

Henryk MARKIEWICZ
Antoni KLAJN

**WPLYW ZMIAN PARAMETRÓW
OKREŚLAJĄCYCH
JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ
NA PRACĘ ODBIORNIKÓW**

PCPM nr 02/03/2001

Wrocław - styczeń 2001

1. WYJAŚNIENIA WSTĘPNE

Odbiorniki energii elektrycznej pracują w warunkach zbliżonych do optymalnych, jeżeli są one zasilane napięciem równym napięciu znamionowemu lub niewiele różniącym się od tego napięcia, a inne parametry określające jakość energii mieszczą się również w przedziałach wartości uznawanych za graniczne dopuszczalne. Również warunki środowiskowe nie powinny być gorsze od zakładanych przez wytwórcę urządzenia. Każde odstępstwo od tych warunków powoduje nieprawidłową pracę odbiorników objawiającą się m.in. pracą przy obniżonej lub nadmiernie wysokiej, a przez to również szkodliwej wydajności, obniżonej sprawności i zwiększonych stratach przy niewielkich przekroczeniach dopuszczalnych zmian podstawowych parametrów napięcia. Przy nadmiernie dużych odchyleniach parametrów napięcia od wartości znamionowych występują przerwy w pracy odbiorników powodowane skutecznym działaniem właściwych zabezpieczeń lub zniszczeniem odbiorników przy braku takich zabezpieczeń.

Jakość energii elektrycznej określają przy prądzie przemiennym parametry napięcia jak:

- wartość skuteczna napięcia na zaciskach odbiornika (poziom napięcia),
- odchylenia i wahania napięcia od wartości znamionowej,
- kształt krzywej napięcia,
- symetria napięć w układzie trójfazowym,
- częstotliwość prądu przemiennego.

Przy prądzie stałym oprócz dwóch pierwszych parametrów ważna jest również zawartość składowych przemiennych w napięciu.

Jakość energii to również niezawodność jej dostawy odbiorcom, określona częstością i czasem występowania przerw w zasilaniu. Oznacza to bowiem, że żaden z warunków określających jakość energii (napięcia) nie jest spełniony. Ważne są również wartości i częstość występowania przebiegów w sieci zasilającej.

Decydujący wpływ na pracę odbiorników energii elektrycznej ma wartość napięcia występującego długotrwale na zaciskach odbiornika, nazywana również poziomem napięcia. Zależy on od wartości napięcia źródła zasilania, ale również od innych odbiorników zasilanych z tej samej sieci i zmienia się wraz ze zmianą liczby i obciążenia pracujących odbiorników na skutek zmian spadków napięcia w poszczególnych elementach sieci. Poziom napięcia jest więc zdarzeniem losowym i jest bardzo trudno, czy wręcz niemożliwe, spełnić warunek, aby napięcie w każdym punkcie sieci było równe napięciu znamionowemu.

Miarę stałości poziomu napięcia są odchylenia i wahania napięcia [1].

Odchyleniem napięcia przyjęto nazywać długotrwale różnice między napięciem na zaciskach odbiornika (U), a napięciem znamionowym (U_N)

$$\delta U_{\%} = \frac{|U - U_N|}{U_N} 100\%, \quad (1)$$

przy czym zmiany wartości napięcia dokonują się stosunkowo wolno, wolniej niż $0,02 U_N$ na sekundę.

Wahaniem napięcia przyjęto natomiast nazywać szybkie zmiany wartości napięcia dokonujące się z szybkością większą niż $0,02 U_N$ na sekundę. Napięcie na zaciskach odbiornika różni się od napięcia znamionowego o odchylenie i wahanie napięcia.

Celem przedstawienia wartości oraz zmian parametrów określających jakość napięcia, jakie mogą występować w warunkach rzeczywistych, w referacie przedstawiono niektóre wyniki badania jakości energii w dużym zakładzie przemysłowym branży elektrotechnicznej w Niemczech. Zakład jest zasilany z własnej stacji 110 kV poprzez 9 stacji transformatorowo-rozdziałczych oddziałowych 20/0,4/0,230 kV, łącznie z 21 transformatorami 630 kVA.

Badania przeprowadzono w miesiącach IV-VI 1999 r. przy zastosowaniu specjalistycznego przyrządu rejestrującego i analizującego wszystkie parametry określające jakość napięcia. Rejestrowano przebiegi różnych wielkości w cyklu tygodniowym, lecz z możliwością wyboru określonego fragmentu zapisu i rozszerzenia zarejestrowanych przebiegów celem dokładniejszej analizy zachodzących zmian wybranych parametrów w dowolnie krótkim czasie. Ze względu na zastrzeżoną poufność tych danych w referacie nie podano nazwy zakładu ani jego lokalizacji.

2. WPLYW ODCHYLEŃ NAPIĘCIA NA PRACĘ ODBIORNIKÓW ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Do oceny wpływu odchylenia i wahań napięcia na pracę odbiorników elektrycznych wykorzystuje się zależności matematyczne, określające zależności i zmiany wartości poszczególnych wielkości fizycznych (parametrów odbiorników) od zmian napięcia lub odpowiednie charakterystyki napięciowe w postaci wykresów przedstawiających zmiany podstawowych parametrów odbiorników od zmian wartości napięcia na jego zaciskach. Charakterystyki napięciowe umożliwiają ustalenie, przy przyjęciu określonych założeń, granicznych dopuszczalnych odchylenia napięcia ze względu na techniczne warunki pracy odbiorników. Ustalenie strat gospodarczych wynikłych z odchylenia napięcia jest z reguły znacznie trudniejsze, wymaga bowiem uwzględnienia czynnika czasu, rodzaju i kosztów wyrobu, jego jakości zarówno zdefiniowania jak i ustalenia.

Wszystkie te zależności są bardzo różne dla różnych urządzeń, dlatego też ustalenie granicznych dopuszczalnych odchylenia i wahań napięcia wymaga dokładnej indywidualnej analizy pracy poszczególnych urządzeń przy zasilaniu ich napięciem różnym od znamionowego i założenia dopuszczalnych dla nich negatywnych konsekwencji.

Odbiorniki oświetleniowe są szczególnie wrażliwe na odchylenia napięcia. Strumień świetlny żarówek zasilanych napięciem U jest równy (rys. 1)

$$\Phi_u = \Phi_N \left(\frac{U}{U_N} \right)^{3,6}, \quad (2)$$

a lamp wyładowczych -

$$\Phi_u = \Phi_N \left(\frac{U}{U_N} \right)^{1,8}, \quad (3)$$

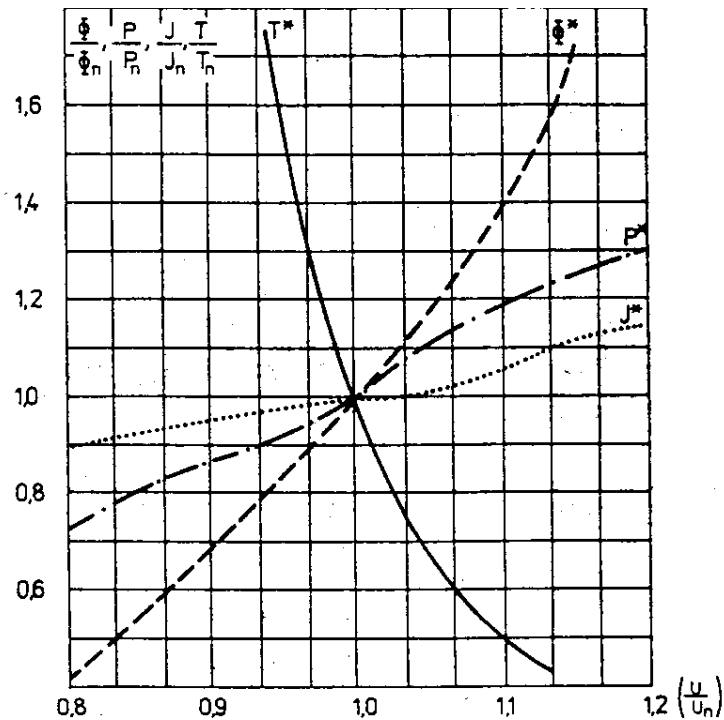
gdzie Φ_N - to strumień świetlny przy napięciu znamionowych (U_N).

Z kolei trwałość żarówek:

$$T_U = T_N \left(\frac{U}{U_N} \right)^{-14}, \quad (4)$$

gdzie T_N to trwałość znamionowa równa zazwyczaj 1000 h.

Trwałość lamp wyładowczych zależy głównie od liczby załączeń i jedynie w niewielkim stopniu zależy od wartości napięcia zasilającego.

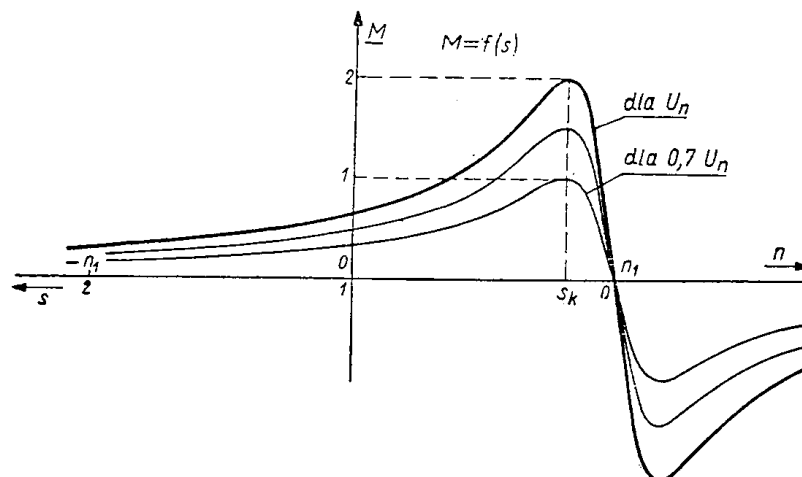


Rys. 1. Charakterystyki napięciowe względnych zmian strumienia świetlnego ϕ , trwałości T , mocy P oraz prądu J żarówek gazowanych.

Z przedstawionych zależności wynika, że przy dodatnich odchyleniach napięcia zyskuje się znacznie na skuteczności świetlnej odbiorników oświetleniowych, lecz w przypadku żarówek ich trwałość zostaje bardzo znacznie obniżona. Trwałe dodatnie odchylenie napięcia o 5% powoduje skrócenie czasu pracy żarówki prawie do połowy trwałości znamionowej.

Ujemne odchylenie napięcia może powodować niestabilną pracę lamp wyładowczych oraz niemożliwość ich uruchomienia. Krótkotrwały, bo nawet 1-2 sekundowy zanik napięcia lub nawet jedynie znaczne obniżenie się napięcia może spowodować przerwanie procesu wyładowania w lampie i zanik świecenia, co w przypadku lamp rtęciowych powoduje długotrwałą, bo nawet kilkuminutową przerwę w pracy (świeceniu) lampy.

W odniesieniu do odbiorników oświetleniowych można uznać, że trwałe 3-4 procentowe dodatnie odchylenie napięcia nie wywoła znaczących negatywnych skutków.



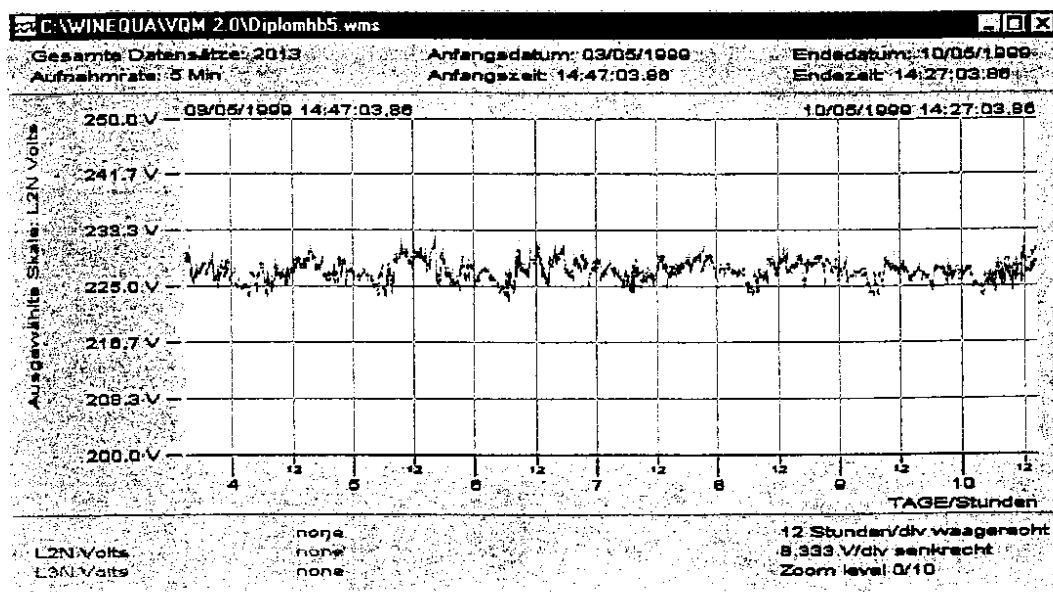
Rys. 2. Wpływ zmiany napięcia zasilania na przebieg charakterystyki momentu silnika asynchronicznego.

Praca silników [2] przy odchyleniach napięcia ulega umiarkowanym zmianom (rys. 2., tabl. 1). Dopiero przy znacznych odchyleniach szczególnie ujemnych, przekraczających 10% może dochodzić do nieprawidłowej pracy silników, objawiającej się różnymi skutkami, głównie jednak przetężeniem i nadmiernym przyrostem temperatury. Mogą wystąpić również trudności podczas rozruchu silników. Przy rozruchu ciężkim granica zadowalająco prawidłowego rozruchu występuje jeszcze przy 0,85 napięcia znamionowego, a przy rozruchach lekkich nawet przy 0,7 U_N .

Innym zagadnieniem jest natomiast wydajność produkcji i jakość wyrobów wytwarzanych w warunkach zasilania silników napędów złożonych urządzeń napięciem różnym od znamionowego.

Tabela 1. Wpływ odchylenia napięcia od wartości znamionowej na niektóre parametry silników indukcyjnych obciążonych mocą znamionową.

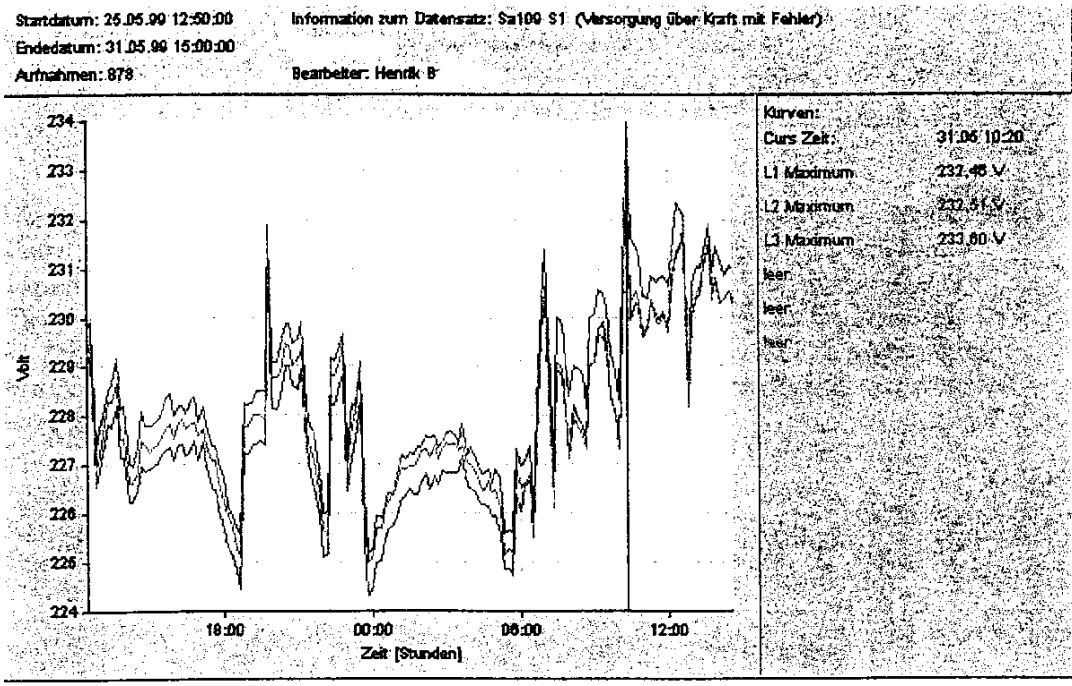
Wielkość	Zmiana wartości przy odchyleniu napięcia o:	
	-10%	+10%
Moment rozruchowy maksymalny oraz rozruchowy	-19%	+21%
Prędkość obrotowa	-1,5%	+1%
Sprawność	-2%	+(0,5÷1)%
Współczynnik mocy	+0,01	-0,03
Prąd stojana	+11%	-7%
Przyrost temperatury uzwojenia stojana	+(6÷7)%	-(3÷4)%



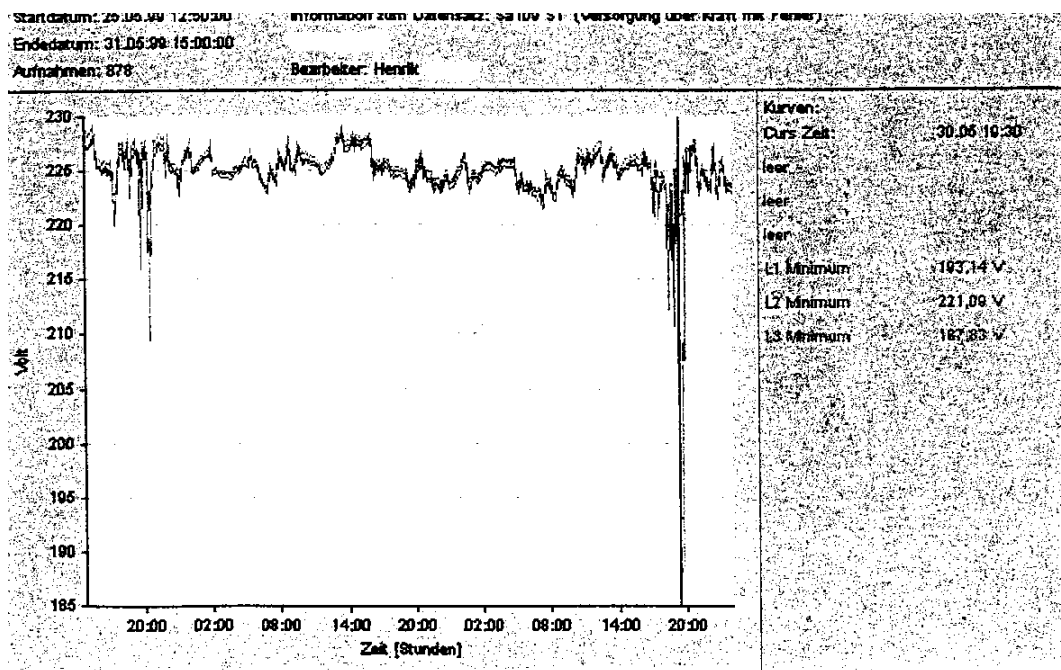
Rys. 3. Przebieg napięcia w cyklu tygodniowym zarejestrowany na jednym z oddziałów produkcyjnych dużego zakładu przemysłowego.

Urządzenia elektrotermiczne to bardzo liczna grupa odbiorników o przeznaczeniu zarówno przemysłowym, jak i komunalnym o mocach od dziesiątków watów do wielu megawatów, przetwarzających energię elektryczną na ciepło. Urządzenia te działają w oparciu o różne zasady przemiany energii (urządzenia oporowe, indukcyjne, elektrodowe, łukowe, pojemnościowe i in.), a mimo to we wszystkich z nich najważniejszy parametr, jakim jest moc grzejna, jest proporcjonalny do kwadratu napięcia zasilającego.

a)



b)



Rys. 4. Najwyższe i najniższe wartości napięć zarejestrowane na jednym z oddziałów dużego zakładu przemysłowego.

Długotrwałe ujemne odchylenie napięcia zmniejsza wydajność urządzenia, a przez to wydłuża proces nagrzewania wsadu, co może z kolei powodować zakłócenia całego procesu technologicznego, a w skrajnym przypadku jego przerwaniu.

Długotrwałe dodatnie odchylenie napięcia powoduje z kolei nadmiernie duże wydzielanie się ciepła, co może być kompensowane nadmiernie częstym działaniem urządzeń regulacyjnych, a przy braku takich urządzeń spowoduje nagrzanie komory grzejnej oraz wsadu do zbyt wysokiej temperatury. Dodatkowym, istotnym skutkiem jest znacznie szybsze zużywanie się urządzenia wskutek nagrzewania się elementów grzejnych, izolacji cieplnej i całego urządzenia do zbyt wysokiej temperatury. W sieciach przemysłowych, zasilających urządzenia grzejne, może być utrzymywane długotrwałe, bez negatywnych skutków, napięcie do 5% wyższe od napięcia znamionowego.

Odbiornikami szczególnie wrażliwymi na odchylenia napięcia są kondensatory, chociaż podobnie jak i w innych odbiornikach moc kondensatorów zależy od kwadratu napięcia. Negatywne skutki tego zjawiska są jednak bardziej znaczące aniżeli w innych odbiornikach [3].

Ujemne odchylenie napięcia powoduje zmniejszenie mocy biernej indukcyjnej generowanej do sieci przez kondensatory, co w przypadku baterii kondensatorowych nie dysponujących nadmiarem mocy spowoduje pogorszenie warunków napięciowych w sieci ze wszystkimi innymi negatywnymi skutkami.

Dodatnie odchylenie napięcia powoduje zwiększenie mocy generowanej przy poszczególne jednostki kondensatorowe oraz zwiększenie strat mocy czynnej i podwyższenie się temperatury, co powoduje przyspieszenie procesów starzeniowych, znacznie intensywniejsze aniżeli w innych typach odbiorników.

Zarejestrowane przebiegi napięcia w jednym z oddziałów dużego zakładu przemysłowego przedstawiono na rysunkach 3 i 4.

3. WPLYW WAHAŃ NAPIĘCIA NA PRACĘ ODBIORNIKÓW ENERGII ELEKTRYCZNEJ

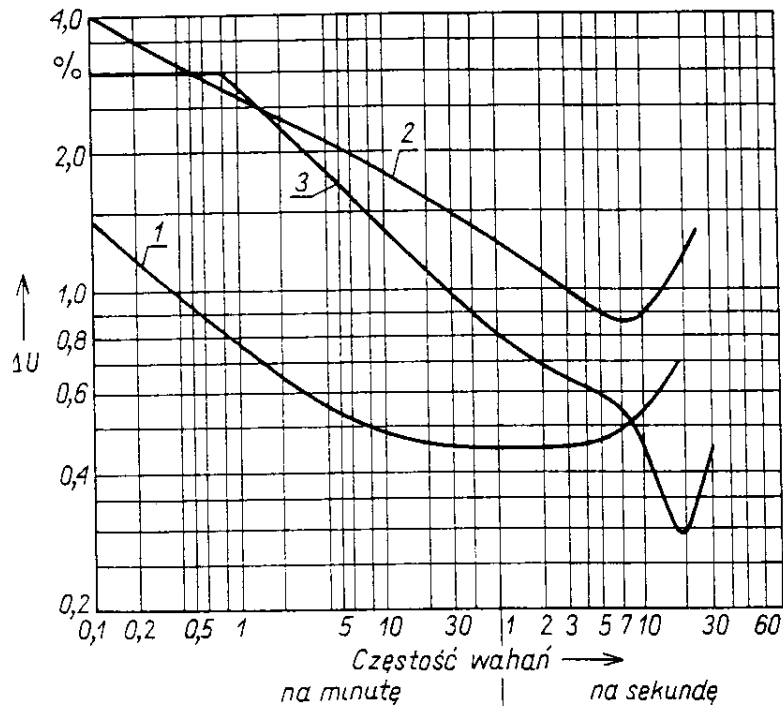
Wahania napięcia objawiające się bardzo szybkimi zmianami napięcia, szybszymi niż $0,02 U_N$ na sekundę, są powodowane głównie gwałtownymi zmianami obciążenia odbiorników o dużych mocach znamionowych, wywołującymi równie szybkie zmiany spadków napięcia na poszczególnych elementach systemu zasilającego. Wahania są powodowane w szczególności rozruchem bezpośrednim czy hamowaniem przeciwrzędem silników, pracą spawarek, pieców łukowych podczas topienia wsadu i zmianami długości łuku, urządzeń walcowniczych, pomp i sprężarek tłokowych oraz dowolnych innych urządzeń charakteryzujących się szybkozmiennym momentem obciążenia. Amplituda i szybkość zmian napięcia jest przy tym większa, przy takich samych zmianach obciążenia, im system jest „słabszy”, im mniejsze są moce znamionowe transformatorów zasilających oraz przekroje przewodów sieci rozdzielczych i instalacji.

Wahania napięcia są charakteryzowane:

- amplitudą, będącą różnicą największej i najmniejszej wartości napięcia w czasie wahania,
- częstością występowania,
- czasem trwania wahania.

Wahania mogą być regulowane i nieregulowane, bardzo częste, częste, umiarkowane, rzadkie i bardzo rzadkie, chociaż pojęcia te nie są dokładnie zdefiniowane. W analizie skutków wahań, ze względu na krótkie czasy wahania pomija się zmienność strat energii powodowanej tym zjawiskiem [1, 3].

Najbardziej odczuwalne dla człowieka skutki wahań napięcia zasilającego dotyczą odbiorników oświetleniowych, w szczególności indekskencyjnych źródeł światła (żarówek). Szybkie zmiany napięcia powodują równie szybkie zmiany skuteczności świetlnej (strumienia świetlnego), co powoduje migotanie światła. Przy pewnej częstości zmian i amplitudzie zmian wywołuje to u ludzi zdenerwowanie, przeradzające się z czasem w niemożliwość wykonywania prac wymagających spostrzegania przedmiotów o małych wymiarach nie kontrastujących z tłem. Wrażliwość na wahania napięcia (migotanie światła) jest odczuciem subiektywnym, przez co może być różne dla każdego człowieka.



Rys. 5. Wpływ wahań napięcia w instalacjach oświetleniowych na wrażenia wzrokowe; 1-odczuwalność migotania oświetlenia, 2-granica zdenerwowania, 3-wartości graniczne dopuszczalne wg [5].

Badania skutków wahań napięcia w odniesieniu do lamp żarowych pozwoliły wyznaczyć granice charakterystycznych oddziaływań na psychikę człowieka (rys. 5). Wahania o amplitudzie i częstości zawierających się pod krzywą 1 są w zasadzie niezauważalne dla człowieka, a zatem dopuszczalne. Natomiast obszar zakłóceń znajdujących się ponad krzywą 2 to obszar zmian wywołujących podrażnienie u ludzi i ograniczoną możliwość pracy przy takim oświetleniu, a zatem nie powinien występować [3].

Obszar pomiędzy krzywymi 1 i 2 wyznacza zmiany wprawdzie odczuwalne, lecz nie ograniczające możliwości pracy. Największa wrażliwość ludzi na migotanie światła zawiera się w granicach częstości 2-8 na sekundę. Krzywa 3 wyznacza graniczne dopuszczalne amplitudy i częstości wahań napięcia zasilającego ustalone przez CENELEC.

Mniej zauważalne, ale wywołujące negatywne skutki, są wahania napięcia w sieci zasilającej silniki. Każdorazowa, szybka zmiana napięcia powoduje zmianę charakterystyki momentów napędowych silników, co przy stałej wartości momentu hamującego, wytwarzanego przez napędzany zespół urządzeń, powoduje niestabilną pracę całego układu napędowego, gdyż każdorazowo występuje przyśpieszenie lub spowolnienie prędkości kątowej wirnika silnika i sprzężonego z nim urządzenia. Powoduje to drgania całego zespołu. Długotrwała praca silnika w warunkach występowania częstych wahań napięcia o znacznej amplitudzie powoduje przyśpieszone zużywanie się zarówno silnika, jak i napędzanych nim maszyn.

Zdecydowana większość odbiorników grzejnych, poza niektórymi o najnowszej technologii (plazmowe, laserowe itp.) są przeważnie mało wrażliwe na wahania napięcia, chociaż część z nich (urządzenia łukowe, indukcyjne) same mogą być źródłem takich zakłóceń.

Urządzeniami szczególnie wrażliwymi na wahania napięcia są natomiast różnorodne przekształtniki prądu i napięcia ze względu na dużą liczbę zainstalowanych w nich urządzeń energoelektronicznych. Nierzadkie są przypadki uszkodzenia tych urządzeń powodowane tym zjawiskiem lub co najmniej ich wyłączenia w wyniku działania właściwych zabezpieczeń.

4. WPLYW ASYMETRII UKŁADU ZASILANIA NA PRACĘ ODBIORNIKÓW

Stan techniczny układu wielofazowego, w którym parametry elektryczne poszczególnych faz nie są jednakowe nazywa się stanem niesymetrycznym. Stany takie mogą być krótkotrwałe, powodowane awaryjną pracą układu oraz długotrwałe - powodowane głównie niesymetrycznym obciążeniem poszczególnych faz przez odbiorniki jedno i dwufazowe. W układzie niesymetrycznym trójfazowym występują składowe kolejności przeciwnej i zerowej napięcia oraz prądu. Stan asymetrii jest charakteryzowany współczynnikami asymetrii (ϵ_u , ϵ_I) oraz nierównomierności (ϵ_{0u} , ϵ_{0I}) [1, 3].

Współczynnik asymetrii napięcia jest równy

$$\epsilon_u = \frac{U_2}{U_1}, \quad (5)$$

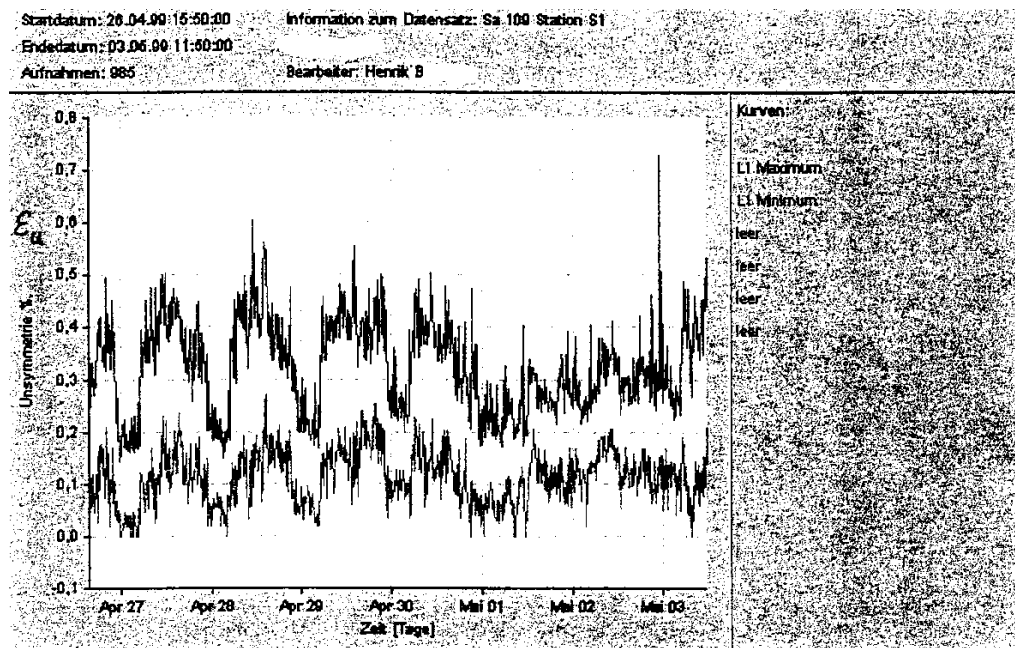
a współczynnik nierównomierności -

$$\epsilon_{0I} = \frac{U}{U_1}, \quad (6)$$

w których:

U_1 , U_2 , U_0 - składowe symetryczne napięcia: zgodna (U_1), przeciwna (U_2) oraz zerowa (U_0).

Składowe symetryczne zerowe napięcia i prądu (U_0 , I_0) występują jedynie w sieciach o skutecznie uziemionym punkcie zerowym (sieci o napięciu 110 kV i wyższym oraz niskiego napięcia 230/400 V).



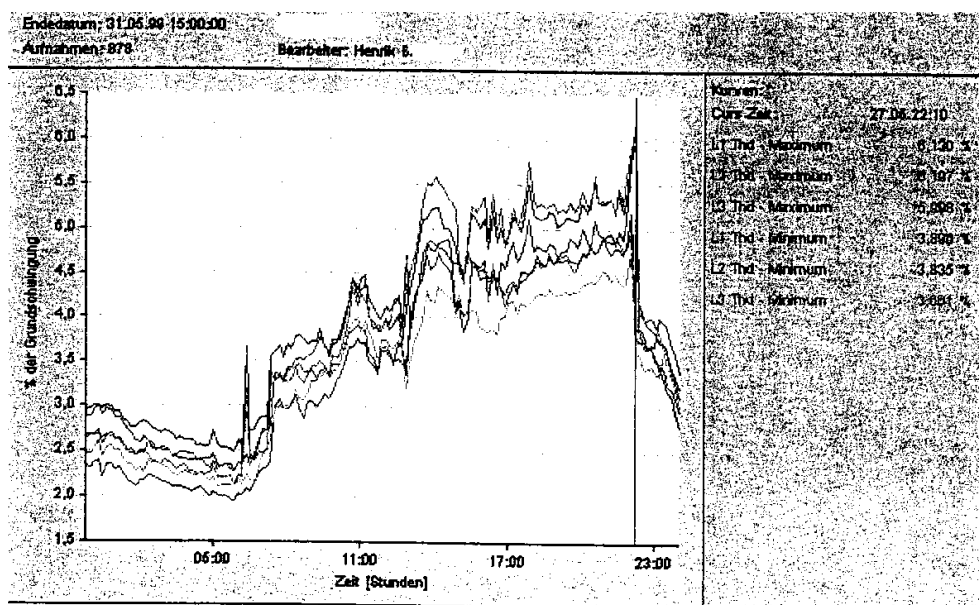
Rys. 6. Najmniejsze i największe wartości współczynnika asymetrii ϵ_u rejestrowane na jednym z oddziałów dużego zakładu przemysłowego.

Niesymetria napięć i prądów w układzie trójfazowym wpływa niekorzystnie na pracę sieci i przyłączonych od niej odbiorników i to zarówno trój- i jednofazowych. Dotyczy to szczególnie silników, gdyż powoduje dodatkowy przyrost temperatury uzwojeń oraz powstanie przeciwnie skierowanego momentu pomniejszającego moment użyteczny. Ponieważ impedancja silników dla składowej przeciwnej prądu jest nawet kilkakrotnie mniejsza od impedancji dla składowej symetrycznej zgodnej, to nawet niewielka zawartość składowej przeciwnej napięcia powoduje kilkakrotnie większy przyrost prądu składowej

przeciwnej, co wywołuje dodatkowy przyrost temperatury, a przez to nawet bardzo znaczne skrócenie czasu pracy maszyny. Zmniejszenie momentu użytecznego maszyny zależy w przybliżeniu od kwadratu współczynnika asymetrii. Negatywne skutki cieplne i mechaniczne mogą w znacznym stopniu ograniczyć możliwość pełnego wykorzystania danych ziemnozwarciowych silników w warunkach występowania znacznych asymetrii układu zasilania.

Niesymetria napięć układu trójfazowego wpływa niekorzystnie - w różnym stopniu - również na pracę wszystkich innych odbiorników trójfazowych. Również odbiorniki jednofazowe zasilane z układu trójfazowego niesymetrycznego pozostają w niekorzystnych warunkach pracy. Część z nich pracuje bowiem przy napięciu wyższym, a część przy napięciu niższym od znamionowego ze wszystkimi wypływającymi stąd konsekwencjami.

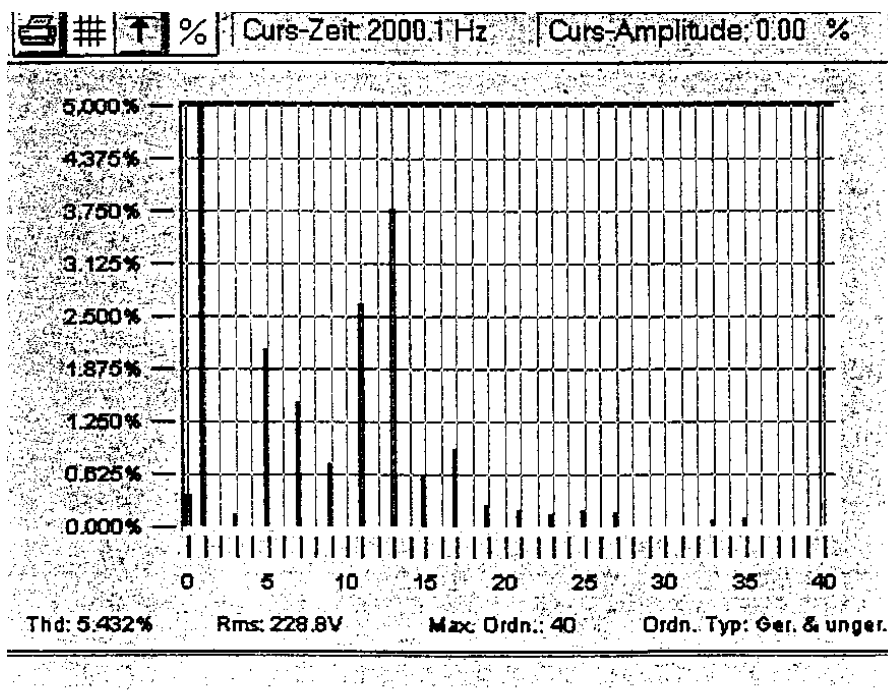
O niesymetrii układu zasilania świadczą głównie wartości współczynnika asymetrii napięcia ϵ_u (rys. 6) oraz różnice napięć poszczególnych faz (rys. 4a).



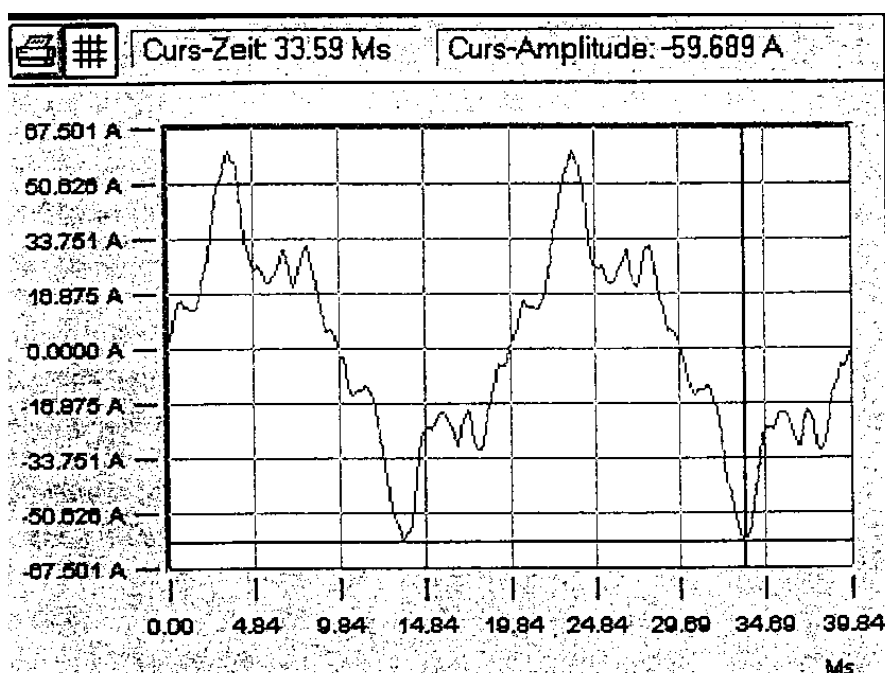
Rys. 7. Wartości współczynnika THD_U zarejestrowane w sieci rozdzielczej dużego zakładu przemysłowego.

5. WPLYW ODKSZTAŁCENIA NAPIĘCIA NA PRACĘ ODBIORNIKÓW ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Chwilowy przebieg napięcia prądu przemiennego powinien być sinusoidalny. W rzeczywistości przebieg ten może być w różnym stopniu odkształcony. Jest to spowodowane w części niewielkim odkształceniem napięcia już na zaciskach generatora, jednakże główną przyczyną jest praca odbiorników o nieliniowych charakterystykach prądowo-napięciowych, takich jak przekształtniki, spawarki, piece łukowe, lampy wyładowcze i in., w szczególności o dużych mocach znamionowych.



Rys. 8. Zawartość wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym w sieci rozdzielczej dużego zakładu przemysłowego.



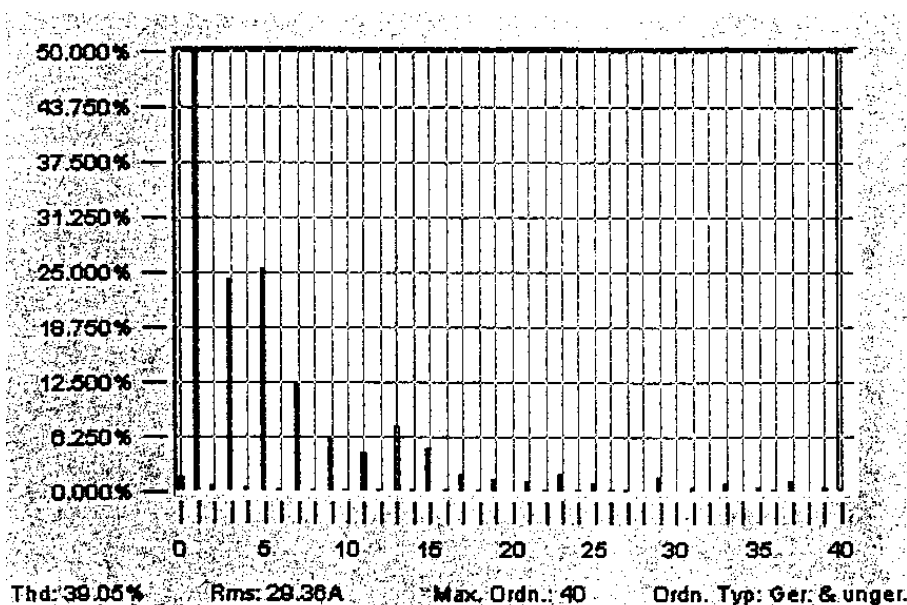
Rys. 9. Przykładowy przebieg chwilowych wartości prądu obciążenia w instalacji przemysłowej.

Miarą odkształcenia napięcia jest wartość współczynnika THD (total harmonic distortion) [4], określonego względną zawartością w napięciu zasilającym lub prądzie wyższych harmonicznych wg zależności:

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U}, \quad (7)$$

w której: U_h - wartość skuteczna h-tej harmonicznej napięcia,
 U - wartość skuteczna napięcia.

Niekiedy zawartość wyższych harmonicznych jest odnoszona nie do wartości skutecznych napięcia lub prądu, lecz do wartości pierwszych harmonicznych (U_1, I_1).



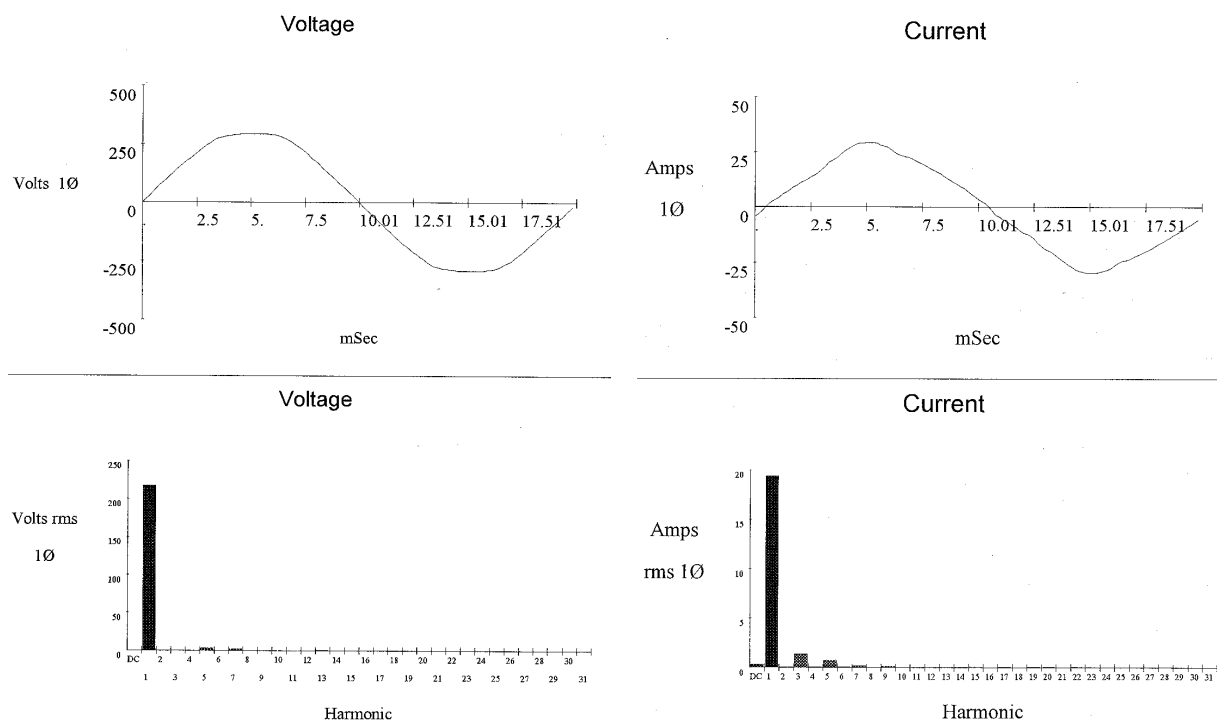
Rys. 10. Przykładowy pomiar zawartości wyższych harmonicznych w prądzie obciążenia w instalacji przemysłowej.

Przykładowe, chwilowe przebiegi napięcia i prądu oraz zawartości wyższych harmonicznych, występujących w rzeczywistych warunkach w zakładzie przemysłowym, przedstawiono na rysunkach 7-10. Podobne dane zarejestrowane w budynkach mieszkalnych wielorodzinnych we Wrocławiu przedstawiono z kolei na rysunkach 11 i 12. Należy przy tym zwrócić uwagę na różny stopień odkształceń sinusoidy prądu w przypadku poboru znacznego obciążenia (rys. 11), gdy dominującymi odbiornikami są silniki pralek, piekarniki, oświetlenie, nie wnoszące znacznych odkształceń, oraz znacznie większy stopień odkształceń (rys. 12) w przypadku, gdy dominującymi odbiornikami jest sprzęt radiowo - telewizyjny. Sprzęt taki, wyposażony zwykle w pojemnościowe filtry napięcia, jest źródłem znacznych odkształceń, pomimo że wartość skuteczna pobieranego prądu jest stosunkowo nieduża.

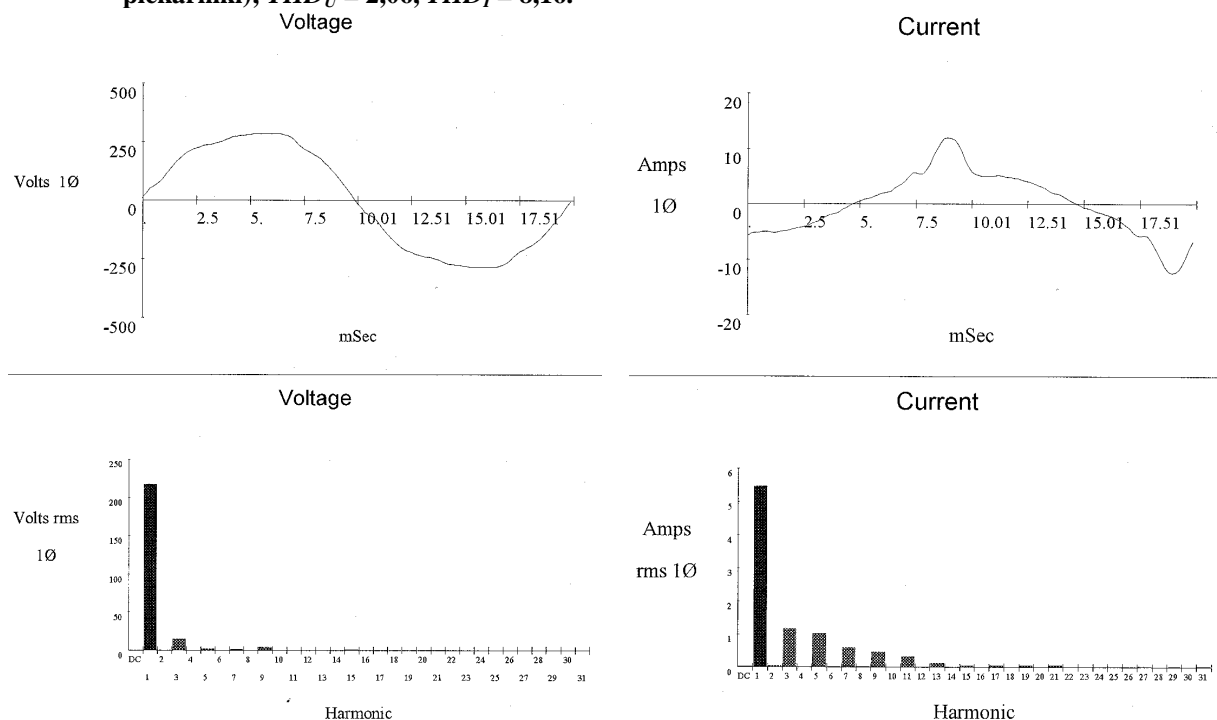
Odbiornikami szczególnie wrażliwymi na występowanie wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym są silniki oraz kondensatory. Moment elektromagnetyczny w maszynie asynchronicznej składa się z wielu momentów składowych wytwarzanych przez poszczególne przepływy harmoniczne stojana i wirnika. Momenty wytworzone przez wyższe harmoniczne, nazywane momentami pasożytniczymi, mogą utrudniać lub wręcz uniemożliwiać prawidłową pracę silników.

Rozróżnia się momenty pasożytnicze asynchroniczne i synchroniczne (rys. 13 i 14).

Momenty asynchroniczne powstają przy dowolnej prędkości silnika, z wyjątkiem prędkości synchronicznej, w wyniku wzajemnego oddziaływania przepływów odpowiadających sobie harmonicznych stojana i wirnika, pozostających nieruchomo względem siebie przy dowolnej prędkości kątowej wirnika. Wartości momentów pasożytniczych mogą być zgodne lub przeciwne do momentu podstawowego pierwszej harmonicznej (rys. 13).



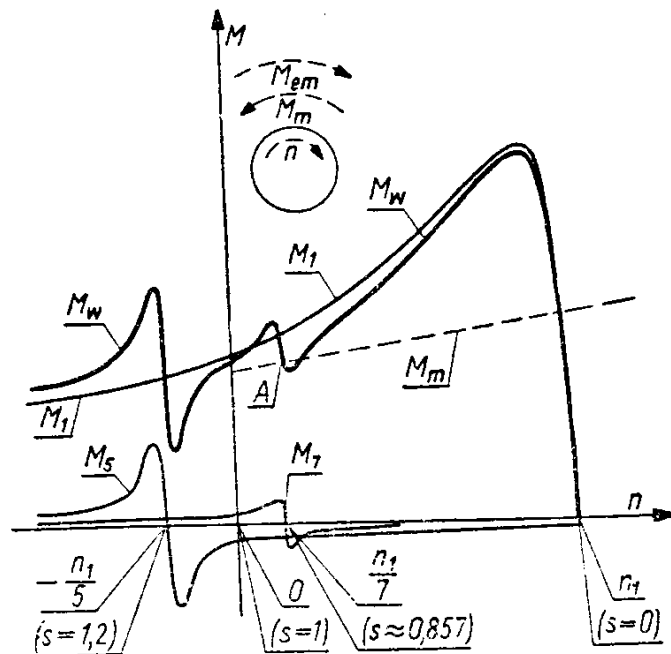
Rys. 11. Przykładowe przebiegi pojedynczej sinusoidy napięcia i prądu w przewodzie fazowym wewnętrznej linii zasilającej wielorodzinnego budynku mieszkalnego, w czasie gdy w obciążeniu dominowały odbiorniki gospodarstwa domowego o większych mocach znamionowych (pralki, piekarniki); $THD_U = 2,06$, $THD_I = 8,16$.



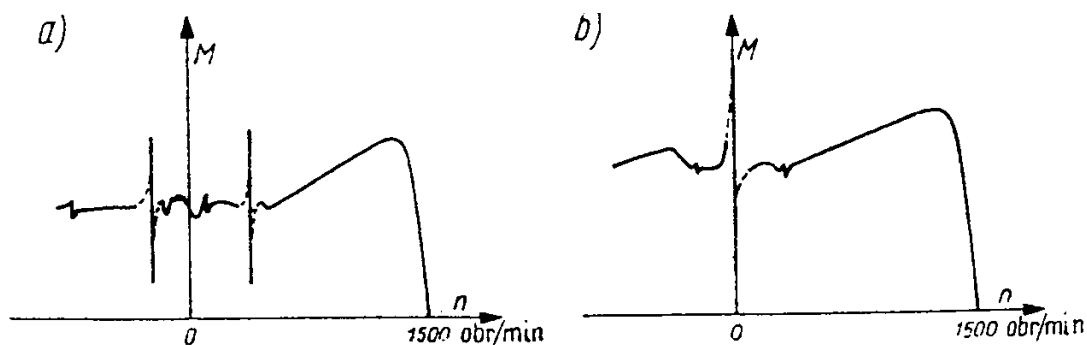
Rys. 12. Przykładowe przebiegi pojedynczej sinusoidy napięcia i prądu w przewodzie fazowym wewnętrznej linii zasilającej wielorodzinnego budynku mieszkalnego w czasie zwiększonej oglądalności programów telewizyjnych; $THD_U = 7,37$, $THD_I = 30,83$.

Charakterystyka momentu wypadkowego ma w pobliżu $s = 1$ (maszyna unieruchomiona) „siodła”, co może uniemożliwiać rozruch silnika, jeżeli moment obciążenia M_m będzie większy od momentu M_{em} występującego w siodle. W takim przypadku silnik osiągnie niewielką prędkość i przy tej niewielkiej prędkości pozostanie (rys. 13).

Moment synchroniczny występuje jedynie przy pewnej prędkości kątowej wirnika w wyniku wzajemnego oddziaływania na siebie przepływów stojana i wirnika pozostających przy pewnej prędkości kątowej nieruchomo względem siebie. Moment synchroniczny objawia się w postaci charakterystycznego ostrza na krzywej momentu wypadkowego (rys. 14).



Rys. 13. Wpływ momentów asynchronicznych wyższych harmonicznych na przebieg charakterystyki maszyny asynchronicznej; M_1 , M_5 , M_7 – momenty składowe 1, 5 i 7 harmonicznej; M_w – moment wypadkowy.



Rys. 14. Wpływ momentów synchronicznych wyższych harmonicznych na przebieg charakterystyki maszyny asynchronicznej.

Momenty pasożytnicze mogą powodować silne drgania i intensywny hałas, co utrudnia, a może nawet uniemożliwić pracę maszyny.

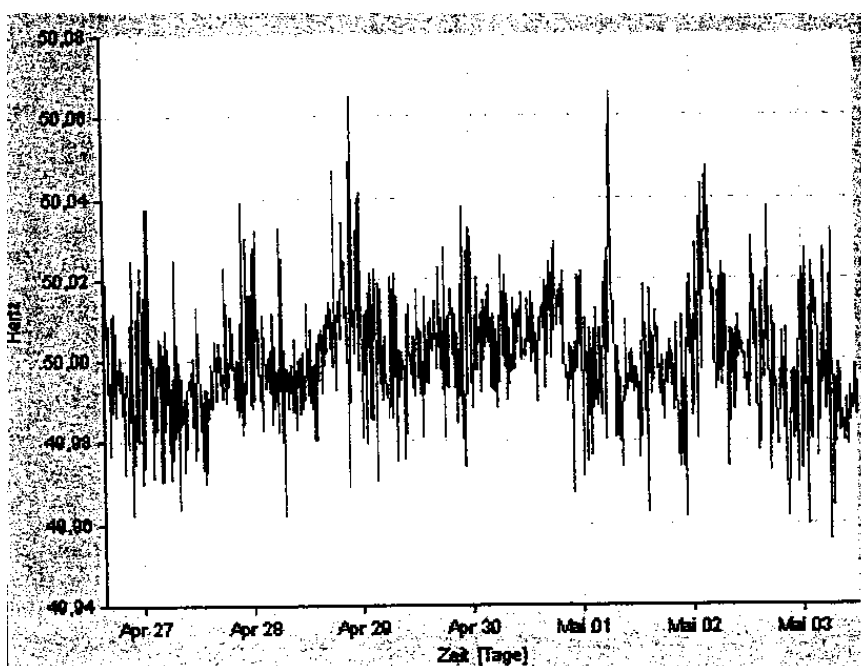
Impedancje kondensatorów dla h -tej harmonicznej prądu są h razy mniejsze niż dla częstotliwości podstawowej. Powoduje to, że udział prądu h -tej harmonicznej w prądzie wypadkowym jest h razy większy niż udział tej harmonicznej w napięciu zasilającym. Powoduje to z kolei intensywne nagrzewanie się kondensatorów, nawet jeżeli są one zasilane napięciem nie wyższym od znamionowego, lecz odkształconym nawet w umiarkowanym stopniu. Konsekwencją jest przyśpieszone zużywanie się izolacji prowadzące do uszkodzenia kondensatora.

Wyższe harmoniczne w napięciu zasilającym są niekorzystne również dla większości innych odbiorników, gdyż powodują dodatkowe straty mocy czynnej oraz straty dielektryczne, powodujące nadmierne nagrzanie się urządzeń, migotanie światła w lampach wyładowczych, nieselektywne działanie niektórych zabezpieczeń oraz różne inne negatywne skutki.

6. WPŁYW ZMIAN CZĘSTOTLIWOŚCI NA PRACĘ ODBIORNIKÓW ENERGII ELEKTRYCZNEJ

W sieciach energetyki zawodowej do zasilania odbiorników stosuje się prawie wyłącznie prąd przemienny o częstotliwości znamionowej 50 Hz. Nawet odbiorniki prądu stałego oraz przemiennego, o częstotliwości innej od sieciowej czy też o częstotliwości regulowanej, są zasilane poprzez odpowiednie urządzenia przetwarzające, z sieci prądu przemiennego 50 Hz [1, 3, 4].

Rzeczywista częstotliwość w sieci może nie być dokładnie równa częstotliwości znamionowej, zależy bowiem od bilansu mocy w systemie elektroenergetycznym. Zmiany częstotliwości są powodowane chwilowym niedoborem lub nadwyżką mocy zespołów wytwórczych w stosunku do obciążenia i jest jednakowa w całym połączonym systemie. Skutki wahań i odchyień częstotliwości od częstotliwości znamionowej dotyczą zatem wszystkich odbiorców. W warunkach praktycznych zmiany częstotliwości są bardzo niewielkie (rys. 15).



Rys. 15. Przykładowy przebieg zmian częstotliwości napięcia zarejestrowany w dużym zakładzie przemysłowym.

Zmiany częstotliwości nie mają wpływu na pracę odbiorników rezystancyjnych. Wpływają natomiast w sposób przeważnie umiarkowany, w zakresie niewielkich zmian częstotliwości, na pracę odbiorników reaktancyjnych zarówno indukcyjnych, jak i pojemnościowych.

Zmiany częstotliwości w zakresie $\pm 0,2$ Hz nie powodują zauważalnych negatywnych zmian w pracy większości odbiorników energii elektrycznej.

7. CZYNNIKI WARUNKUJĄCE JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ.

Wśród czynników warunkujących jakość energii elektrycznej należy wyróżnić trzy podstawowe grupy:

- czynniki zależne od dostawcy energii,
- czynniki zależne od samego odbiorcy czy też innych odbiorców zasilanych z tej samej sieci,
- parametry sieci zasilającej i instalacji odbiorczej.

Czynniki te wpływają równocześnie na wszystkie wspomniane już parametry energii. W niektórych przypadkach można jednak wskazać na dominujący wpływ niektórych z nich na określony parametr jakości. Zgodnie z zasadami określonymi w normie [6] parametry określające jakość energii powinny być mierzone w punkcie dostawy (w złączu), a wymagania te dotyczą normalnych warunków pracy sieci. Wymagania norm odnośnie jakości energii elektrycznej nie dotyczą więc takich sytuacji jak zwarcia czy inne stany awaryjne.

Głównym parametrem zależnym od dostawcy energii jest niezawodność zasilania η , określana zależnością:

$$\eta = \frac{t - t_p}{t}, \quad (8)$$

gdzie: t_p - czasu przerw w zasilaniu, t - rozpatrywany okres dostawy energii.

Nie jest to jednak czynnik zależny wyłącznie od dostawcy. W przypadku zwarć u odbiorcy, a w szczególności w przypadku nieselektywnie działających zabezpieczeń, przerwy w zasilaniu nie są zawinione przez dostawcę.

Innym czynnikiem w dużej mierze zależnym od dostawcy energii jest częstotliwość napięcia zasilającego. Zgodnie z przedstawionymi wcześniej informacjami zmiany częstotliwości, które w rzeczywistych układach mieszczą się w zakresie $\pm 0,2$ Hz, nie powodują negatywnych skutków w pracy większości odbiorników energii elektrycznej.

Zasadniczy wpływ na jakość energii elektrycznej mają jednak dwa pozostałe czynniki, czyli zainstalowane odbiorniki oraz parametry sieci zasilającej i instalacji odbiorczej. Ważną wielkością jest tu tzw. „współczynnik sztywności napięcia” układu zasilania κ . Jedną z miar tej wielkości jest stosunek mocy zainstalowanych odbiorników P_0 do mocy zwarciowej układu zasilającego S_K :

$$\kappa = \frac{P_0}{S_K''} \approx \frac{Z_Q}{Z_0}, \quad (9)$$

gdzie: Z_Q – zastępcza impedancja zwarciowa układu zasilania, Z_0 – impedancja odbiornika. Impedancję zwarciową układu zasilania określić można z zależności:

$$Z_Q = \frac{U_0 - U_I}{I}, \quad (10)$$

gdzie: U_0 – napięcie źródła (np. w złączu budynku) bez obciążenia (stan jałowy), U_I – napięcie źródła (np. w złączu budynku) przy obciążeniu prądem I .

Zależności te są zależnościami przybliżonymi, uwzględniającymi jedynie skuteczne wartości napięć i prądów oraz moduły impedancji, zamiast wielkości wektorowych. Mimo to pozwalają one na oszacowanie, z wystarczającą dla praktyki dokładnością, podstawowych parametrów sieci zasilającej, przy zastosowaniu stosunkowo prostej techniki pomiarowej. Spadek napięcia ΔU na elementach przesyłowych sieci w przypadku źródła idealnego, posiadające teoretycznie zerową impedancję, podczas obciążenia prądem roboczym I_B :

$$\Delta U_Q = I_B Z_Q, \quad (11)$$

byłyby zerowy. W rzeczywistych układach ten spadek napięcia decyduje o wartościach:

- odchyżeń i wahań napięcia spowodowanych zmianami obciążenia (szybkimi i powolnymi),
- odkształceń sinusoidy napięcia zasilającego, spowodowanych przepływem prądów wyższych harmonicznych.

Jeżeli prąd obciążenia sieci (instalacji) I_B zawiera prądy wyższych harmonicznych:

$$I_B = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}, \quad (12)$$

gdzie: $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ – prądy odpowiednio 1, 2, 3 oraz n-tej harmonicznej,

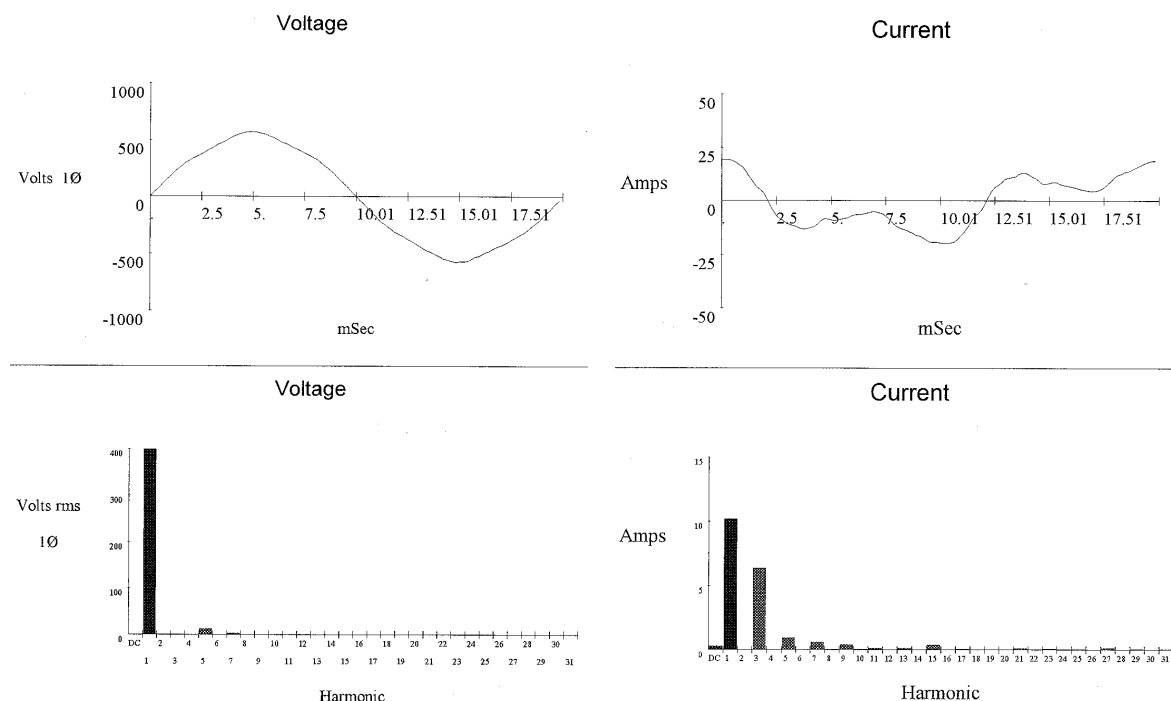
to wywołany jego przepływem spadek napięcia (wartość skuteczna) wyraża się zależnością:

$$\Delta U_Q = \sqrt{(I_1 Z_{Q1})^2 + (I_2 Z_{Q2})^2 + (I_3 Z_{Q3})^2 + \dots + (I_n Z_{Qn})^2}, \quad (13)$$

gdzie: $Z_{Qn} = R_Q + jn\omega L_Q$ – impedancja sieci zasilającej (źródła zasilania) dla n-tej harmonicznej,

ω - pulsacja podstawowej harmonicznej napięcia,

R_Q, L_Q – rezystancja i indukcyjność sieci zasilającej.



Rys. 16. Przykładowe przebiegi prądu i napięcia w przewodzie PEN wewnętrznej linii zasilającej wielorodzinnego budynku mieszkalnego; $THD_U = 3,29$, $THD_I = 53,69$.

Przedstawione zależności ilustrują wpływ parametrów sieci zasilającej na jakość napięcia zasilającego. Dotyczy to w szczególności wewnętrznych linii zasilających budynki wielorodzinne czy też linii magistralnych zakładów przemysłowych, gdzie to właśnie od parametrów tych linii, m.in. od przekrojów przewodów, zależy jakość napięcia zasilającego odbiorców, zgodnie z zależnością (13). Przekroje przewodów sieci i instalacji zasilającej, to - obok parametrów transformatorów w stacjach zasilających - ważny parametr warunkujący sztywność układu zasilania, czyli zminimalizowanie impedancji Z_Q .

Innym problemem związanym z obciążeniem odkształconymi przebiegami prądów jest spadek napięcia w przewodzie neutralnym N lub ochronno-neutralnym PEN. W instalacjach, w których dominują odbiory jednofazowe, np. instalacje w budynkach mieszkalnych, odkształcenie prądu w tym przewodzie jest bardzo duże (rys. 16). Spadki napięcia dla kolejnych harmonicznych (13), mimo malejących wartości skutecznych prądów tych

harmonicznych, są znaczne ze względu na zależność reaktancji linii od częstotliwości danej harmonicznej prądu. Stosowana w przeszłości praktyka projektowania przewodu PEN, w sieciach TN-C, o mniejszym przekroju niż przekrój przewodów fazowych, była całkowicie nieuzasadniona, chociażby ze względu na opisane tu zależności. Zbyt duże spadki napięcia występujące w przewodzie PEN są niekorzystne nie tylko ze względu na jakość energii elektrycznej, ale i ze względu na zapewnienie bezpieczeństwa przeciwporażeniowego.

8. PODSTAWOWE WYMAGANIA NORM ODNOŚNIE PARAMETRÓW ENERGII ELEKTRYCZNEJ.

Do ważniejszych dokumentów w zakresie jakości energii elektrycznej należą normy [6-9], które są tłumaczeniami norm europejskich EN oraz norma [5].

Normą, która w największym stopniu dotyczy dostawców energii, jest dokument [6] określający parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych niskiego i średniego napięcia. Pozostałe dokumenty [5, 7-9] to przede wszystkim wymagania dotyczące poziomów zakłóceń i prądów wyższych harmonicznych wnoszonych do sieci przez odbiorniki. W referacie, ze względu na ograniczony zakres prezentacji, nie omówiono szczegółowo wymagań cytowanych przepisów. Szerokie omówienie tych wymagań można znaleźć w literaturze, np. w pozycji [10].

Analiza ta pozwala stwierdzić, że jakość energii elektrycznej w głównej mierze zależy od rodzaju obciążenia sieci (odbiorniki nieliniowe, zmiany obciążenia) oraz od jej parametrów (sztywność napięciowa układów zasilających). Poprawa tych czynników pozwala na ograniczenie przyczyn pogarszania jakości energii elektrycznej. Do tych czynników należy zaliczyć zadania odpowiedniego projektowania układów zasilania (parametry linii zasilających, instalacji, transformatorów). Eliminacja odkształceń napięcia zasilającego przez wprowadzenie układów filtrujących jest już działaniem wtórnym, ograniczającym skutki wspomnianych wcześniej czynników. W podsumowaniu należy stwierdzić, że likwidacja przyczyn jest zawsze bardziej uzasadniona i racjonalna, niż działania wtórne, choć są one w wielu przypadkach niezastąpione.

Literatura

- [1] Kahl T. i in.: Sieci elektroenergetyczne w zakładach przemysłowych. WNT, Warszawa 1987.
- [2] Plamitzer A.: Maszyny elektryczne. WNT, Warszawa 1968.
- [3] Teresiak Z. (red.): Elektroenergetyka zakładów przemysłowych. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1981.
- [4] Barlik R., Nowak M.: Poradnik inżyniera energoelektronika, WNT, Warszawa, 1999.
- [5] EN V 61000-2-2. „Electromagnetic compability. Environment. Compability levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems” (IEC 1000-2-2:1990,modified), (VDE 0839), 1993.
- [6] PN EN 50160 „Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych”, PKN 1998.
- [7] PN EN 61000-3-2 „Kompatybilność elektromagnetyczna. Dopuszczalne poziomy. Dopuszczalne poziomy emisji harmonicznych prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika $\leq 16A$)”, PKN 1997.
- [8] PN EN 61000-3-3. „Kompatybilność elektromagnetyczna. Dopuszczalne poziomy. Ograniczenie wahań napięcia i migotania światła powodowanych przez odbiorniki o prądzie znamionowym $\leq 16A$ w sieciach zasilających niskiego napięcia”, PKN 1997.
- [9] PN EN 61000-2-4. „Kompatybilność elektromagnetyczna. Środowisko. Poziomy kompatybilności dotyczące zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości w sieciach zakładów przemysłowych”, PKN 1997.
- [10] Szprengiel Z. „Jakość energii elektrycznej w świetle norm i przepisów prawnych”, Wiadomości Elektrotechniczne, rok LXVII, 1999, nr 1, str. 3-8.