

## CZY LICZNIKI ENERGII ELEKTRYCZNEJ MIERZĄ POPRAWNIE?

Romuald MAŚNICKI

Akademia Morska w Gdyni

tel.: 58 5586 440

e-mail: romas@am.gdynia.pl

**Streszczenie:** W odczuciu wielu ludzi, od pewnego czasu wzrosły rachunki za energię elektryczną. Przyczyn tego wzrostu dopatruje się w coraz powszechniejszym stosowaniu statycznych liczników energii w miejsce liczników indukcyjnych. Duży oddźwięk spowodowały artykuły naukowe, opublikowane w ubiegłym roku, w których autorzy otwarcie stawiają tezę, że liczniki statyczne nie działają prawidłowo w niektórych warunkach obciążenia. Szczególnie niekorzystne wyniki uzyskano podczas badań liczników w instalacjach z nowoczesnymi żarówkami energooszczędnymi. W referacie przedstawiono analizę wewnętrznej budowy typowych liczników statycznych, zawarto kilka uwag na temat właściwości wybranych żarówek energooszczędnych, jak również przekładników prądowych, cewek Rogowskiego i przetworników hallotronowych, stosowanych do pomiaru prądu obciążenia. Przedstawiono konfigurację systemu pomiarowego oraz wyniki wstępnych badań kilka rodzajów liczników energii elektrycznej.

**Słowa kluczowe:** liczniki energii elektrycznej, obciążenia nieliniowe, układy pomiarowe energii, dokładność licznika energii.

### 1. WSTĘP

W dyskusjach dotyczących zagadnień związanych z energią elektryczną wyrażane są często indywidualne odczucia odnośnie zwiększonych opłat za jej użytkowanie. Dodatkowym impulsem do rozpowszechnienia takich opinii stała się seria artykułów zawierających wyniki testów statycznych liczników energii elektrycznej [1,2]. Autorzy referatów pokazują, że mierniki te przy pewnych warunkach obciążenia nie działają prawidłowo, a ich wskazania w drastycznych sytuacjach są bardzo niekorzystne dla użytkowników energii elektrycznej, daleko wykraczające poza ich deklarowaną dokładność - nawet niemal o 600 %. Szczególnie niepomyślne wskazania niektórych liczników uzyskano dla obciążeń nieliniowych w postaci zestawów żarówek diodowych (ang. Light Emitting Diode, *LED*) oraz świetlówek kompaktowych (ang. Compact Fluorescent Lamp, *CFL*), zwłaszcza użytkowanych w połączeniu z dodatkowo stosowanymi elektronicznymi regulatorami oświetlenia - ściemniaczami. Nie ujawniono typów badanych liczników ani nie analizowano ich budowy.

Dokumenty normalizacyjne [3,4], według których wzorcowane są liczniki energii elektrycznej, w ograniczonym zakresie uwzględniają rzeczywiste warunki użytkowania tych liczników.

Artykuł zawiera uwagi dotyczące funkcjonowania liczników energii, w tym analizę warunków pomiarowych oraz konfigurację przyrządów. Jest próbą wskazania

przyczyn "niedokładnych odczytów". W artykule zamieszczono również wyniki wstępnych badań liczników energii elektrycznej, o znanych strukturach, różnych typów i różnych producentów.

### 2. WŁAŚCIWOŚCI LICZNIKÓW ENERGII ELEKTRYCZNEJ

#### 2.1. Liczniki indukcyjne

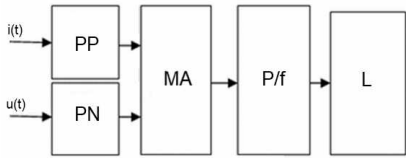
Tradycyjne, elektromechaniczne liczniki energii elektrycznej, w tym najczęściej stosowane liczniki indukcyjne (*LIND*) [5], są wycofywane z użytkowania. Z punktu widzenia dystrybutorów energii poważnym problemem jest podatność tego typu liczników na manipulację, a także stosunkowo wysoki poziom nieczułości, tj. duża wartość prądu, który aktywuje mechanizm licznika. Z uwagi na wąskie pasmo *LIND*, wpływ harmonicznych szybko maleje wraz ze wzrostem ich częstotliwości. Wpływ harmonicznych na funkcjonowanie *LIND* można podsumować następująco [6]:

- harmoniczne 2. i 4. powodują pojawienie się dodatkowych sił napędowych oddziaływujących na tarczę licznika,
- harmoniczne 3. i 5. wywołują nieznaczne siły hamujące,
- *LIND* rejestruje energię czynną przenoszoną przez 2. i 4. harmoniczną, zaś wpływ harmonicznych 3. i 5. jest praktycznie pomijalny.

#### 2.2. Liczniki statyczne

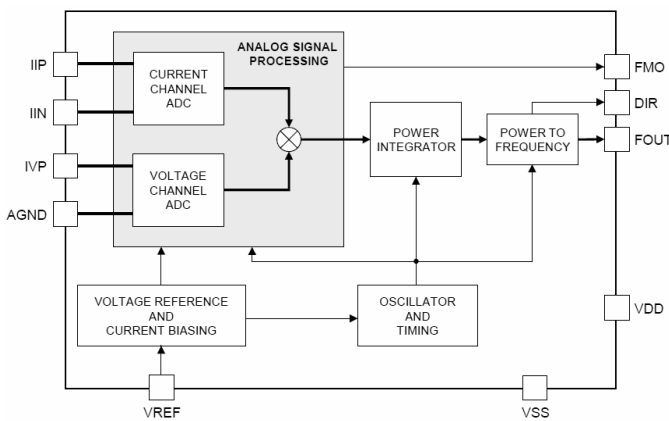
Statyczne liczniki energii (*SLE*) projektowano w technologii analogowej oraz jako przyrządy cyfrowe. W analogowym *SLE* (rys. 1) wykorzystuje się mnożnik analogowy (*MA*), np. AD633 (Analog Devices), za pośrednictwem którego wyznaczana jest moc chwilowa na podstawie wartości chwilowych napięcia i prądu. Wartości mocy konwertowane są, w układzie *Pff*, na impulsy o częstotliwości proporcjonalnej do tej mocy, zliczane w układzie licznika *L*. Ze względu na silną zależność charakterystyk przetwarzania tego rodzaju liczników od czynników zewnętrznych, zwłaszcza od temperatury, jak i niestabilność czasową, ich właściwości użytkowe okazały się nie lepsze od właściwości *LIND*. Analogowe wersje *SLE* są praktycznie niedostępne na rynku.

W cyfrowych *SLE*, w których wykorzystywane są techniki cyfrowego przetwarzania sygnałów (ang. Digital Signal Processing, *DSP*), układowe przetwarzanie sygnałów jest zastępowane przez operacje przetwarzania danych cyfrowych.



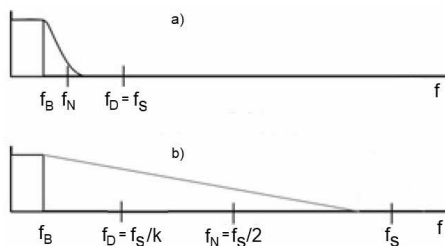
Rys. 1. Bloki funkcjonalne analogowego SLE [7]: PP – przetwornik prądu; PN – przetwornik napięcia; MA – mnożnik analogowy; P/f – przetwornik mocy na częstotliwość; L – licznik/indykator

Przekształcanie sygnałów wejściowych na postać cyfrową jest realizowane z wykorzystaniem wbudowanych przetworników analogowo-cyfrowych (ang. Analog-to-Digital Converter, ADC). W układach SLE najczęściej stosowane są przetworniki typu  $\Sigma\text{-}\Delta$ . Typową konfigurację wewnętrzną układów scalonych (ang. Integrated Circuit, IC) stosowanych w SLE, wykorzystywanych w instalacjach jednofazowych, pokazano na rysunku 2 na przykładzie układu SA9602H (Sames) [8].



Rys. 2. Bloki funkcjonalne układu SA9602 [8]: IIP, IIN – wejście sygnału z PP; IVP, AGND – wejście sygnału z PN

Układ zawiera wszystkie niezbędne bloki funkcjonalne, w tym dwa nadpróbkujące przetworniki ADC, połączone z wyjściami przetworników napięcia (PN) i prądu (PP), bloki wyznaczania mocy i jej konwersji na impulsy. W danych technicznych IC producent nie określa wartości częstotliwości próbkowania (ang. Sampling Frequency,  $f_s$ ) ani częstotliwości przetwarzania danych (ang. Output-Data Rate,  $f_D$ ), przy czym:  $f_s = k \cdot f_D$ ,  $f_N = f_s/2$  oraz  $f_D \geq 2 \cdot f_B$ , gdzie:  $k$  – współczynnik decymacji,  $f_N$  – częstotliwość Nyquista,  $f_B$  – częstotliwość graniczna przetwarzanego sygnału. Relacje pomiędzy poszczególnymi częstotliwościami, dla klasycznego ADC, jak i ADC typu  $\Sigma\text{-}\Delta$ , przedstawiono na rysunku 3.

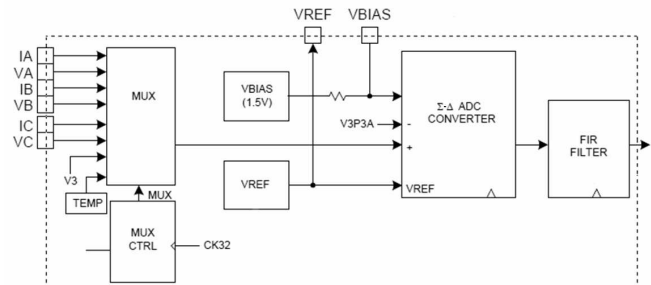


Rys. 3. Pasmo przenoszenia przetwornika ADC: a) przetwornik Nyquista (klasyczny), b) przetwornik nadpróbkujący

Decymacja, realizowana w przetwornikach  $\Sigma\text{-}\Delta$  z wykorzystaniem filtrów cyfrowych, umożliwia istotne

zmniejszenie szumu kwantyzacji, jednakże nie eliminuje obecności wyższych harmonicznych, o ile nie zostały one usunięte z sygnału za pośrednictwem układowego filtra antyaliasingowego (ang. Anti-Aliasing Filter, AAF), przed przetwarzaniem tego sygnału w ADC.

W IC typu 71M6513 (Teridian) (rys. 4) [9], stosowanym w 1- i 3-fazowych licznikach energii, który zawiera tylko jeden przetwornik ADC typu  $\Sigma\text{-}\Delta$  oraz multiplekser sygnałów wejściowych, próbki wszystkich sygnałów są pobierane z szybkością  $f_D = 2520,6$  S/s.

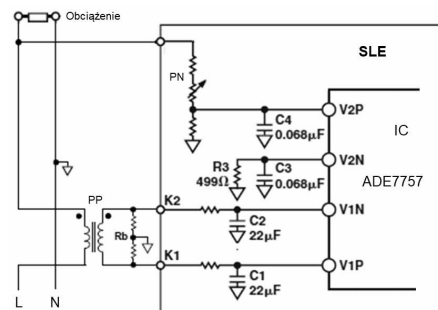


Rys. 4. Bloki funkcjonalne układu 71M6513 [9]: IA, IB, IC – wejścia sygnałów z PP; VA, VB, VC – wejścia sygnałów z PN; MUX – multiplekser analogowy

### 2.3. Układy peryferyjne IC w SLE

Typową konfigurację obwodów peryferyjnych IC w SLE pokazano na rysunku 5. Układ typu ADE7757 (Analog Devices) [10] zawiera dwa wbudowane ADC. Są to 16-bitowe przetworniki  $\Sigma\text{-}\Delta$  o częstotliwości próbkowania  $f_s = 450$  kHz. Obwody RC, łączące wyjścia PP i PN z wejściami ADC, tworzą filtry dolnoprzepustowe (FDP) pierwszego rzędu. W takich prostych strukturach układowych obwodów wejściowych IC realizowane są funkcje filtrów AAF. Sygnały wejściowe IC mogą zawierać, obok składowych podstawowych, także ich harmoniczne.

Jak pokazano na rysunku 5, napięcie sieciowe jest doprowadzane do wejścia SLE z wykorzystaniem IC w postaci prostego obwodu rezystancyjnego dzielnika napięcia (DN). Pomiary prądu obciążenia są zwykle realizowane za pomocą PP, takich jak przekładniki prądowe (ang. Current Transformer, CT), czujniki Halla, znane pod nazwą handlową LEM (fr. Liaisons Electroniques-Mécaniques, LEM) i cewki Rogowskiego.



Rys. 5. Typowe konfiguracje obwodów peryferyjnych IC stosowanych w SLE [10]

Przekładniki prądowe CT są przetwornikami służącymi do liniowego obniżenia wartości prądu obciążenia do poziomu kompatybilnego z oprzyrządowaniem pomiarowym. Za pośrednictwem rezystora  $R_b$  (bocznik) prąd wyjściowy CT jest przetwarzany na napięcie. Szerokość pasma typowego CT przekracza 150 kHz [11].

W czujnikach Halla [12] wykorzystywane jest zjawisko, w którym półprzewodnik zasilany stałym prądem, umieszczony prostopadle do pola magnetycznego, generuje napięcie o wartości zależnej od natężenia tego pola. Pasma tych czujników zwykle nie przekracza 200 kHz.

Napięcie indukowane w cewce Rogowskiego [13] jest proporcjonalne do szybkości zmiany prądu w przewodniku umieszczonym wewnątrz zamkniętej pętli cewki. Przetwornik Rogowskiego, obok cewki, zawiera układ integratora współpracujący z FDP. Różne typy przetworników Rogowskiego umożliwiają pomiar prądów zawierających składowe częstotliwości od 0,1 Hz do kilku MHz. Dokładność pomiaru cewką Rogowskiego w dużej mierze zależy od tego, czy integrator poprawnie odtwarza sygnał prądowy.

Stosowanie pasywnych układów AAF może skutkować tym, że przy występowaniu harmonicznych o wysokich częstotliwościach, dla częstotliwości przetwarzania ADC, stosowanych w niektórych SLE, warunek Nyquista-Shannona może nie być spełniony. Jeśli w sygnale podawanym na wejście ADC znajdują się składowe o częstotliwościach przekraczających  $f_D/2$ , wystąpi zjawisko aliasing.

### 3. NIELINIOWE OBCIĄŻENIA W SIECI

Nowoczesne źródła światła, zarówno lampy LED, jak i świetlówki CFL, są wyposażone w przetworniki energoelektroniczne, które pobierają z sieci odkształcony prąd. Mogą one powodować generowanie składowych prądu o częstotliwościach przekraczających 1 MHz, znacznie powyżej 40-tej harmonicznej, która jest uwzględniona w normie IEC 61000-3-2. W całkowitym prądzie pobieranym przez CFL ponad 50% to prądy bierne i harmoniczne. Również ponad 50% prądu LED może stanowić prąd składowych harmonicznych.

### 4. WSTĘPNE BADANIA ZESTAWU LICZNIKÓW ENERGII

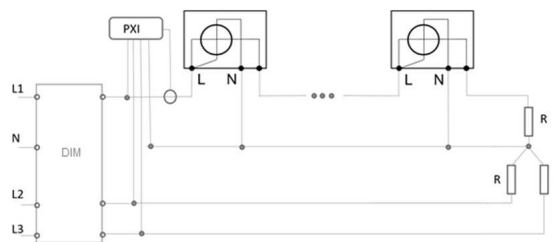
Wstępne badania obejmowały zestaw liczników różnych producentów, wykorzystywanych do pomiaru energii w obwodach jednofazowych. Ich listę zamieszczono w tabelicy 1. Badania przeprowadzono w dwóch konfiguracjach układowych, KONF1 i KONF2, pokazanych odpowiednio na rysunkach 6 i 8. 3-fazowy ściemniacz DIM dużej mocy wprowadzał deformacje sygnałów sieciowych dostarczonych do 3-fazowego obciążenia rezystancyjnego R. Testowane liczniki energii połączono szeregowo z obciążeniem.

Tabela 1. Zestawienie danych przyrządów

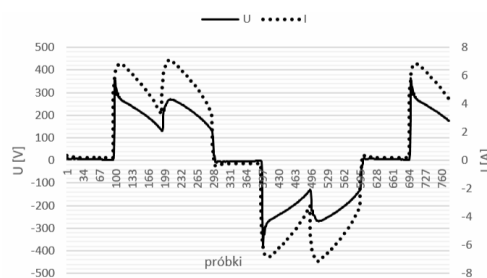
Typ licznika	Budowa	IC	Przetwornik prądu
4A52d	LIND	-	-
LAP	SLE	SA9602H	CT
L1F	SLE	SA9602H	CT
LABM	SLE	71M6513	CT
N10	Analizator parametrów sieci	DSP	bocznik

Jako system gromadzenia danych wykorzystano platformę National Instruments PXI, realizującą pobieranie

próbek z szybkością 30 kS/s, wyposażoną w dzielniki napięcia w obwodach napięciowych i przetwornik Rogowskiego do pomiaru prądu, współpracujące z filtrami FDP, nastrojonymi na 10 kHz. Przykładowe przebiegi dla obu konfiguracji testowych pokazano na rysunkach 7 i 9.

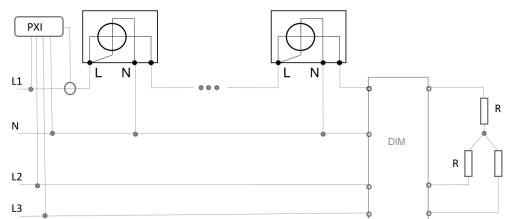


Rys. 6. Konfiguracja KONF1 układu pomiarowego

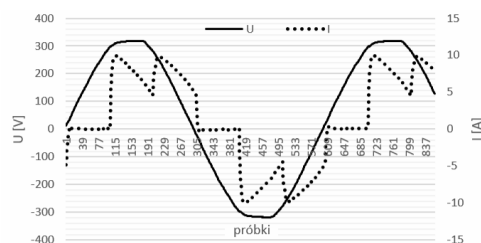


Rys. 7. Przykładowe przebiegi uzyskane w układzie KONF1

Testy prowadzono przy znamionowym, 3-fazowym napięciu sieciowym, zasilającym DIM. Regulowane obciążenie rezystancyjne zostało nastawione na ok. 35 Ω, więc prąd fazowy dla napięcia nieodkształconego wynosił ponad 6 A. Licznik indukcyjny LIND (tablica 1) był miernikiem referencyjnym. Wybrane wartości odchyłeń (względnych) odczytów pozostałych liczników od wskazań licznika indukcyjnego, dla konfiguracji KONF1 i KONF2, przy różnych kątach zapłonu DIM, przedstawiono w tabelicy 2.



Rys. 8. Konfiguracja KONF2 układu pomiarowego



Rys. 9. Przykładowe przebiegi uzyskane w układzie KONF2

W SLE poddawanych badaniom pomiar prądu był realizowany za pomocą przekładników CT. Uzyskane wyniki nie wydają się być wystarczające do wyciągnięcia ogólnych wniosków, jednak pokazują one, że odczyty z SLE różnią się od wskazań LIND o wartości znacznie powyżej wynikających z ich klas dokładności.

Tablica 2. Wyniki wstępnych badań

KONF	Kąt zapięcia ściemniacza [°]	Względne odchyłki wskazań SLE od wskazań LIND [%]			
		LAP	LIF	LAMB	N10
-	0	-2.9	-1.0	-0.8	-1.3
1	45	0.1	0.2	-0.3	-0.2
	90	14.0	6.7	12.0	12.0
2	45	1.9	1.8	0.6	1.2
	90	2.4	2.4	1.9	2.0

## 5. WSTĘPNE WNIOSKI

*SLE* są wprowadzane jako bardziej dokładne i niezawodne przyrządy pomiarowe w porównaniu z *LIND*. Wymagają mniejszej energii zasilającej, przy znacznie większej czułości, tj. niższej wartości mierzonego prądu w porównaniu do minimalnego prądu *LIND*.

Powyższe rozważania i wyniki testów wskazują, że odkształcenia w sygnałach sieciowych mogą wpływać na wyniki pomiarów *SLE*. Wzrost opłat po wprowadzeniu *SLE* może być związany z większą czułością pomiarową tych mierników, tj. mniejszymi prądami, przy których naliczane są opłaty za energię. Dotyczy to wielu urządzeń gospodarstwa domowego, które większość czasu pozostają w trybie gotowości.

Z drugiej strony, łączenie niekompatybilnych komponentów, stosowanie odbiorników energii elektrycznej w konfiguracjach nie przewidzianych przez ich producentów, np. połączenie lamp *LED* lub świetlówek *CFL* ze ściemniaczem, może wiązać się z generowaniem harmonicznych o intensywności i szerokości pasma przekraczającej poziomy dopuszczone przez dyrektywy europejskie i powiązane normy. Jeśli takie zakłócenia pojawią się, a ich skutki zostaną zmierzone przez licznik energii, czy klient powinien zapłacić rachunek?

Dalsze badania obejmą obciążenia nieliniowe w różnych konfiguracjach i ich wpływ na działanie liczników energii. Na podstawie przesłanek wymienionych w artykule wydają się, że szczególnie istotne znaczenie dla poprawności pomiarów mają składowe napięcia i prądu o częstotliwościach harmonicznych. Badania ich wpływu na wyniki pomiaru energii elektrycznej będą realizowane zarówno na drodze doświadczalnej, z wykorzystaniem rzeczywistych *SLE* i sygnałów o kontrolowanych odkształceniach, jak i symulacji komputerowych, w oparciu o modelowanie bloków funkcjonalnych *SLE* o różnych właściwościach i ich testowanie dla różnych warunków

sygnałowych. Celem badań będzie wskazanie ograniczeń wybranych *SLE*, jak również ocena, jakie składowe energii czynnej pobieranej przez obciążenie powinny być mierzone.

## 5. BIBLIOGRAFIA

1. Leferink F., Keyer C.: Electromagnetic Interference in Smart Grids, International workshop Energy-Open, University of Twente, Enschede, the Netherlands, 2017.
2. Leferink F., Keyer C., Melentjev A.: Static energy meter errors caused by conducted electromagnetic interference, IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, Vol. 5 (4), s. 49-55, 2016.
3. PN-EN 62052-11, Urządzenia do pomiarów energii elektrycznej (prądu przemiennego) – Wymagania ogólne, badania i warunki badań – Część 11: Urządzenia do pomiarów, Polski Komitet Normalizacyjny, 2003.
4. PN-EN 62053-21, Urządzenia do pomiarów energii elektrycznej (prądu przemiennego) – Wymagania szczegółowe – Część 21: Liczniki statyczne energii czynnej (klasy 1 i 2), Polski Komitet Normalizacyjny, 2003.
5. The history of the electricity meter, Metering&Smart Energy, <https://www.metering.com/top-stories/the-history-of-the-electricity-meter/>.
6. Ashour M., Youssef K.: Comparison between induction and digital energy meter in the presence of distortion, Conference: Metering, Billing, CRM/CIS, Egypt, 2003.
7. Kuśmierk Z. Korczyński M., J.: Measurement of electrical energy under non-sinusoidal voltage and current - conditions and requirements, <https://www.researchgate.net/publication/41649565>.
8. Dane techniczne SA2002H, "Single Phase Bidirectional Power/Energy Metering IC with Instantaneous Pulse Output" Sames, 2017.
9. Dane techniczne 71M6513, "3-phase energy meter IC", Teridian, 2011.
10. Dane techniczne ADE7757, "Energy Metering IC with Integrated Oscillator", Analog Devices, 2017.
11. Kunde K. et al.: Frequency Response of Instrument Transformers in the kHz range, Heft, 2012.
12. LEM Current and Voltage Transducers for Industrial Applications, [http://www.europowercomponents.com/media/l/e/lem\\_product\\_literature\\_](http://www.europowercomponents.com/media/l/e/lem_product_literature_).
13. PEM Application Notes, Power Electronic Measurements Ltd, <http://www.pwnuk.com>, 2003, s. 1-5.

## DO THE ELECTRICITY COUNTERS MEASURE CORRECTLY?

In the opinion of many people, electricity bills have risen for some time. The reasons for this increase are seen in the widespread use of static energy meters instead of induction meters. The great resonance was caused by scientific articles published last year, in which the authors openly put forward the thesis that static meters do not work properly under certain load conditions. Particularly unfavorable results were obtained when testing meters with modern, energy-saving light bulbs used as a load. The paper presents the internal structure and basic functional blocks of typical static energy meters. The integrated circuits with embedded ADCs and their peripheral devices, applied in considered energy meters are analyzed. Several comments are made on the properties of energy-saving light bulbs, as well as current transformers, Rogowski coils and Hall-effect sensor based transducers used to measure load current. The configuration of the measurement system and results of preliminary tests of several types of electricity meters are shown. Short deliberations on the reasons for discrepancies in energy meter measurements are also presented.

**Keywords:** electric energy meter, non-linear loads, electric energy measurement systems, accuracy of electricity meter.