

## LICZNIK ENERGII ELEKTRYCZNEJ JAKO URZĄDZENIE POMIAROWE ZAWARTOŚCI HARMONICZNYCH

Piotr MAKLES

Zakład Elektronicznych Urządzeń Pomiarowych POZYTON Sp. z o.o.

**Streszczenie:** Publikacja dotyczy możliwości zastosowania licznika energii elektrycznej do pomiarów zawartości harmonicznych napięcia oraz prądu, generowanych przez zasilacze urządzeń małej mocy przy czym licznik wykorzystano do pomiaru harmonicznych oraz współczynników *THDU* (ang. Total Harmonic Distortion, całkowity współczynnik odkształcenia napięcia) oraz *THDI* (całkowity współczynnik odkształcenia prądu).

**Słowa kluczowe:** licznik energii elektrycznej, zasilacze jednofazowe, analiza harmonicznych.

### 1. WPROWADZENIE

Większość jednofazowych urządzeń powszechnego użytku do poprawnej pracy wymaga napięcia stałego. Aby uzyskać napięcie stałe z napięcia przemiennego sieci zasilającej, stosowane są różnego rodzaju prostowniki (przekształtniki AC/DC). Układy tego typu są nieliniowymi odbiornikami energii elektrycznej, generują więc wyższe harmoniczne prądu, co w konsekwencji prowadzi do odkształcenia napięcia zasilającego.

W laboratorium EMC firmy Pozyton przebadane zostały najczęściej stosowane jednofazowe układy zasilające. Pomiaru miały na celu określenie rzeczywistego wpływu przekształtników na parametry prądu i napięcia sieci zasilającej.

Do pomiarów wykorzystano licznik energii elektrycznej typu EPS produkowany przez firmę Pozyton. Licznik ten oprócz pomiaru energii elektrycznej umożliwia odczyt wielu parametrów dotyczących napięcia, pobieranego prądu oraz mocy. W przeprowadzonych badaniach licznik wykorzystano do pomiaru harmonicznych i współczynników *THDU* oraz *THDI*.

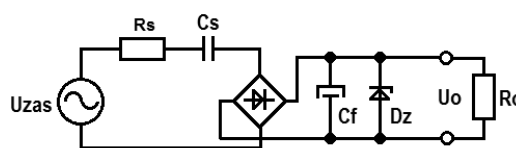
### 2. JEDNOFAZOWE ZASILACZE PRĄDU STAŁEGO

Do najczęściej spotykanych przekształtników AC/DC należą następujące układy:

#### - Zasilacz kondensatorowy [1]

Schemat zasilacza kondensatorowego przedstawiony jest na rysunku 1. Jest to układ o niewielkiej wydajności prądowej (kilka, kilkadziesiąt mA), charakteryzujący się brakiem separacji galwanicznej pomiędzy wejściem AC (*Uzas*) oraz wyjściem DC (*Uo*). Wydajność prądową określa reaktancja kondensatora *Cs* oraz rezystancja *Rs*. Zastosowanie rezystora *Rs* ma na celu ograniczenie udaru prądowego w chwili włączenia układu. Dioda Zenera *Dz* jest stosowana w przypadku niewielkiego obciążenia wrażliwego na zbyt wysokie napięcie zasilające (np. mikrokontroler). Zasilacze

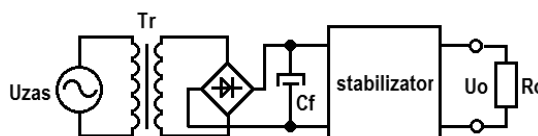
kondensatorowe powszechnie stosowane są w żarówkach LED o mocy do 3 W.



Rys. 1. Schemat zasilacza kondensatorowego

#### - Zasilacz transformatorowy [2]

Zasilacz transformatorowy jest przedstawiony na rysunku 2. Napięcie wyjściowe w takim układzie zależne jest od napięcia wejściowego oraz od przekładni transformatora. W przypadku konieczności zasilania obwodów wrażliwych na wahania napięcia po stronie DC stosuje się układy stabilizacyjne. Takie zasilacze są konstrukcjami stosunkowo prostymi i niezawodnymi, a zastosowanie transformatora zapewnia separację galwaniczną zasilanych układów. W praktyce można spotkać zasilacze jednofazowe o mocach od 1 W do kilku kW.



Rys. 2. Schemat zasilacza transformatorowego

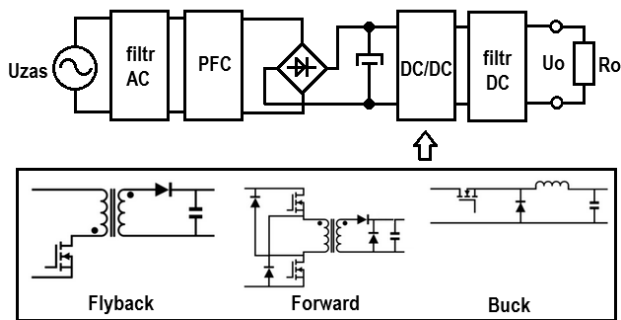
#### - Impulsowa przetwornica AC/DC [3]

Obecnie najczęściej spotykanymi układami zasilania urządzeń powszechnego użytku są przetwornice AC/DC. Schemat blokowy układu zasilacza z przetwornicą napięcia jest przedstawiony na rysunku 3. Przy tej samej mocy co zasilacz zbudowany w oparciu o transformator sieciowy, zasilacz impulsowy posiada mniejsze gabaryty oraz masę i pracuje przy znacznie większym zakresie napięć wejściowych. Niestety, są to układy mocno skomplikowane, a źle zaprojektowana przetwornica AC/DC staje się silnym źródłem zakłóceń promieniowanych i przewodzonych.

Na schemacie blokowym można wyróżnić dwa podstawowe układy: przekształtnik AC/DC - jest to najczęściej prostownik w układzie mostka Graetza wraz z kondensatorem filtrującym oraz przetwornicę DC/DC.

Najczęściej występujące topologie przetwornic DC/DC to flyback, forward oraz buck. Dwie pierwsze charakteryzują

się zastosowaniem transformatora, przez co zapewniona jest separacja galwaniczna zasilanego układu.

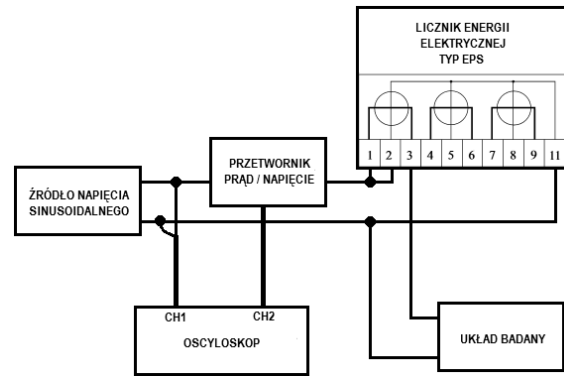


Rys. 3. Schemat blokowy przetwornicy AC/DC

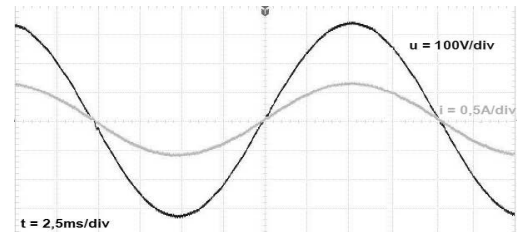
W przypadku, gdy zapotrzebowanie na moc zasilania nie przekracza kilkunastu watów oraz nie jest wymagana separacja galwaniczna, stosowany jest układ typu buck. Typowym przykładem stosowania zasilacza typu buck są kompaktowe żarówki LED o mocach do kilkunastu watów. Zaznaczone na rysunku 3 bloki: filtr AC, układ PFC oraz filtr DC nie są niezbędne do poprawnej pracy zasilacza, wpływają one jednak na poprawę jakości zasilania zarówno po stronie sieci zasilającej, jak i odbiornika. Ze względu na koszty w niektórych rozwiązaniach zasilaczy układy te są pomijane, co skutkuje bardzo dużym poziomem generowanych zakłóceń.

### 3. STANOWISKO LABORATORYJNE

W celu zbadania wpływu odbiorników na zniekształcenia przebiegów prądu i napięcia sieci zasilającej zostało zbudowane stanowisko pomiarowe, którego schemat jest przedstawiony na rysunku 4. Jako źródło zasilające zastosowany został wzorcowy generator napięcia o mocy 1000 VA. Generator ten charakteryzuje się niskimi zniekształceniami wytwarzanego napięcia. Do rejestracji kształtu napięcia i pobieranego prądu wykorzystano oscyloskop wraz z przetwornikiem prąd/napięcie (1 A -> 10 mV). Do pomiaru takich parametrów jak wartości  $U_{RMS}$ ,  $I_{RMS}$ , moc czynna, moc bierna, współczynniki zawartości harmonicznych oraz poziomy poszczególnych harmonicznych, użyty został licznik EPS 3x57,7/100...3x230/400 V 0,01-1(10) A klasy C zgodnie z dyrektywą MID. Oznacza to że błąd podstawowy licznika nie przekracza  $\pm 0,5\%$  w zakresie prądów od 50 mA do 10 A, oraz  $\pm 1,0\%$  dla prądów od 10 mA do 50 mA. Ponieważ we wszystkich przeprowadzonych badaniach mierzony prąd był większy niż 50 mA niepewność przeprowadzonych pomiarów wyniosła  $\pm 0,5\%$ . Aby wyeliminować wpływ zasilania licznika na wyniki pomiarów, licznik zasilono z zasilacza pomocniczego. W takim trybie pracy zasilacz główny licznika jest wyłączony i nie wprowadza dodatkowych zniekształceń mierzonego napięcia. Rysunek 5 przedstawia kształt zarejestrowanych przez oscyloskop przebiegów, a tabela 1 zawiera zmierzone przez licznik wartości chwilowe  $U_{RMS}$ ,  $I_{RMS}$ ,  $THDU$ ,  $THDI$  oraz wartości wyższych harmonicznych dla obciążenia rezystancyjnego o mocy 100 W.



Rys. 4. Schemat stanowiska do badania wpływu odbiorników na sieć zasilającą



Rys. 5. Przebieg napięcia i prądu dla obciążenia rezystancyjnego. Rezystancja odbiornika 500  $\Omega$

Tabela 1. Napięcie, prąd, zawartość harmonicznych oraz poziomy poszczególnych harmonicznych zmierzone przez licznik EPS dla obciążenia rezystancyjnego 500  $\Omega$

	Napięcie	Prąd
Wartość skuteczna	231,50 V	0,44 A
THD [%]	0,22	0,41
$h_2$ [%]	0,08	0,16
$h_3$ [%]	0,12	0,17
$h_4$ [%]	0,11	0,14
$h_5$ [%]	0,13	0,11
$h_6$ [%]	0,02	0,06
$h_7$ [%]	0,09	0,09
$h_8$ [%]	0,02	0,06
$h_9$ [%]	0,11	0,09
$h_{10}$ [%]	0,03	0,00
$h_{11}$ [%]	0,09	0,14

### 4. POMIARY

#### 4.1. Zasilacz Kondensatorowy

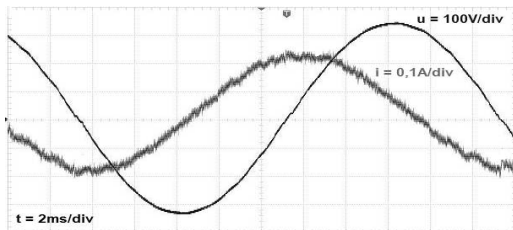
Jako pierwszy przebadany został zasilacz kondensatorowy, którego schemat przedstawia rysunek 1. W układzie zastosowano następujące elementy:

- kondensator ograniczający prąd  $C_s$ : 2  $\mu\text{F}$  / 1000 V (polipropylenowy),
- rezystor  $R_s$ : 150  $\Omega$  / 5 W,
- kondensator filtrujący  $C_f$ : 2200  $\mu\text{F}$  / 35 V,
- rezystancja obciążenia  $R_o$ : 150  $\Omega$  / 5 W.

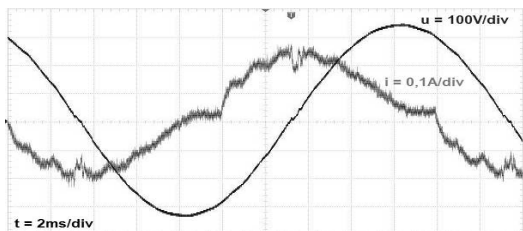
Pomiary zostały przeprowadzone dla dwóch rodzajów obciążenia:

- rezystancyjnego (brak kondensatora  $C_f$ ),
- rezystancyjno - pojemnościowego.

Zarejestrowane przez oscyloskop przebiegi przedstawiają rysunki 6 oraz 7, a wyniki pomiarów odczytane z licznika EPS tabela 2.



Rys. 6. Przebiegi napięcia i prądu zasilacza kondensatorowego dla obciążenia rezystancyjnego



Rys. 7. Przebiegi napięcia i prądu zasilacza kondensatorowego dla obciążenia rezystancyjno - pojemnościowego

Tabela 2. Zasilacz kondensatorowy – wartości zmierzone przez licznik EPS

	Napięcie		Prąd	
	Obc. R	Obc. RC	Obc. R	Obc. RC
Wartość skuteczna	230,50 V	231,25 V	0,14 A	0,14 A
THD [%]	1,09	1,37	4,30	14,11
h <sub>2</sub> [%]	0,13	0,13	0,34	0,27
h <sub>3</sub> [%]	0,74	0,27	2,15	7,42
h <sub>4</sub> [%]	0,09	0,09	0,27	0,27
h <sub>5</sub> [%]	0,14	0,06	0,84	5,69
h <sub>6</sub> [%]	0,02	0,01	0,20	0,27
h <sub>7</sub> [%]	0,07	0,05	0,20	4,21
h <sub>8</sub> [%]	0,02	0,01	0,00	0,20
h <sub>9</sub> [%]	0,10	0,10	0,86	3,61
h <sub>10</sub> [%]	0,02	0,02	0,38	0,34
h <sub>11</sub> [%]	0,10	0,11	0,20	2,46

Analizując rysunki 6 oraz 7 można zauważyć, że zasilacz kondensatorowy charakteryzuje się znacznym przesunięciem napięcia względem prądu, co skutkuje dużą wartością mocy biernej. Moc ta jest przyczyną powstawania strat oraz spadków napięć w sieci zasilającej. Zmierzone przez licznik wartości mocy czynnej oraz biernej dla obydwu obciążeń były zbliżone i wynosiły:

- obciążenie rezystancyjne:  $P = 6,0 \text{ W}$ ,  $Q = 32,2 \text{ var}$ ,
- obciążenie rezystancyjno - pojemnościowe:  
 $P = 5,5 \text{ W}$ ,  $Q = 32,1 \text{ var}$ .

Zasilacze z kondensatorem filtrującym  $C_f$  charakteryzują się również dużą zawartością harmonicznych w pobieranym prądzie. Z tabeli 2 wynika, że dominują harmoniczne nieparzyste.

Badany układ miał niewielką moc pozorną w stosunku do mocy zastosowanego źródła napięcia zasilania, więc nie zaobserwowano znacznego zwiększenia zawartości harmonicznych w napięciu. W warunkach rzeczywistych do sieci zasilającej może być podłączone wiele zasilaczy, co w konsekwencji może doprowadzić do zauważalnego odkształcenia napięcia.

#### 4.2. Zasilacz Transformatorowy

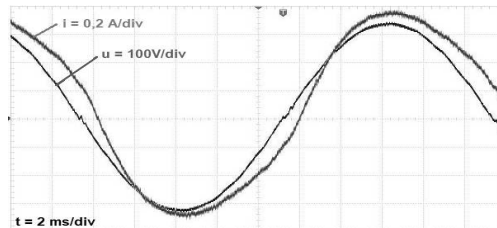
Schemat badanego zasilacza jest pokazany na rysunku 2. Pomiarów dokonano dla dwóch transformatorów różnych producentów o przekładni 1:1, których moce znamionowe wynosiły 160 VA oraz 250 VA. Jako prostownik zastosowano

mostek prostowniczy 10 A / 400 V. Układ nie zawierał zaznaczonego na schemacie stabilizatora napięcia.

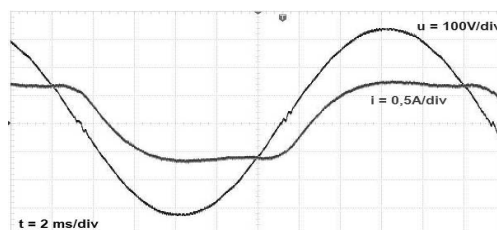
Badania przeprowadzono dla następujących obciążeń:

- rezystancyjnego  $R_o$ : 500  $\Omega$  / 100 W,
- rezystancyjno - pojemnościowego  $R_o$ : 500  $\Omega$  / 100 W,  $C_f$ : 330  $\mu\text{F}$  / 400 V.

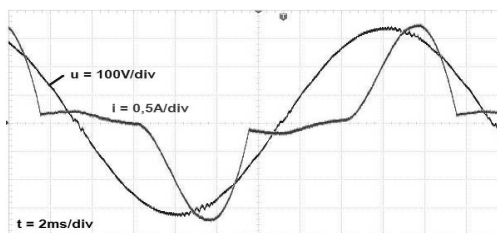
Poniżej przedstawiono zarejestrowane przez oscyloskop przebiegi napięć i prądów (rys. 8, 9 i 10). Wyniki pomiarów odczytane z licznika zestawiono w tabeli 3 oraz 4.



Rys. 8. Przebiegi napięcia i prądu zasilacza transformatorowego. Obciążenie rezystancyjne transformator 160 VA



Rys. 9. Przebiegi napięcia i prądu zasilacza transformatorowego. Obciążenie rezystancyjne transformator 250 VA



Rys. 10. Przebiegi napięcia i prądu zasilacza transformatorowego. Obciążenie rezystancyjno - pojemnościowe transformator 160 VA

Tabela 3. Zasilacz transformatorowy – parametry napięcia zmierzone przez licznik EPS

	Napięcie		
	Obc. R Tr 160 VA	Obc. R Tr 250 VA	Obc. R C Tr 160 VA
Wartość skuteczna [V]	231,63	230,53	231,49
THD [%]	1,11	1,10	1,25
h <sub>2</sub> [%]	0,20	0,19	0,21
h <sub>3</sub> [%]	0,70	0,72	0,87
h <sub>4</sub> [%]	0,13	0,13	0,14
h <sub>5</sub> [%]	0,13	0,13	0,24
h <sub>6</sub> [%]	0,04	0,04	0,02
h <sub>7</sub> [%]	0,09	0,09	0,05
h <sub>8</sub> [%]	0,01	0,02	0,01
h <sub>9</sub> [%]	0,11	0,12	0,18
h <sub>10</sub> [%]	0,01	0,02	0,01
h <sub>11</sub> [%]	0,10	0,10	0,12

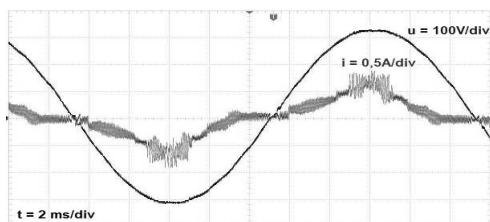
Tabela 4. Zasilacz transformatorowy – parametry prądu zmierzone przez licznik EPS

	Prąd		
	Obc. R Tr 160 VA	Obc. R Tr 250 VA	Obc. R C Tr 160 VA
Wartość skuteczna [A]	0,53	0,93	0,88
THD [%]	8,49	19,82	53,92
h <sub>2</sub> [%]	0,26	0,43	1,79
h <sub>3</sub> [%]	8,18	18,92	50,15
h <sub>4</sub> [%]	0,14	0,26	0,62
h <sub>5</sub> [%]	2,20	5,43	17,11
h <sub>6</sub> [%]	0,07	0,16	0,40
h <sub>7</sub> [%]	0,38	1,65	7,75
h <sub>8</sub> [%]	0,00	0,11	0,18
h <sub>9</sub> [%]	0,27	0,52	4,46
h <sub>10</sub> [%]	0,07	0,09	0,17
h <sub>11</sub> [%]	0,25	0,24	2,73

Z przeprowadzonych badań wynika, że transformatorowy zasilacz napięcia stałego pobiera z sieci zasilającej prąd odkształcony. Zawartość *THDI* zależy od rodzaju obciążenia zasilacza. W większości przypadków stosowany jest kondensator filtrujący (*C<sub>f</sub>* na rysunku 2). Element ten jest przyczyną wysokiej zawartości harmonicznych w pobieranym prądzie. W czasie pomiarów zaobserwowano również niekorzystny wpływ transformatora na odkształcenie prądu. Można zauważyć, że dla obciążenia rezystancyjnego transformator 250 VA powodował dużo większe zniekształcenia niż transformator 160 VA, mimo że w obydwu przypadkach moc obciążenia wynosiła 100 W.

#### 4.3. Przetwornica impulsowa DC/DC

Badana przetwornica impulsowa to zasilacz komputera typu laptop. Moc znamionowa wynosiła 90 W, a napięcie wyjściowe 20 V. Jako obciążenie zastosowano żarówkę 12 V, która przy zasilaniu o wartości 20 V pobierała moc 70 W. Wyniki pomiarów są przedstawione na rysunku 11 oraz w tabeli 5. Z pomiarów wynika, że w prądzie zasilania występują duże zniekształcenia. Znaczny poziom nieparzystych harmonicznych, zwłaszcza h<sub>3</sub>, spowodowany jest obecnością na wejściu mostka Graetza oraz kondensatora filtrującego. Analizując wykres przedstawiony na rysunku 11 można zauważyć zakłócenia wysokoczęstotliwościowe, których przyczyną jest niskiej jakości wejściowy filtr AC.



Rys. 11. Przebiegi napięcia i prądu zasilacza impulsowego

Tabela 5. Zasilacz impulsowy-wartości zmierzone przez licznik EPS

	Napięcie	Prąd
Wartość skuteczna	231,63 V	0,35 A
THD [%]	2,06	36,93
h <sub>2</sub> [%]	0,10	0,52
h <sub>3</sub> [%]	0,29	32,32
h <sub>4</sub> [%]	0,07	0,26
h <sub>5</sub> [%]	0,13	9,22
h <sub>6</sub> [%]	0,01	0,25
h <sub>7</sub> [%]	0,12	5,61
h <sub>8</sub> [%]	0,01	0,18
h <sub>9</sub> [%]	0,10	1,04
h <sub>10</sub> [%]	0,02	0,15
h <sub>11</sub> [%]	0,11	1,24

#### 5. WNIOSKI

Przebadane zasilacze stanowią nieliniowe obciążenie sieci energetycznej, co jest przyczyną generowania dużej zawartości nieparzystych harmonicznych w prądzie zasilania. Z badań wynika, że współczynnik *THDI* zależy od konstrukcji zasilacza oraz od jakości zastosowanych elementów. W pomiarach wszystkich układów zasilających nie zaobserwowano znacznego wzrostu współczynnika *THDU*. W rzeczywistej sieci zasilającej, gdzie występuje znaczna ilość odbiorników pobierających prądy odkształcone, można zaobserwować współczynnik *THDU* na poziomie kilku %. Powoduje to dodatkowe straty oraz przyspiesza degradację izolacji kabli energetycznych i kondensatorów.

Zastosowanie licznika energii elektrycznej, umożliwiającego pomiar zawartości harmonicznych i ich analizę, zapewni lepszą kontrolę nad pracującymi w sieci odbiornikami. Aby zmniejszyć zawartość harmonicznych należy stosować odpowiednie filtry oraz eliminować wadliwie lub niskiej jakości urządzenia. Odpowiedni licznik energii elektrycznej ułatwia więc uzyskanie wysokiej jakości dostarczanej energii.

#### 6. BIBLIOGRAFIA

1. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00954a.pdf> AN954 "Transformless Power Supplies" Microchip 08/24/04.
2. CD00003794.pdf Application note "Power Supply design basics", SGS-THOMSON 1995.
3. Ferenczi O.: Zasilanie układów elektronicznych. Zasilacze impulsowe. WNT, Warszawa 1989.
4. <https://www.power.com>. Noty aplikacyjne.
5. Borkowski A.: Zasilanie urządzeń elektronicznych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1990.
6. Keith H. Billings: Handbook of switchmode power supplies, McGraw-Hill Publishing Company 1989.
7. Abraham I. Pressman: Power Supply Design. Second edition. McGraw-Hill Publishing Company 1998.

### ELECTRICITY METER AS A MEASURING DEVICE FOR HARMONICS CONTENT

The article describes the possibility of using an electricity meter to measure both voltage and current harmonics content generated by power supplies for low power devices. The most frequently used single-phase DC power supplies were described and their influence on the supply network were tested. The following types of power supplies were checked: capacitive transformerless power supply, transformer power supply with Graetz rectifier and AC/DC switching power supply.

All mentioned power supplies are non-linear load on the power grid, which causes the generation of a large content of harmonics in the supply current. This causes additional power losses in the power supply circuits. An EPS-type electricity meter manufactured by Pozyton was used for these measurements. Use of an electricity meter with harmonics content analyzer, provides better control over receivers operating in the network. Modern electricity meter makes it easy to maintain good power quality.

**Keywords:** electricity meter, power supply, harmonic analysis.