

# Rozważania o jakości energii elektrycznej (IV)

Zbigniew Hanzelka

**P**ojęcie harmonicznej wywodzi się z akustyki, gdzie odnosi się do wibracji struny lub kolumny powietrza. W przypadku przebiegów występujących w elektrotechnice, harmoniczna jest definiowana jako składowa przebiegu o częstotliwości będącej całkowitą krotnością częstotliwości podstawowej (rys. 1).

Superpozycja przebiegów sinusoidalnych o różnych częstotliwościach i amplitudach umożliwia otrzymanie okresowego przebiegu odkształconego (a więc różnego od sinusoidy) o dowolnym, zadanym kształcie (rys. 2).

O kształcie przebiegu decydują nie tylko częstotliwości i wartości amplitud składowych harmonicznych, lecz również kąty ich wzajemnych przesunięć fazowych. Wpływ wartości amplitudy i fazy harmonicznej na kształt przebiegu wypadkowego pokazano na rys. 3.

Przebiegi na rys. 3a i b zawierają – oprócz składowej podstawowej, której wartość w jednostkach względnych wynosi jeden – również współfazową z nią piątą harmoniczną o wartości 0,15 (rys. 3a) i 0,30 (rys. 3b). Przebieg na rys. 3c zawiera – oprócz harmonicznej podstawowej – również przesuniętą względem niej w fazie o 180° piątą harmoniczną o amplitudzie 0,15.

Każdy odkształcony okresowy przebieg czasowy napięcia lub prądu może być utworzony z harmonicznych, a każdy przebieg

Wyższe harmoniczne napięć i prądów są jednym z najstarszych zaburzeń, które pojawiły się w systemie elektroenergetycznym. Przez wiele lat ich wartość szybko się zwiększała w wyniku wzrostu liczby odbiorników nieliniowych oraz malejącego udziału odbiorników rezystancyjnych. Ostatnia dekada przyniosła poprawę sytuacji. Jest to spowodowane głównie wyższym poziomem wiedzy i świadomości wagi zagrożeń, jakie niesie ze sobą obecność wyższych harmonicznych. Niekorzystne jest jednak to, że zamiast dużych nieliniowych instalacji i urządzeń (np. napędów) zlokalizowanych w jednym punkcie systemu zasilającego (w zakładzie przemysłowym) pojawiły się nieliniowe odbiorniki komunalne (oświetlenie, sprzęt elektroniczny itp.), których moc jednostkowa jest niewielka, ale ich ogromna liczba sprawia, że negatywny efekt sumaryczny jest bardzo znaczący, a rozproszona instalacja zasadniczo utrudnia jego redukcję. W artykułach poświęconych harmonicznym (część IV i V cyklu) omówiono podstawowe informacje dotyczące tego zaburzenia, ze szczególnym podkreśleniem jego źródeł, skutków oraz sposobów eliminacji.

## Wyższe harmoniczne napięć i prądów

okresowy może być poddany rozkładowi na harmoniczne (rys. 4). Ta technika analizy pozwala rozważać oddzielnie każdą składową odkształconego przebiegu, a następnie stosując standardowe metody analizy liniowych obwodów elektrycznych, uzyskać wynik ostateczny jako efekt sumowania rezultatów częściowych.

Za twórcę tej techniki analizy powszechnie uważa się francuskiego matematyka J. B. Fouriera. Szereg Fouriera dla funkcji  $f(x)$  o okresie  $T$  ma postać:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + a_{(1)} \cos x + b_{(1)} \sin x + a_{(2)} \cos 2x + b_{(2)} \sin 2x + \dots + a_{(n)} \cos nx + b_{(n)} \sin nx + \dots = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_{(n)} \cos nx + \sum_{n=1}^{\infty} b_{(n)} \sin nx = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} c_{(n)} \sin(nx + \varphi_{(n)})$$

gdzie dla  $T = 2\pi$ :

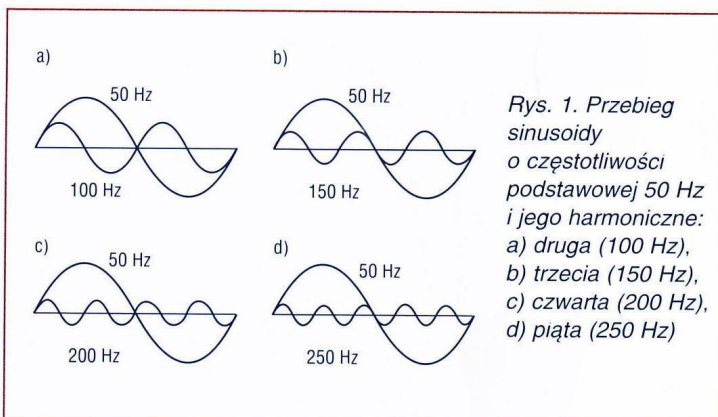
$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx; \quad a_{(n)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(nx) dx;$$

$$b_{(n)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(nx) dx; \quad c_{(n)} = \sqrt{a_{(n)}^2 + b_{(n)}^2}; \quad \varphi_{(n)} = \arctg \frac{b_{(n)}}{a_{(n)}}$$

Składowa harmoniczna o najmniejszym rzędzie  $n = c_{(1)}$  (nie stała  $a_0$ ) jest nazywana podstawową. Pozostałe składowe szeregu są zwane wyższymi harmonicznymi (wh).

Z punktu widzenia rodzaju analizowanych w elektrotechnice przebiegów można rozróżnić harmoniczne napięcia lub prądu. Ze względu na relację częstotliwości wyższych harmonicznych do częstotliwości składowej podstawowej można dodatkowo wyróżnić (oprócz harmonicznych):

- **interharmoniczne** – składowe o rzędach nie będących całkowitą krotnością częstotliwości podstawowej,
- **subharmoniczne** – składowe o częstotliwościach mniejszych od częstotliwości składowej podstawowej.



Często spotykanym terminem jest określenie harmoniczne „potrójne” w odniesieniu do składowych, których rzędy są całkowitą krotnością trzech. Nie wymagają wyjaśnienia takie pojęcia jak: harmoniczne parzyste i nieparzyste.

## Wielkości opisujące odkształcenie napięć i prądów

Najpełniejszą informacją dostarcza zbiór liczb określający rzędy, amplitudy (wartości skuteczne) i fazy poszczególnych harmonicznych.

W dokumentach normalizacyjnych przyjmuje się różne wielkości liczbowe, zdefiniowane na tym zbiorze (najczęściej bez uwzględnienia fazy harmonicznych). Są to:

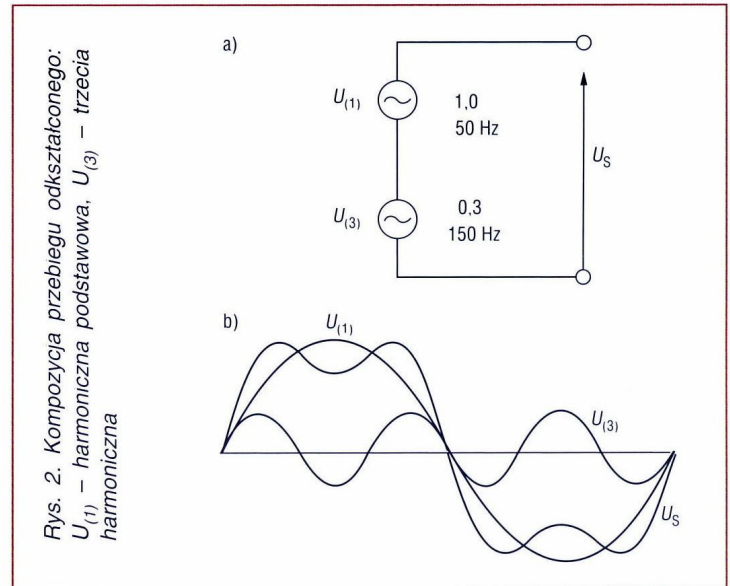
– współczynnik udziału  $n$ -tej harmonicznej napięcia (analogicznie harmonicznej prądu):

$$D_{(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}}$$

– całkowity współczynnik odkształcenia harmonicznego napięcia –  $THD_U$  wyrażony jako iloraz wartości skutecznej harmonicznych do wartości skutecznej podstawowej harmonicznej:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} 100\%$$

Jako górną granicę sumowania przyjmuje się najczęściej  $n = 50$ . Jeżeli ryzyko rezonansu w przypadku harmonicznych wyż-



szych rzędów jest małe, można ograniczyć sumowanie do rzędu 25. Współczynnik odkształcenia ma analogiczną postać dla prądu ( $THD_I$ ) i jest miarą dodatkowego prądu harmonicznego w całkowitej wartości skutecznej. Wadą tego współczynnika jest nieuwzględnienie w definicji częstotliwości harmonicznych. Taką samą jego wartość można otrzymać przy nieskończonej kombinacji różnych harmonicznych.

Oprócz podanej definicji współczynnika  $THD$  stosowane są sporadycznie w literaturze technicznej również inne wskaźniki będące miarą odkształcenia przebiegu.

Przedstawione wielkości są podstawą normalizacji w dziedzinie jakości energii elektrycznej. Ich rzeczywiste wartości są po-

01/00475-01

**Twelve Electric**  
Kompensacja Mocy Biernej  
Rozdział Energii  
Monitoring Jakości Sieci  
Osprzęt Elektrotechniczny

AS-3  
Y f 0.000  
U f 225.4  
cos φ 0.718  
ANALIZATOR PARAMETRÓW SIECI

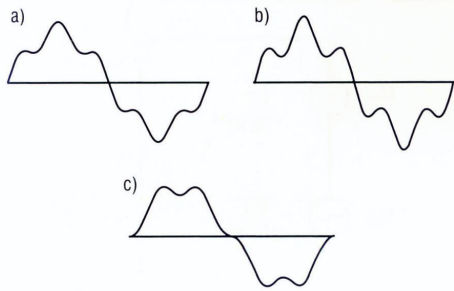
REGULATOR MOCY BIERNEJ MRW-12 OS

JEEN 2000 im. K. Szpotańskiego INSTALELEKTRA Bydgoszcz 2000  
ZŁOTA ISKRA ELEKTROEXPO Warszawa 2000  
ZŁOTY MEDAL INSTALELEKTRA Bydgoszcz 2000  
MEDAL PREZESA SEP ELEKTROINSTALACJE Gdańsk 2000

Po pełną wersję artykułu prof. Z. Hanzelki dzwoń:  
**(22) 872-20-20**  
lub odwiedź stronę  
**www.twelve.com.pl**

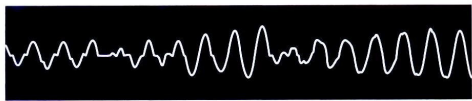
**TWELVE ELECTRIC**  
04-994 Warszawa, ul. Poezji 19  
tel. (22) 872 20 20, fax (22) 612 79 49  
[www.twelveE.com.pl](http://www.twelveE.com.pl)





↑ Rys. 3. Przebiegi różniące się wartościami i kątami fazowymi odkształcającej harmonicznej: a) 1. (harmoniczna podstawowa) – 100%, 5. (piąta harmoniczna) – 15%, ( $\varphi_{15} = 0$ ); b) 1. – 100%, 5. – 30%, ( $\varphi_{15} = 0$ ); c) 1. – 100%, 5. – 15%, ( $\varphi_{15} = 180^\circ$ )

Rys. 6. Przykładowy przebieg czasowy prądu pieca w pierwszych minutach roztopiania



równywane z wartościami dopuszczalnymi określonymi w normach przedmiotowych i przepisach. Na tej podstawie są wydawane m.in. warunki techniczne przyłączenia lub certyfikat dla urządzeń i sprzętu.

## Źródła wyższych harmonicznych prądu

Wśród występujących w systemie elektroenergetycznym źródeł harmonicznych można wyróżnić trzy grupy:

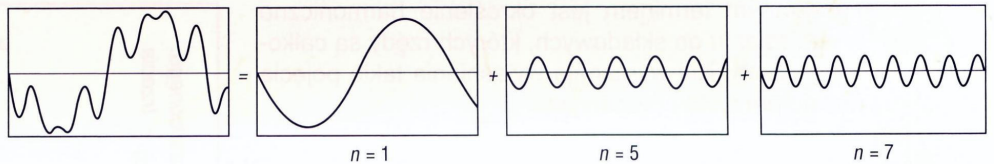
- urządzenia z rdzeniami magnetycznymi, np. transformatory, silniki, generatory,
- urządzenia łukowe, np. piece łukowe, wyładowcze źródła światła, urządzenia spawalnicze,
- urządzenia elektroniczne i energoelektroniczne.

● **Transformatory.** Historycznie były jednym z pierwszych źródeł harmonicznych w systemie elektroenergetycznym. Zależność między napięciem a prądem strony pierwotnej transformatora jest nieliniowa i dlatego lokalizacja punktu pracy w pobliżu nasycenia powoduje odkształcenia prądu magnesującego (rys. 5).

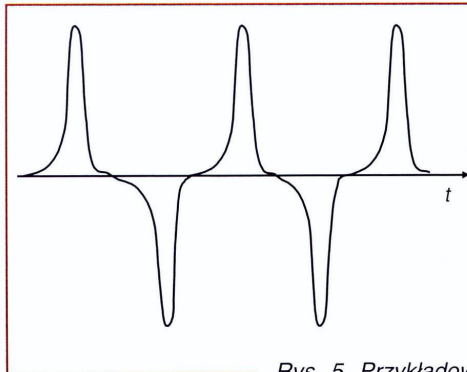
Transformatory są projektowane w taki sposób, aby ich prąd magnesujący nie przekroczył 1–2% prądu znamionowego. Punkt pracy znajduje się wówczas poniżej kolana charakterystyki magnesowania na jej prostoliniowej części. Dzięki temu, nawet mimo dużej liczby transformatorów pracujących w systemie elektroenergetycznym nie są one znaczącym źródłem harmonicznych w normalnych, ustalonych warunkach pracy. Stan ten może ulec radykalnej zmianie w przypadku np. niewielkiego wzrostu napięcia ponad wartość znamionową. Powoduje to znaczny wzrost prądu magnesującego oraz poziomu jego odkształcenia. W sieciach rozdzielczych i zakładowych powszechnie są stosowane transformatory o połączeniu trójkąt/gwiazda, co eliminuje problem odkształceń napięcia trzecią harmoniczną.

● **Piece łukowe prądu przemiennego.** Przebiegi czasowe napięcia i prądów pieca sprawiają, że przedstawienie ich odkształcenia poprzez dyskretne spektrum jest pewnym, powszechnie stosowa-

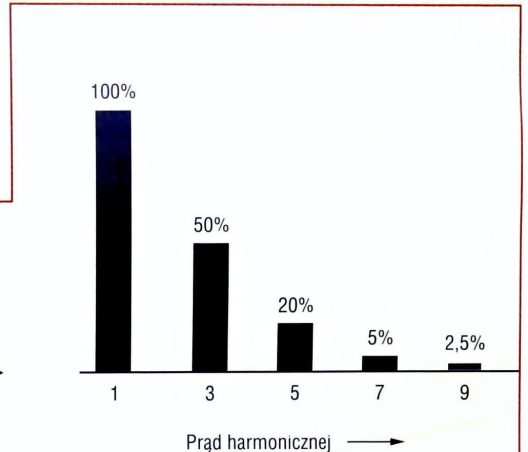
Rys. 7. Przykładowe spektrum harmonicznych prądu: a) pieca łukowego; b) piecokadzi



↑ Rys. 4. Dekompozycja przebiegu odkształconego na składowe harmoniczne: podstawową oraz piątą i siódmą

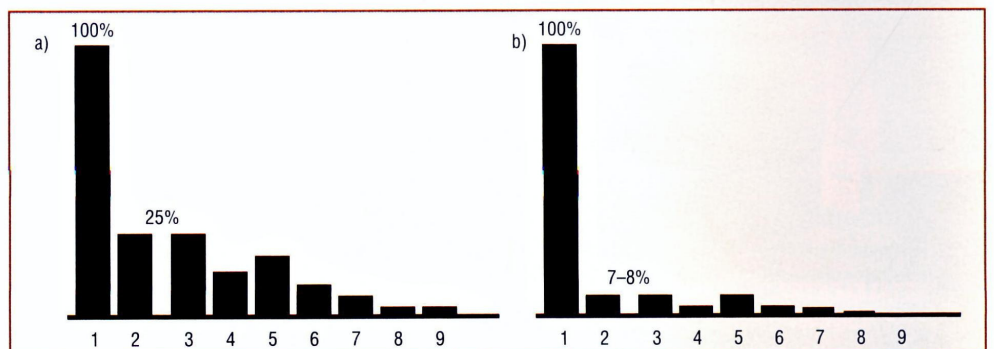


Rys. 5. Przykładowy, odkształcony przebieg prądu magnesującego transformatora oraz jego widmo harmonicznych (napięcie strony pierwotnej równe  $115\%U_N$ )

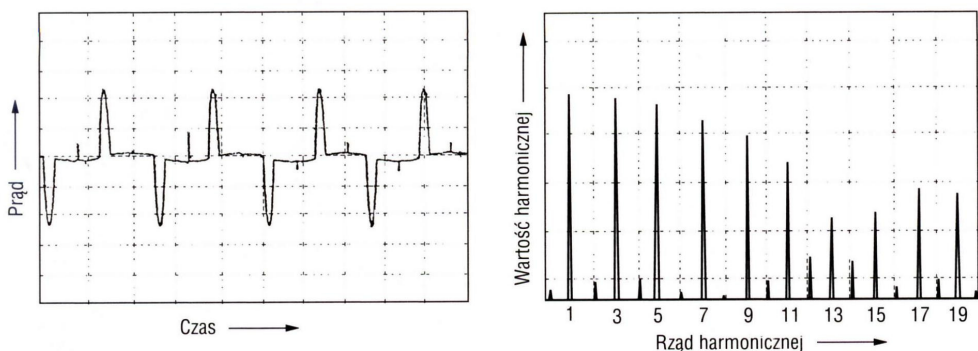
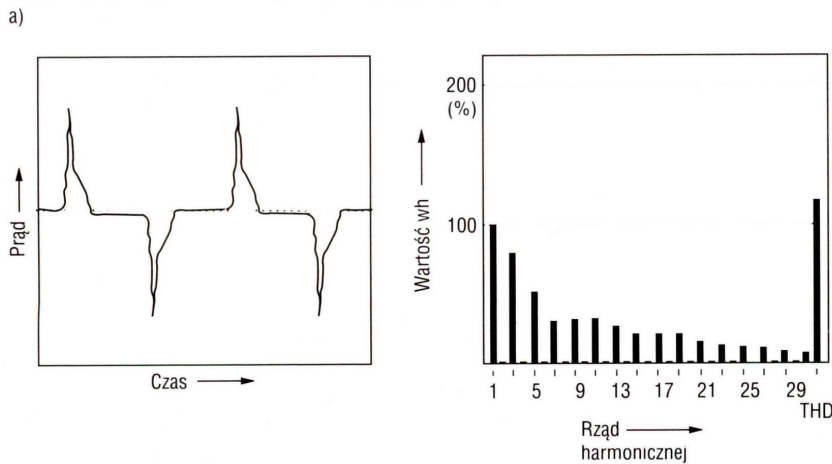


nym przybliżeniem rzeczywistości technicznej. Kształty tych przebiegów mają bowiem charakter zmiennych losowych, są nieokresowymi funkcjami czasu (rys. 6). Warunki wyładowania łukowego ulegają zmianom w poszczególnych fazach wytopu. Największy stopień odkształcenia przebiegu prądu występuje w okresie roztopiania. W przypadku piecokadzi jest znacznie mniejszy, gdyż z pojawieniem się lustra roztopionego metalu występuje krótki łuk, wahania prądu stają się mniejsze, a krzywa prądu coraz mniej różni się od przebiegu sinusoidalnego. Przykładowe przebiegi amplitudowego spektrum prądu przedstawiono na rys. 7. W widmie tym zawsze uwidaczniają się dominujące harmoniczne o najbardziej znaczących amplitudach i rzędach będących zarówno parzystymi, jak i nieparzystymi krotnościami częstotliwości podstawowej, np. 2, 3, 4.

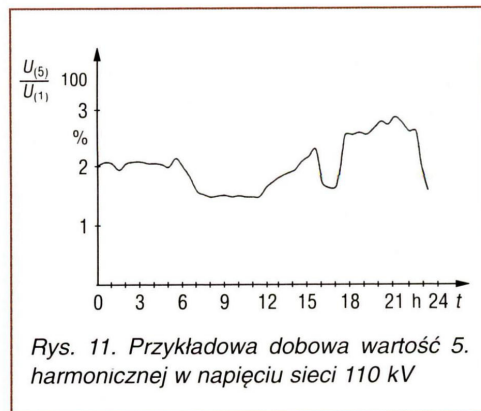
Prawidłowością jest, że amplitudy te (określone jako wartości spodziewane) szybko się zmniejszają ze wzrostem częstotliwości harmonicznej oraz mocy pieca. Wyższe harmoniczne rzędu  $n > 11$  mają praktycznie pomijalne wartości. Obecność harmonicznej trzeciej (ogólnie o rzędach będących całkowitą krotnością trzech) jest wynikiem asymetrycznej pracy pieca. Pomiary wyższej harmonicznej wykazują, co jest racjonalnie uzasadnione, ogromnie duże zróżnicowanie będące rezultatem losowości zjawiska wyładowania łukowego (niekiedy również stosowanych metod i środków pomiarowych). Pomiedzy wyróżnionymi, dominującymi harmonicznymi spektrum ma charakter tzw. białego szumu o znaczących wartościach.



Rys. 8. Przebiegi czasowe prądu: a) energooszczędnej lampy typu kompakt ( $THD_I = 80-130\%$  – balast elektroniczny); b) dużej lampy fluorescencyjnej ( $THD_I = 20-30\%$ )



Rys. 9. Przykładowy przebieg czasowy prądu zasilającego komputer (PC) wraz ze spektrum harmonicznym



Rys. 11. Przykładowa dobowa wartość 5. harmonicznej w napięciu sieci 110 kV

● **Wyładowcze źródła światła.** W urządzeniach tych światło jest wynikiem przepływu prądu przez parę lub gaz, a nie przez żarnik jak w żarowych źródłach światła. Występujący w ich strukturze szeregowy dławik z rdzeniem (balast) jest źródłem trzeciej harmonicznej o znacznej wartości. Zastąpienie go w nowoczesnych konstrukcjach układem elektronicznym, mimo niewątpliwych zalet użytkowych, zwiększa zwykle stopień odkształcenia prądu  $THD_I$ , którego wartość zawiera się w przedziałach jak na rys. 8. Znaczenie harmonicznych prądu generowanych przez wyładowcze źródła światła wzrasta, stanowią one bowiem coraz bardziej znaczącą pod względem mocy część odbiorników komunalnych.

● **Przekształtniki statyczne.** Jako źródła wyższych harmonicznych stanowią one oddzielne, bardzo obszerne zagadnienie, którego omówienie przekracza zakres niniejszego artykułu. W tablicy przedstawiono jedynie przykładowe przebiegi czasowe

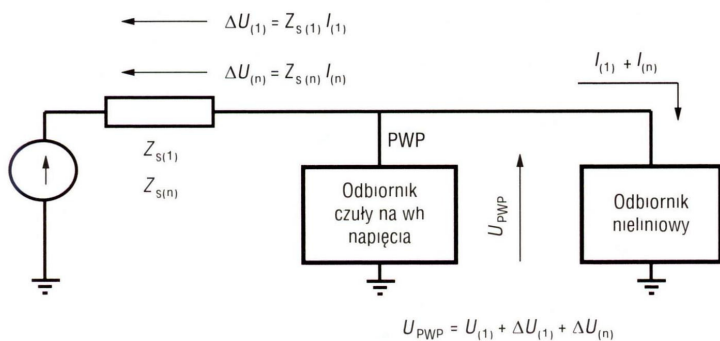
prądów różnych, najbardziej typowych układów przekształtnikowych.

● **Urządzenia informatyczne.** Na rys. 9 pokazano typowy przebieg prądu komputera PC wraz z jego widmem harmonicznym. Widać wyraźnie, że 3., 5. i 7. harmoniczna mają wartości porównywalne z wartością składowej podstawowej. Współczynnik odkształcenia prądu w ogromnej większości przypadków jest zawarty w przedziale 100-130%, a wartość maksymalna trzeciej harmonicznej osiąga poziom 90-95% składowej podstawowej.

## Harmoniczne napięcie i prądów

Składowa prądu zasilającego odbiornik nieliniowy  $I_{(n)}$  wywołuje na impedancji zastępczej sieci zasilającej  $Z_{S(n)}$  spadek napięcia  $\Delta U_{(n)} = Z_{S(n)} I_{(n)}$  (rys. 10). Spadek ten powoduje odkształcenie napięcia w punkcie wspólnego przyłączenia (PWP) czułego na odkształcenie napięcia odbiornika.

Nową jakością w dziedzinie wyższych harmonicznych jest to, że w coraz większym stopniu funkcję dominujących źródeł tego zaburzenia pełnią nie odbiorniki przemysłowe, lecz rozproszone odbiorniki komunalne o małej mocy jednostkowej, występujące w bardzo dużej liczbie. Ich łączne negatywne oddziaływanie na sieć zasilającą uwidacznia się szczególnie w porze wieczornego szczytu obciążeniowego (rys. 11).



$$U_{PWP} = U_{(1)} + \Delta U_{(1)} + \Delta U_{(n)}$$

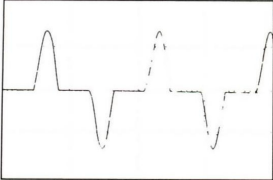
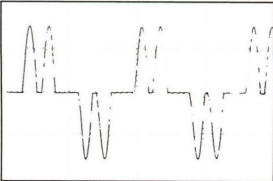
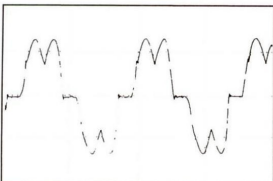
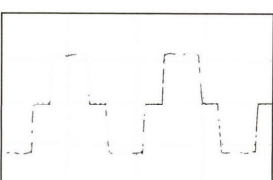
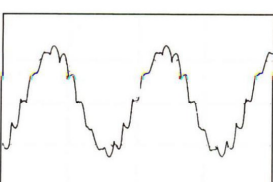
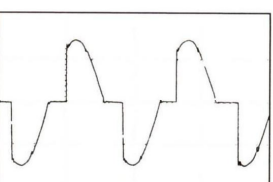
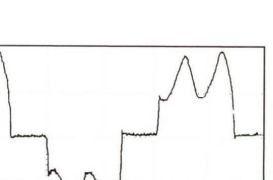


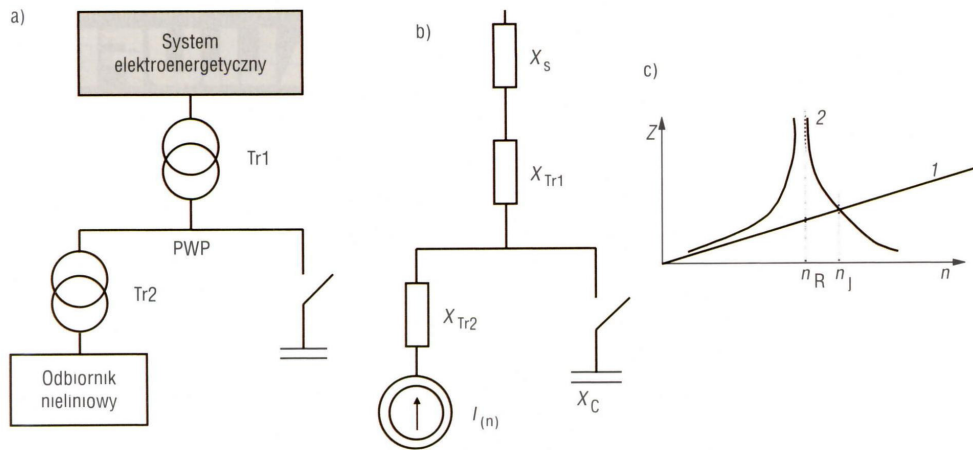
Rys. 10. Odkształcenia napięcia w PWP będące rezultatem spadku napięcia  $\Delta U_{(n)}$

## Skutki obecności wyższych harmonicznych

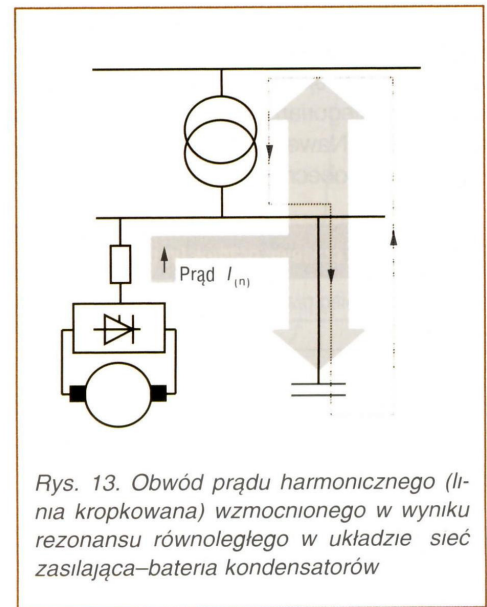
Poziom dopuszczalnego odkształcenia napięcia/prądu jest determinowany czułością odbiorników (również źródeł energii), które podlegają wpływowi odkształconych wielkości. Najmniej czułym rodzajem sprzętu są te urządzenia, których główną funkcją jest ogrzewanie, a więc np. wszelkiego rodzaju piece rezystancyjne. Najbardziej czułym rodzajem sprzętu są te urządzenia elektroniczne, których projektant lub konstruktor założył (pra-

wie) idealne, sinusoidalne przebiegi napięć i prądów o częstotliwości podstawowej. Silniki elektryczne – najpopularniejsze odbiorniki energii elektrycznej – mieszczą się między tymi dwiema granicznymi kategoriami. Większość z nich toleruje znaczące poziomy odkształceń. Nawet w przypadku najmniej czułych odbiorników, jakimi są piece, obecność harmonicznych jest niekorzystna. Mogą one

Przebiegi czasowe prądów typowych odbiorników przekształtnikowych	
Przebieg prądu	Rodzaj przekształtnika
	jednofazowy prostownik $THD_I \gg 80\%$ dominująca trzecia harmoniczna
	sześciopulsowy prostownik z filtrem pojemnościowym bez szeregowej indukcyjności $THD_I \gg 80\%$
	sześciopulsowy prostownik z filtrem pojemnościowym i szeregowym dławikiem (>3%) lub napęd prądu stałego $THD_I \gg 40\%$
	sześciopulsowy przekształtnik z dławikiem o dużej indukcyjności dla redukcji składowej zmiennej prądu stałego $THD_I \gg 28\%$
	przekształtnik 12-pulsowy $THD_I \gg 15\%$
	sterownik prądu przemiennego (odbiornik rezystancyjny) $THD_I$ zmienne wraz ze zmianą kąta wysterowania
	falownik z sześciopulsowym przekształtnikiem wejściowym do zasilania napędu prądu przemiennego



Rys. 12. Układ kompensacji mocy biernej: a) schemat ideowy, b) schemat zastępczy, c) częstotliwościowe charakterystyki impedancyjne (1 – systemu zasilającego  $Z_s = \omega L_s$ , 2 – systemu zasilającego z baterią kondensatorów  $X_C$ ),  $Z$  – impedancja widziana z zacisków odbiornika nieliniowego



Rys. 13. Obwód prądu harmonicznego (linia kropkowana) wzmocnionego w wyniku rezonansu równoległego w układzie sieć zasilająca–bateria kondensatorów

bowiem powodować np. szkodliwe oddziaływanie napięciowe i termiczne na dielektryk izolacji przyspieszając proces jej starzenia lub niekiedy trwale uszkodzenie.

● **Silniki i generatory.** Podstawowym skutkiem obecności harmonicznych napięcia i prądu w maszynach wirujących (indukcyjnych i synchronicznych) jest wzrost temperatury pracy spowodowany stratami mocy w uzwojeniach i magnetowodzie maszyny. Jest to dodatkowe narażenie izolacji, które w razie długotrwałego występowania może skrócić czas eksploatacji maszyny. Do niekorzystnych skutków zalicza się dodatkowe momenty harmoniczne, oscylacje mechaniczne oraz podwyższony poziom zakłóceń akustycznych.

● **Transformatory.** Bezpośrednim skutkiem obecności harmonicznych (oprócz zakłóceń akustycznych) jest wzrost strat mocy w rdzeniu (straty histerezy – proporcjonalne do częstotliwości i straty pochodzące od prądów wirowych – proporcjonalne do kwadratu częstotliwości) oraz w uzwojeniach, w następstwie wzrostu wartości skutecznej prądu oraz zwiększonej rezystancji (zjawisko naskórkowości). Przyjmuje się, że te ostatnie są proporcjonalne do  $\approx \sum I_{(n)}^2 n^2$ , gdzie  $n$  jest rzędem harmonicznej prądu o wartości skutecznej  $I_{(n)}$ . Wywołany tym termiczny stres izolacji może być przyczyną skrócenia czasu eksploatacji transformatorów.

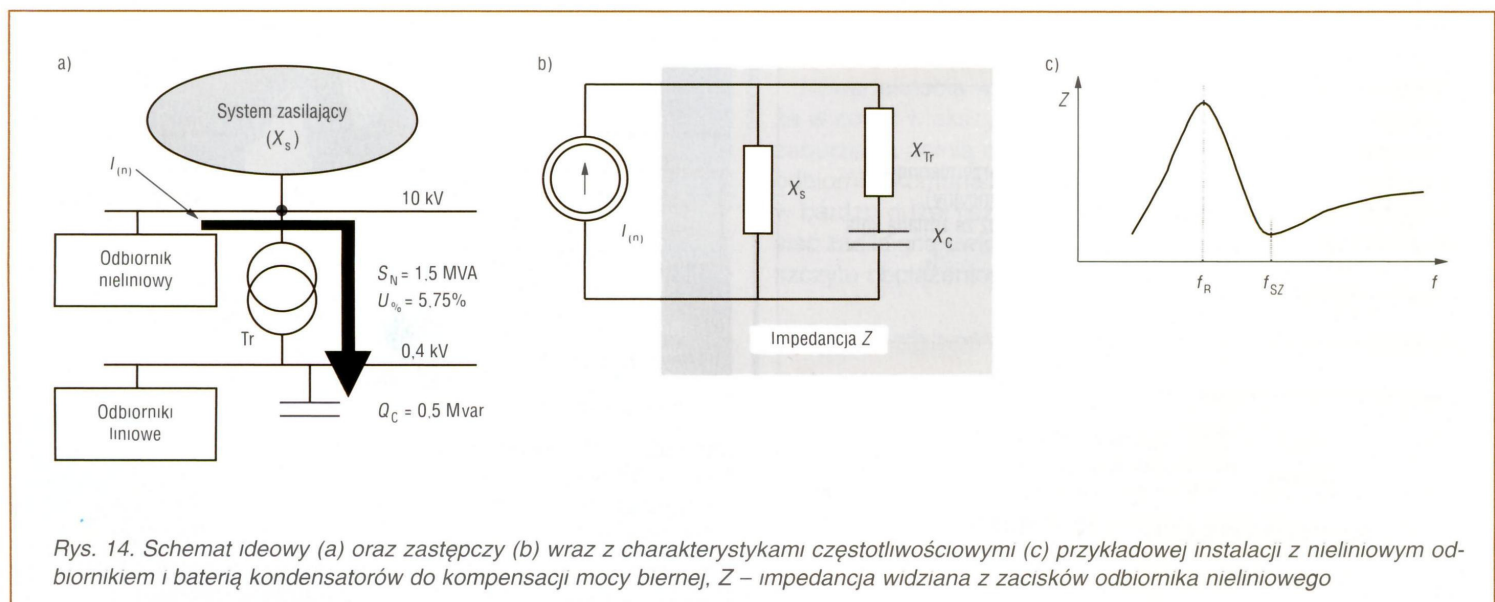
Ważnym miejscem lokalizacji strat mocy są połączone w trójkąt uzwojenia stanowiące obwód zwarty dla prądów harmonicznych potrójnych.

● **Kondensatory.** Należą one do tej kategorii urządzeń, które w bardzo dużym stopniu doświadczają skutków pracy w środowisku elektromagnetycznym z przebiegami odkształconymi. Przeciżenia, którym podlegają, dotyczą napięcia, prądu i mocy. Dlatego do tych wielkości odnoszą się, określane przez producentów, dopuszczalne współczynniki przeciążeniowe podające krotność ich wartości znamionowych (praca z długotrwałym przeciążeniem znacznie skraca czas ich eksploatacji). Wyznaczają one obszar nieniszczących warunków eksploatacji baterii kondensatorów.

Wzrost wartości szczytowej napięcia, będący rezultatem obecności wyższych harmonicznych, to dodatkowe narażenia izolacji. Mogą one w konsekwencji spowodować częściowe wyładowanie w dielektryku, zwarcie końców folii i trwałe uszkodzenie kondensatora. Zgodnie z większością krajowych i międzynarodowych norm, dopuszczalny współczynnik przeciążenia napięciowego kondensatora nie przekracza 110% wartości znamionowej.

Większość problemów występujących w kondensatorach, a wywołanych harmonicznymi ma charakter prądowy. Obecność wyższych harmonicznych w napięciu powoduje przepływ przez kondensator dodatkowych prądów, których wartość może być znacząca i może się zwiększać wraz ze wzrostem rzędu harmonicznej, w wyniku zmniejszenia impedancji zastępczej kondensatora  $Z_C \approx (n\omega C)^{-1}$ .

Względna wartość prądu kondensatora dla  $n$ -tej harmonicznej  $I_{(n)}^*$ , odniesioną do harmonicznej podstawowej ( $I_{(n)}^* = I_{(n)} I_{(1)}^{-1}$ ), można określić związkiem  $I_{(n)}^* = nU_{(n)}^*$ , gdzie:  $U_{(n)}^*$  jest wzglę-



Rys. 14. Schemat ideowy (a) oraz zastępczy (b) wraz z charakterystykami częstotliwościowymi (c) przykładowej instalacji z nieliniowym odbiornikiem i baterią kondensatorów do kompensacji mocy biernej,  $Z$  – impedancja widziana z zacisków odbiornika nieliniowego

dną wartością napięcia  $n$ -tej harmonicznej odniesioną do harmonicznej podstawowej ( $U_{(n)}^* = U_{(n)} U_{(1)}^{-1}$ ). Przykładowo, 7. harmoniczna napięcia o wartości 15% spowoduje przepływ prądu dla tej harmonicznej stanowiącego 105% prądu harmonicznej podstawowej. Może to być przyczyną przeciążenia prądowego kondensatora. Przepływ przez baterię prądu o zbyt dużej wartości powoduje wystąpienie w kondensatorach dodatkowych strat mocy, z wynikającymi z tego niekorzystnymi zjawiskami, takimi jak przepalenie bezpieczników, procesy fizykochemiczne dielektryków wywołujące przyspieszony proces starzenia i skrócenie czasu eksploatacji, trwałe uszkodzenie itp. Wszystkie wymienione niekorzystne zjawiska ulegają drastycznemu wzmocnieniu w warunkach rezonansów: szeregowego i równoległego.

● **Kompensacja mocy biernej.** Kondensatory są najprostszym, z technicznego punktu widzenia, środkiem służącym do kompensacji prądu biernego. Jeżeli normatywne wartości zaburzeń, tj. współczynnik odkształcenia napięcia i amplituda wahań napięcia mieszczą się w dopuszczalnych granicach, realizacja kompensacji przy użyciu stałych baterii kondensatorów jest zazwyczaj uzasadniona ekonomicznie. Kondensatory prezentują bowiem wiele istotnych zalet: niewielki własny pobór mocy czynnej (małe straty), duża trwałość (przy właściwych warunkach eksploatacyjnych), prosty montaż, brak potrzeby konserwacji, możliwość rozbudowy itp. Ich zastosowanie wymaga jednak rozważenia zagrożeń mogących zmniejszyć lub wręcz całkowicie wyeliminować efekt kompensacyjny. Na rys. 12 przedstawiono uproszczony schemat ideowy i zastępczy układu: odbiornik nieliniowy-sieć zasilająca-bateria kondensatorów. Odbiornik na schemacie zastępczym jest reprezentowany jako idealne źródło prądu poszczególnych wyższych harmonicznych, którego wartość jest niezależna od impedancji obciążenia.

Przyłączenie baterii kondensatorów do szyn, z których jest zasilany odbiornik nieliniowy zmienia amplitudowe widmo harmonicznych napięcia w PWP (rys. 12c). Zmianie ulega bowiem częstotliwościowa charakterystyka impedancyjna widziana z zacisków nieliniowego odbiornika. Zwiększają się wartości harmonicznych napięcia  $U_{(n)}$  o rzędach mniejszych od rzędu harmonicznej  $n_1$ :  $U_{(n)} = Z_{\Sigma(n)} I_{(n)}$ , gdzie  $Z_{\Sigma(n)}$  jest impedancją widzianą z zacisków odbiornika dla  $n$ -tej harmonicznej. Zmniejszają się natomiast (wskutek zmiany charakterystyki impedancyjnej systemu zasilającego) harmoniczne napięcia o rzędach większych od rzędu harmonicznej  $n_1$  (rys. 12c).

Dobór mocy baterii kondensatorów  $Q_k$  przeznaczonych wyłącznie do poprawy współczynnika mocy powinien być prowadzony wnikliwie i starannie, również z uwzględnieniem charakterystyki częstotliwościowej impedancji w PWP. Należy unikać trudności mogących wystąpić w eksploatacji układu, powodowanych zjawiskami rezonansowymi związanymi z obecnością wh. Należy mieć pewność, że częstotliwość rezonansowa  $n_R$  układu: sieć zasilająca-bateria kondensatorów:

$$n_R \approx \sqrt{\frac{S_{zw}}{Q_k}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_\Sigma}}$$

ma wartość gwarantującą odstrojenie układu od stanów zbliżonych do rezonansu równoległego dla jednej ze znaczących harmonicznych wytworzonych obecnością odbiornika nieliniowego.

Na rys. 13 przedstawiono przykładowy schemat ideowy układu, w którym wskutek zjawisk rezonansowych nastąpiło wzmocnienie prądu jednej z charakterystycznych harmonicznych sześciopulsowego napędu przekształtnikowego.

Odstrojenie się od rezonansu równoległego można zrealizować dobierając odpowiednio parametry układu kompensacyjnego, tzn. zmieniając moc baterii i/lub włączając dławik przeciwozresonansowy. Ten ostatni włącza się szeregowo z baterią kondensatorów, gdy odkształcenie napięcia jest zawarte w dopuszczalnych granicach, ale istnieje potrzeba ochrony baterii przed przeciążeniem jej prądami wyższych harmonicznych.

● **Rezonans szeregowy.** W pewnych warunkach w systemie elektroenergetycznym, w którym zainstalowano baterie kondensatorów, może wystąpić zjawisko rezonansu szeregowego. Przypadek taki pokazano na rys. 14. Z sieci rozdzielczej o napięciu 10 kV przez transformator (Tr) o mocy 1500 kVA i napięciu zwarcia 5,75% są zasilane szyny niskiego napięcia 0,4 kV. W celu kompensacji mocy biernej przyłączono baterie kondensatorów o mocy 500 kvar. Z szyn SN jest zasilany sześciopulsowy przekształtnik tyrystorowy (odbiornik nieliniowy). Schemat zastępczy układu oraz częstotliwościową charakterystykę impedancyjną widzianą z zacisków przekształtnika przedstawiono na rys. 14b i c.

Widać wyraźnie, że oprócz rezonansu równoległego przy częstotliwości  $f_R$  w układzie występuje również rezonans szeregowy przy częstotliwości  $f_{SZ}$ , kiedy całkowita impedancja osiąga małą wartość. Oznacza to, że obwód rezonansowy w przypadku tej harmonicznej ma cechy filtra równoległego. Jeżeli częstotliwość rezonansowa  $f_{SZ}$  jest bliska częstotliwości np. piątej lub siódmej harmonicznej, to prąd tej harmonicznej generowanej przez przekształtnik będzie płynął w obwodzie szeregowo połączonej reaktancji transformatora i kondensatora do kompensacji mocy biernej. W przeciwieństwie do zjawiska rezonansu równoległego nie ma wówczas wzmocnienia prądu harmonicznego, lecz obwód rezonansu wymusza przepływ prądu w nieprzeznaczonym do tego obwodzie. Może wystąpić bardzo duże odkształcenie napięcia w obwodzie niskiego napięcia.



**Dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka**

– profesor Akademii Górniczo-Hutniczej,  
konsultant ds. technicznych firmy TWELVE