

Adam Siwik¹

PRZYSPIESZONA DEGRADACJA WYBRANYCH URZĄDZEŃ ELEKTRYCZNYCH I UKŁADÓW IZOLACYJNYCH A NIEKTÓRE WSKAŹNIKI JAKOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Streszczenie: W artykule omówiono zagrożenia w pracy wybranych urządzeń elektroenergetycznych w sieciach publicznych, przemysłowych i komunalnych w świetle narażeń niesinusoidalnymi napięciami lub zjawiskami rezonansowymi. Skala wymienionych tu narażeń urządzeń elektrycznych może mieć znaczenie ekonomiczno-techniczne i prawne wobec porządkowania standardów jakościowych obsługi odbiorców w Polsce. Potwierdzają to obserwacje i badania wzrostu awaryjności niektórych urządzeń np. takich jak metalizowane kondensatory, kable i transformatory. W artykule ograniczono się do analizy wybranych cech jakości energii elektrycznej, takich jak: harmoniczne – do 1000 Hz, amplituda, stromość oraz wartość skuteczna napięcia. Przedstawiono rezultaty oryginalnych materiałowych badań wykonanych w Bolonii. Wskazują one, że amplituda napięcia jest najistotniejszym parametrem przyspieszonej degradacji izolacji w warunkach odkształconych napięć. Zamieszczono także przykładowe rejestracje niektórych narażeń.

Słowa kluczowe: degradacja urządzeń elektrycznych, układ izolacyjny, jakość energii elektrycznej

1. Wstęp

Od 1.01.1996 roku, na terenie krajów Unii Europejskiej, obowiązuje tzw. Dyrektywa EMC 89/336/EWG z dnia 23.V.1989, która obliguje państwa członkowskie do konsekwentnych działań w celu ograniczenia zaburzeń i zakłóceń elektromagnetycznych – opisując te działania najbardziej ogólnie. Polska podjęła powyższe cele i prowadzi stosowne prace w programie: tzw. „kompatybilności elektromagnetycznej” obejmującym kodyfikację pojęć, standaryzację i wydawanie zarządzeń eksploatacyjnych w elektroenergetyce (a także w metrologii, automatyce, telekomunikacji itp.) [1-9]. Przyjmuje się, że: kompatybilność (zgodliwość) elektromagnetyczna EMC to zdolność urządzenia lub systemu do zadowalającego działania w określonym środowisku elektromagnetycznym równocześnie bez wprowadzania do tego środowiska niedopuszczalnych zaburzeń elektromagnetycznych [1].

Można przyjąć, że aktualnie ponad 50% użytkowanej energii elektrycznej uzyskuje się w wyniku przemian jej parametrów – także z niepożądanymi, negatywnymi konsekwencjami

¹ Zakład Elektroenergetyki AGH, 30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30

– w energoelektronicznych układach przekształtnikowych. Urządzeniach, które w równym stopniu odpowiadają za „produkcję” rozmaitych zaburzeń elektromagnetycznych, jak i potencjalnie stanowią najdoskonalszy środek dla ich likwidacji. Niezmiernie dynamiczny wzrost liczby i mocy przekształtników, nieliniowych odbiorników energii zasilanych napięciami wysokimi, średnimi i niskimi może być powodem wielorakich zagrożeń dla tych urządzeń, jak i dla sieci elektrycznych – tam, gdzie nie stosuje się urządzeń do poprawy jakości parametrów energii elektrycznej. Im wyższe napięcia sieci, tym mniejsze i krócej trwające zaburzenia jakości energii elektrycznej. Wyraźny wzrost nieintencjonalnych zakłóceń lokalizuje się w sieciach niskich i także średnich napięć. Najczęstszym symptomem pogorszenia jakości energii jest pojawienie się znacznej liczby wyższych harmonicznych. Wzrasta przy tym prawdopodobieństwo chwilowych i długotrwałych przeciążeń cieplnych oraz przepięć. Czas ich trwania, poziom odkształceń nie zawsze możliwy jest do przewidzenia. Zaburzenia są tym większe im większy jest pobór energii. Bez ograniczenia lub eliminacji niektórych zaburzeń elektromagnetycznych mogą pojawić się w sieci zagrożenia zarówno natury techniczno-eksploatacyjnej, jak i nieprawidłowości metrologiczno-prawne [10-15].

Aktualnie, w Polsce [3] obowiązują poniższe, wybrane wskaźniki jakości energii elektrycznej (n – rząd harmonicznej, U_1 – składowa podstawowa, 50 Hz):

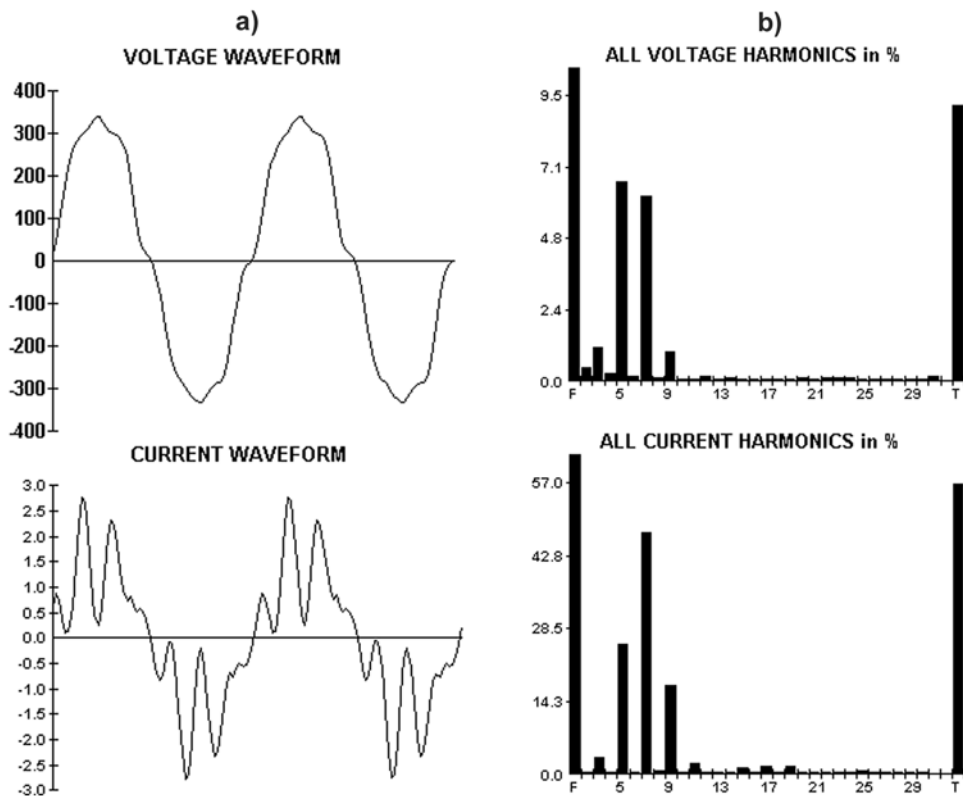
Odchylenie częstotliwości Δf		-0,5 Hz	+0,2 Hz
Odchylenia napięcia ΔU_{15min}	$U_N < 110$ kV	-10%	+10%
	110 kV $< U_N < 220$ kV	-10%	+10%
	$U_N = 400$ kV	-10%	+5%
Odkształcenie napięcia od sinusoidy nie powinno przekraczać nw. parametrów:			
		THD [%]	U_n/U_1 [%]
	$U_N > 110$ kV	1,5	1
	30 kV $< U_N < 110$ kV	2,5	1,5
	1 kV $< U_N < 30$ kV	5	3
	$U_N < 1$ kV	8	5
Moc i współczynnik mocy	$P_{\text{odbioru}} < P_{\text{umownej}}$ przy $\text{tg}\varphi < 0,4$ ($\cos\varphi < 0,93$)		

gdzie: THD – współczynnik zawartości harmonicznych lub współczynnik odkształcenia harmonicznego, lub współczynnik harmonicznych (w PN-IEC/61000-3-2 wg załącznika krajowego NB także całkowity współczynnik odkształcenia „THD – total harmonic distortion”); dla napięcia (Rys. 1):

$$THD_U [\%] = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{41} U_n^2}}{U_1} \quad (1)$$

Zarówno w Polsce, jak w świecie sygnalizuje się od kilku lat narastającą ilość zakłóceń elektromagnetycznych i sporadycznych awarii różnych urządzeń elektrycznych. W sieciach komunalnych i niektórych przemysłowych poziom harmonicznych w napięciu sięga nawet do 20%. Można stwierdzić, że wiele nowoczesnych zakładów przemysłowych budowanych w ostatnich latach w Polsce nie było właściwie przygotowanych (zaprojektowanych) na ist-

niejące warunki jakości zasilania, a także nie przewidziano skutków zakłóceń pochodzących od własnych niespokojnych i nieliniowych odbiorów na jakość energii elektrycznej w najbliższym otoczeniu.



Rys. 1. a) Kształty napięcia w sieci i b) prądu kondensatora ($16\mu F$) oraz ich spektrum dla $THD_U = 9,2\%$; gdzie $I_{C_{rms}} = 1,31 A$, $i_{C_{max}} = 2,77 A$; przy czym $F(n = 1) = 50 Hz$, $T = THD\%$

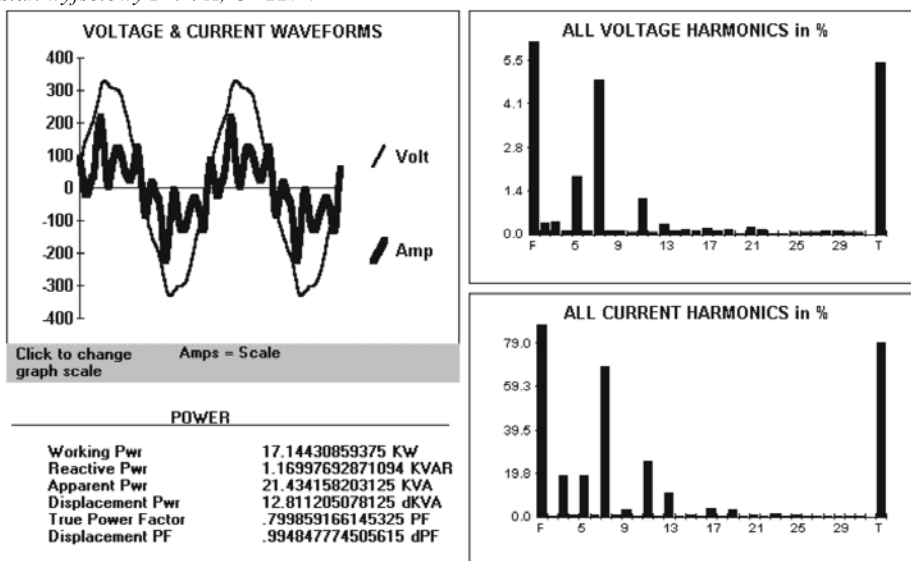
2. Wybrane obserwacje

Na rysunku 2 przedstawiono negatywne efekty „współdziałania” kilku źródeł wyższych harmonicznych w sieci nowoczesnego zakładu produkcyjnego, z wydzielonymi – zasilanymi z suchych transformatorów – obwodami oświetleniowymi (lampy metalohalogenkowe z indywidualną kompensacją) oraz z technologicznymi urządzeniami przekształtnikowymi. Pomiar wykonano na szynach transformatora instalacji oświetleniowej.

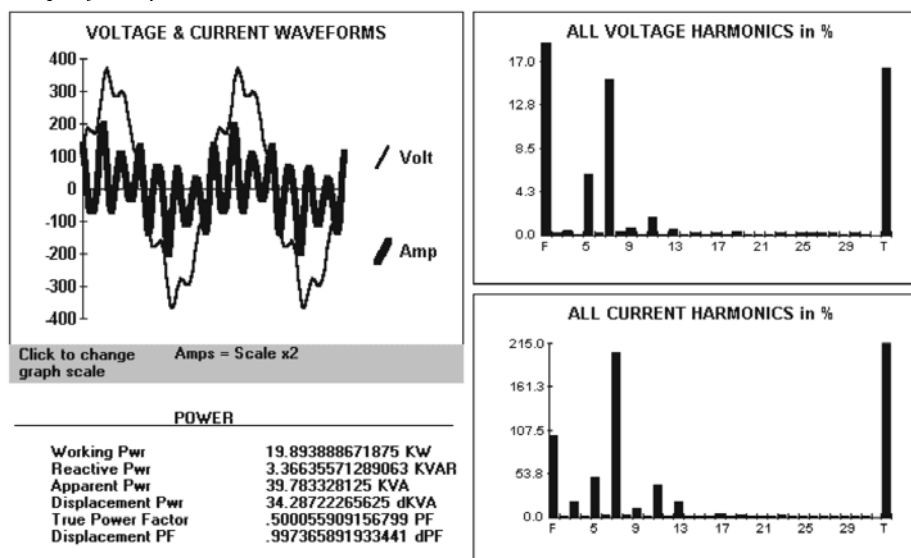
Do chwili, gdy nie pracują maszyny technologiczne, w obwodach oświetleniowych istnieją stabilne warunki elektryczne – rys.2a. Zniekształcenie prądu jest znaczne, $THD_I = 80\%$ z dominacją siódmej harmonicznej, co powoduje dostrzegalne, lecz jeszcze nie krytyczne odkształcenie napięcia do $THD_U = 5\%$. Obciążenie postrzegane jest jako pojemnościowe (tu: nieprawidłowo opracowane oprawy!) o rzeczywistym współczynniku mocy $TPF = 0,8$, przy czym współczynnik mocy dla podstawowej harmonicznej bliski jest jedności.

W określonych porach dnia, uruchomienie pewnych faz produkcji powoduje, że w obwodach siłowych powstają nowe źródła harmonicznych, a „pojemnościowy“ obwód oświetleniowy staje się „niskoomową studnią“ dla wszystkich harmonicznych generowanych w sieci, co przedstawiono na rysunku 2b. W tej nowej sytuacji, która zresztą nie jest stabilna,

a) stan wyjściowy $I=94\text{ A}$, $U=227\text{ V}$



b) stan przejściowy $I=175\text{ A}$, $U=230\text{ V}$



Rys.2. Niestabilne, rezonansowe obciążenie instalacji oświetleniowej, wspomagane stanem pracy urządzeń technologicznych, w zakładzie przemysłowym z dużą mocą źródeł światła (lampy metalohalogenkowe z indywidualną kompensacją)

znieszczenie prądu jest już katastrofalne, przy $\text{THD}_I = 200\%$ oraz znaczące dla napięcia, gdyż $\text{THD}_U = 15\%$. Zmienia się wartość rzeczywistego współczynnika mocy na $\text{TPF} = 0,5$, przy czym współczynnik mocy dla podstawowej harmonicznej w dalszym ciągu bliski jest jedności. Najistotniejsze zagrożenie urządzeń wynika tu z możliwości cieplnego przeciążenia instalacji, wartość skuteczna prądu wzrasta bowiem z 94 A (wartość bliska obciążalności długotrwałej przewodów) do 175 A. W ciągu doby często wymieniano bezpieczniki, chłodzono ciągi kabli wentylatorami!

Doraźną likwidację powyższego zagrożenia – zmniejszenie wartości natężeń prądu – uzyskano poprzez zmniejszenie pojemności kompensacyjnych w oprawach.

Ostatnie lata przyniosły też zmiany (zalecenia CIGRE - ELEKTRA 174/97-[10,11]) w sposobie kalkulacji strat mocy w transformatorach mocy, także suchych. Jak wykazują wieloletnie doświadczenia, opisywane w prasie anglojęzycznej, dla oceny stopnia przeciążenia transformatora od wyższych harmonicznych przydatny jest poniższy wskaźnik:

$$K = \frac{\sum_{n=1}^{31} \left(n \frac{I_n}{I_1} \right)^2}{\sum_{n=1}^{31} \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2} \quad (2)$$

Opcję pomiaru tego wskaźnika posiada wiele przyrządów kontrolno-pomiarowych. Przykładowo, przy $K = 5$, występują straty dodatkowe w transformatorze, o ok. 20%.

3. Rezultaty badań laboratoryjnych

Mechanizmy degradacji układów izolacyjnych w obecności wielu typów narażeń są od dziesiątków lat znane i wykorzystywane także w praktyce. Dla większości sytuacji i materiałów wykorzystuje się modele życia z mechanizmami jonizacyjnymi, cieplnym i elektrochemicznym, czasem także z uwzględnieniem niedocenianych synergii narażeń [16,17]. Opisane niżej badania miały raczej cel użytkowy, niż naukowy.

Autorzy prac [18-21] uznali, że do rozpoznania niekorzystnego wpływu jakości energii elektrycznej na wybrane materiały: folię PP i XLPE, oraz na kondensatory metalizowane użyją trzech – względnych – wskaźników, opisujących niesinusoidalność napięć, a to; – maksymalnego natężenia pola elektrycznego, jako:

$$K_p = \frac{E_p}{E_{1pN}} \quad (3)$$

gdzie: E_p – zadawana amplituda pola, E_{1pN} – wartość znamionowa pola 50 Hz, stromości napięcia (którą można odnieść do wartości prądów szczytowych) jako:

$$K_s = \sqrt{\sum_{n=1}^{22} n^2 \left(\frac{U_n}{U_1} \right)^2} \quad (4)$$

– skutecznej wartości napięcia (lub pola elektrycznego) odkształconego, jako:

$$K_{rms} = \frac{E_{rms}}{E_{1Nrms}} \quad (5)$$

gdzie: E_{rms} – odpowiednie wartości skuteczne narażenia polowego (lub napięciowego) odniesione do wartości znamionowej 50 Hz. Z oczywistym względów, wartość współczynnika za wartości harmonicznych THD nie może być właściwą miarą spodziewanych zjawisk.

Badania przeprowadzono z użyciem regulowanych (napięcie, częstotliwość, faza) generatorów umożliwiających powstanie pola złożonego z co najwyżej 4 harmonicznych. Realizowano niezbędne pomiary, monitorowano czas do uszkodzenia, kontrolowano obecność wyładowań niezupełnych.

A) Badania folii

Wartość odniesienia amplitudy pola elektrycznego ustalono, dla folii za $20\sqrt{2}$ kV/mm, przy czym PP narażano do wartości względnej $K_p = 5,7$ podczas gdy dla XLPE stosowano wyraźnie niższe wartości np. do $K_p = 4$. Skala pozostałych wskaźników narażeń folii to: K_s (1,3,5÷16) oraz K_{rms} (1,5,2,4÷5,6). Pomiary kontynuowano do uszkodzenia próbki – a więc do przebicia folii. Ilość badanych próbek folii – od kilku do kilkunastu sztuk w pojedynczym eksperymencie.

Czas trwania pojedynczych prób przeciętnie do 100 godzin.

B) Badania kondensatorów

Podobnym narażeniom poddano metalizowane kondensatory o napięciu znamionowym 250 V, w temperaturze otoczenia – po 5 sztuk w teście, przy czym próby kontynuowano do uszkodzenia kondensatora tj. do 10% zmniejszenia się wyjściowej pojemności. Przeciętne wartości zastosowanych narażeń opisują wybrane wskaźniki; K_p (2,3,4), K_s (1,3,5÷26), K_{rms} (1,8÷3). Czas trwania prób do 100 godz.

Wyniki pomiarów opracowano statystycznie – na odpowiednim poziomie istotności, starając się wydzielić udziały wielopostaciowego oddziaływania mechanizmu cieplnego.

W każdym powyższym typie badań potwierdzono dominujący charakter uszkodzenia jonizacyjnego (K_p) z ważącym, choć – jak przyznają Autorzy nie dość jednoznacznie wycenionym udziałem oddziaływań cieplnych wyższych harmonicznych prądu, szczególnie, wobec ograniczenia zakresu pomiarów temperaturowych w wykonanych badaniach.

Intensywność przyspieszonej degradacji badanych obiektów w świetle powyższych badań zależy kolejno od amplitudy, wartości skutecznej i od stromości napięcia. Najwygodniej przedstawić powyższe wnioski Autorów poprzez wyznaczone zależności:

I tak, dla metalizowanych kondensatorów

$$L/L_N = K_p^{-6,1} K_{rms}^{-2,6} K_s^{-0,5} \quad (6)$$

– dla folii PP

$$L/L_N = K_p^{-5,3} K_{rms}^{-2,0} K_s^{-0,8} \quad (7)$$

– dla folii XLPE

$$L/L_N = K_p^{-14,3} K_{rms}^{-4,7} K_s^{-1,3} \quad (8)$$

gdzie L, L_N – czasy pracy w warunkach niepożądanych i sinusoidalnych narażeń.

Wyniki ww. badań należy traktować jako ważne dla praktyki, cenne w dyskusji nad zagrożeniami urządzeń wobec obniżonych parametrów energii elektrycznej. Interesujące jest

m.in., to, że nawet przy tak ograniczonym polu badań, narażeniowo i ilościowo, potwierdzono znane relacje starzeniowe. Może zbyt skromnie skomentowano powody degradacji metalizowanych struktur, także w strefie połączeń czołowych, dużymi prądami szczytowymi.

4. Podsumowanie

Niekorzystne parametry napięć zasilających, obniżone wskutek niedotrzymania odpowiednich standardów jakości energii na różnych poziomach napięć sieci mogą powodować wzrost awaryjności wybranych obiektów elektroenergetycznych, transformatorów, kabli, kondensatorów, szczególnie tam, gdzie przewiduje się urządzeń do poprawy parametrów napięcia.

Intensywność degradacji izolacji oraz podzespołów (np. zwijek metalizowanych kondensatorów) zależy kolejno od amplitudy, wartości skutecznej i stromości napięcia i jest odpowiednia także do wartości skutecznej harmonicznych prądu i ich skutku cieplnego. Skala deformacji napięcia w węzłach sieci jest tym większa im większy jest pobór energii. Ostateczny czas życia obiektu zależy od czasu ekspozycji na narażenie, a ten jest zwykle trudny do oszacowania, stąd charakter obserwowanych dotąd przemysłowych i sieciowych awarii jest raczej przypadkowy, co z kolei może powodować bagatelizowanie powyższych uwarunkowań.

Okresowy monitoring parametrów jakości energii w odpowiednich wybranych fragmentach sieci powinien być obligatoryjny.

Wskazana byłaby kontynuacja badań odporności wybranych urządzeń elektrycznych na przejściowo zmienne, pogorszone jakościowo warunki zasilania, w szerszym, niż opisanym zakresie narażeń.

Literatura

- [1] PN-T-01030/1996 – *Kompatybilność elektromagnetyczna. Terminologia*
- [2] **Hanzelka Z., Kowalski Z.:** *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) i jakość energii elektrycznej w dokumentach normalizacyjnych*, JiUEE, t.5, z.1, 1999
- [3] Dziennik Ustaw nr 85 poz.957/2000: Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 25 września 2000 roku 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
- [4] PN-EN-50081-2/1996; *Kompatybilność elektromagnetyczna. Wymagania ogólne dotyczące emisyjności. Środowisko przemysłowe*
- [5] PN-EN –50082-2/1997: *Kompatybilność elektromagnetyczna EMC. Wymagania ogólne dotyczące odporności na zaburzenia. Środowisko przemysłowe*
- [6] PN-EN-50082-1/1996: *Kompatybilność elektromagnetyczna. Wymagania ogólne dotyczące odporności na zakłócenia. Środowisko mieszkalne, handlowe i lekko uprzemysłowione*
- [7] PN-EN-50160/1998 : *Charakterystyki napięcia w publicznych sieciach rozdzielczych*
- [8] PN-EN-61000-3-2: *Kompatybilność elektromagnetyczna. Dopuszczalne poziomy. Dopuszczalne poziomy emisji harmonicznych prądu (fazowy prąd zasilania odbiornika $\leq 16A$), 1997. +A1+A2/2000*
- [9] PN-EN-61000-4-11/1997: *Kompatybilność elektromagnetyczna EMC. Metody badań i pomiarów. Badania odporności na zapady napięcia, krótkie przerwy i zmiany napięcia*

- [10] **Siwik A., Pietrucha R.:** *Ocena obciążeniowych strat mocy czynnej w transformatorach w obecności wyższych harmonicznycch*, Mat IV Symp. Metody Mat. W Elektroenergetyce, AGH, 1998
- [11] **Pierce L.:** *Transformer design and application considerations for nonsinusoidal load current*, IEEE Trans. on Industry Application, vol.32, no.3, 1996
- [12] **Siwik A., Gula A., Z. Hanzelka, Jaglarz A.:** *Wyższe harmoniczne w miejskich sieciach oświetleniowych*, Mat. Kof. SEP "Energoozczędne oświetlenie w miastach", Kraków, 1997
- [13] **Pietrucha R., Siwik A.:** *Errors of electric energy measurement with three-phase meters in the presence of current higher harmonics*, Mat. 4 Międzynarodowej Konf. Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej, JUEE'97, str.277-284, Kraków, AGH, 23-25.09, 1997
- [14] **Florkowski M.:** *Odkształcenia harmoniczne wysokiego napięcia a obrazy wylądowań niezupełnych*. Mat.Konf.-VI Symp. Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia, EUI'97, Zakopane, str.95-101, 1997
- [15] **Key T., Jih-Sheng L.:** *Costs and benefits of harmonic current reduction for switch-mode power supplies in a commercial office buildings*, Mat. IEEE IAS Conf., Orlando, October, 1995
- [16] **Siwik A.:** *Wielokryterialne metodyki wyznaczania wielonarażenowch modeli życia układów izolacyjnych*, Monografie AGH nr 59, Kraków 1997
- [17] **Nishimatsu M., Siwik A.:** *Some problems of estimation of synergism effect in multistress life models of insulation systems*, Journal of the Society of Electrical Materials Engineering, vol.9,no.3, Japan 2000
- [18] **Montanari G., Fabiani D.:** *Searchching for the factors which affect self-healing capacitor degradation under non-sinusoidal voltage*, IEEE Trans. on DEI, vol.6, no3., June 1999
- [19] **Montanari G., Fabiani D.:** *The effect of non-sinusoidal voltage on intrinsic aging cable and capacitor insulating materials*, IEEE Trans. on DEI, vol.6, no 6., June 1999
- [20] **Cavallini A., Fabiani D., Mazzanti G., Montanarii G.:** *Models for degradation of self-healing capacitors operation under voltage distortion and temperature*, Proc. of Int Conf. On Properties and Application of Dielectric Materials, Xi'an University, Xi'an, China, June 21-26, 2000
- [21] **Xin D, Lin F., Zonggan Y., Jin L.:** *A new method for research of electrode-end contact degradation of metallized polypropylene pulse capacitors*, Proc. of Int Conf. on Properties and Application of Dielectric Materials, Xi'an University, Xi'an, China, June 21-26, 2000

ACCELERATED DEGRADATION OF THE SELECTED ELECTRICAL DEVICES AND INSULATION SYSTEMS CAUSED BY VARIOUS FACTORS OF POWER ENERGY QUALITY

Nowadays, in some of electrical networks, the increase of polluting loads affects supply nonsinusoidal wave of voltages and currents, more significantly than in the past. Most stressing features of power energy; as peak, rms of voltage, slope voltage or rms of current harmonics caused life reduction of electrical appliances, as metallized capacitors, cables, transformers. The results of italians investigations – up spectra 1000 Hz, for capacitors and PP and XLPE foils – were reported, for which some life models are proposed. Some practical observation were shown, too.