

WPLYW SPRZĘTU KOMPUTEROWEGO W STANIE OBCIĄŻENIA NA GENEROWANIE WYŻSZYCH HARMONICZNYCH PRĄDU I MOCY BIERNEJ POJEMNOŚCIOWEJ

Krzysztof LUDWINEK

Politechnika Świętokrzyska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
tel.: 41 342-46-82 e-mail: k.ludwinek@tu.kielce.pl

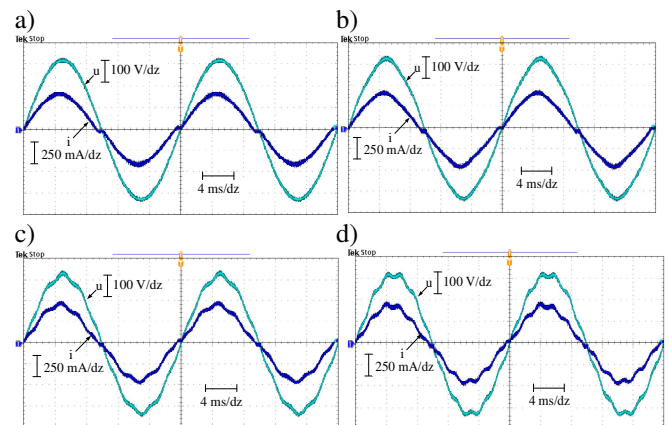
Streszczenie: W artykule przedstawiono badania eksperymentalne wpływu zestawu komputerowego oraz UPS-a, pracujących w stanie ustalonym obciążenia, na generowanie wyższych harmoniczných prądu oraz poboru mocy biernej indukcyjnej lub pojemnościowej. Obliczenia mocy czynnej i biernej (wynikającej z przesunięcia fazowego napięcia i prądu) oraz zawartości wyższych harmoniczných w prądach pobieranych z sieci zasilania dokonano na podstawie zarejestrowanych przebiegów napięć i prądów jednostki stacjonarnej PC, monitora i drukarki laserowej oraz UPS-a, pracujących bez układu korekcji współczynnika mocy.

Słowa kluczowe: wyższe harmoniczne, moc czynna i bierna, sprzęt komputerowy, UPS.

1. WPROWADZENIE

Najczęstszą przyczyną powstawania wyższych harmoniczných w prądach jest odkształcone napięcie zasilania [1-3]. Z badań eksperymentalnych wynika, że najmniejsza zawartość wyższych harmoniczných występuje w prądach, w których najmniejszy jest udział wyższych harmoniczných w odniesieniu do składowej podstawowej napięciach zasilania [2]. Najczęściej, największe wartości posiadają wyższe harmoniczne 3. i 5. rzędu [2, 4-6]. W przypadku maszyn elektrycznych harmoniczne te powstają na skutek niesymetrii i nieliniowości obwodu magnetycznego [2]. Harmoniczne 3. i 5. rzędu są również wytwarzane przy sinusoidalnym zasilaniu odbiorników liniowych, np. poprzez układy prostownikowe, które w obwodzie elektrycznym wprowadzają nieliniowość ze względu na tryb pracy [7, 8]. Największą liczbę takich odbiorników stanowią zestawy komputerowe współpracujące z UPS-ami i drukarkami, źródła światła zasilone poprzez regulatory elektroniczne HF, sprzęt AV oraz rzadziej inny sprzęt, np. sprzęt monitorujący życie pacjenta w szpitalach. Największe skupisko odbiorników z elektronicznymi układami prostowniczymi występuje w budynkach użyteczności publicznej takich jak: urzędy, uczelnie, szkoły, szpitale, banki, itp. Są to najczęściej odbiorniki kilkuletnie, tj. niewyposażone w układy korekcji współczynnika mocy (Power Factor Correction - PFC) [7, 8]. Zastosowanie układu PFC pozwala korygować przesunięcie fazowe wartości chwilowej prądu względem wartości chwilowej napięcia zasilania [7, 8]. Zasilacz wyposażony w układ PFC powoduje, że w przypadku kiedy napięcie zasilania nie jest odkształcone, to prąd pobierany z sieci jest

prawie (praktycznie) sinusoidalny z niewielką zawartością składowej harmoniczných będącą przyczyną poboru kilkuprocentowej mocy biernej indukcyjnej (w odniesieniu do wartości mocy czynnej). W przypadku odkształconego napięcia zasilania, układy PFC pozwalają wprowadzić korygować przesunięcie fazowe prądu, ale powodują również odkształcenie prądu proporcjonalne do odkształcenia napięcia zasilania. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe zarejestrowane przebiegi napięcia zasilania i prądu pobieranego przez regulator elektroniczny HF (z układem PFC), zasilający świetlówkę przy napięciu zasilania prawie (praktycznie) sinusoidalnym oraz z udziałem wyższych harmoniczných.



Rys. 1. Zarejestrowane przebiegi napięcia zasilania i prądu pobieranego przez regulator elektroniczny HF (z układem PFC) świetlówki przy napięciu zasilania: a) sinusoidalnym, b) z 4,5% udziałem 5 harmoniczných, c) z 5% udziałem 7 harmoniczných, d) z 6,6% udziałem 11 harmoniczných

Z analizy przedstawionych przebiegów (rys. 1) wynika, że prąd przyjmuje kształt napięcia zasilania. Aby utrzymać kształt prądu zbliżony do sinusoidalnego należy jeszcze bardziej rozbudować układ zasilania, tj. zastąpić układ PFC układem o sinusoidalnym poborze prądu.

Wg normy [9], przyłączenie do sieci zasilania odbiorników o prądach znamionowych do 16 A, wymaga określenia dopuszczalnej zawartości wyższych harmoniczných prądu. Jednostka stacjonarna PC, monitor i drukarka (do 600 W) wg normy [9], ze względu na specyficzny kształt prądu, zaliczone są do odbiorników klasy

D. Wg normy [9], klasę A stanowią, m. in., odbiorniki inne niż wymienione w pozostałych klasach (B, C i D), i dlatego pośrednio do klasy A zaliczone są UPS-y. W przypadku odbiorników klasy A i D dopuszczalna zawartość w prądach nieparzystych wyższych harmonicznych do 39 rzędu jest podana w tabeli 1 [9]. Dla odbiorników klasy A wg [9] (np. UPS-y) dopuszczalna zawartość w prądach parzystego rzędu wyższych harmonicznych wynosi: $I_2 = 1,08$ A, $I_4 = 0,43$ A, $I_6 = 0,3$ A. Dla rzędu $8 \leq n \leq 40$ wartość $I_n = 0,23 \cdot 8/n$ [A].

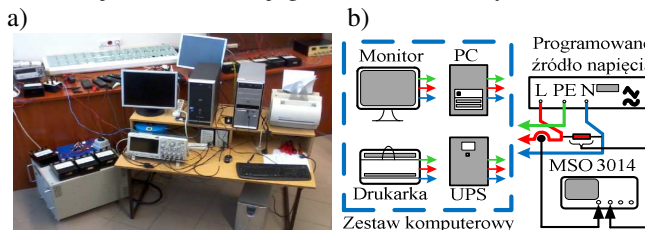
Tabela 1. Zestawienie dopuszczalnej zawartości wyższych harmonicznych w prądach nie parzystego rzędu dla odbiorników klasy A i D wg normy [9]

Rząd harmonicznej	Maksymalny dopuszczalny prąd odbiornika	
	Klasa A i D	Klasa D
n	[A]	na jednostkę mocy [mA/W]
3	2,30	3,4
5	1,14	1,9
7	0,77	1,0
9	0,40	0,5
11	0,33	0,35
13	0,21	3,85/13
13 < n < 39	0,15 * 0,15/n	3,85/n

W pracy [10] przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych jednostki centralnej PC i monitora w stanie standbay jako przyczynę generowania wyższych harmonicznych prądu oraz generacji mocy biernej pojemnościowej. Niniejsza praca stanowi kontynuację badań nad wpływem sprzętu komputerowego, tym razem pracującego w stanie ustalonym obciążenia na generowanie wyższych harmonicznych prądu oraz na pobór mocy biernej indukcyjnej i generowanie mocy biernej pojemnościowej, w zależności od włączonych odbiorników (jednostki stacjonarnej PC, monitora i drukarki laserowej oraz UPS-a) pracujących bez układu korekcji współczynnika mocy.

2. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Na rysunku 2 przedstawiono widok stanowiska (do badania jednostki stacjonarnej PC, monitora, drukarki laserowej i UPS-a) oraz jego schemat blokowy.



Rys. 2. Stanowisko badawcze: a) widok, b) schemat blokowy

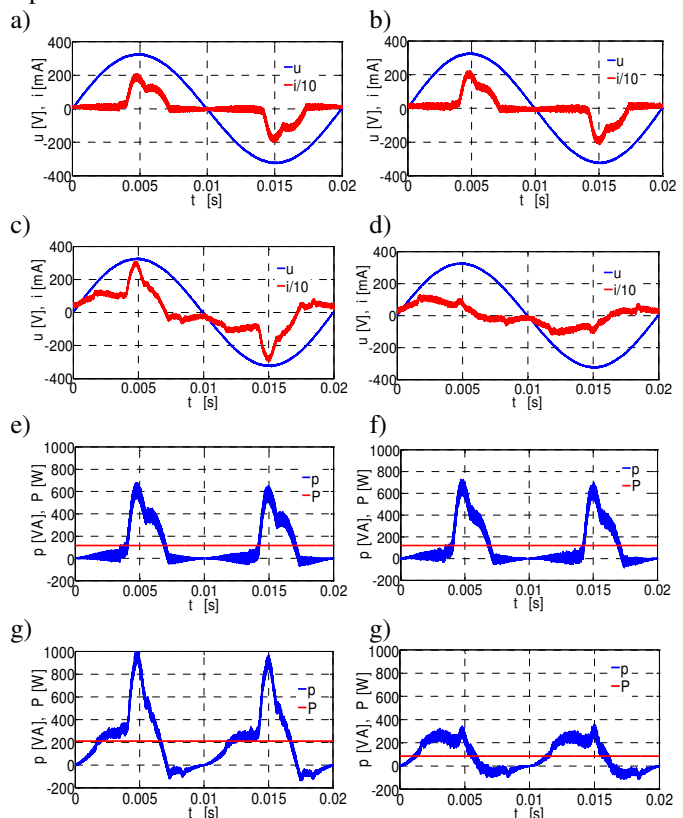
W skład stanowiska badawczego wchodzi następujące urządzenia:

- komputer PC (Core 2 Quad Q6600 2.4 GHz z wbudowaną na płycie głównej kartą graficzną),
- monitor LG19535,
- drukarka HP1100,
- UPS 2000 VA,
- Chroma 61704 - źródło o programowalnym kształcie napięcia zasilania o danych $S_N = 5,5$ kVA, $U_N = 230$ V, $I_N = 8$ A, zakres częstotliwościowy: DC, 12 - 1200 Hz, dokładność 0,1%,

- czterokanałowy oscyloskop cyfrowy MSO3014 firmy Tektronix (podczas badań częstotliwość próbkowania ustawiono na 1 MHz/kanał),
- zestaw: sonda prądowa TCP303 - zakres: DC - 15 MHz (-3 dB), wzmacniacz TCPA300 (Tektronix) - zakres: DC - 50 MHz, czas narastania sygnału dla zestawu ≤ 23 ns,
- sonda napięciowa P5200 (Tektronix) - zakres: DC - 25 MHz (-3dB), czas narastania sygnału ≤ 14 ns,
- czterokanałowy oscyloskop cyfrowy MSO3014 firmy Tektronix (podczas badań częstotliwość próbkowania ustawiono na 2,5 MS/s na każdy kanał).

2.1. Badania przy zasilaniu ze źródła o napięciu prawie/praktycznie sinusoidalnym

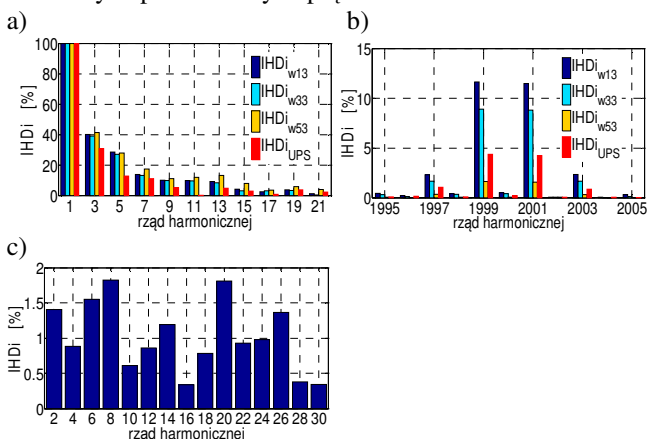
Na rysunku 3 przedstawiono zarejestrowane przebiegi napięcia i prądu oraz mocy chwilowej w stanie ustalonym obciążenia jednostki stacjonarnej PC i monitora (wariant w11), a następnie w11 z dołączoną drukarką laserową – (wariant w12) oraz z równolegle włączonym nieobciążonym UPS-em (wariant w13). Badany zestaw komputerowy i UPS zasilono z programowalnego źródła o napięciu prawie sinusoidalnym (wartość obliczona $THDu = 0,12\%$): $U_N = 230$ V, $f = 50$ Hz. Na rysunkach 3c i 3d linią ciągłą zaznaczono poziom mocy czynnej (jako średnią wartość z mocy chwilowej za okres). Aby z rysunku 3 odczytać wartość rzeczywistą prądu, należy pomnożyć jej wartość przez 10.



Rys. 3. Zarejestrowane przebiegi w stanie ustalonym obciążenia: a), b), c), d) napięcia i prądy odpowiednio dla wariantów w11, w12, w13 i UPS-a, e), f), g) moc chwilowa i mocy czynna odpowiednio dla wariantów w11, w12, w13 i UPS-a

Wartość skuteczna składowej podstawowej prądów (rys. 3) wynosi odpowiednio 0,71 A (w11), 0,72 A (w12), 1,42 A (w13), 0,56 A (UPS-a). Na rysunku 4 przedstawiono procentowy udział wyższych harmonicznych w prądach (rys. 3) odpowiednio: nieparzystych do 21. rzędu, parzystych do 30. rzędu oraz wyższych harmonicznych od

1995. do 2005. rządu (pochodzących od pracujących przetwornic napięć), liczonych odpowiednio względem składowych podstawowych prądu.



Rys. 4. Procentowy udział wyższych harmonicznych: a) od 3. do 21. rzędu odpowiednio dla w11, w12, w13 i UPS-a; b) od 1995. do 2005. rządu odpowiednio dla w11, w12 i w13 i UPS-a; c) od 2. do 30. rzędu dla UPS-a

Z analizy przedstawionych wyników badań eksperymentalnych (rys. 3 i 4) wynika, że dla rozważanych wariantów obciążenia (w11, w12, w13 oraz UPS):

- pobierana moc czynna wynosi $P_{w11} = 114,81$ W, $P_{w12} = 118,96$ W oraz $P_{w13} = 210,42$ W oraz $P_{UPS} = 85,74$ W;
- pobierana moc wynosi: bierna indukcyjna $Q_{w11} = 4,58$ VAR i $Q_{w12} = 1,59$ VAR; bierna pojemnościowa $Q_{w13} = 95,05$ VAR (UPS włączony), $Q_{UPS} = 96,80$ var (tylko UPS włączony do sieci);
- w pobieranym prądzie generowane są wyższe harmoniczne nieparzyste niskiego rzędu: 3. rzędu o udziale 76,7% (w11), 78% (w12), 40,2% (w13) i 31,1% (UPS); 5. rzędu o udziale 41% (w11), 43,7% (w12), 28,7% (w12) i 12,9% (UPS);
- w pobieranym prądzie generowane są wyższe harmoniczne głównie rzędu 2000 ± 1 (będących wielokrotnością częstotliwości pracy przetwornicy napięcia 50 kHz) o udziale 11,6% (w11), 8,81% (w12), 1,62% (w13) i 4,38% (UPS).

Całkowita zawartość wyższych harmonicznych w prądzie: liczona wg normy [9] do harmonicznej 39 rzędu (rys. 3 i 4) wynosi odpowiednio: $THDi_{(w11)} = 94,02\%$, $THDi_{(w12)} = 96,82\%$, $THDi_{(w13)} = 55,18\%$ oraz $THDi_{(UPS)} = 37,58\%$. Natomiast $THDi$ liczone do harmonicznej 2010 rzędu (rys. 4, tj. z uwzględnieniem częstotliwości pracy przetwornicy napięć) wynosi odpowiednio: $THDi_{(w11)} = 94,83\%$, $THDi_{(w12)} = 97,92\%$, $THDi_{(w13)} = 55,25\%$ oraz $THDi_{(UPS)} = 38,15\%$.

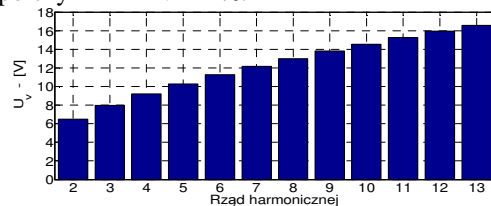
2.2. Badania przy zasilaniu ze źródła o napięciu odkształconym

Źródłem napięcia zasilania, jakimi najczęściej są maszyny elektryczne prądu przemiennego, stawia się wymagania, aby dopuszczalna zawartość wyższych harmonicznych w ich napięciach, określona współczynnikiem zawartości harmonicznych napięcia HFV spełniała wg normy [11] warunek $HFV \leq 2\%$, przy czym

$$HFV = \sqrt{\sum_{n=2}^{13} \left(\frac{U_n}{U_N}\right)^2} \cdot 100 \quad (1)$$

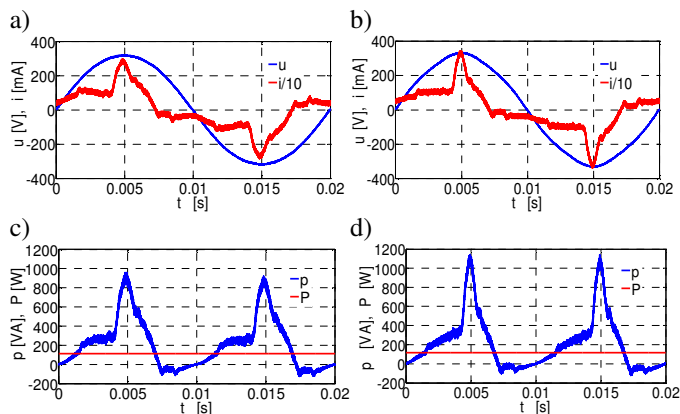
gdzie: U_n – napięcie n -tej harmonicznej, U_N – napięcie znamionowe, n – rząd harmonicznej.

Na rysunku 5 przedstawiono wartości skuteczne pojedynczych harmonicznych, których każda wartość wg (1) ma współczynnik HFV = 2%.



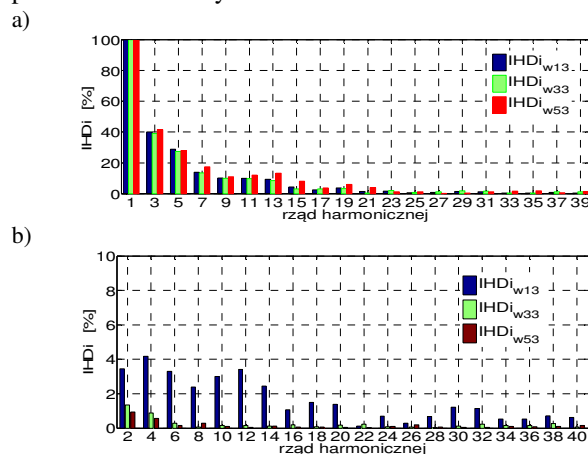
Rys. 5. Wartości skuteczne pojedynczych wyższych harmonicznych napięcia o współczynniku HFV = 2%

Na rysunku 6 przedstawiono zarejestrowane przebiegi napięcia i prądu oraz mocy chwilowej. Badany zestaw komputerowy i UPS zasilono ze źródła o napięciu prawie/praktycznie sinusoidalnym przy $THDu = 0,12\%$, $U_N = 230$ V, $f = 50$ Hz oraz przy zawartości harmonicznej 3. lub 5. rzędu (rys. 5) o wartości $HFV = 2\%$ ($U_3 = 3,46\%U_N$ oznaczenie w33 oraz $U_5 = 4,47\%U_N$ oznaczenie w53). Na rysunku 7, aby odczytać rzeczywistą wartość chwilową prądu należy pomnożyć ją przez 10. Zarejestrowane przebiegi napięć i prądów oraz mocy chwilowej dla UPS-a są podobne jak na rysunku 3d i 3g (występujące różnice zostaną podane w obliczeniach).



Rys. 6. Zarejestrowane przebiegi w stanie ustalonym obciążenia: a) i b) napięcia i prądu odpowiednio dla w33 i w53; c) i d) mocy chwilowej i mocy czynnej odpowiednio dla w33 i w53

Przedstawione na rysunku 6 przebiegi prądów poddano analizie Fouriera. Procentowy udział w prądach (rys. 6 i 3c (wariant w13)) zawartości wyższych harmonicznych nieparzystych do 39. rzędu oraz parzystych do 40 rzędu przedstawiono na rysunkach 7 i 8.



Rys. 7. Procentowy udział wyższych harmonicznych w prądach (zasilanie napięciem prawie sinusoidalnym oraz z harmoniczną 3. lub z 5. rzędu): a) nieparzystych, b) parzystych

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych (rys. 3 i 4 oraz rys. 6 i 7) podano w tabeli 2 zestawienie najważniejszych wartości określających $THDu$ i $THDi$ oraz moce czynne i bierne dla zestawu komputerowego bez oraz z UPS-em.

Tabela 2. Zestawienie najważniejszych wyników wykonanych badań eksperymentalnych (rys. 3, 4, 6 i 7)

Rodzaj obciążenia	$THDi$ harm. rzędu		$THDu$	P	Q (charakter)
	do 39.	Do 2010.			
	[%]	[%]	[%]	[W]	[VAr]
w11	94,02	95,52	0,12	114,81	4,58 (indukc.)
w12	96,82	97,71	0,12	118,96	1,59 (indukc.)
w13	55,18	55,24	0,12	210,42	95,05 (pojemn.)
w33	55,06	55,19	3,46	212,74	94,97 (pojemn.)
w53	58,18	58,35	4,47	214,93	94,64 (pojemn.)
UPS	37,58	38,17	0,12	85,74	96,80 (pojemn.)
UPS3*	37,65	38,19	3,46	86,11	97,05 (pojemn.)
UPS5**	37,87	38,35	4,47	86,32	98,17 (pojemn.)

* - UPS zasilony napięciem prawie sinusoidalnym z zawartością 3. harmonicznej.

** - UPS zasilony napięciem prawie sinusoidalnym z zawartością 5. harmonicznej.

3. WNIOSKI KOŃCOWE

W przypadku badanego zestawu komputerowego (bez UPS-a) znaczny udział harmonicznej 3. i 5. rzędu (rys. 4a) powoduje, że nawet udział harmonicznych rzędu 2000 ± 1 o wartości 11,6% (w11 - rys. 4b) lub 8,81% (w12- rys. 4c) ma niewielki wpływ na różnicę w wartościach $THDi$ liczonego tylko dla harmonicznych do 39. rzędu oraz do 2010. rzędu. W przypadku zasilania napięciem prawie sinusoidalnym dokładne wartości $THDi$ (liczone dla harmonicznych do 2010. rzędu) różnią się tylko odpowiednio o 1,5% (w11) i o 1,61% (w12). Włączenie równolegle do badanego zestawu komputerowego UPS-a (rys. 4c) zmniejsza ten błąd do 0,06% (w13). Obecność 3. harmonicznej $3,46\%U_N$ ($HFV = 2\%$) w napięciu zasilania nie wpływa na wzrost THD prądu badanego zestawu komputerowego. Natomiast obecność w napięciu zasilania 5. harmonicznej $4,47\%U_N$ ($HFV = 2\%$) powoduje 3% wzrost THD prądu. Obecność 3. i 5. harmonicznej o wartościach $HFV = 2\%$ powoduje przyrost mocy czynnej i biernej nie przekraczający 1%.

Stan ustalony obciążenia badanego sprzętu komputerowego bez UPS-a jest przyczyną powstawania jedynie niewielkiej mocy biernej indukcyjnej, stanowiącej 1,3% wartości mocy czynnej. Charakter pojemnościowy mocy biernej powstaje dopiero wtedy, kiedy UPS jest włączony do zasilania. Porównując przedstawione w pracy [10] wyniki badań jednostki stacjonarnej PC i monitora w stanie standby z wynikami badań w niniejszym artykule,

należy stwierdzić, że generacja mocy biernej pojemnościowej spowodowana jest głównie przez włączone do sieci zasilania UPS-y. Stan taki jest główną przyczyną przekompensowania systemów zasilania w budynkach, gdzie występuje duże skupisko wszelkiego typu sprzętu komputerowego współpracującego z UPS-ami (pracownie komputerowe, serwerownie, uczelnie, urzędy, szkoły, banki, itp).

4. BIBLIOGRAFIA

1. Hanzelka. Z.: Baterie kondensatorów w środowisku napięć i prądów odkształconych, Automatyka Elektryka Zakłócenia, Wyd. Infotech 2013, Vol. 4, Nr 2. s. 10 -19.
2. Ludwinek K.: FEMM utilisation in representation of inductance distributions in a salient pole synchronous generator circuit model in no-load state, Technical Transactions 2015, Vol. 1-E (8), pp. 325-341.
3. Hanzelka. Z.: Koszty dostawy złej jakości energii elektrycznej. Automatyka Elektryka Zakłócenia, Wyd. Infotech 2012, Vol. 4, Nr 7, s. 11 -19.
4. Kutt F., Michna M., Ronkowski M., Chrzan P. J.: Non-Uniform Saturation Modelling of Synchronous Generator Pole Shoes, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne 2014, No 103, pp. 121-126.
5. Ludwinek K.: Influence of DC Voltage and Current of Field Winding on Induced Stator Voltages of a Salient Pole Synchronous Generator, International Review of Electrical Engineering 2014, Vol. 9, No. 1, pp. 62-72.
6. Kutt F., Michna M., Ronkowski M., Chrzan P. J.: Polyharmonic Model of Synchronous Generator for Analysis of Autonomous Power Generation Systems, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne 2011, No 92, pp. 109-114.
7. Huber L., Jang Y., Jovanovic M. M.: Performance Evaluation of Bridgeless PFC Boost Rectifiers, IEEE Transactions on Power Electronics 2008, Vol. 23, No. 3, pp. 1381-1390.
8. García O., Cobos J. A., Prieto R.: Single Phase Power Factor Correction: A Survey, IEEE Transactions on Power Electronics 2003, Vol. 18, No. 3, pp. 749-755.
9. PN -EN 61000-3-2:2014-10 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) Część 3-2: Dopuszczalne poziomy emisji harmonicznych prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika < 16 A).
10. Ludwinek K.: Wpływ jednostek stacjonarnych PC i monitorów pracujących w stanie standby na generowanie wyższych harmonicznych prądu. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej 2016, Nr 50 , s. 49-52.
11. PN-EN 60034-1. Maszyny elektryczne wirujące. Część 1. Dane znamionowe i parametry.

INFLUENCE OF COMPUTER EQUIPMENT IN THE LOAD STATE FOR GENERATING HARMONIC CURRENT AND CAPACITIVE REACTIVE POWER

The article presents experimental investigations of the influence of an computer equipment and UPS operating in the steady state on generating harmonic current and the inductive or capacitive power consumption. On the basis of the recorded voltage and current waveforms, active and reactive power (resulting from the phase shift between voltage and current) and the content of higher harmonics are calculated for PC unit, monitor, laser printer and UPS, without Power Factor Correction system.

Keywords: higher harmonics, active and reactive power, computer equipment, UPS.