

Analiza dokładności wskazań liczników energii elektrycznej stosowanych w systemach automatyki budynkowej

Streszczenie. W artykule zwrócono uwagę na dokładność elektronicznych liczników energii elektrycznej coraz powszechniej stosowanych w instalacjach elektrycznych inteligentnych domów. W ramach prac badawczych wykonane zostały wzorcowania wskazań wybranych liczników energii elektrycznej stosowanych w systemach automatyki budynkowej zgodnie z wymaganiami normatywnymi oraz dodatkowo dla odkształconych prądów obciążenia, typowych dla odbiorników stosowanych w inteligentnych domach. Określono wpływ poziomu odkształceń prądu (THD) oraz jego wartości (różne obciążenie) na błędy wskazań wybranych elektronicznych liczników energii elektrycznej.

Abstract. The article draws attention to the accuracy of electronic energy meters, which are increasingly used in electrical installations of smart homes. As part of the research work, the readings of selected electricity meters used in building automation systems were calibrated in accordance with the normative requirements and additionally for distorted load currents typical of receivers used in smart homes. The influence of the level of current distortion (THD) and its value (different loads) on the reading errors of selected electronic electricity meters was determined. (**Analysis of the accuracy of electricity meters used in building automation systems**)

Słowa kluczowe: liczniki energii elektrycznej, automatyka budynkowa, błędy wskazań, odkształcone prądy obciążenia

Keywords: energy meters, building automation, indication errors, distorted load currents

Wstęp

Elektroniczne liczniki energii elektrycznej przeznaczone do pomiaru energii czynnej i biernej pobieranej przez różne odbiorniki stosowane są zarówno do rozliczeń finansowych odbiorców energii elektrycznej, jak i do optymalizacji działania systemów automatyki budynkowej. Jednym z głównych celów działania systemów automatyki budynkowej jest ograniczenie zużycia energii elektrycznej. Poprawność działania elektronicznych liczników energii elektrycznej stosowanych w systemach automatyki budynkowej jest warunkiem koniecznym efektywnej pracy oraz optymalnej parametryzacji podzespołów takiego systemu.

automatyki budynkowej. Są to niewielkich rozmiarów urządzenia pomiarowe montowane najczęściej w szafach rozdzielczych na szynach DIN.

Warto zauważyć, że istnieje wiele różnych rozwiązań technicznych liczników elektronicznych [1], [2], które różnią się nie tylko szczegółami konstrukcyjnymi, ale także podstawowymi algorytmami przetwarzania sygnału. Ze względu na niewielkie rozmiary liczniki takie często wymagają zastosowania zewnętrznych przekładników prądowych pokazanych w górnej części rys. 1.

Jak już wspomniano liczniki energii elektrycznej mierzą energię pobieraną przez różne odbiorniki. Wśród nich rośnie liczba obciążeń nieliniowych, które wprowadzają silne odkształcenia prądu, m.in. energooszczędne lampy LED lub zasilacze impulsowe. Wykazano, że nowoczesne, homologowane elektroniczne liczniki energii wykazują błędne odczyty przy pomiarze energii pobieranej przez takie odbiorniki [3]. Ze względów ekonomicznych ważne jest również określenie, jak silnie odkształcenia prądu wprowadzane przez obciążenie wpływają na poprawną pracę urządzeń pomiarowych stosowanych w systemach automatyki budynkowej oraz Smart Grid [4]. Poszukując odpowiedzi na powyższe pytanie można zarówno przeprowadzić symulacje oparte na teorii mocy jak również wykonać odpowiednie badania.

W dalszej części artykułu zostanie przedstawione zarówno wprowadzenie do analizy teoretycznej, jak i przykładowe wyniki przeprowadzonych badań wpływu wybranych nieliniowych odbiorników na wskazania typowych liczników energii elektrycznej. W ramach prac badawczych wykonana została m.in. analiza wpływu odkształconych przebiegów prądu na wskazania przykładowych elektronicznych liczników energii.

Procedura pomiarowa

Znane teorie mocy opisują nieliniowość obciążenia w postaci modelu matematycznego wykorzystującego składowe harmoniczne wyrażające poziom odkształcenia m.in. prądu płynącego przez obciążenie [5], [6].

Gdy napięcie zasilania jest sinusoidalne, ale prąd jest odkształcony, prąd ten można wyrazić wzorem [6]:

$$(1) \quad I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$$



Rys. 1. Przykładowe liczniki energii elektrycznej do zastosowań w systemach automatyki budynkowej (źródło: <https://www.google.pl/search?q=liczniki+energii+elektrycznej>)

Na rys. 1 przedstawiono przykładowe liczniki energii elektrycznej przeznaczone do zastosowań w systemach

gdzie: n – rząd harmonicznego, I_n – wartość średnia kwadratowa (RMS) n -tej harmonicznej prądu.

W równaniu (1) oddzielono składową mocy częstotliwości podstawowej ($n = 1$) od składowych związanych z odkształceniami prądu ($n \geq 2$).

Moc pozorną można zatem opisać równaniem [6]:

$$(2) \quad S = UI = U \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$$

a równanie tej mocy przyjmuje postać [7]:

$$(3) \quad S^2 = U^2 I^2 = U^2 I_1^2 + U^2 \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 = S_1^2 + H^2 = P_1^2 + Q_1^2 + H^2 = P_1^2 + D^2$$

gdzie: składowe mocy o częstotliwości podstawowej reprezentują: P_1 – moc czynną pierwszej harmonicznej, Q_1 – moc bierna pierwszej harmonicznej, a składowe związane z odkształceniami: H – moc odkształcenia, D – moc dystorsji.

W przypadku obciążenia nieliniowego współczynnik mocy PF definiuje się jako [7]:

$$(4) \quad PF = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{\sqrt{S_1^2 + H^2}} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + H^2}}$$

Aby określić zawartość harmonicznego w przebiegu prądu odkształconego, definiuje się współczynnik THD [7]:

$$(5) \quad THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$

W dalszej części artykułu określono wpływ poziomu odkształceń prądu (THD) dla różnych wartości prądu (różne obciążenie) na błędy wskazań przykładowych liczników energii elektrycznej stosowanych w systemach automatyki budynkowej. W prezentacji wyników badań szczególną uwagę zwrócono na nieliniowe odbiorniki, gdyż to one stanowią typowe obciążenie obwodów prądowych liczników energii w inteligentnych domach. Prezentowane w pracy przykładowe wyniki badań są reprezentatywne dla grupy kilkunastu przebadanych liczników różnych producentów, które są powszechnie stosowane w systemach automatyki budynkowej.

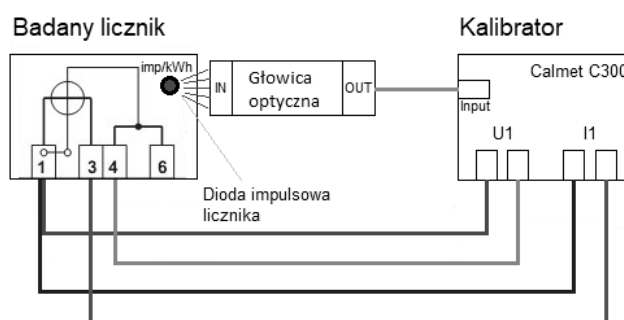
Zastosowana procedura pomiarowa służąca określeniu błędów badanych liczników energii składa się z następujących etapów:

- Początkowo mierzono składowe harmoniczne prądu każdego badanego obciążenia za pomocą analizatora jakości PQM-710.
- W zależności od konkretnego obciążenia kalibrator Calmet C300 (rys. 2) generował odpowiednio odkształcony prąd i napięcie zasilania, stosując wymaganą amplitudę i fazę każdej harmonicznej.
- Wygenerowane wcześniej sygnały posłużyły do doprowadzenia prądu i napięcia do obwodu badanego licznika energii („U1” i „I1” na rys. 2).
- Głowica optyczna (rys. 2) odczytywała wskazanie (impulsy) z badanego licznika energii i przesyłała wyniki do kalibratora.
- Oprogramowanie zaimplementowane w kalibratorze Calmet C300 (rys. 3) umożliwiło rejestrację energii wskazywanej przez badany licznik metodą mocy i czasu.
- Na koniec, za pomocą programu CALPRO, obliczano błąd pomiaru energii jako różnicę pomiędzy energią zmierzoną przez badany licznik a energią wygenerowaną przez kalibrator.

Liczniki energii należą do grupy przyrządów pomiarowych podlegających kontroli, zwanej czasem „weryfikacją pierwotną” lub „legalizacją” [8]. W Unii Europejskiej wszelkie czynności związane z legalizacją określa międzynarodowa dyrektywa w sprawie przyrządów pomiarowych (MID) 2014/32/UE. Zgodnie z przepisami europejskimi badanie dokładności liczników energii można przeprowadzić metodą licznika kontrolnego lub metodą mocowo-czasową. Błędy licznika należy sprawdzić dla różnych prądów obciążenia; jednakże normy te nie wspominają o konieczności oceny błędów licznika dla obciążeń nieliniowych. W krajach pozaeuropejskich można zastosować inne metody i procedury pomiarowe w celu określenia błędów liczników energii [9]-[12].

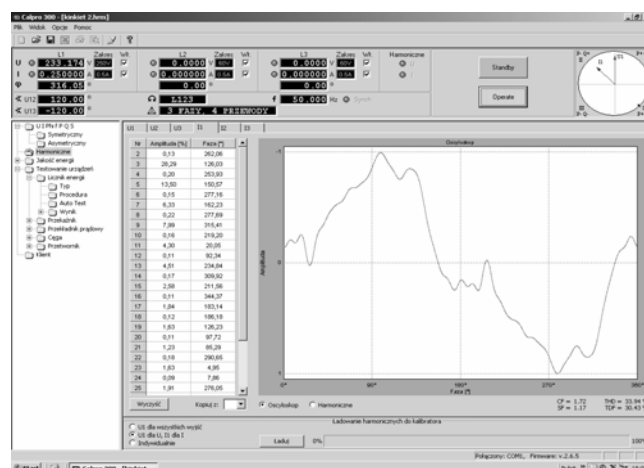
Stanowisko pomiarowe

Badania poprawności wskazań liczników energii elektrycznej były przeprowadzone w układzie, gdzie wskazania badanego licznika są porównywane z energią zadawaną w sposób liczalny przez kalibrator Calmet C300.



Rys. 2. Układ pomiarowy do badań błędów wskazań liczników energii elektrycznej

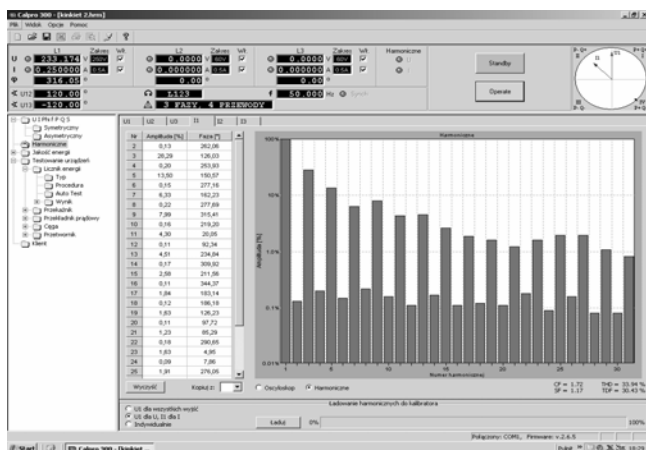
Charakterystyczne odkształcenia prądów obciążenia były realizowane dzięki oprogramowaniu komputerowemu Calpro współpracującemu z kalibratorem Calmet C300 (rys. 2). Oprogramowanie Calpro (rys. 3) umożliwia m.in. wyznaczanie błędów wskazań badanych liczników metodą mocy i czasu bez konieczności dysponowania licznikiem kontrolnym zarówno dla prądów sinusoidalnych jak i odkształconych. Otrzymane wyniki badań pozwalają na analizę dokładności wskazań liczników energii elektrycznej stosowanych w systemach automatyki budynkowej oraz ocenę ich przydatności do stosowania w takich systemach.



Rys. 3. Okno programu CALPRO, w którym pokazany jest przykładowy prąd odkształcony (wygenerowany z programu CALPRO)

Wyniki wzorcowania

Do analizy wpływu odkształconych przebiegów prądu na odczyty elektronicznych liczników energii wybrano obciążenia nieliniowe powszechnie stosowane w oświetleniu domów, które charakteryzują się różnymi charakterystykami widmowymi i bardzo różnymi THD. Takimi obciążeniami są m.in. lampy z diodami elektroluminescencyjnymi (LED). Ze względu na mnogość tego typu urządzeń i układów zasilania zdecydowano się na wymianę obciążen LED na kalibrator CALPRO C300, który dostarczał prąd i napięcie do badanych liczników energii [13]. Kalibrator może generować sinusoidalne lub odkształcone prądy i napięcia z niezależnie nałożonymi składowymi harmonicznymi prądu i napięcia. Producent kalibratora dostarczył oprogramowanie komputerowe umożliwiające wyznaczenie odkształceń prądu badanych obciążeń poprzez określenie wartości poszczególnych harmonicznymi i ich zależności fazowych (rys. 4).



Rys. 4. Przykładowe widmo prądu odkształconego generowanego przez kalibrator mocy Calmet C300. Amplitudy i fazy kolejnych harmonicznymi przedstawiono w tabeli (po lewej stronie wykresu)

Oprogramowanie Calpro umożliwia wyznaczanie błędów wskazań badanych liczników metodą mocy i czasu (tj. bez licznika kontrolnego [14]). W pierwszej kolejności wyznaczono zawartość widmową prądu badanych obciążeń za pomocą analizatora jakości energii PQM-710 [15], który spełnia wymagania normy EN 61000-4-30 klasa A [16]. Za pomocą tego samego analizatora mocy zmierzono moc czynną, współczynnik mocy i współczynnik zniekształceń harmonicznymi.

Poprawność wskazań miernika oceniano zgodnie z procedurą wzorcowania [8], zarówno dla prądu sinusoidalnego, jak i prądu odkształconego zawierającego wyższe harmoniczne. Przykładowe wyniki badań wykonane dla różnych prądów obciążenia (krotności prądu bazowego licznika I_b) przedstawiono w tabelach 1-6. Błędy odczytu licznika oznaczono jako ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 . Pogrubione wartości oznaczają błędy przekraczające błędy dopuszczalne ϵ_{gr} .

W tabelach 1-3 przedstawiono typowe błędy liczników stosowanych w instalacjach systemów automatyki budynkowej (1 typ).

W przeprowadzonych badaniach uwzględniono również liczniki energii elektrycznej stosowane w bilansowaniu energii pochodzącej z instalacji fotowoltaicznej (2 typ). Przebadano kilka takich liczników a ich typowe błędy zaprezentowano w tabelach 4-6. Wskazania tego typu liczników są szczególnie istotne ze względu na działanie dodatkowych układów sterujących pracą odbiorników w inteligentnym domu w zależności od własnej produkcji energii elektrycznej (autokonsumpcja energii PV).

Tabela 1. Zestawienie błędów wskazań licznika typu 1 dla sinusoidalnych prądów obciążenia

Licznik 1 typ				
Parametry punktu pomiarowego procedury	ϵ_1 , %	ϵ_2 , %	ϵ_3 , %	ϵ_{gr} , %
0,05 I_b , $\cos\varphi = 1$	0,244	0,219	0,302	1
0,1 I_b , $\cos\varphi = 1$	0,318	0,216	0,148	1
0,5 I_b , $\cos\varphi = 1$	0,528	0,222	0,835	1
1 I_b , $\cos\varphi = 1$	0,499	0,683	0,528	1
1 I_b , $\cos\varphi = 0,5$	0,286	0,219	0,214	1
2 I_b , $\cos\varphi = 1$	0,219	0,219	0,219	1
3 I_b , $\cos\varphi = 1$	0,238	0,238	0,209	1
4 I_b , $\cos\varphi = 1$	0,180	0,219	0,219	1

Tabela 2. Zestawienie błędów wskazań licznika typu 1 dla odkształconych prądów obciążenia (THD = 196%)

Licznik 1 typ				
Parametry punktu pomiarowego procedury	ϵ_1 , %	ϵ_2 , %	ϵ_3 , %	ϵ_{gr} , %
0,05 I_b , $\cos\varphi = 1$	1,752	0,796	0,716	1
0,1 I_b , $\cos\varphi = 1$	40,987	41,244	41,546	1
0,5 I_b , $\cos\varphi = 1$	0,582	0,803	0,626	1
1 I_b , $\cos\varphi = 1$	6,266	6,173	6,183	1
1 I_b , $\cos\varphi = 0,5$	7,162	6,920	6,940	1
2 I_b , $\cos\varphi = 1$	1,153	1,100	1,109	1

Tabela 3. Zestawienie błędów wskazań licznika typu 1 dla odkształconych prądów obciążenia (THD = 34%)

Licznik 1 typ				
Parametry punktu pomiarowego procedury	ϵ_1 , %	ϵ_2 , %	ϵ_3 , %	ϵ_{gr} , %
0,05 I_b , $\cos\varphi = 1$	-0,055	0,056	0,191	1
0,1 I_b , $\cos\varphi = 1$	0,437	-0,021	0,124	1
0,5 I_b , $\cos\varphi = 1$	0,191	0,145	0,176	1
1 I_b , $\cos\varphi = 1$	0,185	0,130	0,148	1
1 I_b , $\cos\varphi = 0,5$	-0,954	-1,079	-1,123	1
2 I_b , $\cos\varphi = 1$	0,230	0,212	0,194	1

Tabela 4. Zestawienie błędów wskazań licznika typu 2 dla sinusoidalnych prądów obciążenia

Licznik 2 typ				
Parametry punktu pomiarowego procedury	ϵ_1 , %	ϵ_2 , %	ϵ_3 , %	ϵ_{gr} , %
0,05 I_b , $\cos\varphi = 1$	0,453	0,395	0,387	1
0,1 I_b , $\cos\varphi = 1$	0,454	0,483	0,508	1
0,5 I_b , $\cos\varphi = 1$	0,649	0,627	0,627	1
1 I_b , $\cos\varphi = 1$	0,702	0,732	0,698	1
1 I_b , $\cos\varphi = 0,5$	2,773	2,756	2,770	1
2 I_b , $\cos\varphi = 1$	0,664	0,664	0,664	1
3 I_b , $\cos\varphi = 1$	0,702	0,659	0,732	1
4 I_b , $\cos\varphi = 1$	0,741	0,741	0,741	1

Tabela 5. Zestawienie błędów wskazań licznika typu 2 dla odkształconych prądów obciążenia (THD = 196%)

Licznik 2 typ				
Parametry punktu pomiarowego procedury	$\varepsilon_1, \%$	$\varepsilon_2, \%$	$\varepsilon_3, \%$	$\varepsilon_{gr}, \%$
0,05 $I_b, \cos\varphi = 1$	1,235	1,200	1,190	1
0,1 $I_b, \cos\varphi = 1$	33,120	33,136	33,177	1
0,5 $I_b, \cos\varphi = 1$	1,139	1,133	1,137	1
1 $I_b, \cos\varphi = 1$	7,052	7,014	7,027	1
1 $I_b, \cos\varphi = 0,5$	10,927	10,775	10,759	1
2 $I_b, \cos\varphi = 1$	1,718	1,727	1,732	1

Tabela 6. Zestawienie błędów wskazań licznika typu 2 dla odkształconych prądów obciążenia (THD = 34%)

Licznik 2 typ				
Parametry punktu pomiarowego procedury	$\varepsilon_1, \%$	$\varepsilon_2, \%$	$\varepsilon_3, \%$	$\varepsilon_{gr}, \%$
0,05 $I_b, \cos\varphi = 1$	0,234	0,220	0,217	1
0,1 $I_b, \cos\varphi = 1$	0,204	0,262	0,243	1
0,5 $I_b, \cos\varphi = 1$	0,303	0,301	0,313	1
1 $I_b, \cos\varphi = 1$	0,418	0,431	0,450	1
1 $I_b, \cos\varphi = 0,5$	1,951	1,915	1,892	1
2 $I_b, \cos\varphi = 1$	0,459	0,477	0,486	1

Gdy w instalacji elektrycznej budynku jest przeważającą liczbą odbiorników o dużym stopniu nieliniowości, takich jak zasilacze impulsowe i lampy LED, wówczas błędy liczników energii mają duże wartości i w szczególnych przypadkach mogą przekraczać wartości dopuszczalne wynikające z klasy dokładności wspomnianych liczników [17]. Taka sytuacja ma miejsce głównie w przypadku obciążeń o małej mocy i urządzeń znajdujących się w trybie czuwania [18].

Podsumowanie

Podczas badań przeprowadzonych dla odbiorników nieliniowych błędy wskazań liczników energii elektrycznej powodowane odkształceniami prądów odbiornika o współczynniku THD < 50% najczęściej mieściły się w dopuszczalnych granicach niepewności pomiaru. Sytuacja wyraźnie zmieniła się dla małych prądów obciążenia ($I < 0,1 I_b$) oraz większych współczynników THD (THD > 50%). Błędy wskazań elektronicznych liczników energii elektrycznej, wywołane odkształceniami prądów odbiornika przy wartościach poniżej 10% prądu bazowego licznika, bardzo często dla silnie nieliniowych odbiorników (THD > 50%) znacząco przekraczają dopuszczalne wartości (licznik najczęściej rejestruje zbyt duże wartości pobranej energii).

Przekroczenia dopuszczalnych błędów liczników energii elektrycznej stosowanych w systemach automatyki budynkowej występowały również, gdy odbiorniki wykazywały charakter indukcyjny (punkt procedury pomiarowej wykonany dla $\cos\varphi = 0,5$). Dla większości przebadanych liczników oraz odbiorników błędy wskazań w takim przypadku przekraczały wartości dopuszczalne.

W artykule przedstawiono jedynie przykładowe wyniki wykonanych badań, ale zarówno one, jak i wiele pozostałych otrzymanych wyników badań wzorcowania nowoczesnych liczników energii elektrycznej [18] wskazują na fakt, że obecna procedura wzorcowania takich liczników [19] zakładająca wyłącznie pomiary dla różnych wartości tylko prądów sinusoidalnych, nie weryfikuje w sposób

obiektywny błędów wskazań. Ponieważ energooszczędne, nieliniowe odbiorniki energii elektrycznej oraz elektroniczne liczniki tej energii są już powszechnie stosowane celowym wydaje się badanie takich liczników również przy oddziaływaniu na nie prądów odkształconych.

Autorzy:

dr inż. Artur Skórkowski, Politechnika Śląska, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: Artur.Skorkowski@polsl.pl

dr inż. Marcin Zygmantowski, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Marcin.Zygmantowski@polsl.pl

LITERATURA

- [1] F. R. Clenitiaa, E. Ilakya, G. S. Preetha and B. Meenakshi, "Enhanced digital energy meter," 2017 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPEIC), 2017, pp. 588-591.
- [2] V. Preethi and G. Harish, "Design and implementation of smart energy meter," 2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), 2016.
- [3] F. Leferink, C. Keyer, A. Melentjev, "Static energy meter errors caused by conducted electromagnetic interference", IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, Volume: 5, Issue: 4, 2016.
- [4] H. Farhangi, "The Path of the Smart Grid", IEEE Power & Energy Mag. Vol. 8 Nr 1, Jan/Febr 2010.
- [5] L. S. Czarnecki, "Comparison of instantaneous reactive power p-q theory with theory of the current's physical components", Archiv für Elektrotechnik, Vol. 85, No. 1, pp. 21-28, February 2003.
- [6] M. Aredes, E. H. Watanabe, "Compensation of non-periodic currents using the instantaneous power theory", IEEE PES Summer Meeting, Seattle, pp. 994-998, July 2000.
- [7] L. S. Czarnecki, „Harmonics and power phenomena”, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, John Wiley & Sons, Inc., Supplement 1, pp. 195-218, 2000.
- [8] International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM).
- [9] N. Zhou, J. Wang, Q. Wang, "A novel estimation method of metering errors of electric energy based on membership cloud and dynamic time warping" IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8 (3): 1318-1329.
- [10] B. Pamulaparthi, G. P. Gerdan, "Method, system and device of phase enable or disable functionality in a meter": U.S. Patent 9,197,066 [P]. 2015-11-24.
- [11] S. Arôte, G. N. Mulay, A. Khaparde, "Design and Implementation of Smart Three Phase Energy Meter." Proc. 2016 International Conf. on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE), Chengdu, China, 44-49, 2017.
- [12] A. Olencki, P. Mróz, "Testing of energy meters under three-phase determined and random nonsinusoidal conditions." Metrol. Meas. Syst., 21(2), 217-232, 2014.
- [13] <https://www.calmet.com.pl/images/pdf/C300-Power-Calibrator-Presentation-EN.pdf>
- [14] H. Songxue, L. Yuyou, X. Yunying, W. Shunchao and X. Dan, "Analysis and optimization of calibration method of digital energy meter", IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 887 (2017) 012034.
- [15] <https://www.sonel.pl/en/product/power-quality-analyzer-sonel-pqm-710>
- [16] <https://webstore.iec.ch/publication/22270>
- [17] Directive 2014/32/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of measuring instruments.
- [18] A. Skórkowski, M. Kampik, K. Musioł, A. Nocoń, "The errors of electronic energy meters that measure energy consumed by LED lighting", Energies, MDPI, vol. 15, nr 9, 2022, pp. 1-10.
- [19] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 7 stycznia 2008 r. w sprawie wymagań, którym powinny odpowiadać liczniki energii elektrycznej czynnej prądu przemiennego oraz szczegółowego zakresu sprawżeń wykonywanych podczas prawnej kontroli metrologicznej tych przyrządów pomiarowych.