

Procedura oceny dokładności transformacji indukcyjnych przekładników napięciowych w szerokim zakresie częstotliwości do wyznaczania opcjonalnych klas normy IEC 61869-1

Streszczenie. W artykule przedstawiono propozycję procedury mającej na celu wyznaczenie opcjonalnych klas dokładności indukcyjnych przekładników napięciowych zdefiniowanych w normie IEC 61869-1 z 2023 r. Podczas wstępnej oceny wykazano adekwatności zastosowania napięcia sinusoidalnego. Ten krok pozwala określić dokładnie te same wartości ich częstotliwości rezonansowych jak dla transformacji harmonicznych i interharmonicznych, jednak nie umożliwia wyznaczenia tych samych wartości błędów napięciowego i kąтового jak dla napięcia odkształconego.

Abstract. The article presents a proposal for a procedure aimed at determining optional accuracy classes of inductive voltage transformers defined in the IEC 61869-1 standard of 2023. During the initial assessment, the adequacy of the use of sinusoidal voltage was demonstrated. This step allows to specify exactly the same values of their resonance frequencies as for harmonics and interharmonics transformation. However, it does not allow to determine the same values of voltage error and phase displacement as for the distorted voltage. (**Procedure for evaluation of the wideband transformation accuracy of inductive voltage transformers for assignment of their optional classes of the 2023 IEC 61869-1 standard**).

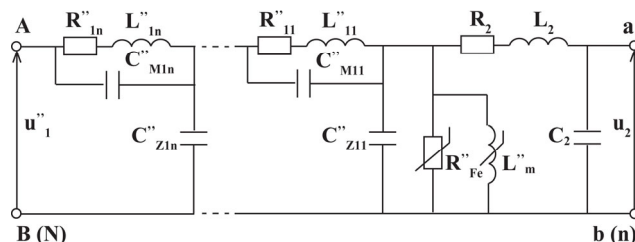
Słowa kluczowe: indukcyjny przekładnik napięciowy, błąd napięciowy, błąd kątowy, harmoniczne, napięcie sinusoidalne, rezonans.
Keywords: inductive voltage transformer, voltage error, phase displacement, harmonics, sinusoidal voltage, resonance.

Wstęp

W nowym wydaniu normy IEC 61869-1 z roku 2023 (Przekładniki - Część 1: wymagania ogólne) zostały zawarte wymagania w zakresie dokładności transformacji wyższych harmonicznych prądu/napięcia odkształconego przez wszystkie przekładniki [1]. Zdefiniowanych zostało pięć opcjonalnych klas dokładności: WB0 do 13. harmonicznej, WB1 dla częstotliwości harmonicznych do 3 kHz, WB2 do 20 kHz i WB3 dla częstotliwości harmonicznych do 150 kHz oraz WB4 do 500 kHz. Zgodnie z normą IEC 61869-1 klasę dokładności przekładnika w szerokim zakresie częstotliwości można przykładowo określić w następujący sposób: 0,5-WB1. Oznacza to, że klasa dokładności przekładnika napięciowego (PN) lub przekładnika prądowego (PP) dla transformacji sinusoidalnego napięcia lub prądu o częstotliwości 50 Hz lub 60 Hz wynosi 0,5, natomiast jego opcjonalna klasa dokładności dla transformacji wyższych harmonicznych to WB1. Oznacza to, że przekładnik ten zapewnia zachowanie błędów przekładni i kąтового nie przekraczających wartości odpowiednio 5%/° do 1 kHz włącznie, 10%/° od 1 kHz do 1,5 kHz włącznie i 10% oraz 20° od 1,5 kHz do 3 kHz włącznie. Norma nie określa wymagań co do przekładnika wzorcowego. Zwykle jednak przyjmuje się, że powinien on charakteryzować się dziesięciokrotnie wyższą dokładnością niż wynika to ze zdefiniowanych wartości granicznych klasy dokładności, dla której ma zostać wykonane sprawdzenie dokładności przekładnika badanego. Dlatego w przypadku przekładnika wzorcowego dla klasy 0,5-WB1 jego błędy przekładni i kątowny nie powinny przekraczać odpowiednio 0,5%/° do 1 kHz włącznie, 1%/° od 1 kHz do 1,5 kHz włącznie i 1% oraz 2° od 1,5 kHz do 3 kHz włącznie.

W artykułach [2–7] przedstawiono układy pomiarowe służące do wyznaczania wartości błędów napięciowego i kąтового PN dla transformacji harmonicznych napięcia odkształconego. Źródło odniesienia – przekładnik wzorcowy stanowi dzielnik napięcia przeznaczony do pracy w szerokim zakresie częstotliwości napięcia wejściowego [7-12]. W przypadku sprawdzania dokładność indukcyjnych PN należy zastosować układ podwyższający napięcie, aby zapewnić odpowiednio wysoką do przeprowadzenia prawidłowego badania wartość skuteczną napięcia pierwotnego. Jest to wymagane ze względu na nieliniowość charakterystyk magnesowania rdzenia magnetycznego [13-16]. Najbardziej istotną przyczyną występowania znaczących błędów

transformacji harmonicznych napięcia odkształconego przez indukcyjne PN jest zjawisko rezonansu związane z jednoczesnym występowaniem indukcyjności rozproszenia i pojemności pasozytniczej poszczególnych sekcji uzwojenia pierwotnego. Na rysunku 1 przedstawiono schemat zastępczy indukcyjnego PN dla wyższych częstotliwości.



Rys. 1. Schemat zastępczy indukcyjnego przekładnika napięciowego dla wyższych częstotliwości

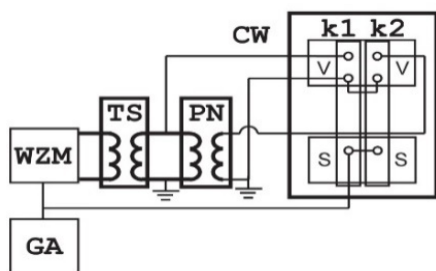
Na rysunku 1 zastosowano następujące oznaczenia:

C''_{M1n} – pojemność zastępcza między warstwą n uzwojenia pierwotnego i uzwojeniem wtórnym, C''_{Z1n} – pojemność zastępcza między warstwą n uzwojenia pierwotnego i potencjałem ziemi, R''_{1n} – rezystancja warstwy n uzwojenia pierwotnego, L''_{1n} – indukcyjność rozproszenia warstwy n uzwojenia pierwotnego, R''_2 – rezystancja uzwojenia wtórnego, L''_2 – indukcyjność rozproszenia uzwojenia wtórnego, R''_{Fe} – rezystancja odwzorowująca straty mocy czynnej w rdzeniu, L''_m – indukcyjność wzajemna uzwojeń pierwotnego i wtórnego przekładnika napięciowego.

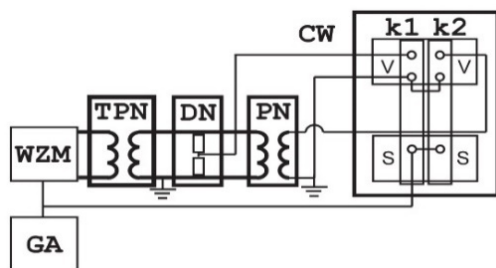
W przypadku oceny dokładności transformacji harmonicznych napięcia odkształconego przez indukcyjne przekładniki napięciowe, w celu wyznaczania opcjonalnych klas normy IEC 61869-1 z 2023 r. w szerokim zakresie częstotliwości ich pracy, należy uwzględnić zjawisko generacji własnej wyższych harmonicznych niskiego rzędu do ich napięcia wtórnego spowodowane nieliniowością charakterystyki magnesowania rdzenia magnetycznego. Zjawisko to jest znacznie mniej istotne niż w przypadku indukcyjnych przekładników prądowych, ale nadal zmiany wyznaczonych wartości błędów napięciowego i kąтового wraz ze zmianą przesunięcia fazowego transformowanej wyższej harmonicznej w stosunku do podstawowej harmonicznej odkształconego napięcia pierwotnego mogą być znaczące w przypadku składowych niskiego rzędu.

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki badań dotyczą wykazania skuteczności zaproponowanej procedury przeznaczonej do ustalenia zgodności badanych indukcyjnych PN z wymaganiami opcjonalnych klas dokładności zdefiniowanymi w nowej edycji normy IEC 61869-1. Sprawdzanie dokładności transformacji harmonicznyc (i interharmonicznyc) napięcie odkształconego jest uzasadnione w zakresie ich częstotliwości niższych niż ustalona wartość na podstawie badania dokładności transformacji napięcia sinusoidalnego o wartości skutecznej 100 V, przy której występuje pierwszy rezonans. Należy podkreślić, że metoda ta pozwala wyznaczyć dokładnie te same wartości częstotliwości rezonansowych PN jak dla transformacji harmonicznyc i interharmonicznyc, jednak nie pozwala określić tych samych wartości błędów napięciowego i kątownego jak dla transformacji napięcia odkształconego. Wynika to z nieliniowości krzywej magnesowania rdzenia indukcyjnego PN. Dlatego wraz ze zmianą wartości i kształtu napięcia pierwotnego zmianie ulegają wartości przenikalności magnetycznej rdzenia i strat mocy czynnej i są one znacząco inne dla harmonicznyc i dla napięcia sinusoidalnego o tej samej częstotliwości. Jednak proponowane rozwiązanie jest skuteczne w określaniu częstotliwości rezonansowych w przypadku indukcyjnych PN, ponieważ zjawisko rezonansu jest spowodowane pojemnością pasożytniczą i indukcyjnością rozproszenia uzwojenia pierwotnego, które jako parametry konstrukcyjne są niezależne od wartości skutecznej napięcia pierwotnego [3].

a)



b)



Rys.2. Uproszczony schemat blokowy zastosowanego systemu pomiarowego do wyznaczenia dokładności transformacji: a) napięcia sinusoidalnego i b) harmonicznyc napięcia odkształconego

Metodyka badań i układ pomiarowy oraz badane indukcyjne przekładniki napięciowe SN

Badania przeprowadzono dla 6 indukcyjnych PN średniego napięcia o znamionowych przekładniach napięciowych: 15 kV / 100 V i (15/√3) kV / (100/√3) V, 20 kV / 100 V i (20/√3) kV / (100/√3) V, 30 kV / 100 V i 40 kV / 100 V. Uprozczone schematy blokowe zastosowanych układów pomiarowych przedstawiono na rysunku 2 [12], [14], [17-20]. Na rysunku 2 zastosowano następujące oznaczenia:

GA – generator arbitralny, WZM – wzmacniacz mocy o szerokim zakresie częstotliwości pracy, TS – transformator separacyjny, PN – badany indukcyjny przekładnik

napięciowy, CW – cyfrowy watomierz (analyzer mocy, k1/2 – 1/2 kanał pomiarowy, V – wejście napięciowe, S – wejście napięciowe (BNC) przeznaczone do podłączenia sondy prądowej), TPN – transformator probierczy podnoszący napięcie, DN – dzielnik napięciowy (sonda max. 20 kV : 20 V, dla której uwzględniono korekty wartości skutecznej i fazy napięcia wyjściowego wyznaczone dla napięcia sinusoidalnego o częstotliwości 50 Hz przy wartości skutecznej do 20 kV względem wzorcowego przekładnika napięciowego klasy 0,05 i w zakresie wyższych częstotliwości do 5 kHz przy wartości skutecznej do 1 kV względem pomiaru bezpośredniego CW).

Układ pomiarowy w konfiguracji 2a jest stosowany do sprawdzania dokładności transformacji napięcia sinusoidalnego o wartości skutecznej 100 V przez wszystkie badane indukcyjne PN w zakresie częstotliwości od 50 Hz do 20 kHz. Druga konfiguracja 2b jest stosowana do sprawdzania dokładności transformacji poszczególnych harmonicznyc napięcia odkształconego przez indukcyjne PN o wartości znamionowej napięcia pierwotnego (15/√3) kV i (20/√3) kV oraz 15 kV i 20 kV. Do jego generacji zastosowano transformator probierczy podnoszący napięcie (max. 123 kV) zasilany przez wzmacniacz mocy (4 kW / 150 V) sterowany przez dwukanałowy generator arbitralny (jeden kanał odpowiada za generację składowej podstawowej, drugi za generację składowej o podwyższonej częstotliwości). System ten umożliwia zadawanie harmonicznyc podstawowej i wyższego rzędu o regulowanych wartościach skutecznych i wzajemnym przesunięciu fazowym. Badania dokładności transformacji harmonicznyc napięcia odkształconego przeprowadzono dla składowyc podstawowej o częstotliwości 50 Hz i pojedynczej wyższej harmonicznyc o częstotliwości z zakresu od 100 Hz do 5 kHz, której udział procentowy wynosił 5% składowej podstawowej. W zakresie wyższych harmonicznyc niższego rzędu (do 350 Hz), z uwagi na zjawisko generacji własnej harmonicznyc do napięcia wtórnego przez indukcyjne PN (wynikające z nieliniowości charakterystyki magnesowania rdzenia magnetycznego), przesunięcie fazowe wyższej harmonicznyc względem składowej podstawowej regulowano w zakresie od 0° do 270° z krokiem co 90° w celu wyznaczenia ich maksymalnego wpływu na wartości błędów napięciowego i kątownego. W przypadku harmonicznyc o wyższych częstotliwościach zadano przesunięcie fazowe względem harmonicznyc podstawowej napięcia odkształconego o wartości 0°. Pomiar wartości skutecznej harmonicznyc i przesunięcia fazowego między harmoniczną tego samego rzędu w napięciu pierwotnym i wtórnym wykonane zostały za pomocą cyfrowego watomierza (między dwoma jego kanałami względem tego samego napięcia odniesienia z generatora arbitralnego).

Błąd napięciowych obliczany jest na podstawie zależności:

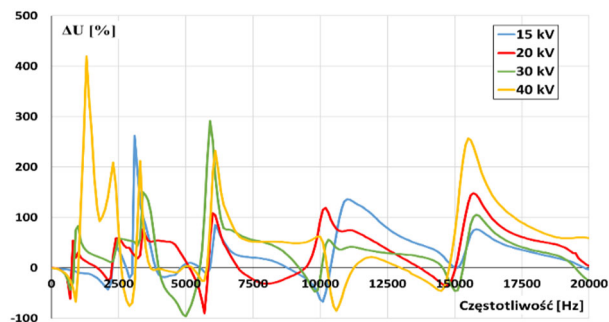
$$(1) \quad \Delta U = \frac{U_{PN} - U_{DN}}{U_{DN}} \cdot 100\%$$

gdzie: U_{PN} – wartość skuteczna napięcia sinusoidalnego lub danej harmonicznyc napięcia odkształconego po stronie wtórnej badanego indukcyjnego PN, U_{DN} – wartość skuteczna wyjściowego napięcia sinusoidalnego lub danej harmonicznyc napięcia odkształconego wzorcowego DN. Błąd kątowny wyznaczany jest jako przesunięcie fazowe sinusoidalnych napięć wyjściowego DN i wtórnego PN lub poszczególnyc harmonicznyc o tej samej częstotliwości w przypadku napięć odkształconyc.

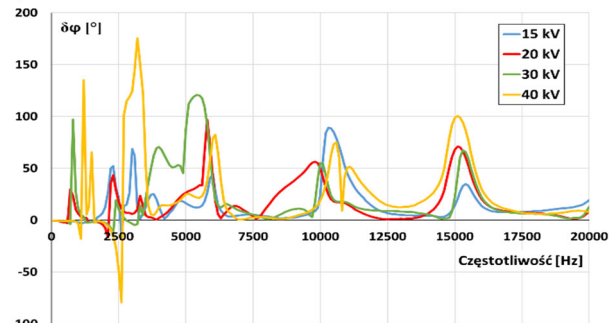
Charakterystyki częstotliwościowe błędów napięciowego i kąтового badanych indukcyjnych PN

Na rysunku 3 przedstawiono charakterystykach częstotliwościowe błędów napięciowego i kąowego badanych indukcyjnych PN wyznaczone dla transformacji napięcia sinusoidalnego o częstotliwości od 50 Hz do 20 kHz i wartości skutecznej równej 100 V w celu określenia ich częstotliwości rezonansowych.

a)



b)



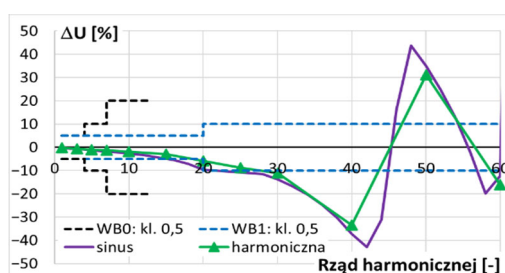
Rys.3. Charakterystykach częstotliwościowe błędów: a) napięciowego i b) kąowego, wyznaczone dla transformacji napięcia sinusoidalnego o częstotliwości od 50 Hz do 20 kHz

Rezonans identyfikowany jest jako jednoczesny gwałtowny wzrost wartości błędów napięciowego i kąowego. Częstotliwościowe pasmo pracy indukcyjnego PN jest ograniczone przez pierwszy rezonans (w analizowanych przypadkach wynosi około 500 Hz). Najważniejszymi czynnikami sprzyjającymi występowaniu tego zjawiska przy niższych częstotliwościach są wysokie wartości pojemności pasożytniczych (między warstwami uzwojenia) i indukcyjności rozproszenia poszczególnych warstw uzwojenia. Są to cechy charakterystyczne uzwojenia pierwotnego indukcyjnych przekładników wysokiego napięcia, ponieważ do jego wykonania wymagana jest wysoka liczba zwojów wynikająca z wymaganej wartości napięcia pierwotnego.

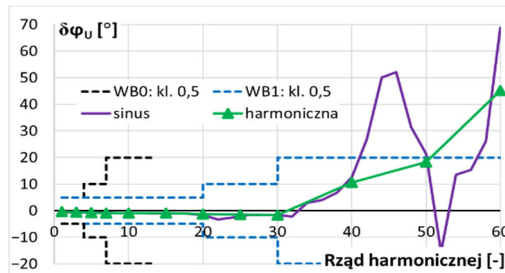
Na rysunku 4 przedstawiono porównanie wyznaczonych wartości błędów transformacji harmonicznego napięcia odkształconego i napięcia sinusoidalnego przez indukcyjny PN o znamionowej przekładni 15 kV / 100 V.

W przypadku badanego indukcyjnego PN 15 kV / 100 V występuje wiele częstotliwości rezonansowych (Rys.3) zgodnie ze schematem zastępczym z rysunku 1. W zakresie częstotliwości analizowanych na wykresach z rysunku 4 wyznaczone wartości błędów transformacji harmonicznego napięcia odkształconego o wartości skutecznej 1,5 kV przy wartości skutecznej składowej podstawowej 15 kV i napięcia sinusoidalnego o wartości skutecznej 100 V są znacząco inne. Wynika to z nieliniowości charakterystyki magnesowania rdzenia indukcyjnego PN. Dlatego przy 15 krotnie wyższej wartości skutecznej wyższej harmonicznej w

stosunku do wartości skutecznej napięcia sinusoidalnego zastosowanej podczas badania oraz ze względu na składową podstawową zmianie ulegają wartości przenikalności magnetycznej rdzenia i strat mocy czynnej i są znacząco inne dla harmonicznego i dla napięcia sinusoidalnego o tej samej częstotliwości. Wyniki przedstawione na Rysunku 4 potwierdzają, że proponowana metoda jest skuteczna w celu wyznaczenia częstotliwości rezonansowych indukcyjnych PN. Dlatego, może zostać zastosowana do wstępnej oceny ich zgodności z wymaganiami opcjonalnych klas dokładności w szerokim zakresie częstotliwości według nowej edycji normy IEC 61869-1. Sprawdzenie dokładności indukcyjnych PN napięciem sinusoidalnym o relatywnie niewielkiej wartości skutecznej pozwoli na ograniczenie zakresu częstotliwości (do rezonansu) podczas sprawdzania dokładności transformacji harmonicznego napięcia odkształconego o wartości znamionowej - wymaganej w celu uzyskania adekwatnych wyników do warunków rzeczywistej pracy indukcyjnego PN ze względu na nieliniowy kształt charakterystyki magnesowania jego rdzenia.

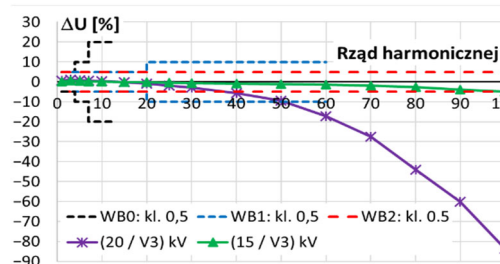


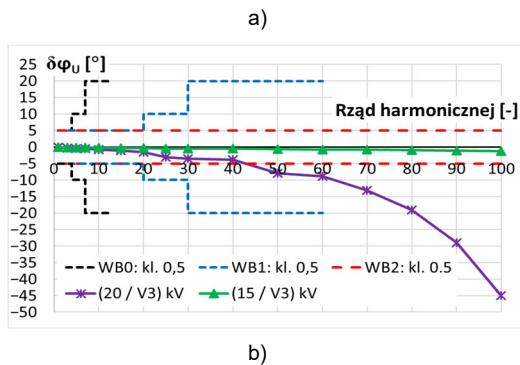
b)



Rys.4. Wartości błędów: a) napięciowego i b) kąowego wyznaczone dla transformacji harmonicznego napięcia odkształconego i napięcia sinusoidalnego przez indukcyjny PN 15 kV / 100 V

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki oceny dokładności transformacji indukcyjnych PN (15/√3) kV / (100/√3) V i (20/√3) kV / (100/√3) V zgodnie z wymaganiami opcjonalnych klas 0,5-WB0 i 0,5-WB1 oraz w zakresie do 5 kHz klasy 0,5-WB2 nowej edycji normy IEC 61869-1. W przypadku badanego indukcyjnego PN (15/√3) kV / (100/√3) V potwierdzono zgodność z wymaganiami opcjonalnych klas dokładności 0,5-WB0 i 0,5-WB1 oraz w zakresie do 5 kHz klasy 0,5-WB2.





Rys.5. Wartości błędów a) napięciowego i b) kąтового wyznaczone dla transformacji harmonicznego napięcia odkształconego przez indukcyjne PN $(15/\sqrt{3})$ kV / $(100/\sqrt{3})$ i $(20/\sqrt{3})$ kV / $(100/\sqrt{3})$

W przypadku badanego indukcyjnego PN $(20/\sqrt{3})$ kV / $(100/\sqrt{3})$ V potwierdzono zgodność tylko z wymaganiami opcjonalnej klasy dokładności 0,5-WB0.

Podsumowanie

W artykule wykazano, że seryjnie produkowane przekładniki napięciowe zaprojektowane do transformacji napięć sinusoidalnych o częstotliwości 50 Hz mogą zapewnić zgodność z wymaganiami opcjonalnych klas dokładności WB0 (do 13 harmonicznej) i WB1 (do 3 kHz) zdefiniowanych w normie IEC 61869-1. Przedstawione wyniki badań indukcyjnych przekładników napięciowych średniego napięcia uzasadniają konieczność prowadzenia analizy dokładności transformacji harmonicznego napięcia odkształconego z uwagi na różne właściwości poszczególnych jednostek w tym zakresie. Z tego względu wskazane jest prowadzenie prób przynajmniej napięciem sinusoidalnym w badaniach typu w celu wykluczenia występowania zjawisk rezonansowych w wymaganym spektrum częstotliwości pracy zgodnie z planowanym do wykorzystania zakresem pomiarowym aparatury przyłączonej do strony wtórnej indukcyjnego przekładnika napięciowego. Wykazano, że zastosowanie napięcia sinusoidalnego o niewielkiej wartości skutecznej pozwala określić częstotliwości rezonansowe indukcyjnego przekładnika napięciowego nawet w przypadku, gdy nie są one całkowitą wielokrotnością częstotliwości podstawowej (dla interharmonicznych). Wyznaczone w ten sposób wartości błędów transformacji nie mogą jednak służyć do weryfikacji dokładności transformacji harmonicznego napięcia odkształconego. Wynika to z różnych wartości przenikalności magnetycznej rdzenia magnetycznego dla harmonicznego i napięcia sinusoidalnego o tej samej częstotliwości. Sprawdzenie dokładności transformacji indukcyjnego przekładnika napięciowego dla napięcia sinusoidalnego powinno stanowić pierwszy etap oceny jego zgodności z wymaganiami opcjonalnych klas normy IEC 61869-1 z 2023 roku.

Autorzy: dr hab. inż. Michał Kaczmarek prof. uczelni, Politechnika Łódzka, Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych, ul. Stefanowskiego 22, 90-537 Łódź, E-mail: michal.kaczmarek@p.lodz.pl.

LITERATURA

[1] IEC 61869-1: Inst. transf. - general requirements 2nd ed., IEC: Genewa, Szwajcaria, 2023.
 [2] Crotti G., Giordano D., D'Avanzo G., Letizia P.S., Luiso M. A., New Industry-Oriented Technique for the Wideband Characterization of Voltage Transformers, *Measurement*, 182 (2021), 109674.
 [3] Kaczmarek M., Brodecki D., Transformation of Transient Overvoltages by Inductive Voltage Transformers, *Sensors*, 21 (2021), 4167.

[4] Buchhagen C., Fischer M., Hofmann L., Daumling H. Metrological determination of the frequency response of inductive voltage transformers up to 20 kHz, *In Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting* (2013).
 [5] Lamedica R., Pompili M., Sangiovanni S., Calcara L., Ruvio, A., Cauzillo B.A., Transient-state analysis of MV instrument transformers. *Electric Power Systems Research*, 168 (2019), 162–168.
 [6] Castello P., Laurano C., Muscas C., Pegoraro P.A., Toscani, S., Zanoni M., Harmonic Synchrophasors Measurement Algorithms with Embedded Compensation of Voltage Transformer Frequency Response. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 70 (2021), 9001310, doi:10.1109/TIM.2020.3042317.
 [7] Kaczmarek M., Reference voltage divider designed to operate with oscilloscope to enable determination of ratio error and phase displacement frequency characteristics of MV voltage transformers, *Measurement*, 68 (2015), 22-31.
 [8] Garnacho F., Khamlichi A., Rovira J., The design and characterization of a prototype wideband voltage sensor based on a resistive divider, *Sensors* 17 (2017).
 [9] Zucca M., Modarres M., Giordano D., Crotti G., Accurate Numerical Modelling of MV and HV Resistive Dividers, *IEEE Trans. Power Deliv.* 32 (2017), 1645–1652.
 [10] Letizia P.S., Crotti G., Giordano D., Delle Femine A., Gallo D., Landi C., Luiso M., Low cost procedure for frequency characterization of voltage instrument transformers, *Proceedings of the I2MTC 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 5 (2019), 1–6.
 [11] Gianesini B.M., Brito V.H.F., Lima R.N.C., Santos I.N., Frequency response test of MV inductive voltage transformers for power quality applications. *Renew. Energy Power Qual. J.*, 18 (2020), 556–561.
 [12] Kaczmarek M., The effect of distorted input voltage harmonics rms values on the frequency characteristics of ratio error and phase displacement of a wideband voltage divider, *Electric Power Systems Research*, 167 (2019), 1-8.
 [13] Faifer M., Laurano C., Ottoboni R., Toscani S., Zanoni M., Nonlinear Behavioral Modeling of Voltage Transformers in the Frequency Domain: Comparing Different Approaches, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 69 (2020), 8137–8145.
 [14] Kaczmarek M., Development and application of the differential voltage to single-ended voltage converter to determine the composite error of voltage transformers and dividers for transformation of sinusoidal and distorted voltages, *Measurement*, 101 (2017), 53-61.
 [15] Dewayalage I., Robinson D., Elphick S., Perera S., Measurement Based Linear and Nonlinear Time Invariant Representations for High Voltage Inductive Transformer Frequency Response up to 10 kHz, *IEEE Access*, 12 (2024), 52363 – 52377, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3387292
 [16] Kaczmarek M., Inductive current transformer accuracy of transformation for the PQ measurements, *Electric Power Systems Research*, 150 (2017), 169-176.
 [17] Kaczmarek M., Two Channels Opto-Isolation Circuit for Measurements of the Differential Voltage of Voltage Transformers and Dividers, *Energies*, 15(2022), nr 7, 2694.
 [18] Kaczmarek M., Próba określenia dokładności transformacji sygnałów sinusoidalnych o częstotliwościach 50 Hz i wyższych przez przekładniki napięciowe, *Przegląd Elektrotechniczny*, 11b (2012), nr 88, 233-236.
 [19] Kaczmarek M., Badanie i analiza przebiegów czasowych napięć wytwarzanych w układzie do generacji napięć odkształconych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 11b (2010), nr 86, 99-102.
 [20] Kaczmarek P., Zastosowanie źródeł zasilania o szerokim zakresie częstotliwości pracy w układach probierczych przeznaczonych do sprawdzania dokładności przekładników prądowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 9 (2023), nr 99, 19-25.