

Krzysztof Marszałkiewicz

Politechnika Poznańska

Instytut Elektroenergetyki

60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3A

krzysztof.marszalkiewicz@put.poznan.pl

JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ W SIECIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

1. Wprowadzenie

Różnorodność typów urządzeń i odbiorników w sektorach wytwarzania, przesyłu i dystrybucji, z powodu zastosowania nowoczesnej elektroniki i modernizacji stanowisk technologicznych może wpływać negatywnie na jakość energii elektrycznej. Może to być powodem poważnych trudności związanych z działaniem nowoczesnych systemów kontroli i sterowania procesami technologicznymi.

Najbardziej zagrożone złą jakością energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych są powszechnie używane urządzenia kontrolno-pomiarowo-sterujące oraz baterie kondensatorów i transformatory energetyczne zasilające odbiorców zakłócających. Występują problemy z kompensacją mocy biernej, wymiarowaniem kabli, transformatorów, zbędnym działaniem zabezpieczeń przy prądach poniżej nastawionych wartości rozruchu, mają miejsce wyłączenia wyłączników zasilających instalacje sprzęzarek, trudności z rozruchami silników, zatrzymywania taśm produkcyjnych, odpadanie styczników, gaśnięcie palników w ciągach walcowniczych przy występowaniu odkształceń napięć i prądów [3-11]. Zakłócenia mogą pochodzić z sieci zewnętrznej jak i wewnętrznej. Często trudno jest ustalić przyczynę uszkodzeń bądź błędnego działania sprzętu, zwłaszcza przy zmianach konfiguracji sieci.

W interesie wszystkich stron biorących udział w wytwarzaniu, przesyłu, dystrybucji i użytkowaniu energii elektrycznej jest świadome ograniczanie wprowadzanych zakłóceń do sieci. Spółki dystrybucyjne zobowiązane do zapewnienia dobrej jakości dostarczanej energii

elektrycznej [1, 2], powinny znać możliwości przepustowe sieci, zagrożenia jakości energii elektrycznej, możliwe zjawiska rezonansowe, konieczne inwestycje związane z poprawą funkcjonowania sieci itp. Powinien istnieć ich bezpośredni nadzór nad intensywnością nasycania sieci odbiorami zakłócającym, np. w trakcie wydawania warunków przyłączeniowych. Do tego dochodzą błędy w projektowaniu, wykonawstwie układów sieciowych i instalacyjnych obiektów komercyjnych (banki, biurowce, terminale) i przemysłowych. Z doświadczenia wynika, że dostawcy sprzętów i urządzeń unikają podawania ich poziomów emisyjności i odporności na zakłócenia. Jest to przyczyną wielu dalszych kłopotów z właściwą realizacją procesów technologicznych, z częstymi przestojami działów zarządzania, produkcji i administracji, niemożliwością spełnienia wymagań jakościowych prowadzonej produkcji.

Bardzo często inwestor nieświadomie, razem z projektantami, wykonawcami oraz dostawcami urządzeń realizuje błędne koncepcje taniego inwestycyjnie, autonomicznie funkcjonującego, wydzielonego „piekielka zakłóceniewego” (środowiska niekompatybilnego) uniemożliwiającego normalne funkcjonowanie przede wszystkim technologii informatycznych.

W [12] podano, że koszty wykonania dobrej instalacji, odpornej na zakłócenia, z wydzielonymi dedykowanymi obwodami mogą dochodzić do 1% wartości budynków.

2. Zakłócenia sieciowe - parametry jakości energii elektrycznej

Obecnie istotnymi zakłóceniami sieciowymi są:

- odkształcenia napięcia ($THD_{dop} < 8\%$),
- wahania napięcia ($P_{LT\ dop} < 1,0$),
- uskoki (zapady) napięcia ($1\% < U < 90\% U_n$, $t_{trwania} \sim 10 \div 600\ ms \div 3s \div 1min$),
- krótkotrwałe wzrosty napięcia ($U > 110\% U_n$, $t_{trwania} \sim 600\ ms \div 3s \div 1min$),
- długotrwałe obniżenia i wzrosty napięcia ($t_{trwania} > 1\ min$; typowe wartości:
 $U_{min} = 0,8 \div 0,9\ jw.$, $U_{max} = 1,1 \div 1,2\ jw.$)
- krótkie i długie przerwy w zasilaniu ($U < 1\ \% U_n$, $T_{kr} < 3\ min$, $T_{dl} > 3\ min$),

- przepięcia impulsowe (zbocza $t_{\text{narastania}} \sim 5\text{ns} \div 0,1\text{ms}$; $t_{\text{trwania}} \sim 50\text{ns} \div 1\text{ms}$),
- przepięcia oscylacyjne ($f_{\text{osc}} \sim 5\text{kHz} \div 5\text{MHz}$, $t_{\text{trwania}} \sim 5\mu\text{s} \div 50\text{ms}$,
amplitudy $0 \div 4 \div 8\text{ jw.}$)
- asymetria napięć ($U_{2\% \text{ dop}} = (U_2/U_1) \cdot 100\% < 2\%$),
- załamania napięcia (szer. [°el.], głębokość [% U_{max}], typ. $5 \div 15^{\circ}\text{el} * 70\%$).

Do tego dochodzą zakłócenia wysokoczęstotliwościowe.

Istnieje cały katalog norm [przykładowe poz.13-28], ciągle aktualizowanych i uzupełnianych, ukierunkowanych na:

- systemy i układy zasilające,
- urządzenia, w tym na:
 - poziomy emisji zakłóceń,
 - odporność na zakłócenia.

Przy rozwiązywaniu problemów związanych ze złym funkcjonowaniem np. urządzeń należy pamiętać o kilku pojęciach, a mianowicie:

kompatybilność elektromagnetyczna, czyli zdolność urządzeń lub systemów do zadowalającego działania w określonym środowisku elektromagnetycznym, równocześnie bez wprowadzania do tego środowiska niedopuszczalnych zaburzeń,

poziom odporności elektromagnetycznej - maksymalny poziom określonego zaburzenia elektromagnetycznego, oddziałującego na urządzenie, zestaw urządzeń lub system, przy którym jest ono jeszcze zdolne do pracy z wymaganą jakością.

wadliwe działanie - utrata zdolności sprzętu do spełnienia zamierzonych funkcji lub wykonywanie niezamierzonych funkcji przez ten sprzęt.

Ważny ze względów eksploatacyjnych jest:

współczynnik oddziaływania na transformator zasilający K będący miarą dodatkowych strat mocy pochodzących od wyższych harmonicznyc, zdefiniowany jako suma kwadratów względnych prądów harmonicznyc pomnożonych przez kwadraty rzędów harmonicznyc odniesionych do sumy kwadratów względnych prądów harmonicznyc

$$K = \frac{\sum_k [k^2 \cdot I(\%)^2]}{\sum_k I(\%)^2}$$

gdzie: k - rząd harmonicznyc,

$I(\%)$ - udziały procentowe harmonicznyc prądu (I_k/I_1).

Budowane są transformatory przystosowane do obciążeń nieliniowych o wartościach $K = 4, 9, 13, 20, 30, 40, 50$ z:

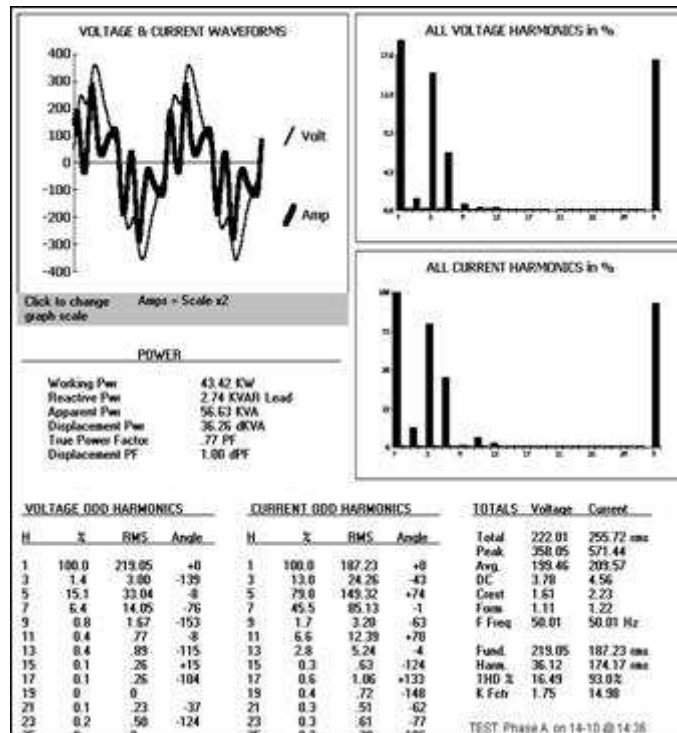
- podwojoną obciążalnością przewodów neutralnych w stosunku do prądów fazowych,
- wzmocnionymi uzwojeniami pierwotnymi połączonymi w trójkąt,
- przeplecionymi przewodami równoległymi w obwodach wtórnych,

i dobierane są do określonego rodzaju obciążenia, np.:

- K_{13} Sprzęt telekomunikacyjny, obwody w szkołach, itp.,
- K_{20} Sieci komputerowe, napędy z regulacją obrotów, obwody zasilające urządzenia do transmisji danych, komputery.

3. Przykłady zarejestrowanych parametrów jakości energii elektrycznej

O możliwościach funkcjonowania urządzeń w rzeczywistych sieciach i instalacjach często decydują lokalne zjawiska np. rezonansowe. Skala i natężenie ich występowania zależy zarówno od urządzeń odbiorców jak i konfiguracji sieci. Odkształcone sygnały prądów i napięć są doprowadzane do wejść regulatorów mocy, zabezpieczeń transformatorów i BKR - na tej podstawie podejmowane są decyzje np. o załączaniu bądź wyłączaniu stopni baterii itp.



Rys.3.1. Analiza widmowa napięci i prądu fazy L1 transformatora (Sn=250 kVA- strona 0,4 kV)

Powstaje pytanie, czy odfiltrowywanie harmoniczných podstawowych prądu i napięcia w każdym przypadku jest właściwe i wystarczające, jak daleko ingerować w algorytmy działania urządzeń? Okazuje się, że bezkrytyczne podejście do tego tematu może narazić użytkowników na niepotrzebne koszty.

Największym zagrożeniem dla transformatorów są urządzenia pobierające prądy impulsowo z dużymi udziałami harmoniczných rzędu $k = 3n$ sumującymi się w przewodzie neutralnym. Prąd ten może przekraczać wartości prądów fazowych. Udziały harmoniczných nieparzystych, w tym o krotnościach 3 mogą osiągać wartości: $I_3\% = 220\%$, $I_9\% = 40\%$, a współczynnik odkształcenia prądu $THDi = 110 \div 420\%$. Duże zgrupowania takich urządzeń mogą przeciążyć, w wyniku zwiększonych strat cieplnych, transformatory zasilające ($K \approx 21,5$).

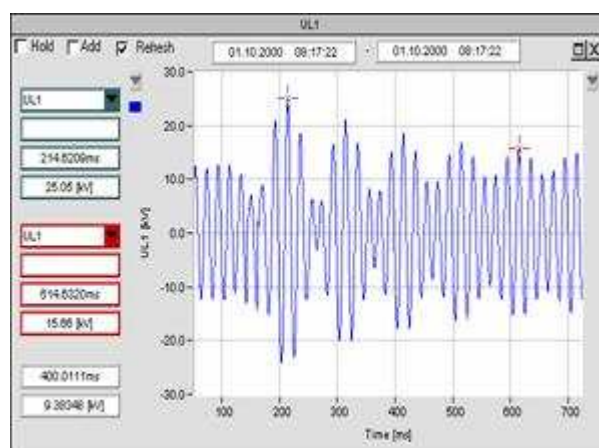
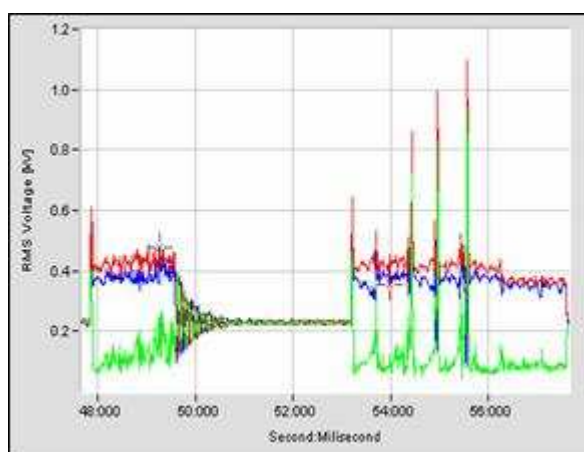
Podczas badań obciążenia transformatora (rys.3.1) zasilającego terminal magazynowy, moc bierna harmoniczných podstawowej miała charakter pojemnościowy, natomiast moc odkształcenia stanowiła 64% mocy pozornej. Pomimo, że współczynnik mocy dla harmoniczných podstawowej wynosił 1.00, to jednak rozbieżność z wartością współczynnika mocy $PF = 0.77$ świadczy o zjawiskach zachodzących w miejscu pomiarów. Silny rezonans spowodował trwałe odkształcenie napięcia $THDu = 16.49\%$ (wartość większa od podanej w

normie PN-EN 50160). W prądzie fazowym transformatora po stronie 0,4 kV dominowały 5 (79%) i 7 (45%) harmoniczne.

Na rys. 3.2a. pokazano zarejestrowane interharmoniczne w napięciu fazowym 6 kV/ $\sqrt{3}$, które wystąpiły dla częstotliwości 191,59 Hz, przekraczając wartość $1kV_{RMS}$, a narys.3.2b przebiegi oscylacyjne napięcia fazowego rzędu 12 kV_{max} w sieci 15kV.

a)

b)



Rys.3.2. a) Interharmoniczne o częstotliwości 191,59 Hz w napięciu fazowym sieci 6 kV, b) przebiegi oscylacyjne napięcia fazowego 15kV/ $\sqrt{3}$

W tabelicy 3.1 przedstawiono wartości współczynników odkształcenia napięcia spotykane w Polsce, a w tabl.3.2 wartości zarejestrowanych zdarzeń w stacji 110/15 kV [8,10].

Tablica 3.1.

Zarejestrowane w czasie badań wartości THDu%

Poziom napięcia	Współczynnik odkształcenia napięcia THDu [%]			
	Obiekty komercyjne	Budownictwo komunalne	Stacje MST	Oświetlenie ulic
0,4 kV	1,4 - 3,1 10,3 - 21,7	1,5 - 3,5%	1,3 - 3,9% 4,1 - 10,5%	2,8 - 3,3%; 14,2 - 17,0%
6, 15, 20 kV	1,2 - 3,6%, 5,3 - 7,5%	Wartości zależą od konfiguracji i nasycenia sieci odbiornikami nieliniowymi		
110 kV	0,5 - 1,7 (2,6)%			

Tablica 3.2.

Zestawienie zarejestrowanych zdarzeń w czasie pomiarów w stacji 110/15 kV

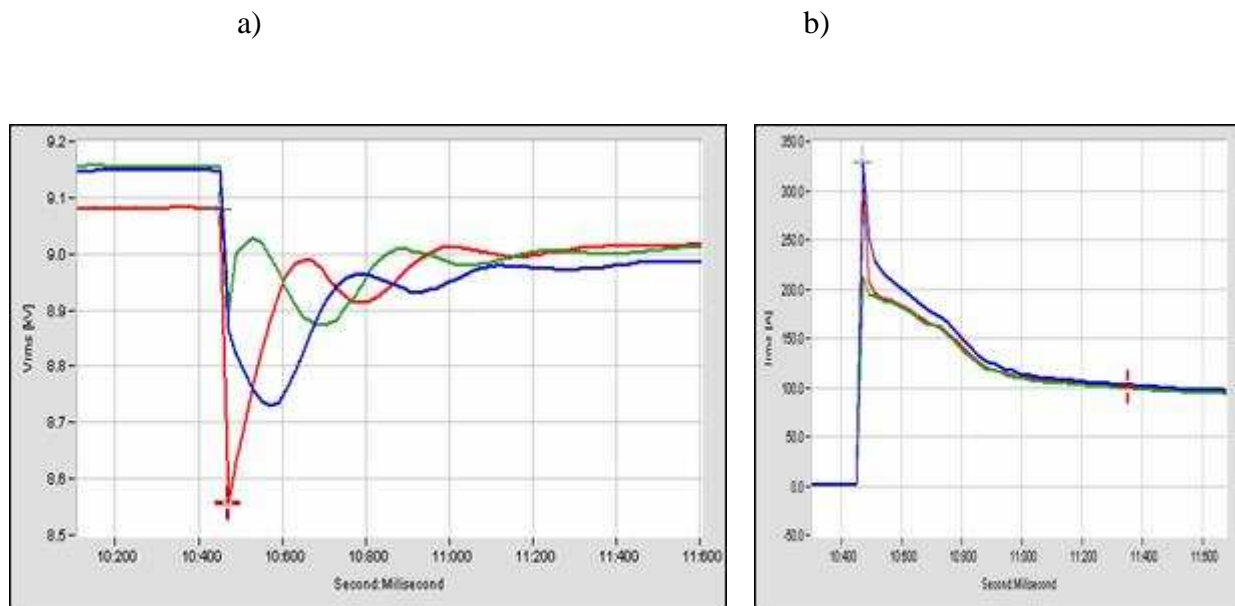
Wielkość	Odchylenia napięcia [V]			Wzrosty napięcia $U > 1,25 U_C$	Zapady napięcia $U < 0,9 U_C$	Przerwy $U < 1\% U_C$	
	Min	95 %	Max	[V] _{sk,max} / ilość/czas _{max}	[V] _{sk,min} / ilość/czas _{max}	Ilość/ czas	
TR1 15 kV $U_{fc} = 9\ 100\ V$							
UL1	8 902	9 199	9 380	21 586		889	
				106	5,0 s	158	2,0 s
UL2	8 812	9 200	9 375	20 145		435	
				93	5,0 s	112	3,1 s
UL3	8 799	9 198	9 325	19 618		907	
				102	1,9 s	125	5,0 s
				95	1,2s	89	1,0 s

W tablicy 3.2 zarejestrowane wartości dotyczą:

- § odchylen napięcia minimalne, 95% i maksymalne,
- § maksymalnych wzrostów napięcia $U > 1,25 U_C$ oraz ilość i maksymalny czas trwania,
- § minimalne uskoków (zapadów) napięcia $U < 0,9 U_C$ oraz ilość i maksymalny czas trwania.

O ile odchylenia napięcia nie budzą zastrzeżeń, to zarejestrowane wzrosty napięcia, są dość znaczne (tablica 3.2). Na szynach sekcji 1 i 2 R15 kV wielokrotnie wystąpiły wzrosty napięć o krotności dochodzącej do $K_{umax}=2,3 U_C$. Maksymalna krotność napięcia w sieci 110 kV osiągnęła wartość $K_{umax}=1,35$ (co odpowiada napięciu przewodowemu $U=155\ kV > U_{dop}=145\ kV$). Zarejestrowano również w omawianej stacji bardzo liczne zapady i wzrosty napięcia o czasach wynoszących $T_Z= 1\div 5$ sekund . Nie zarejestrowano nieplanowych krótkich i długich przerw w zasilaniu.

Na rys.3.3 pokazano oscylacyjną odpowiedź sieci na załączenie linii 15 kV z BKR.



Rys. 3.3. Przebiegi: a) prądu linii 15 kV po załączeniu linii z baterią kondensatorów o mocy 150 kvar, b) przebiegi przejściowe w napięciach zasilających

Odpowiedzią układu zasilającego na udar prądowy w chwili załączenia linii z baterią kondensatorów jest przebieg przejściowy w napięciach zasilających (czas trwania ok.400 ms), co pokazano na rys. 3.3. Głębokość zmiany napięcia była rzędu 520 V.

4. Wnioski

- a) Rejestrowane liczne awarie bądź błędne działania urządzeń bardzo często wskazują na przyczyny tkwiące w odkształceniach napięcia i prądu, uskokach (zapadach) napięcia oraz przepięciach.
- b) Najbardziej zagrożone złą jakością energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych są powszechnie używane urządzenia kontrolno-pomiarowo-sterujące oraz baterie kondensatorów i transformatory energetyczne zasilające odbiorców zakłócających.
- c) Bardzo często inwestorzy nieświadomie, razem z projektantami, wykonawcami oraz dostawcami urządzeń realizują błędne koncepcje taniego inwestycyjnie, autonomicznie funkcjonującego, wydzielonego „piekielka zakłóceniewego” (środowiska niekompatybilnego) uniemożliwiającego normalne funkcjonowanie przede wszystkim technologii informatycznych.

- d) Zakłócenia w napięciu zasilającym trwające kilka milisekund często decydują o funkcjonowaniu obwodów regulacji i sterowania energoelektronicznych układów napędowych oraz powszechnie wykorzystywanych układów mikroprocesorowych.
- e) Przy utrzymywaniu się dynamiki wdrażania nowoczesnych technologii energooszczędnych, przy dużym ich nasyceniu, nieuchronnie nadchodzi czas na oczyszczenie sieci z zakłóceń i poniesienie kosztów związanych z ich usunięciem, które szacuje się na poziomie od 70÷300 (550) EUR/kVA_{zakłóceniuowy}.

Literatura

- [1] Prawo Energetyczne, ustawa z 10.04.1997 r., Dz.U. Nr 54 (Dz. U. Nr 54, Nr 158; z 1998 r. Nr 94, Nr 106 i Nr 162; z 1999 r. Nr 88, Nr 91 i Nr 110 oraz z 2000 r. Nr 43 i Nr 48)
- [2] 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 85 poz.957 z dnia 13 października 2000 r.)
- [3] Andruszkiewicz J., Lorenc J., Marszałkiewicz K., Nowe spojrzenie na zagadnienie zabezpieczenia baterii kondensatorów, Automatyka Elektroenergetyczna, nr 3, 1995, ss.17-19.
- [4] Andruszkiewicz J., Kordus A., Lorenc J., Marszałkiewicz K.: Sposób sterowania załączaniem członów baterii kondensatorów dla zmniejszenia strat mocy czynnej w obwodzie zasilającym odbiorniki - patent udzielony 6.08.1997 r. przez Urząd Patentowy RP z mocą od 18.04.1994 r., nr P.303 061.
- [5] Januszewski S., Serafin S., Harmoniczne, interharmoniczne i subharmoniczne w układach energoelektronicznych, WE, 2000 nr 7, ss.360-363.
- [6] Marszałkiewicz K., Trzeciak A., IV Ogólnopolski Kurs Techniczno-Szkoleniowy, EKO-TECH S.C., zagadnienia pomiarowe przy wydawaniu warunków przyłączenia odbiorców do sieci z uwzględnieniem odbiorników zakłóceniuowych, Poznań-Kiekrz, 1-2.06.2000 r.
- [7] Marszałkiewicz K., Możliwości dostarczania energii elektrycznej przez spółki dystrybucyjne przy wymaganym współczynniku odkształcenia napięcia, Wiadomości Elektrotechniczne, nr 8, 1999, ss.394-398.
- [8] Marszałkiewicz K., Jakość napięcia w sieciach elektroenergetycznych zasilających odbiorniki zakłócające, Elektro.info, nr 7, 2003, ss.48-54.
- [9] Marszałkiewicz K., Trzeciak A., Andruszkiewicz J., Grzybulski A., Wykorzystanie baterii kondensatorów do kompensacji mocy biernej na obszarze osiedli mieszkaniowych, II Konferencja Naukowo-techniczna „Straty energii w Spółkach Dystrybucyjnych”, PTPiREE, Poznań, 24-25 czerwca 2002 r., ss.129-137.
- [10] Marszałkiewicz K., Trzeciak A., Andruszkiewicz J., Groński M., Poziomy parametrów jakości napięcia zasilającego w sieci spółki dystrybucyjnej, II Konferencja „Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce. Zmiana napięcia w sieciach nN”, PTPiREE, Jelenia Góra, 8-9 maja 2003 r., ss.141-149.
- [11] Marszałkiewicz K., Urządzenia elektryczne potrzeb własnych jako źródła zakłóceń harmonicznych, II Ogólnopolska Konferencja 2000 "Potrzeby Własne w Elektroenergetyce", Politechnika Warszawska, Ośrodek Promocji Badań Energoelektroniki, Szklarska Poręba, 21-23 listopada 2000 r., ss.9-17.

- [12] Targosz R., Procesy sterowania, komunikacji, zarządzania bazami danych, operacji finansowych, Konferencja „Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce, PTPiREE , Poznań , 9-10.11.2000 r., ss.109-112.
- [13] PN-T-01030 (1996, zm.1999). Kompatybilność elektromagnetyczna. Terminologia.
- [14] PN-EN 50160 (1998). Kompatybilność elektromagnetyczna. Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.
- [15] PN-EN 50081 (XII 1996). Kompatybilność elektromagnetyczna. Wymagania ogólne dotyczące emisyjności . 50081-1: Środowisko mieszkalne, handlowe i lekko uprzemysłowione. 50081-2: Środowisko przemysłowe.(Zakłócenia w zakresie częstotliwości: 0 Hz do 400 GHz).
- [16] PN-EN 50082-1 (1996). Kompatybilność elektromagnetyczna. 50082-1: Wymagania ogólne dotyczące odporności na zakłócenia - Środowisko mieszkalne, handlowe i lekko uprzemysłowione. 50082-2: (1997) Wymagania ogólne dotyczące odporności na zaburzenia - Środowisko przemysłowe.
- [17] PN-EN 55014-2 (1999, zm. A1, A2/2000). Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Wymagania dotyczące przyrządów powszechnego użytku, narzędzi elektrycznych i podobnych urządzeń - Odporność na zaburzenia elektromagnetyczne - Norma grupy wyrobów.
- [18] PN-EN 55024 (2000). Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Urządzenia informatyczne - Charakterystyki odporności - Poziomy dopuszczalne i metody pomiaru.
- [19] PN-EN 55020 (1996). Kompatybilność elektromagnetyczna - Odporność elektromagnetyczna odbiorników i urządzeń dodatkowych (obowiązkowa).
- [20] IEC 61000-2-2 (05-1990). Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems Załącznik krajowy NB w PrPN-EN 61000-3-2. Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Poziomy kompatybilności harmonicznych w sieciach niskiego napięcia.
- [21] PN-EN 61000-2-4 (1997, zm.A1, A2, A12 /99). Kompatybilność elektromagnetyczna. Środowisko. Poziomy kompatybilności dotyczące zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości w sieciach zakładów przemysłowych.
- [22] PN-EN 61000-3-2. Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Dopuszczalne poziomy (część 3). Dopuszczalne poziomy emisji harmonicznych prądu - arkusz 2 (fazowy prąd zasilający odbiornika ≤ 16 A).
- [23] PN-EN 61000-3-3 (1997) Kompatybilność elektromagnetyczna - Dopuszczalne poziomy - Ograniczanie wahań napięcia i migotania światła powodowanych przez odbiorniki o prądzie znamionowym ≤ 16 A w sieciach zasilających niskiego napięcia.
- [24] IEC 61000-3-8 (09-1997). Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 8: Signaling on low-voltage electrical installations - Emission levels, frequency bands and electromagnetic disturbance levels
- [25] IEC 61000-3-9. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-9: Limits for interharmonic current emissions (equipment with input power ≤ 16 A per phase and prone to produce interharmonics by desing).
- [26] IEC 61000-3-11 (08-2000). Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-11: Limits - Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems - Equipment with rated current ≤ 75 A and subject to conditional connection
- [27] PN-EN 61000-4-2 (1999). Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Metody badań i pomiarów - Badanie odporności na wyładowania elektrostatyczne Podstawowa publikacja EMC.
- [28] PN-IEC 1000-4-3 (1996). Kompatybilność elektromagnetyczna - Metody badań i pomiarów Badanie odporności na pole elektromagnetyczne o częstotliwości radiowej .