

Zastosowanie przekładnika prądowego ułamkowej mocy do pomiaru napięcia przemiennego

Streszczenie. W artykule przedstawiono czujnik napięcia zbudowany w oparciu o przekładnik prądowy ułamkowej mocy oraz rezystory ograniczające prąd w obwodzie wejściowym. Dzięki zastosowaniu małego przekładnika prądowego uzyskano separację galwaniczną pomiędzy obwodem wejściowym i wyjściowym. Zastosowanie nowoczesnych przekładników ułamkowej mocy umożliwia pomiar chwilowych wartości napięcia odkształconego przy minimalnym błędzie kątowym i amplitudowym. Czujnik nie wymaga dodatkowego zasilania.

Abstract. The article presents a voltage sensor built on the basis of a fractional power current transformer and resistors limiting the current in the input circuit. Thanks to the use of a small current transformer, galvanic separation was obtained between the input and output circuits. The use of modern fractional power transformers enables the measurement of instantaneous values of distorted voltage with minimal angular and amplitude errors. The sensor does not require additional power. (**Use of a fractional power current transformer to measure AC voltage**)

Słowa kluczowe: czujnik napięcia, przekładnik prądowy, rdzeń magnetyczny, błąd amplitudowy i kątowy

Keywords: voltage sensor, current transformer, magnetic core, amplitude and angular error

Wprowadzenie

W laboratoriach i w przemyśle często zachodzi konieczność cyfrowego pomiaru zmiennego napięcia elektrycznego przeznaczonego do stosowania w różnego rodzaju układach pomiarowych. W układach tych wymagany jest pomiar napięcia i kształtu przebiegu w szerokim zakresie zmian wartości oraz separacja galwaniczna. Cyfrowe pomiary napięcia wykorzystywane są m.in. w:

- pomiarach mocy w obwodach o przebiegach odkształconych w układach z przetwornicami mocy z pełną izolacją galwaniczną np. mierniki mocy,
- pomiarach napięcia na autotransformatorze w układach laboratoryjnych m.in. w laboratoriach dydaktycznych,
- układach badawczych, np. pomiarach właściwości transformatorów, maszyn elektrycznych, rdzeni magnetycznych o dużym zapotrzebowaniu na moc, przyłączanych bezpośrednio do sieci,
- coraz częściej stosowanych układach cyfrowej akwizycji danych z ograniczonym napięciem wejściowym lub pomiarami oscyloskopowymi (oscyloskop posiada łączną masę przewodów sygnałowych i uziemienie mogące powodować zwarcie) gdzie konieczne jest zastosowanie separacji galwanicznej.

Pomiary napięcia wykonuje się najczęściej za pomocą różnego rodzaju rezystancyjnych lub pojemnościowych dzielników napięcia [1, 2, 3]. Stosowanie dzielników napięcia wiąże się z koniecznością stosowania dodatkowych urządzeń, gdyż same w sobie nie zapewniają separacji galwanicznej. W tym celu wykorzystywane są różne przetworniki jak np. przetwornica napięcia na częstotliwość, gdzie sygnał przesyłany jest za pomocą światła. Mniej kosztowne rozwiązania przetwarzania optycznego ograniczają się do wąskiego zakresu napięć i wykazują znaczne przesunięcie fazowe. Nowoczesne czujniki optyczne wysokonapięciowe działają w szerokim zakresie napięć i częstotliwości [4, 5, 6, 7] jednak wymagają dodatkowego skomplikowanego oprzyrządowania i są kosztowne stąd, rzadko są spotykane w urządzeniach energetycznych. W przypadku niskich napięć najpowszechniejszymi metodami są indukcyjne przekładniki napięciowe, dzielniki rezystancyjne, czujniki napięcia z przetwornikami Halla oraz pętla sprzężenia zwrotnego [8, 9]. Czujniki napięcia z przetwornikami Halla są obecnie produkowane na napięcia do 6 kV [10].

Czujniki napięcia z przetwornikami Halla, przekładniki napięciowe i przetworniki optyczne zapewniają separację galwaniczną. Każde z rozwiązań ma swoje zalety i wady. Przekładniki napięciowe pracują w dość ograniczonym zakresie mierzonego napięcia [11]. Przetworniki optyczne jak i czujniki napięcia z przetwornikami Halla wymagają dodatkowych układów zasilających. W artykule przedstawiono czujnik napięcia zapewniający separację galwaniczną i niewymagający dodatkowego zasilania.

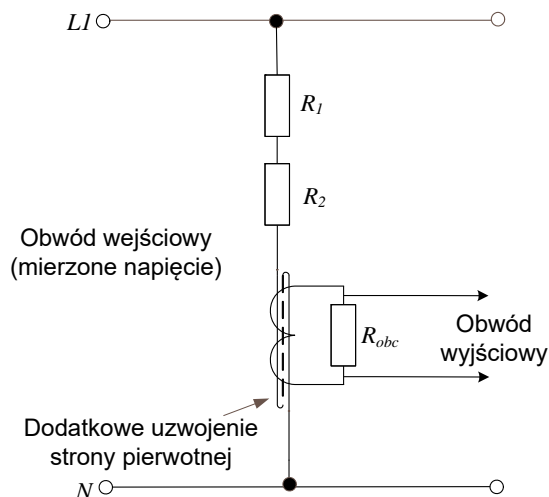
Czujnik napięcia

Jedną z metod pomiaru wysokiego napięcia jest metoda pomiaru prądu płynącego przez rezystor o dużej rezystancji, tzw. dzielnik stałorezystancyjny [1, 12]. W proponowanym czujniku napięcia mikroamperomierz zastąpiono przekładnikiem prądowym ułamkowej mocy [13, 14]. Przekładniki takie wykorzystuje się np. w licznikach energii elektrycznej. Rdzenie tych przekładników wykonywane są między z innymi taśm amorficznych, nanokrystalicznych lub ze stopu niklu i żelaza [15]. Przekładniki z rdzeniami ze stopów amorficznych i nanokrystalicznych wykazują przesunięcia fazowe rzędu kilku stopni. Przesunięcie to jest jednak stałe i może łatwo być skorygowane np. programowo. Natomiast te wykonane ze stopu niklu i żelaza charakteryzują się bardzo małym maksymalnym przesunięciem fazowym o zakresie zmienności od 0,11 do 0,12 stopnia, a ich błąd amplitudowy w temperaturze otoczenia 25°C zawiera się w granicach od 0,08% do 0,14% [13]. Ze względu na swoje właściwości metrologiczne przekładniki z rdzeniami ze stopu niklu i żelaza wykorzystano do budowy nowego czujnika napięciowego. Konstrukcja czujnika napięciowego została opatentowana [16].

Na rysunku 1 przedstawiono dwa rezystory ograniczające wartość prądu obwodu wejściowego czujnika. Zastosowano dwa rezystory bezindukcyjne R_1 i R_2 o tolerancji 1% i wytrzymałości napięciowej 1 kV. Liczba rezystorów dobrano do wartości mierzonego napięcia w taki sposób, aby spadek napięcia na każdym z nich nie przekroczył napięcia przebicia pojedynczego rezystora. Wybór liczby rezystorów jest szczególnie istotny przy zastosowaniu czujnika do pomiarów wysokiego napięcia.

Separację galwaniczną czujnika napięcia (rys.1) zapewnia zastosowanie przekładnika prądowego ułamkowej mocy. Najmniejsza wartość prądu pierwotnego tych przekładników wynosi 6 A [13]. Strona wtórna

przekładnika zawiera 2500 zwojów i obciążana jest rezystorem zapewniającym spadek napięcia 300 mV przy nominalnym prądzie strony pierwotnej przekładnika [13]. Aby wymusić odpowiednią siłę magnetomotoryczną ($\Theta=I \cdot z$) dla znacznie mniejszego niż nominalny prądu przekładnika, po stronie pierwotnej nawinięto 80 zwojów co schematycznie przedstawiono na rysunku 1. Zastosowanie przekładnika prądowego o mocy ułamkowej z dodatkowymi uzwojeniami po stronie pierwotnej ogranicza pobór mocy czujnika i zwiększa jego czułość.

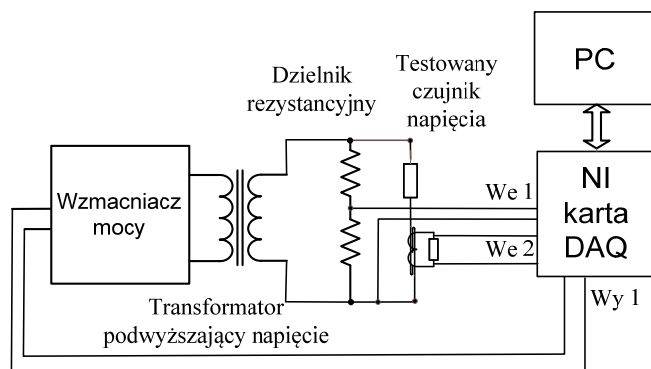


Rys.1. Schematyczne przedstawienie proponowanego czujnika [15]

Zaproponowany czujnik napięcia nie wymaga dodatkowego zasilania i zapewnia separację galwaniczną. Charakteryzuje się dużą powtarzalnością i dużą dokładnością. Błąd napięcia szczytowego nie przekracza $\pm 1,0\%$ i w razie potrzeby można go skalibrować ze znacznie większą tolerancją.

Układ pomiarowy

Do wyznaczania błędu napięciowego i przesunięcia kąтового czujnika napięcia zastosowano układ przedstawiony na rysunku 2.



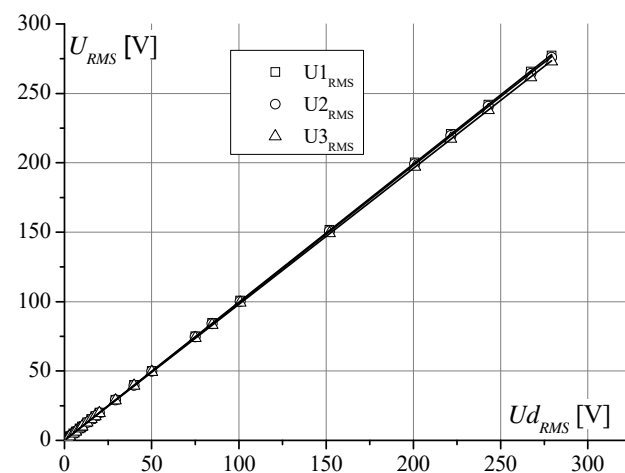
Rys.2. Schemat układu pomiarowego czujników

W układzie pomiarowym zastosowano wielofunkcyjną kartę wejścia/wyjścia o rozdzielczości 16 bitów. Sygnał z karty pomiarowej podawany jest na wejście wzmacniacza mocy. Napięcie ze wzmacniacza podnoszone jest przez transformator podwyższający napięcie. Do wyjścia transformatora podłączono dzielnik rezystancyjny wykonany z rezystorów bezindukcyjnych oraz badany czujnik napięcia. W układzie przedstawionym na rysunku 2 separacja galwaniczna zapewniona jest przez transformator podwyższający napięcie. Umożliwia to bezpośrednie

podłączenie wyjścia dzielnika rezystancyjnego i badanego czujnika do wejścia różnicowego karty przetworników cyfrowych. W układzie zastosowano rezystancyjny dzielnik napięcia o dokładności 0,1%. Przedstawiony na rysunku 2 układ pozwala na wykonanie pomiarów w zakresie od około 0 V do 280 V wartości skutecznych.

Wyniki

Do badań przygotowano trzy podobne czujniki wykonane z przekładników prądowych ułamkowej mocy. W badanych czujnikach nie zastosowano specjalnie dobranych przekładników prądowych. Badania wykonano dla sinusoidalnego przebiegu napięcia. Na rysunku 3 przedstawiono wyniki pomiarów liniowości przetwarzania napięcia badanych czujników w odniesieniu do dzielnika rezystancyjnego. Pomiar przeprowadzono w układzie przedstawionym na rysunku 2.



Rys.3. Zależności wartości skutecznych napięć wejściowych U_{RMS} od wyjściowych U_{dRMS} trzech prototypów badanych czujników napięciowych

Czujniki napięcia mają liniową charakterystykę przetwarzania w pełnym zakresie napięcia do 280 V wartości maksymalnych, a zatem mogą być wykorzystywane do celów pomiarowych. Na rysunku 3 punkty stanowią wartości zmierzone natomiast, linie stanowią dopasowanie liniowe ze współczynnikiem R^2 w przybliżeniu równym 0,99(9). Różnicę w przekładni transformacji można ograniczyć poprzez dodatkową kalibrację jak zdefiniowano w normie dla przekładników napięciowych małej mocy (LPVT) [17]. Taka korekta jest stosunkowo łatwa do wykonania i uwzględnienia w oprogramowaniu pomiarowym lub układzie elektronicznym.

Dla przekładników LPVT w normie [16] sformułowano specyficzne wymagania dotyczące błędów pomiarowych. Skorygowany błąd przekładni ε_{corU} zdefiniowano jako [16]:

$$\varepsilon_{corU} (\%) = \frac{CF_U \cdot K_r \cdot U_s - U_p}{U_p} 100 \% \quad (1)$$

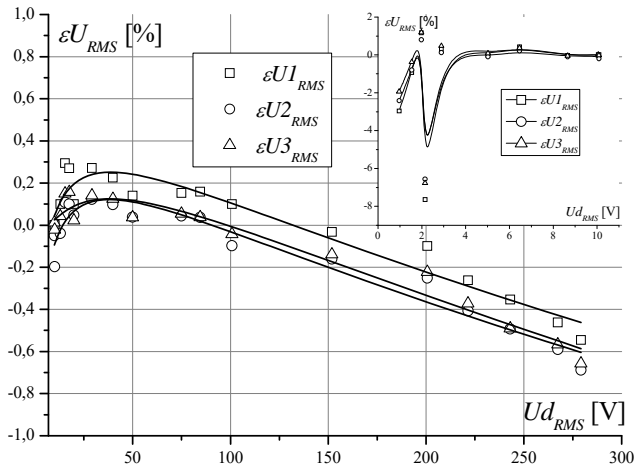
gdzie: CF_U – jest współczynnikiem korekcji współczynnika pojedynczego pasywnego LPVT, przez który należy pomnożyć znamionową przekładnię obliczoną przy obciążeniu znamionowym i częstotliwości znamionowej pojedynczego pasywnego LPVT, aby uzyskać określoną klasę dokładności, K_r – przekładnia przekładnika, U_s – wartość skuteczna napięcia po stronie wtórnej, U_p – wartość napięcia po stronie pierwotnej.

Skorygowany błąd przesunięcia fazowego φ_{ecor} jest opisany następującym wzorem [16]:

$$(2) \quad \varphi_{ecor} = \varphi_s - \varphi_p - \varphi_{cor\varphi}$$

gdzie: $\varphi_{cor\varphi}$ – indywidualne przesunięcie fazowe pasywnego LPVT, φ_s – przesunięcie fazowe napięcia po stronie wtórnej, φ_p – przesunięcie fazowe po stronie pierwotnej.

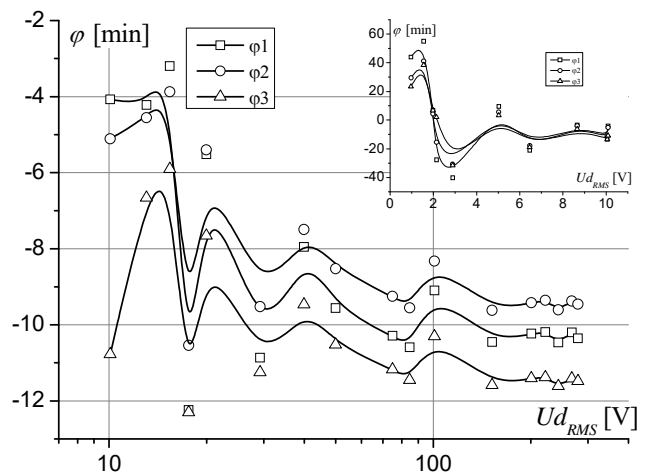
Norma [16] przewiduje zatem korektę indywidualną dla przekładników LPVT. W opracowaniu wyników pomiarowych zrezygnowano z wprowadzania korekty błędów badanych czujników, aby przedstawić także rozrzut błędów pomiędzy trzema badanymi czujnikami napięcia. Na rysunku 4 przedstawiono zależności błędów pomiaru wartości skutecznych bez uwzględnienia współczynnika korekcji CF_U .



Rys.4. Charakterystyka błędów pomiaru wartości skutecznych napięcia εU_{RMS} w zależności od napięcia mierzonego na dzielniku rezystancyjnym $U_{d_{RMS}}$ dla trzech badanych czujników napięcia 10 V do 280 V. Wykres wstawiony w górnym rogu przedstawia także zależność $\varepsilon U_{RMS} = f(U_{d_{RMS}})$ ale dla zakresu napięć od 1 V do 10 V

Błąd pomiaru wartości skutecznych napięcia czujników w odniesieniu do napięcia mierzonego na dzielniku rezystancyjnym mieści się w zakresie od -0,6% do 0,3% dla napięć powyżej 10 V. Należy podkreślić, że dla napięć powyżej 4 V, współczynnik zawartości harmonicznych (THD) przebiegów mierzonych na czujnikach napięcia wynosił 0,6%. Po przeprowadzeniu kalibracji dla każdego czujnika zakres błędów pomiarowych zawierałby się w granicach $\pm 5\%$. Charakterystykę błędów pomiaru wartości skutecznych napięcia εU_{RMS} dla zakresu napięć od 1 V do 10 V przedstawiono na rysunku 4 jako wykres wstawiony. Mierzone napięcia w tym zakresie obciążone były współczynnikiem THD dochodzącym do 2,5% ze względu na małą czułość czujników w tym zakresie napięć. Przy czym napięcie 10 V stanowi ok. 5% zakresu pomiarowego wartości skutecznych badanych czujników. Dodatkowo błąd εU_{RMS} zawierał się w granicach od -8% do 1% i charakteryzował się znacznym rozrzutem wartości pomiarowych. Zmierzono także błędy czujników dla wartości maksymalnych. Dla zakresu napięć od 1 V do 10 V zawierały się w granicach od -9% do -1% natomiast od -1% do 0,2% dla zakresu mierzonych napięć powyżej 10 V. Rozrzut mierzonych wartości błędów pomiaru wartości skutecznych jest podobny do rozrzutu wartości błędów pomiaru wartości skutecznych.

Wyniki pomiaru błędu przesunięcia fazowego φ bez uwzględniania korekty $\varphi_{cor\varphi}$ przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Charakterystyka błędów kątowych φ w zależności od napięcia mierzonego na dzielniku rezystancyjnym $U_{d_{RMS}}$ dla trzech badanych czujników napięcia 10 V do 280 V. Wykres wstawiony w górnym rogu przedstawia także zależność $\varphi = f(U_{d_{RMS}})$ dla zakresu napięć od 1 V do 10 V

Podobnie jak w przypadku błędu pomiaru wartości skutecznych tak i w przypadku błędu przesunięcia fazowego dla napięć powyżej 10 V kąt przesunięcia pomiędzy przebiegiem pierwotnym i wtórnym jest prawie stały i zawiera się w granicach 9 min dla czujnika 1 i 7 min dla pozostałych dwóch (rys. 5). Należy podkreślić omawiany zakres napięć czujników stanowi 5% (ok. 10 V) do 120% (ok. 280 V) ich napięcia znamionowego i pokrywa się z wymaganym przez normy zakresem pomiarowym przekładników prądowych. Błąd przesunięcia fazowego można łatwo skorygować indywidualnie dla każdego czujnika np. programowo do wartości zmian w granicach ± 5 min. Proponowany czujnik posiada zdolność odpowiedniego przetwarzania fazowego mierzonego przebiegu, co ma kluczowe znaczenie przy pomiarach mocy lub energii. Większą dokładność można uzyskać poprzez staranny dobór przekładników prądowych.

Przykład zastosowania

Blachy elektrotechniczne są badane najpierw za pomocą aparatu Epsteina lub aparatu do pomiaru na pojedynczym arkuszu blachy. Po wykonaniu rdzenia zwykle nie jest on badany ze względu, na ich masę i wymaganą dużą moc wzbudzenia. Duże rdzenie zaprojektowane do pracy z częstotliwością wyższą niż 50 Hz można badać w układzie testowym ze wzmacniaczem, jednak takie podejście jest ograniczone mocą wzmacniacza. Zachodzi zatem konieczność zasilania układu pomiarowego bezpośrednio z sieci niskiego napięcia, jednak konieczna jest wtedy separacja galwaniczna i obniżenie napięcia do zakresu wymaganego przez cyfrowe układy pomiarowe. Proponowany czujnik napięcia zapewnia zarówno separację galwaniczną jak i obniżenie zakresu mierzonych napięć. Czujniki napięcia umożliwiają pomiar napięcia pierwotnego bezpośrednio z sieci, a osobne przekładniki prądowe umożliwiają pomiar prądu magnesującego. Dzięki małym przesunięciom fazowym można poprawnie określić moc strat rdzenia z uwzględnieniem kształtu przebiegu wielkości mierzonych. Takie rozwiązanie z powodzeniem zastosowano w urządzeniu do pomiaru dużych rdzeni przemysłowych i przedstawiono szerzej w pracy [18].

Podsumowanie

Proponowany czujnik charakteryzuje się dużą powtarzalnością i dokładnością pomiaru. Jego zaletą jest separacja galwaniczna oraz jego działanie pasywne.

Zastosowanie przekładnika prądowego i brak konieczności stosowania dodatkowego zasilania zapewnia w pełni bezpieczne warunki pracy. Dodatkową zaletą czujników, w porównaniu do tradycyjnych przekładników napięciowych są wielokrotnie niższe straty energii. Sygnały pomiarowe z sensorów są wprowadzane bezpośrednio do układów automatyki. Czujniki zastosowano w układzie trójfazowym do badania jakości dużych rdzeni magnetycznych o masie rzędu kilkuset kilogramów.

Zaletami prezentowanego systemu są:

- szeroki zakres pomiaru napięcia,
- dokładność w granicach 1% pomiaru amplitudy napięcia,
- 10-minutowy zakres błędu kąтового,
- separacja galwaniczna zapewnia bezpieczne warunki pracy ludzi i urządzeń technicznych,
- eliminacja konieczności stosowania drogich (odpornych na wysokie napięcie) przetworników pomiarowych.

Autorzy: dr hab. inż. Wojciech Pluta, Politechnika Częstochowa, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: wojciech.pluta@pcz.pl

LITERATURA

- [1] Hugh M. Ryan (Editor), High-Voltage Engineering and Testing, The Institution of Engineering and Technology; 3rd edition, (2013)
- [2] Webster J.G. (Editor), Measurement, Instrumentation, and Sensors, Handbook CRC Press (1999)
- [3] Behzadi R., Oskuoee M., Mohammadi D., Integrated electronic metering insulator for medium voltage overhead lines, *19th International Conference on Electricity Distribution*, Vienna, 21-24 (2007), paper 0118
- [4] Laurensse I.J., Koreman C.G.A., Rutgers W.R., Van der Wey A.H., Applications for optical current and voltage sensors, *Sensors and Actuators*, 17 (1989), No 1–2, 181-186
- [5] Bohnert K., Gabus P., Kostovic J., Brandle H., Optical fiber sensors for the electric power industry, *Optics and Lasers in Engineering*, 43 (2005), No 3-5, 511–526
- [6] De Maria L., Bartalesia D., Pistoni N.C., Combined Optical Sensor and Capacitor Voltage Divider Arrangement for Voltage Control in Medium Voltage Switchboard Fiber, *Procedia Engineering*, 168 (2016), 1597-1600
- [7] Sydenham P. H., Thorn R. Handbook of measuring system design, John Wiley & Sons, Ltd, (2015)
- [8] Piwowarczyk J., Wykorzystanie środowiska Matlab do oceny dokładności elektronicznych przekładników prądowych i napięciowych, *Zeszyty naukowe Politechniki Łódzkiej Elektryka*, Nr 1054 (2009), z. 120
- [9] Sulowicz M.; Ludwinek K., Tulicki, J., Depczynski, W., Nowakowski L., Practical Adaptation of a Low-Cost Voltage Transducer with an Open Feedback Loop for Precise Measurement of Distorted Voltages, *Sensors*, 19 (2019), No 5, 1071
- [10] Dane katalogowe: Voltage Transducer LV 25-P. LEM, Datasheet, 12 August 2014/version 19. Available online: <https://www.lem.com> (sierpień 2023)
- [11] IEC 60044-7, "Electronic voltage transformers", 1999-12, first edition
- [12] Flisowski Z., Technika wysokich napięć, WNT, Warszawa (1988)
- [13] Dane katalogowe, Current transformers for electronic electricity meters, current monitoring and protection applications, Vacuumschmelze GmbH & co. KG, Germany, [Available online (08.2023) at www.vacuumschmelze.de]
- [14] IEC 60044-8, "Electronic current transformer", Part 8 (2002)
- [15] Boll R., Weichmagnetische Werkstoffe, Publicis Corporate Publishing (1990)
- [16] Pluta W., Rygał R., Zurek S., Apparatus for measuring AC voltage with galvanic separation (in Polish: Układ do pomiaru napięcia przemiennego z separacją galwaniczną), Patent No PL420750, 2017
- [17] IEC 61869-11:2017, Instrument Transformers – Part 11: Additional requirements for low-power passive voltage transformers, Part 11 (2017)
- [18] Pluta W., Rygał R., Soiński M., Leszczyński J., Labview Based Testing System for the Aim of Construction of Energy Efficient Magnetic Cores. E3S Web of Conferences. ISSN 2267-1242 — 14 (2017) No. 01039, 1–10