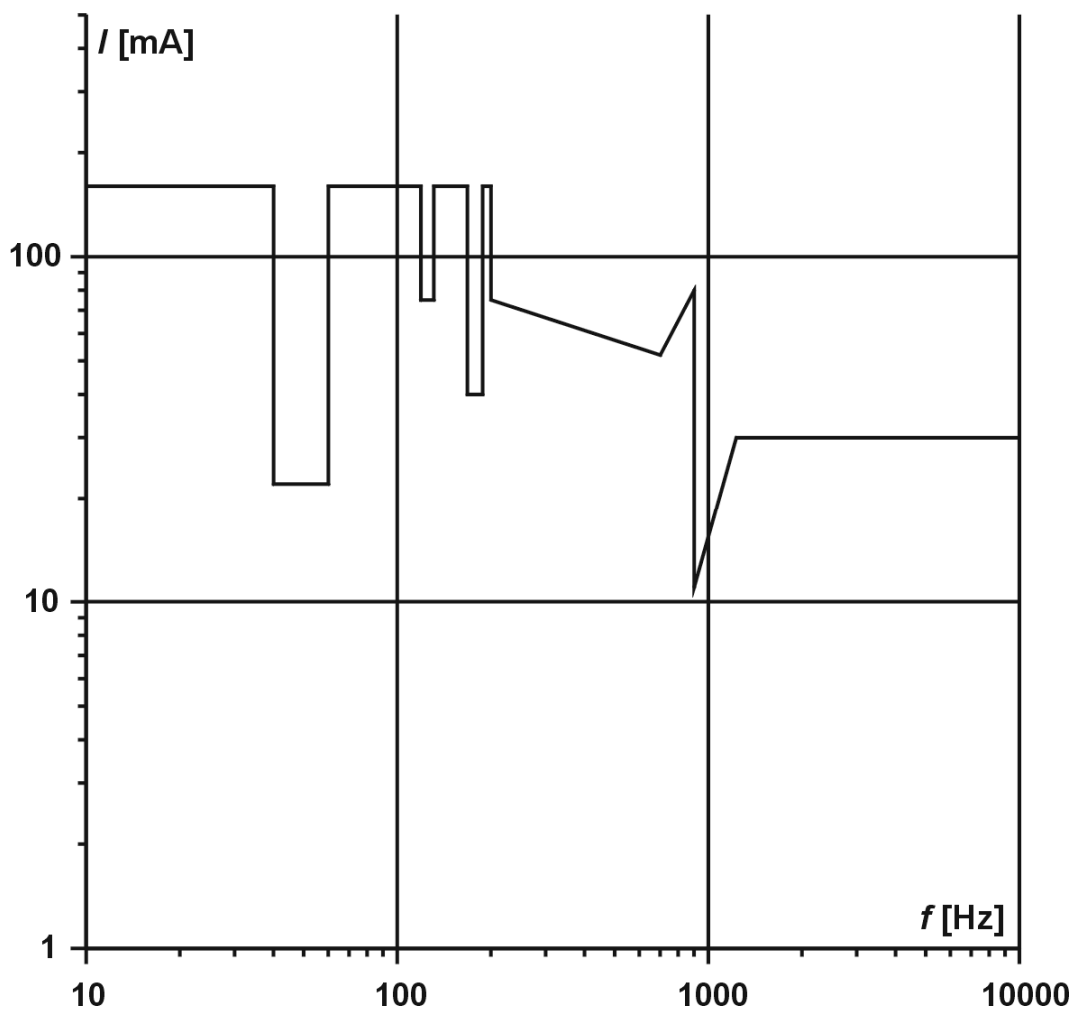
Obecnie dopuszczalne poziomy odkształceń nie są definiowane poziomem napięcia, lecz wartością prądu płynącego w obwodach torowych, którego przepływ i wartość zależne są od odkształceń napięcia. Wartości dopuszczalnych prądów odkształceń dodatkowo są zależne od ich częstotliwości. Przykładowe poziomy dopuszczalnych prądów zakłócających przedstawiają rysunki 10 i 11.

Wartości prądów zakłócających – przedstawione na rysunku 11 – zostały ustalone jako wartości dopuszczalne dla instalacji wagonowych o napięciu 3 kV DC. Jednak obecnie, gdy w Polsce są eksploatowane głównie pojazdy trakcyjne z rozruchem rezystorowym, nie wyposażone w układy filtrujące, wyższe harmoniczne, powstające w układach elektrycznych wagonów przedostają się do sieci trakcyjnej.

W celu zmniejszenia poziomu odkształceń napięcia w sieci trakcyjnej stosuje się w podstacjach trakcyjnych urządzenia wygładzające. W większości podstacji są to filtry rezonansowe, rozbudowane o gałęzie aperiodyczne. Wadą tego rozwiązania jest to, że filtry te są dostrojone do częstotliwości wyższych harmonicznych, charakterystycznych dla układu prostownika (300, 600, 900 i 1200 Hz – dla układów sześciopulsowych lub 600 i 1200 Hz – dla układów dwunastopulsowych). To powoduje, że w przypadku wystąpienia harmonicznych niecharakterystycznych, wywoływanych asymetrią napięcia zasilającego lub różnicą (nawet niewielką) wartości napięć zasilających mostki prostownika dwunastopulsowego, harmoniczne niecharakterystyczne nie są tłumione.



Rys. 10. Dopuszczalne poziomy prądów zakłócających w obwodach torowych wg [4]



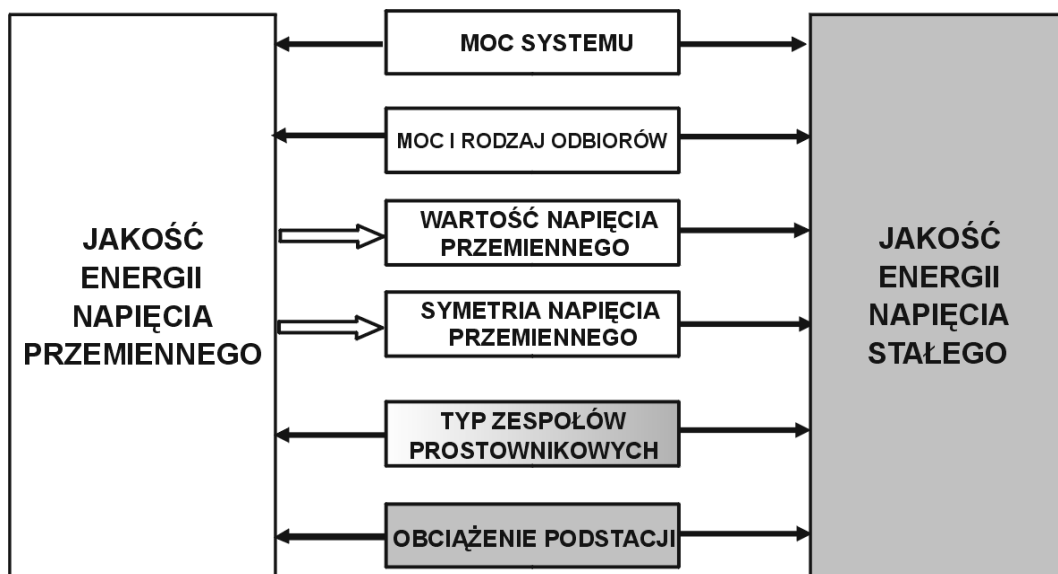
Rys. 11. Dopuszczalne poziomy prądów zakłócających wg karty UIC 550 [1]

Z tych powodów w najnowszych rozwiązaniach podstacji trakcyjnych stosuje się filtry typu gamma, które tłumią wszystkie harmoniczne o częstotliwości większej od częstotliwości rezonansowej filtra ($f_r < 80$ Hz), niezależnie od źródła i przyczyny ich powstawania.

4. ODDZIAŁYWANIE WZAJEMNE CZĘŚCI KOLEJOWEGO SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO

Jak wspomniano we wstępie, kolejowy system elektroenergetyczny składa się z dwóch części: przemiennoprądowej i stałoprądowej, połączonych ze sobą za pomocą zespołów prostownikowych. Części systemu oddziałują na siebie, mając wpływ na jakość energii elektrycznej prądu przemiennego i stałego. Sposób i parametry oddziałujące na jakość energii w obydwu częściach systemu przedstawiono schematycznie na rysunku 12.

Moc zwarciova systemu elektroenergetycznego prądu przemiennego wpływa na jego odporność na zakłócenia. Im ta moc jest większa, tym występujące w systemie spadki napięcia od prądów wyższych harmonicznych są mniejsze, a więc wyższe harmoniczne napięcia mają mniejsze wartości.



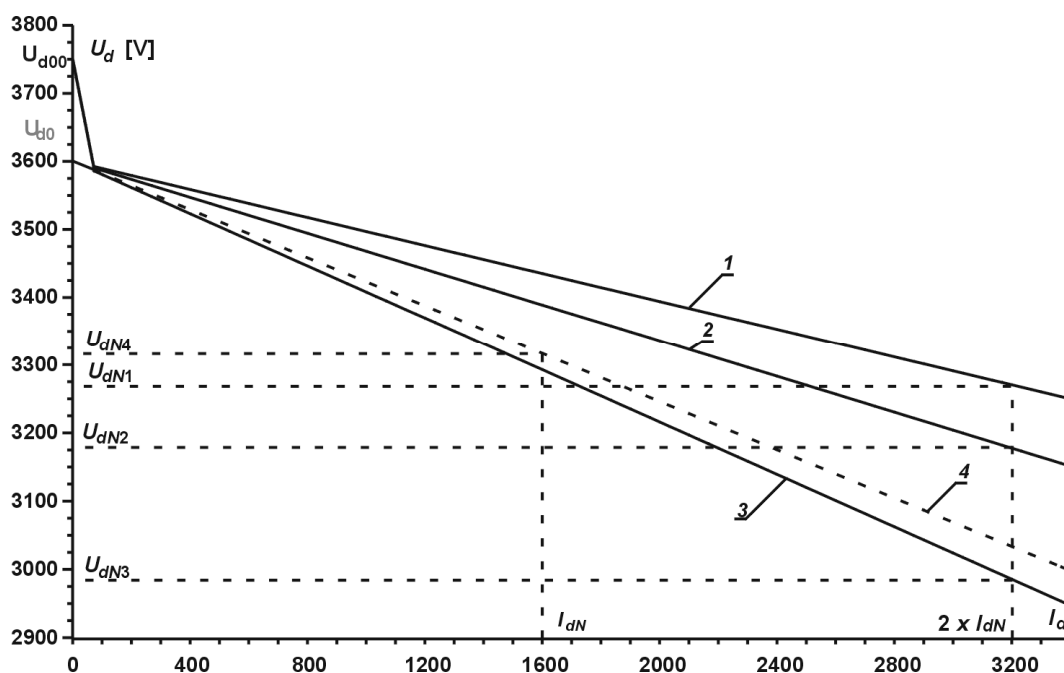
Rys. 12. Oddziaływanie wzajemne części kolejowego systemu elektroenergetycznego

Moc zwarciova w punkcie zasilania podstacji trakcyjnej wpływa w znacznym stopniu na nachylenie charakterystyki zewnętrznej podstacji (wartość rezystancji zastępczej). Wpływ mocy zwarciovej na charakterystykę podstacji ilustruje rysunek 13. Charakterystyki 1, 2 i 3 są wyznaczone dla podstacji dwuzespołowej, zasilanej z sieci o mocy zwarciovej odpowiednio:

- charakterystyka 1 – $2 S_{zw}$,
- charakterystyka 2 – S_{zw} ,
- charakterystyka 3 – $0,5 S_{zw}$.

Z powyższego rysunku wynika, że wraz ze zmniejszaniem się mocy zwarciowej maleje napięcie wyjściowe podstacji dla jej prądu znamionowego. W skrajnych przypadkach napięcie na wyjściu podstacji może być niższe od 3000 V.

Linia przerywana 4 jest charakterystyką zewnętrzną podstacji jednozespołowej, zasilanej z punktu o mocy zwarciowej takiej samej jak podstacja o charakterystyce 1. Z porównania tych dwóch charakterystyk wynika, że zwiększenie liczby zespołów prostownikowych nie powoduje proporcjonalnego zwiększenia prądu obciążenia podstacji, przy utrzymywaniu napięcia wyjściowego na stałym poziomie. Inaczej, zwiększenie liczby zespołów prostownikowych – znamionowego prądu podstacji – powoduje zmniejszenie się jej napięcia wyjściowego. Zjawisko to jest spowodowane spadkiem napięcia w części przemiennoprądowej systemu. Spadki napięcia w części przemiennoprądowej systemu oraz różnica napięć znamionowych podstacji jedno – i dwuzespołowej jest tym mniejsza, im większa jest moc zwarciowa systemu elektroenergetycznego, zasilającego podstację.



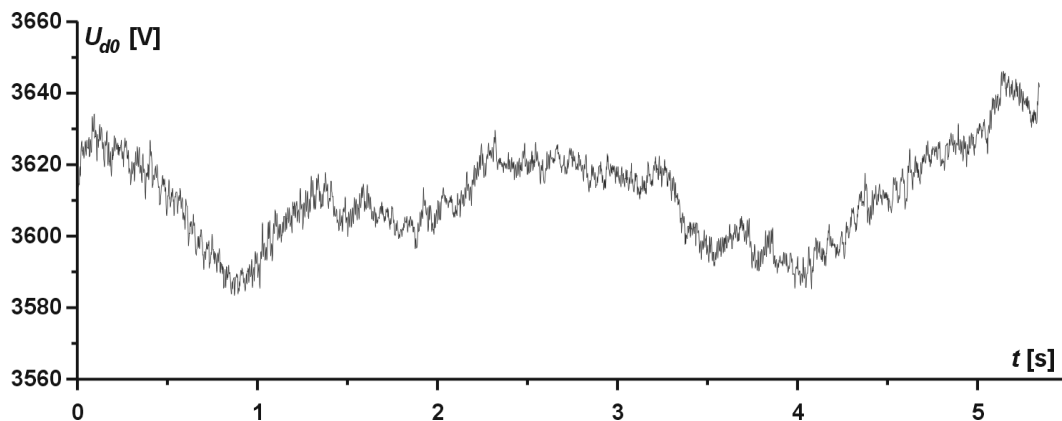
Rys. 13. Charakterystyki podstacji trakcyjnej przy różnych wartościach mocy zwarciowej w punkcie jej zasilania

Zmiany wartości napięcia w części przemiennoprądowej wpływają bezpośrednio na poziom napięcia stałego. Zmniejszenie się napięcia przemiennego, zasilającego podstację trakcyjną powoduje przesunięcie się w dół jej charakterystyki zewnętrznej, co skutkuje tym,

że sieć trakcyjna (pojazd trakcyjny) jest zasilana niższym napięciem, przy określonym obciążeniu podstacji.

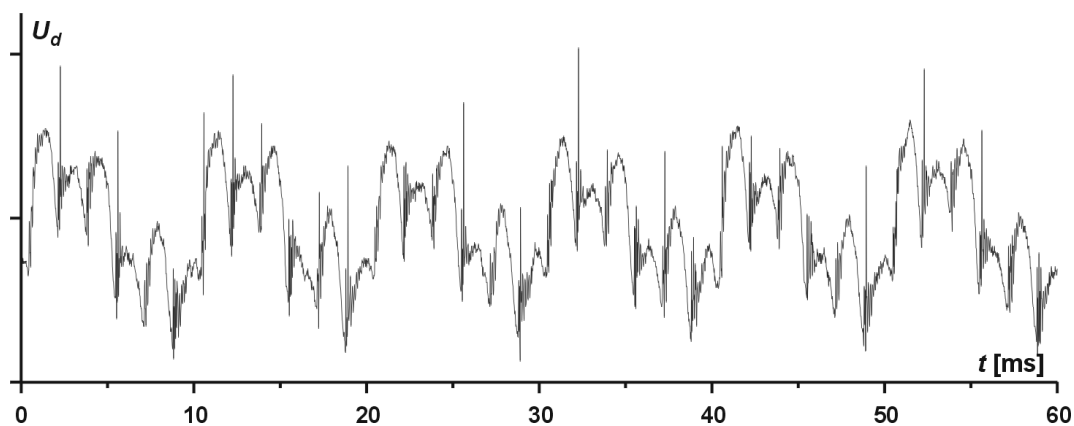
W celu skompensowania zmian napięcia zasilającego podstację (np. różnice wartości napięcia w porze dziennej i nocnej) najnowsze typy transformatorów prostownikowych są wyposażone w przełączniki zaczeów, działające również pod obciążeniem.

Na zmiany napięcia zasilającego podstację wpływa moc i charakter innych odbiorników zasilanych z części przemiennoprądowej systemu. Im moc tych odbiorników jest większa, tym większe wywołują one spadki napięć w systemie. Szczególnie uciążliwe są odbiorniki o zmiennej mocy lub pracujące dorywczo, gdyż ich praca powoduje zmiany napięcia trudne do skompensowania przez zmianę odczepów transformatorów prostownikowych. Zjawisko to ilustruje rysunek 14, na którym przedstawiony jest przebieg napięcia jałowego podstacji, zasilanej napięciem o zmiennej wartości.



Rys. 14. Przebieg napięcia jałowego podstacji trakcyjnej

Symetria napięcia zasilającego zespoły prostownikowe ma istotny wpływ na zawartość harmoniczną w napięciu wyprostowanym. Brak symetrii napięcia zasilającego powoduje powstawanie wyższych harmonicznych niecharakterystycznych oraz zwiększenie wartości współczynnika odkształcenia napięcia wyprostowanego – napięcia zakłócającego. Na rysunku 15 przedstawiono przebieg napięcia wyjściowego dwunastopulsowego zespołu prostownikowego z zasilaniem asymetrycznym. Rozkład tego napięcia na wyższe harmoniczne ilustruje rysunek 16, na którym wyróżniono harmoniczne charakterystyczne (kolor biały) i niecharakterystyczne (kolor czarny).



Rys. 15. Przebieg napięcia wyjściowego zespołu prostownikowego zasilanego napięciem asymetrycznym

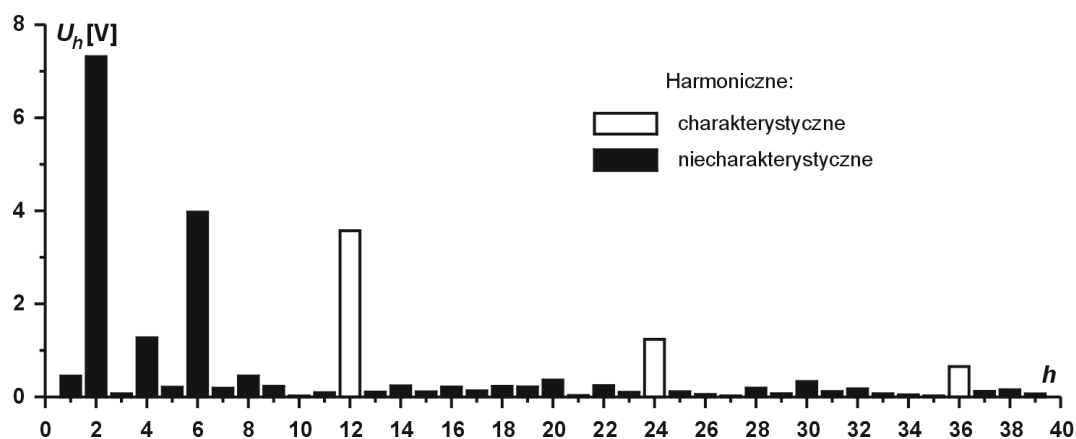
Od typu zespołów prostownikowych uzależniona jest liczba, wartość i rząd wyższych harmonicznych wprowadzanych zarówno do części stałoprądowej, jak również do części przemiennoprądowej kolejowego systemu elektroenergetycznego. Im większa jest liczba pulsów przekształtnika, tym mniej generuje on wyższych harmonicznych. Do części przemiennoprądowej zespoły prostownikowe wprowadzają wyższe harmoniczne rzędów:

$$h = c \cdot p \pm 1,$$

a do części stałoprądowej rzędów

$$h = c \cdot p,$$

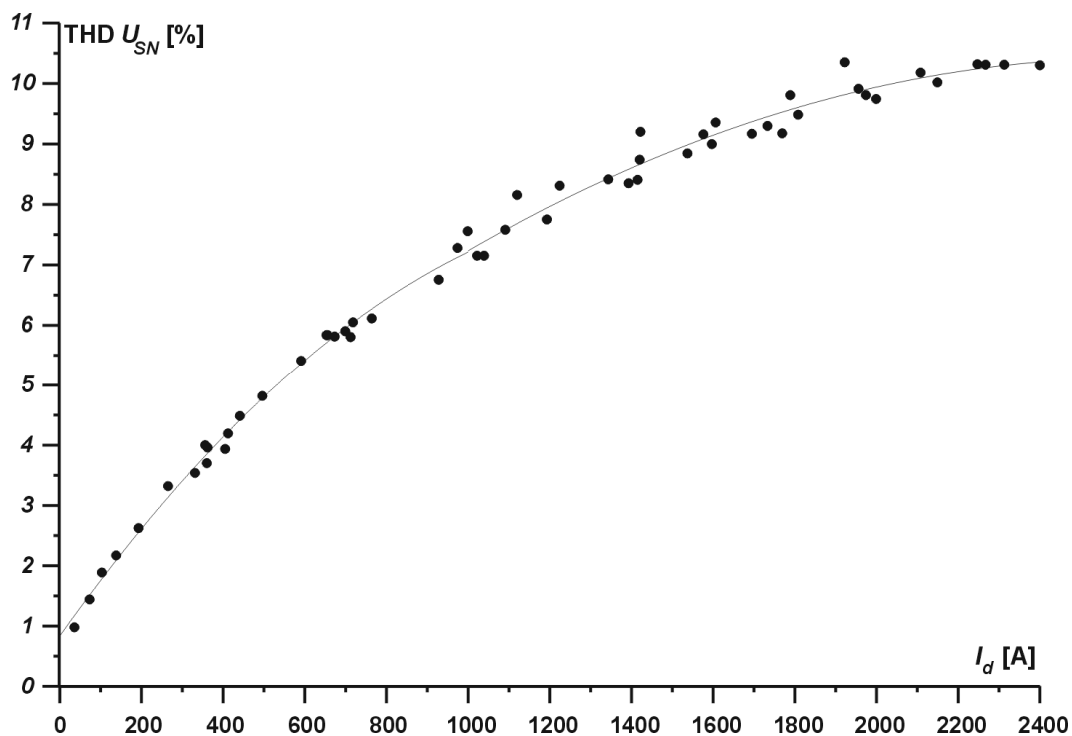
gdzie: h – rząd wyższej harmonicznej, c – liczba naturalna, p – liczba pulsów przekształtnika.



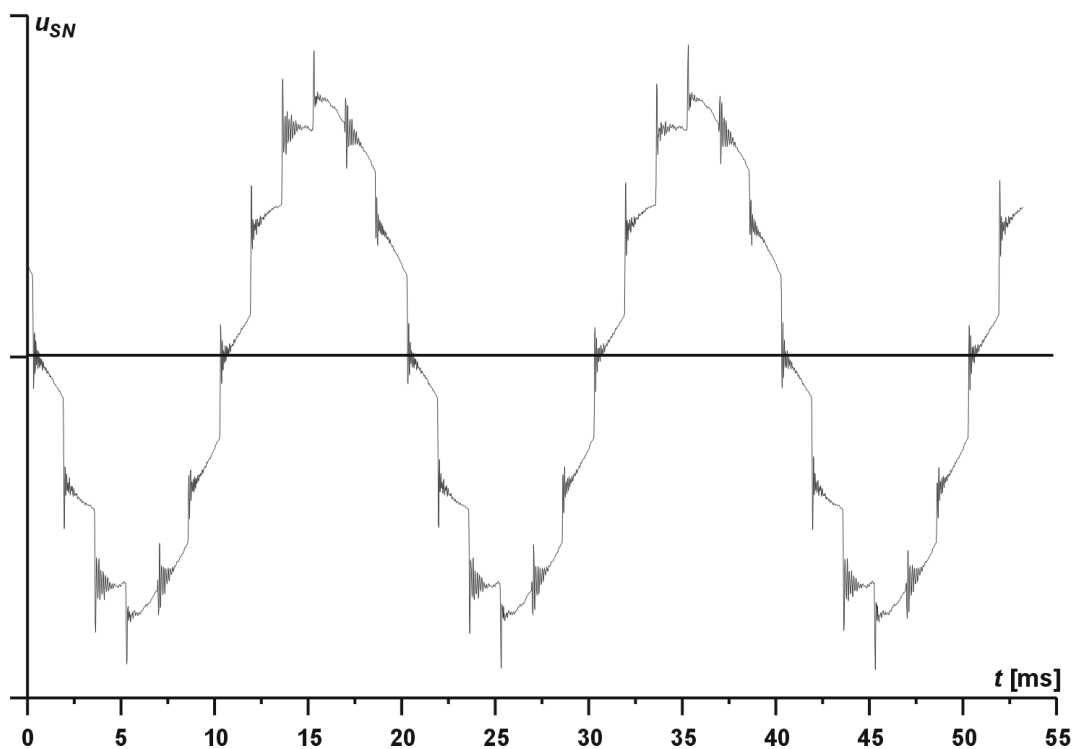
Rys. 16. Rozkład na wyższe harmoniczne przebiegu z rysunku 15

Z tych względów w kolejowych podstacjach trakcyjnych nowo budowane zespoły prostownikowe są dwunastopulsowe, a w podstacjach tramwajowych są próbnie eksploatowane zespoły 18- i 24-pulsowe.

Wartości wyższych harmonicznych i wywoływanych nimi odkształceń napięcia przemiennego i stałego zależą od obciążenia zespołu prostownikowego, a dla części przemiennoprądowej – również od poziomu mocy zwarciowej w punkcie zasilania podstacji. Jako przykład, na rysunku 17 przedstawiono zależność współczynnika odkształcenia napięcia zasilającego od obciążenia podstacji. W przypadku niskiej mocy zwarciowej w punkcie zasilania podstacji może dojść do znacznego odkształcenia napięcia przemiennego. W niekorzystnych przypadkach napięcie to może mieć przebieg taki, jak przedstawiono na rysunku 18.



Rys. 17. Zależność odkształcenia napięcia zasilającego od obciążenia podstacji



Rys. 18. Przebieg napięcia zasilającego podstację trakcyjną (THD = 12,3 %)

5. PODSUMOWANIE

Analizując jakość energii elektrycznej w kolejowym systemie elektroenergetycznym należy brać pod uwagę jego obydwie części (stało- i prądu przemienną) oraz ich wzajemne oddziaływanie. Przykładowo, działania mające na celu zmniejszenie rezystancji zastępczej podstacji trakcyjnej przez zmianę tylko typów i liczby zespołów prostownikowych, bez poprawy parametrów części prądu przemiennego układu, nie dadzą wymiernych rezultatów. Natomiast bez modernizacji podstacji i zastąpienia starych zespołów sześciopulsowych nowymi – dwunastopulsowymi nie uzyska się zmniejszenia odkształceń napięcia, zarówno stałego, jak i prądu przemiennego.

O ile wymagania jakościowe, dotyczące napięcia prądu przemiennego są dość dobrze znormalizowane, to w unormowaniach dla napięcia stałego 3 kV występuje sporo braków. Szczególnie jest to odczuwalne w zakresie wydolności układu oraz wartości prądów możliwych do przesłania do pojazdów trakcyjnych. Kwestie te starano się uzupełnić w opracowaniach CNTK (Standardach [14, 15]).

Istotną luką w unormowaniach dotyczących odkształceń napięcia prądu przemiennego jest brak wskazania strony (dostawcy lub odbiorcy energii elektrycznej) odpowiedzialnej za

utrzymanie wymaganych poziomów tego parametru jakościowego. Skutkiem tego jest występowanie w sieci średniego napięcia znacznych odkształceń.

W zachowaniu wysokiej jakości napięcia przemiennego nie pomagają również różnice występujące w dokumentach zawierających wymagania jakościowe. Szczególnie ważne są tu różnice między normami [5, 7] a *Rozporządzeniem Ministra Gospodarki* [12], z których chyba najistotniejszą jest różnica, dopuszczalny poziom odkształceń oraz wartości poszczególnych harmonicznych.

Reasumując, dbałość o jakość energii elektrycznej powinna być obowiązkiem jej dostawców i odbiorców. Powinni oni dążyć do spełniania wymagań jakościowych przez stałą modernizację urządzeń przesyłowych, rozdzielczych, przetwarzających i odbiorczych. Ponadto, dokumenty jakościowe, oprócz spójnych wymagań, powinny zawierać unormowania w zakresie obowiązków dostawców i odbiorców energii elektrycznej.

BIBLIOGRAFIA

1. Karta UIC.550 : Power supply installation for passenger stock.
2. Karta UIC.795: Minimum installed power. Line categories.
3. Metody pomiarowe i zakres pomiarów diagnostycznych w podstacjach trakcyjnych w świetle istniejących przepisów. Praca CNTK, temat nr 3066/12.
4. Opracowanie dopuszczalnych parametrów zakłóceń dla urządzeń srk, łączności i pojazdów trakcyjnych. Praca CNTK, temat nr 6915/23.
5. PN-EN 50160: Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych. 1998.
6. PN-EN 50163: Zastosowania kolejowe. Napięcia zasilające systemów trakcyjnych. 1999.
7. PN-EN 61000-2-4: Kompatybilność elektromagnetyczna. Środowisko. Poziomy kompatybilności dotyczące zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości w sieciach zakładów przemysłowych. 1997.
8. *Przybylska M.*: Analiza jakości energii elektrycznej dostarczanej liniami odbiorów nietrakcyjnych. *Prace CNTK*, 2002 , nr 136.
9. *Rojek A.*: Pomiary i badania systemów elektroenergetycznych na kolei. Konferencja „Energetyka na kolei”, Szczyrk 26-28.03.2003 (nie publikowane).
10. *Rojek A.*: Techniczne możliwości kształtowania obciążenia podstacji trakcyjnej. *Prace CNTK*, 2002, nr 136.

11. *Roman Z.:* Nowe standardy elektryfikacji linii kolejowych. *Technika Transportu Szynowego*, 1998, nr 1.
12. *Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 25 września 2000 r. w sprawie* szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, obrotu energią elektryczną, świadczenia usług przesyłowych, ruchu sieciowego i eksploatacji sieci oraz standardów jakościowych obsługi odbiorców. (Dz. U. nr 65 poz. 957).
13. *Sochoń A.:* Metoda doświadczalna wyznaczania rezystancji zastępczej obwodu zasilania pojazdu trakcyjnego w systemie 3 kV prądu stałego. *Prace CNTK*, 2002. nr 136.
14. Standardy techniczne – szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji linii CMK do prędkości 200/250 km/h. Praca CNTK, temat nr 3005/10.
15. Standardy techniczne – szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji linii o znaczeniu międzynarodowym do prędkości 160 km/h. Praca CNTK, temat nr 4017/11.