

doi:10.15199/48.2024.12.18

Analiza Wpływu Składowych Harmonicznych na Pomiar Energii Licznikiem Elektronicznym – Studium Przypadku

Streszczenie. Artykuł przedstawia badania dotyczące pomiaru energii za pomocą konwencjonalnych liczników energii elektrycznej z różnymi obwodami wejściowymi. Badania przeprowadzono w zakresie częstotliwości składowych harmonicznych napięcia i prądu do 2,5 kHz (do 50. składowej harmonicznej), uwzględniając różne kierunki przepływu energii. Opisano metodę pomiaru, stanowisko badawcze oraz analizę wyników.

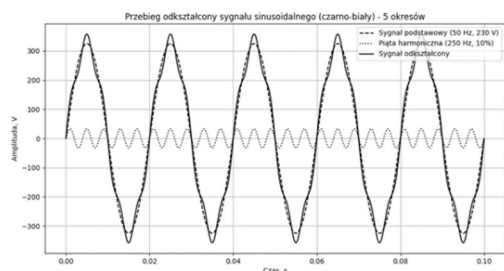
Abstract. The article presents research on energy measurement using conventional electric energy meters with various input circuits. The research was conducted in the frequency band of harmonic components of voltage and current up to 2.5 kHz (up to the 50th harmonic), considering different directions of energy flow. The measurement method, test setup, and analysis of results are described. (Analysis of the Impact of Harmonic Components on Energy Measurement by an Electronic Meter – A Case Study).

Słowa kluczowe: liczniki energii, składowe harmoniczne, błąd pomiaru energii, dokładność.

Keywords: electricity meters, harmonics, metering error, accuracy.

1. Wstęp – motywacja do badań

W idealnej sieci energetycznej mielibyśmy do czynienia z elektrycznym sygnałem sinusoidalnie zmiennym o częstotliwości znamionowej 50 Hz. W rzeczywistych sieciach energetycznych odbiorcy prądu powszechnie stosują nieliniowe odbiorniki energii, do których zaliczamy np. komputery, telewizory, urządzenia audio-wideo, nowoczesne źródła światła oraz inne urządzenia wyposażone w układy przetwarzania energii. Innymi słowy, urządzenia te zawierają takie elementy, które odkształcają przebiegi sinusoidalne. Popularne zasilacze impulsowe generują prądy o kształcie znacząco odbiegającym od sinusoidy, co objawia się szerokim pasmem częstotliwości w widmie sygnału. Skutkuje to powstawaniem składowych harmonicznych w sygnale prądowym i napięciowym wywołujących pogorszenie parametrów jakościowych zasilających sieci energetycznych. Przykładowy przebieg sinusoidalny odkształcony piątą składową harmoniczną został przedstawiony na rysunku 1.



Rys. 1. Przebieg odkształcony sygnału sinusoidalnego

W ostatnich latach opublikowano wiele artykułów dotyczących pomiarów energii przy przebiegach odkształconych [1,2,3,4,5,6].

Autorzy tych artykułów starali się określić wpływ odkształceń wywołanych przez współczesne odbiorniki na pomiar energii elektrycznej czynnej dokonywany przez liczniki energii elektrycznej. Znaczący wpływ takich zakłóceń na pomiar energii, powodujący zawyżenie wskazań pomiarów, wywołał zainteresowanie opinii publicznej tym tematem. Jest to zrozumiałe, ponieważ w praktyce dostawcy energii są monopolistami na danym terenie i jednocześnie właścicielami liczników energii, które instalują u swoich klientów [7]. Taka sytuacja może prowadzić do spekulacji, że

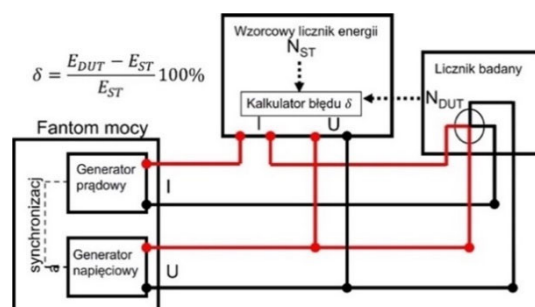
liczniki mogą być dobierane na niekorzyść odbiorcy energii [8,9,10].

Celem badań opisanych w niniejszym artykule jest ustalenie, który parametr przebiegów odkształconych - składowa harmoniczna, amplituda czy faza - powoduje znaczące anomalie w pomiarze energii przez licznik. Skupiono się na zbadaniu wpływu pojedynczych składowych harmonicznych o różnych rzędach w sygnale prądowym i napięciowym.

2. Opis stanowiska pomiarowego

W celu przeprowadzenia pomiarów zbudowano stanowisko składające się ze źródła symulującego moc (fantom mocy, typ 8100-3P), wzorcowego licznika energii (typ RD-22, RD-33, COM5003) oraz licznika badanego. Źródło typu 8100-3P generowało odpowiednie sygnały napięciowe i prądowe o częstotliwości 50 Hz. Do tych sygnałów dodawano pojedynczą składową harmoniczną o żądanej częstotliwości, amplitudzie i fazie.

Do sterowania przyrządami pomiarowymi oraz akwizycji wyników zastosowano oprogramowanie LabView. Rysunek 2 i rysunek 3 przedstawiają odpowiednio schemat blokowy stanowiska oraz jego zdjęcie.



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego



Rys. 3. Fotografia układu pomiarowego

Energię pobraną (importowaną) w obwodzie symulowano poprzez ustawienie kąta przesunięcia fazowego pomiędzy prądem a napięciem na wartość 0° . Energię wytworzoną (wyeksportowaną) symulowano poprzez ustawienie kąta przesunięcia fazowego na 180° .

Do badań wybrano pięć liczników użytkowych klasy B (1%), które są montowane w Polsce. Liczniki te charakteryzują się różnymi układami kondycjonującymi w torach prądowych. Spośród wybranych liczników, cztery były licznikami elektronicznymi.

Stanowisko realizuje metodę bezpośrednią, w której błąd względny pomiaru energii przez licznik badany, δ , obliczany jest według wzoru (1). Błąd ten jest mierzony przez wzorcowe liczniki energii i odczytywany za pomocą autorskiego oprogramowania napisanego w środowisku Labview.

$$(1) \quad \delta = \frac{E_{DUT} - E_{REF}}{E_{REF}} 100\%$$

gdzie: E_{DUT} – energia zmierzona przez licznik wzorcowany, E_{REF} – energia zmierzona przez licznik wzorcowy.

3. Wyniki eksperymentów

Wynikami pomiarów są błędy względne pomiaru energii licznika badanego w stosunku do licznika wzorcowego, wyrażone w procentach w funkcji rzędu składowej harmonicznej. Rezultaty przedstawiono na wykresach (Rys. 4-8), a w tabelach 1-5 zestawiono wartości maksymalne i minimalne błędów oraz różnice pomiędzy nimi. Dla porównania przeprowadzono również pomiary licznika indukcyjnego L4. Wszystkie pomiary wykonano przy napięciu i natężeniu prądu nominalnym według oznaczeń na badanym liczniku, częstotliwości 50 Hz oraz przesunięciu fazowym między prądem a napięciem wynoszącym 0° i 180° . Wartość składowych harmonicznych w sygnale prądowym i napięciowym ustalono na 10% wartości skutecznej, co przekracza normy PN-EN 50160, jednak nie w sposób krytyczny. Największe różnice pomiędzy błędami nie przekraczały 1,3% dla obu kierunków przepływu energii. Niepewność rozszerzona pomiaru wyniosła od 0,032% do 0,092% i została obliczona według wzoru (2).

$$(2) \quad U = k \sqrt{\left(\frac{u_{STD}}{\sqrt{N}}\right)^2 + \left(\frac{u_{roz}}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{u_{gr}}{\sqrt{3}}\right)^2}$$

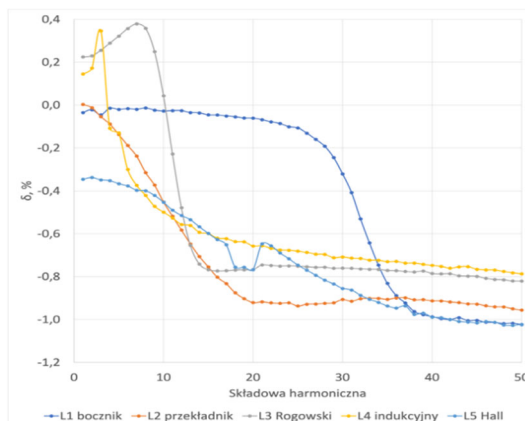
gdzie: U – niepewność rozszerzona pomiaru, k – współczynnik rozszerzenia, u_{STD} – odchylenie standardowe z $N = 12$ pomiarów, u_{roz} – składnik niepewności związany z rozdzielczością, u_{gr} – składnik niepewności związany z błędem granicznym ze specyfikacji.

Tabela 1. Wartości maksymalne, minimalne oraz rozstęp błędów liczników użytkowych w paśmie do 50. składowej harmonicznej dla energii pobranej (Rys. 4)

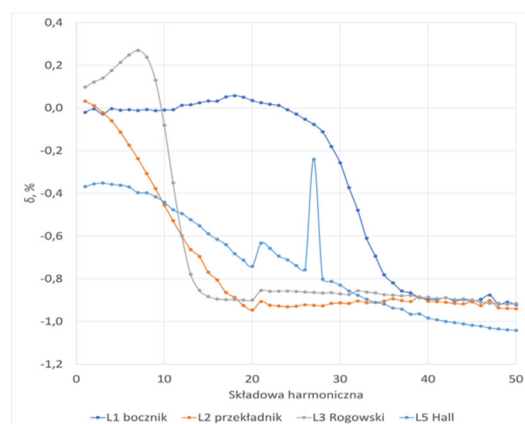
Licznik	Rodzaj sensora prądowego	δ_{min} %	δ_{max} %	$\delta_{max} - \delta_{min}$ %
L1	Bocznik	-1,023	-0,013	1,010
L2	Przekładnik	-0,955	0,003	0,958
L3	Cewka Rogowskiego	-0,820	0,379	1,199
L4	Cewka prądowa licznika indukcyjnego	-0,786	0,346	1,133
L5	Czujnik Halla	-1,027	-0,338	0,689

Podstawowymi składnikami niepewności pomiaru są: składowa typu A tj. odchylenie standardowe wartości średniej z 12 pomiarów u_{STD} oraz składowa typu B na którą

składają się pozostałe składniki niepewności takie jak niepewność pomiaru związana z rozdzielczością u_{roz} oraz błąd graniczny przyrządu wzorcowego w obecności składowych harmonicznych u_{gr} .



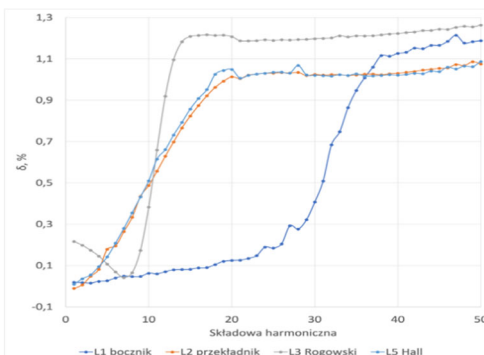
Rys. 4. Charakterystyki częstotliwościowe błędów pomiaru energii liczników w funkcji rzędu harmonicznej dla kierunku przepływu energii pobranej dla składowej podstawowej i składowych harmonicznych



Rys. 5. Charakterystyki częstotliwościowe błędów pomiaru energii liczników w funkcji rzędu harmonicznej dla kierunku przepływu energii wytworzonej dla składowej podstawowej i składowych harmonicznych

Tabela 2. Wartości maksymalne, minimalne oraz rozstęp błędów liczników użytkowych w paśmie do 50. składowej harmonicznej dla energii wyeksportowanej (Rys. 5)

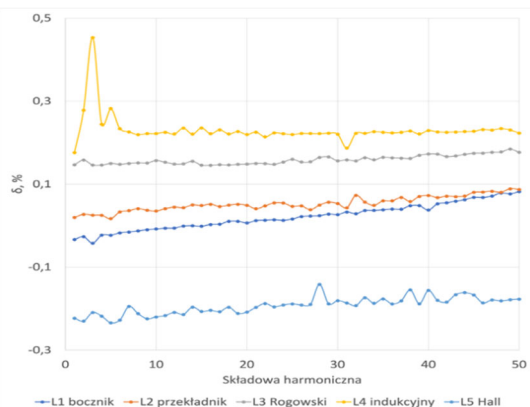
Licznik	Rodzaj sensora prądowego	δ_{min} %	δ_{max} %	$\delta_{max} - \delta_{min}$ %
L1	Bocznik	-0,922	0,057	0,979
L2	Przekładnik	-0,946	0,031	0,978
L3	Cewka Rogowskiego	-0,921	0,269	1,190
L5	Czujnik Halla	-1,042	-0,241	0,801



Rys. 6. Charakterystyki częstotliwościowe błędów pomiaru energii liczników w funkcji rzędu harmonicznej dla kierunku przepływu energii wytworzonej dla składowej podstawowej i pobranej składowych harmonicznych

Tabela 3. Wartości maksymalne, minimalne oraz rozstęp błędów liczników użytkowych w paśmie do 50. składowej harmonicznej dla jednoczesnego przepływu energii w dwóch kierunkach (Rys. 6)

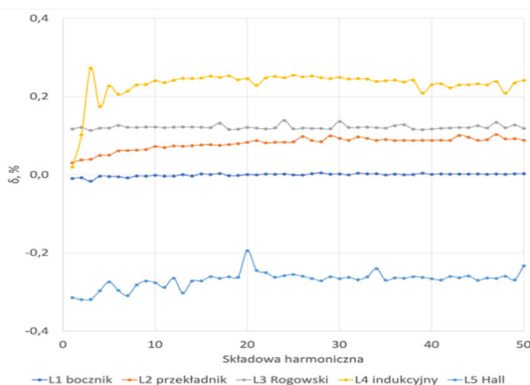
Licznik	Rodzaj sensora prądowego	δ_{\min} %	δ_{\max} %	$\delta_{\max} - \delta_{\min}$ %
L1	Bocznik	1,214	0,015	1,199
L2	Przekładnik	1,086	-0,010	1,096
L3	Cewka Rogowskiego	1,263	0,041	1,222
L5	Czujnik Halla	1,086	0,009	1,077



Rys. 7. Charakterystyki częstotliwościowe błęd pomiaru energii liczników w funkcji rzędu harmonicznej dla kierunku przepływu energii pobranej dla składowej podstawowej i składowych harmonicznnych obecnych tylko w napięciu na poziomie 10 %

Tabela 4. Wartości maksymalne, minimalne oraz rozstęp błędów liczników użytkowych w paśmie do 50. składowej harmonicznej dla kierunku energii pobranej dla składowej podstawowej i składowych harmonicznnych obecnych tylko w napięciu na poziomie 10 % (Rys. 7)

Licznik	Rodzaj sensora prądowego	δ_{\min} %	δ_{\max} %	$\delta_{\max} - \delta_{\min}$ %
L1	Bocznik	0,082	-0,043	0,124
L2	Przekładnik	0,089	0,017	0,072
L3	Cewka Rogowskiego	0,184	0,145	0,039
L4	Cewka prądowa licznika indukcyjnego	0,453	0,176	0,277
L5	Czujnik Halla	-0,142	-0,234	0,093



Rys. 8. Charakterystyki częstotliwościowe błęd pomiaru energii liczników w funkcji rzędu harmonicznej dla kierunku przepływu energii pobranej dla składowej podstawowej i składowych harmonicznnych obecnych tylko w prądzie na poziomie 10 %

4. Dyskusja wyników

Gdy składowe harmoniczne występowały jednocześnie w obu kanałach - prądowym i napięciowym, charakterystyki błęd pomiaru energii pobranej (import) w funkcji rzędu składowej harmonicznej, przy założeniu, że energia zarówno składowej podstawowej (50 Hz), jak i składowych harmonicznnych przenoszona jest w tym samym kierunku (Rys. 4 i Rys. 5), przybierają kształt charakterystyki częstotliwościowej filtra dolnoprzepustowego. Wynika to z faktu, że liczniki wzorcowe miały szersze pasmo

częstotliwościowe (zgodnie z instrukcją obsługi przyrządów [12][13]) niż liczniki badane. Liczniki wzorcowe mogły mierzyć energię harmonicznnych do 50. składowej harmonicznej, tj. do 2,5 kHz. Układy wejściowe badanych liczników ograniczały wyższe harmoniczne, co prowadziło do zaniżenia pomiaru energii w porównaniu do liczników wzorcowych. Z tego powodu ich charakterystyki częstotliwościowe zbiegały do wartości ujemnych.

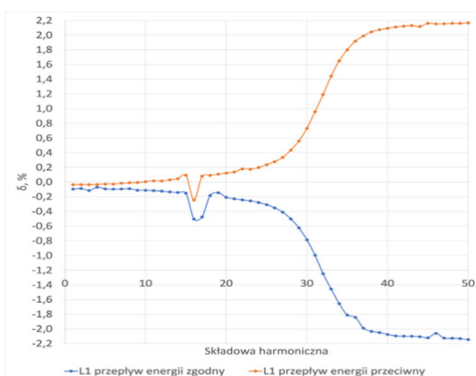
Tabela 5. Wartości maksymalne, minimalne oraz rozstęp błędów liczników użytkowych w paśmie do 50. składowej harmonicznej dla kierunku energii pobranej dla składowej podstawowej i składowych harmonicznnych obecnych tylko w prądzie na poziomie 10 % (Rys. 8)

Licznik	Rodzaj sensora prądowego	δ_{\min} %	δ_{\max} %	$\delta_{\max} - \delta_{\min}$ %
L1	Bocznik	0,005	-0,017	0,022
L2	Przekładnik	0,103	0,030	0,073
L3	Cewka Rogowskiego	0,139	0,113	0,025
L4	Cewka prądowa licznika indukcyjnego	0,272	0,019	0,253
L5	Czujnik Halla	-0,195	-0,320	0,125

W przeprowadzonych eksperymentach przyjęto 10 % zawartości harmonicznnych w sygnale napięciowym i prądowym. Ponieważ moc czynna przenoszona przez składowe harmoniczne jest sumą iloczynów wartości skutecznych napięcia i prądu danej składowej harmonicznej (wzór (3)), to w przypadku, gdy energia składowej podstawowej płynie w przeciwnym kierunku niż energia składowych harmonicznnych (Rys. 6) kształt charakterystyk błęd pomiaru energii przypomina charakterystykę filtra górnoprzepustowego. Można to wyjaśnić analogicznie do sytuacji opisanej wcześniej, z tą różnicą, że ponieważ energia składowych wyższych harmonicznnych nie była odejmowana od całkowitej energii mierzonej przez licznik badany, który rejestrował zawyżoną wartość energii o około +1 %.

$$(3) \quad P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\varphi_n)$$

gdzie: V_n – wartość skuteczna n-tej harmonicznej napięcia, I_n – wartość skuteczna n-tej harmonicznej prądu, φ_n – kąt przesunięcia fazowego między n-tą harmoniczną prądu i napięcia.



Rys. 9. Charakterystyki częstotliwościowe błęd pomiaru energii liczników w funkcji rzędu harmonicznej dla dwóch jednoczesnych przepływów energii przy zawartości harmonicznnych w napięciu 20 %, a w prądzie 10 %

Zweryfikowano również przypadki, gdy zawartość składowych harmonicznnych wyniosła 20 % w sygnale napięciowym i 10 % w sygnale prądowym, zarówno dla sytuacji, gdy energia składowej podstawowej i składowych harmonicznnych przepływała w tym samym kierunku, jak i w przeciwnym. Podobnie jak w opisanych wcześniej

przypadkach, charakterystyki błędów pomiaru energii w funkcji rzędu harmonicznej, zgodnie ze wzorem (3), zbiegały do wartości iloczynu amplitud harmonicznych, tj. -2 % dla tego samego kierunku przepływu energii i +2 % dla przeciwnych kierunków (Rys. 9).

Charakterystyka licznika indukcyjnego L4 odpowiada opisanemu w literaturze [14].

W przypadku obecności składowych harmonicznych tylko w sygnale napięciowym lub tylko w sygnale prądowym (Rys. 7 i 8) ich wpływ na wynik błędu pomiaru energii przez licznik badany był marginalny (Tab. 4 i 5). To również jest konsekwencją wzoru (3), gdyż gdy jeden ze składników iloczynu jest równy zeru to ich iloczyn jest równy zeru.

W przeprowadzonych eksperymentach nie stwierdzono ekstremalnych przekroczeń błędów liczników, które wyniosłyby dziesiąte lub setne części procenta.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone eksperymenty ujawniają nadal aktualny problem precyzyjnego pomiaru energii czynnej w obwodach z odkształceniami prądów i napięć. Wartości niepewności, a w niektórych publikacjach także błędów pomiaru energii, są często większe niż te podawane przez autorów, co jest istotne dla praktyki pomiarowej [3,4,5,6]. Wartości błędów zależą od konstrukcji licznika energii, obwodów wejściowych oraz stosowanych algorytmów obliczeniowych. Przeprowadzone badania podkreślają znaczącą rolę obwodów wejściowych. Autorzy planują kontynuację prac mających na celu określenie poziomu niepewności pomiaru, który można uznać za akceptowalny dla sygnałów niesinusoidalnych. Kolejnym ważnym obszarem są prace nad opracowaniem standardu oceny metrologicznej liczników energii czynnej.

Autorzy: mgr inż. Grzegorz Sadkowski, Szkoła Doktorska AGH w Krakowie, Zakład Elektryczności i Promieniowania w Głównym Urzędzie Miar, ul. Elektoralna 2, 00-139 Warszawa, E-mail: grzegorz.sadkowski@gum.gov.pl; prof. dr hab. inż. Andrzej Bień, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: abien@agh.edu.pl.

LITERATURA

[1] Leferink F., Keyer C., Melentjev A., Static Energy Meter Errors Caused by Conducted Electromagnetic Interference, *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, Vol. 5, Issue

[2] Skórkowski A., Kampik M., Musioł K., Nocoń A., The Errors of Electronic Energy Meters That Measure Energy Consumed by LED Lighting, *Energies* (2022), 15(9), 3254. <https://doi.org/10.3390/en15093254>.

[3] Van Leeuwen R., Kok G., Van den Brom H.E., Rietveld G., Current Waveforms of Household Appliances for Advanced Meter Testing, (2019) *IEEE 10th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*.

[4] Ten Have B., Hartman T., Moonen N., Keyer C., Leferink F., Faulty Readings of Static Energy Meters Caused by Conducted Electromagnetic Interference from a Water Pump, *17th International Conference on Renewable Energies and Power Quality* (2019) - University of La Laguna, Santa Cruz de Tenerife, Spain.

[5] Van den Brom H.E., Marais Z., Hoogenboom D., Van Leeuwen R., Rietveld G., A Testbed for Static Electricity Meter Testing with Conducted EMI, (2019) *International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*.

[6] Marais Z., Van den Brom H.E., Rietveld G., Van Leeuwen R., Hoogenboom D., Rens J., Sensitivity of Static Energy Meter Reading Errors to Changes in Non-Sinusoidal Load Conditions, (2019) *International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*.

[7] Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej Warszawa, z dnia 28 kwietnia 2023 r. Poz. 819, Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 22 marca 2023 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego Rozdział 4 paragraf 12 punkt 3 podpunkt 2.

[8] W.J., Liczniki prądu oszukują na twoją niekorzyść! <https://www.fakt.pl/pieniadze/finanso/liczniki-pradu-oszukujana-niekorzysc-klienta/7bq5r43>.

[9] Osiński P., Liczniki energii przekłamują odczyty. Szokujące odkrycie naukowców, <https://superbiz.se.pl/wiadomosci/liczniki-energii-przeklamuja-odczyty-szukajace-odkrycie-naukowcow-aa-HWZy-jGEt-vvdD.html>.

[10] Kowalska A., Czy nowe liczniki prądu oszukują?, <https://tumw.pl/czy-nowe-liczniki-pradu-oszukuja>.

[11] PKN, Polska Norma PN-EN 50160:2010 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych, 23.10.2014.

[12] Radian Research, Inc., RD-33 Operations Manual 944033.C, <https://manualzz.com/doc/28676844/rd-33-manual>

[13] Radian Research, Inc., Radian Research RD-22 332 Primary Transfer Standard Operations Manual 944022.A, <https://manualzz.com/doc/32470859/rd-22-manual?p=2>

[14] Kuśmierk Z., Pomiar mocy i energii w układach elektroenergetycznych, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1994.