

Metoda pomiaru pojemności pasożytniczej wysokonapięciowych sensorów prądu przemiennego

Streszczenie. W artykule przedstawiono trzy metody pomiaru pojemności pasożytniczej wysokonapięciowych sensorów prądu przemiennego przeznaczonych do stosowania w sieciach energetycznych średniego napięcia. Rozwiązanie układowe sensora bazuje na wysokonapięciowym rezystancyjnym dzielniku napięcia. Badaniom podlegały zmodyfikowane sensory, w których usunięto niskonapięciowy rezystor dzielnika. Dodatkowo sensory były umieszczane w specjalizowanej głowicy konektorowej, zgodnie z docelowym sposobem aplikowania tego typu sensorów w systemach energetycznych.

Abstract. The article presents three methods for measuring the parasitic capacitance of high-voltage AC sensors intended for use in medium-voltage power networks. The sensor's circuit solution is based on a high-voltage resistive divider. Modified sensors in which the low-voltage resistor of the divider was removed were tested. Additionally, the sensors were placed in a specialized connector head, in accordance with the target method of applying this type of sensors in medium-voltage power networks. (**Method of measuring of the parasitic capacitance of high voltage sensors**).

Słowa kluczowe: przekładnik napięciowy, rezystancyjny dzielnik napięcia, metody pomiarowe, pojemność pasożytnicza rezystora.

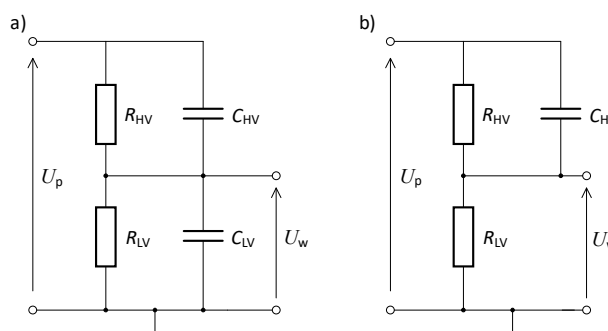
Keywords: voltage transformer, resistive voltage divider, measurement methods, resistor parasitic capacitance.

Wstęp

W energetyce średnio i wysoko napięciowej do pomiarów napięcia w systemach monitorowania, zabezpieczeń, analizy jakości energii elektrycznej oraz do rozliczeń energii są stosowane wysokonapięciowe dzielniki napięcia (przekładniki napięcia), nazywane branżowo sensorami napięciowymi. W sieciach elektrycznych są stosowane przekładniki napięcia o różnych zasadach działania: transformatory napięciowe, dzielniki pojemnościowe, dzielniki rezystancyjne, dzielniki rezystancyjno-pojemnościowe i dzielniki pojemnościowo-transformatorowe [1]. Obecnie najczęściej są to transformatory napięciowe, które zapewniają kluczową w tym przypadku właściwość, tj. izolację galwaniczną pomiędzy systemami wysoko i nisko napięciowymi, ale jednocześnie charakteryzują się istotną wadą - są one zwykle projektowane na podstawowe częstotliwości sieci energetycznych (50 lub 60 Hz) i nie są przeznaczone do pracy z sygnałami o wyższych częstotliwościach. Zgodność z normą jakości energii EN 50160 jest podstawowym celem wszystkich operatorów sieci energetycznych. Jednym z ważnych wymagań tej normy jest ograniczenie występowania w sieciach energetycznych poszczególnych harmonicznych, do 25 harmonicznej włącznie, a także ograniczenie zniekształceń harmonicznych (THD) w zakresie częstotliwości do 40-tej harmonicznej. Stąd w przypadku pomiaru napięcia w sieciach energetycznych konieczne jest zapewnienie możliwości pomiaru harmonicznych w paśmie częstotliwości do 2 kHz. We współczesnych systemach energetycznych dodatkową pożądaną właściwością przekładników napięcia jest możliwość pracy z sygnałami stałoprądowymi. Z wyżej wymienionych powodów w sensorach napięciowych coraz częściej są stosowane wysokonapięciowe rezystancyjne dzielniki napięcia [1-6], szczególnie odnosi się to do sieci energetycznych średniego napięcia. Dodatkowymi zaletami tego typu sensorów (rezystancyjnych przekładników napięcia (RPN)) są ich relatywnie małe wymiary i niższy koszt w stosunku do tradycyjnych rozwiązań.

Podstawowe właściwości częstotliwościowo-fazowe RPN są wyznaczane na podstawie przedstawionego na rysunku 1a uproszczonego schematu zastępczego przekładnika [7]. Symbole U_p i U_w oznaczają odpowiednio napięcia po stronie pierwotnej i wtórnej przekładnika, symbole R_{HV} i R_{LV} rezystancje rezystora wysokonapięciowego i rezystora niskonapięciowego, a

symbole C_{HV} i C_{LV} pojemności pasożytnicze rezystorów R_{HV} i R_{LV} .



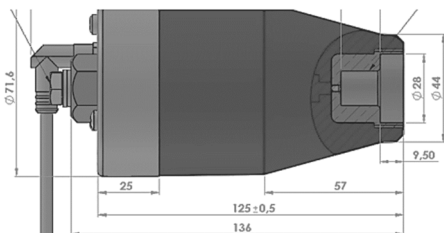
Rys. 1. Uproszczone schematy zastępcze sensorów napięciowych z uwzględnieniem pojemności pasożytniczej rezystora niskonapięciowego (a) i bez uwzględnieniem pojemności pasożytniczej rezystora niskonapięciowego (b)

Ze względu na dominujący wpływ pojemności pasożytniczej C_{HV} na właściwości częstotliwościowo-fazowe przekładnika stosuje się także schemat zastępczy, w którym nie występuje pojemność C_{LV} (rys. 1b [8]). W analizie właściwości metrologicznych są także stosowane bardziej zaawansowane modele sensorów napięciowych [9,10], bazujące na schematach zastępczych, w których uwzględnia się dodatkowe pojemności pasożytnicze związane ściśle z konstrukcją danego sensora, w tym jego obudową i sposobem umieszczenia w niej rezystorów rezystancyjnego dzielnika napięcia. Do obliczenia wartości tych pojemności stosuje się metody elementów skończonych [9,10]. Stosowanie zaawansowanych modeli RPN jest szczególnie przydatne w procesie projektowania sensorów napięciowych. Poprawa charakterystyk częstotliwościowo-fazowych pasywnych RPN [7-9] jest zwykle realizowana na podstawie pomiaru pojemności pasożytniczych C_{HV} i C_{LV} i dołączenia równolegle do rezystora R_{LV} dodatkowej pojemności kompensacyjnej. Można też zastosować procedurę korekcji, w której znajomość wartości pojemności C_{LV} nie będzie konieczna. Jest to wyjaśnione w sekcji „Przedmiot badań”. W pracy [7] przedstawiono metodę kompensacji wpływu pojemności pasożytniczej C_{HV} na właściwości częstotliwościowe sensora w układzie

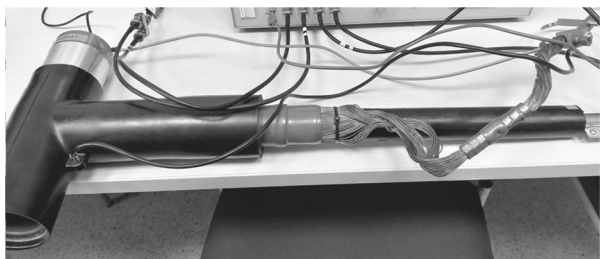
działającym w czasie rzeczywistym, który może być implementowany bezpośrednio w sieciach energetycznych. Jednak ze względu na koszt takiego rozwiązania nie jest ono dotychczas powszechnie stosowane.

Przedmiot badań

Komercyjne RPN są dostępne w formie sensorów napięciowych ze specjalizowanymi obudowami, umieszczanych w głowicach konektorowych instalowanych w stacjach średniego i wysokiego napięcia. Przykładem takiego sensora jest produkowany przez Łukasiewicz – ITR (Sieć badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny) sensor napięciowy UR-66 (rys. 2), który jest przeznaczony do współpracy z głowicą konektorową firmy Nexans (rys. 3).



Rys. 2. Sensor napięciowy UR-66 produkowany w Łukasiewicz – ITR



Rys. 3. Sensor napięciowy UR-66 z głowicą konektorową

W przypadku sensora UR-66 przeznaczonego do stosowania w sieciach SN wartość nominalna rezystora wysokonapięciowego R_{HV} jest równa 100 M Ω , natomiast wartość rezystora R_{LV} jest rzędu kilkunastu k Ω . Ze względu na dużą wartość rezystancji R_{HV} , jego pojemność pasywna C_{HV} determinuje właściwości częstotliwościowo-fazowe sensora [8]. Dodatkowo pojemność przewodów sygnałowych głowicy konektorowej, których długość nierzadko przekracza 10 m, ma wpływ na charakterystykę fazową sensora. Dokładna znajomość pojemności pasywnych C_{HV} jest konieczna do prawidłowej kompensacji, najczęściej realizowanej poprzez sztuczne zwiększanie pojemności pasywnej C_{HV} rezystora wysokonapięciowego R_{HV} , i kompensowanie dodatkową pojemnością po stronie „wtórnej” sensora (rezystor niskonapięciowy R_{LV}), co w praktyce jest prostsze w realizacji. W praktyce dzięki sztucznej kompensacji wartości pojemności C_{HV} wartość pojemności C_{LV} ma pomijalny wpływ na wartość dobieranej pojemności kompensacyjnej

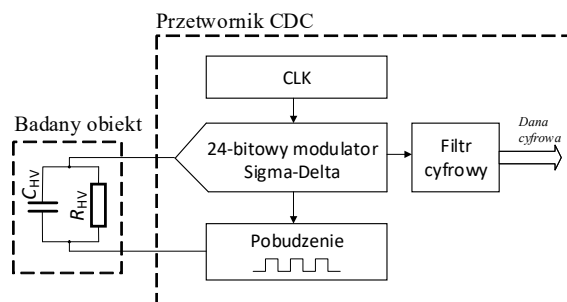
Metody pomiaru pojemności pasywnej

Pomiary parametrów sensorów muszą być najczęściej wykonywane na linii produkcyjnej, stąd metoda pomiaru pojemności pasywnej powinna się wyróżniać szybkością pomiaru, a sam proces pomiaru nie powinien wymagać zaawansowanej wiedzy eksperckiej od operatora systemu pomiarowego. Zakłada się, że pomiar pojemności pasywnej C_{HV} może być wykonany w układach

miarowych z niską wartością napięcia zasilającego mierzony rezystor R_{HV} , a dodatkowa weryfikacja uzyskanych wyników zostanie przeprowadzona dla referencyjnego egzemplarza skompensowanego sensora przy napięciu roboczym. Pomiar pojemności pasywnej może być realizowany na podstawie pomiaru impedancji (składowa bierna) lub poprzez pomiar ładunku elektrycznego po naładowaniu pojemności odpowiednim sygnałem zasilającym układ pomiarowy.

Pomiar pojemności pasywnej z zastosowaniem scalonego przetwornika pojemność-cyfra

Przetworniki pojemność-cyfra (ang. *Capacitance to Digital Converter (CDC)*) to grupa specjalizowanych przetworników analogowo-cyfrowych przeznaczonych do współpracy z czujnikami pojemnościowymi [11,12]. Charakteryzują się one zakresem pomiarowym i dokładnością predestynowanymi do pomiaru pojemności pasywnej sensorów napięcia. W pomiarach pojemności pasywnej sensora UR-66 zastosowano moduł ewaluacyjny EVAL-AD7746EB firmy Analog Devices [13], który bazuje na scalonym przetworniku CDC AD7746 [14]. Funkcjonalność użytkowa modułu EVAL-AD7746EB jest określona przez oprogramowanie zrealizowane w środowisku LabVIEW i dostarczane wraz z modułem ewaluacyjnym przez producenta. Na rysunku 4 przedstawiono ideę pomiaru pojemności pasywnej C_{HV} za pomocą przetwornika CDC. W przypadku układu AD7746 mierzona pojemność jest pobudzana unipolarnym sygnałem prostokątnym o amplitudzie 3,2 V i częstotliwości f_p równej 32 kHz. Wartość zgromadzonego przez mierzoną pojemność ładunku elektrycznego jest wyznaczana za pomocą 24-bitowego modulatora sigma-delta. Na wyjściu filtra cyfrowego jest dostępna postać cyfrowa tego wyniku. Na podstawie znanych parametrów sygnału pobudzającego i zmierzonej wartości ładunku elektrycznego jest obliczana wartość mierzonej pojemności.



Rys. 4. Pomiar pojemności pasywnej z zastosowaniem przetwornika CDC

Układ AD7746, a co za tym idzie moduł ewaluacyjny EVAL-AD7746EB cechują się bardzo dobrymi parametrami metrologicznymi. Deklarowany przez producenta błąd pomiaru, na podstawie jego fabrycznej kalibracji, mieści się w przedziale ± 4 fF. Układ AD7746 może pracować w kilku różnych konfiguracjach. Zastosowanie określonej konfiguracji definiuje także zakres pomiarowy. W przeprowadzonych pomiarach zakres pomiarowy pojemności mieścił się w przedziale od 0 do 4 pF.

Ponieważ moduł EVAL-AD7746EB został wykorzystany do pomiaru pojemności pasywnej wysokonapięciowego rezystora, to wartość jego rezystancji R_{HV} powinna zostać uwzględniona w korekcji wyniku pomiaru pojemności pasywnej. W tym przypadku pojemność pasywną C_{HV} traktujemy jako mierzoną pojemność, a wartość rezystancji R_{HV} badanego rezystora jako rezystancję

pasożytniczą. Stąd wynik pomiaru pojemności pasożytniczej należy skorygować o wartość pojemności obliczonej na podstawie poniższej zależności [14]:

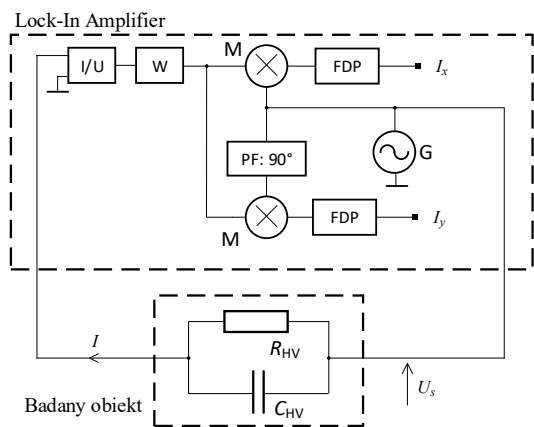
$$(1) \quad C_{cr} = \frac{1}{4f_p \cdot R_{HV}}$$

gdzie: R_{HV} - wartość rezystancji badanego rezystora równa 100 MΩ; f_p – częstotliwość sygnału (przebieg prostokątny) zasilającego badany obiekt równa 32 kHz.

Pomiar pojemności pasożytniczej metodą techniczną

Pomiar pojemności pasożytniczej metodą techniczną, bazuje na pomiarze składowej biernej prądu płynącego przez wysokonapięciowy rezystor sensora, jednak w takim przypadku mamy do czynienia z sygnałami o bardzo małych wartościach, które w zależności od przyjętej częstotliwości pomiarowej są na poziomie od dziesiątych części nanoampera do kilkudziesięciu nanoamperów. Pomiar składowej biernej prądu przemiennego o tak małych wartości wymaga zastosowania odpowiedniego przyrządu, który zapewni wymaganą selektywność (pomiar wąskopasmowy) oraz umożliwi rozdzielczy pomiar składowej czynnej i biernej mierzonego prądu. Autorzy w proponowanej metodzie do pomiaru składowych impedancji (w tej metodzie jest możliwy pomiar obu składowych mierzonej impedancji) zastosowali komercyjny detektor synchroniczny typu Lock-In Amplifier (LIA), który w układzie pomiarowym spełnia jednocześnie rolę źródła sygnału zasilającego układ pomiarowy i fazoczułego selektywnego amperomierza (amperomierza wektorowego).

Na rysunku 5 przedstawiono uproszczony schemat blokowy LIA pracującego w trybie amperomierza (aktywne wejście prądowe). Schemat blokowy ilustruje ogólną zasadę działania tego typu przyrządów. Sygnał z generatora G jest także używany, jako sygnał referencyjny dla dwóch układów mnożących M, z tym, że w przypadku drugiego układu mnożącego sygnał referencyjny jest przesunięty w fazie o kąt 90°.



Rys. 5. Pomiar pojemności pasożytniczej metodą techniczną z zastosowaniem LIA

Mierzony sygnał prądowy po konwersji na sygnał napięciowy jest wzmacniany za pomocą wzmacniacza W, dalej wymnażany przez ortogonalne sygnały referencyjne i następnie filtrowany przez układy filtrów dolnoprzepustowych (FDP). Wartość stałej czasowej FDP jest powiązana z selektywnością częstotliwości układu pomiarowego. Na wyjściu filtrów otrzymujemy składową synfazową (czynną) I_x oraz składową kwadraturą (bierną) I_y mierzonego prądu I .

W badaniach eksperymentalnych zastosowano dwa różne przyrządy LIA: SR830 firmy Stanford Research [15] i

SR7265 Signal Recovery [16]. Oba przyrządy są typu DSP (Digital Signal Processing), w których większość opisanych wcześniej operacji jest realizowana w domenie cyfrowej. Przed przystąpieniem do pomiarów składowych mierzonego prądu ważne jest zapewnienie ścisłej zgodności fazowej pomiędzy sygnałem U_s i sygnałem mierzonym I , dla każdej częstotliwości pomiarowej. Ten proces ma istotny wpływ na niepewność pomiarową składowych prądu, szczególnie w sytuacji, gdy wartości tych składowych znacząco się różnią. Taka sytuacja ma miejsce w przypadku badanych obiektów.

Wartość pojemności pasożytniczej wyznaczana metodą techniczną z zastosowaniem LIA jest obliczana z następującej zależności:

$$(2) \quad C_{HV} = \frac{I_y}{U_s} \cdot \frac{1}{2\pi f}$$

gdzie: I_y – wartość skuteczna składowej ortogonalnej (biernej) mierzonego prądu, U_s – wartość skuteczna napięcia zasilającego mierzony rezystor, f – częstotliwość napięcia zasilającego mierzony rezystor.

Dla wyznaczanej w ten sposób pojemności pasożytniczej, jej złożoną standardową niepewność pomiaru można przedstawić w następujący sposób:

$$(3) \quad u(C_{HV}) = \sqrt{\left(\frac{\partial C_{HV}}{\partial I_y} \cdot u(I_y)\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{HV}}{\partial U_s} \cdot u(U_s)\right)^2 + \left(\frac{\partial C_{HV}}{\partial f} \cdot u(f)\right)^2}$$

Napięcie U_s i częstotliwość f mogą być zmierzone za pomocą wysokiej klasy precyzyjnych przyrządów pomiarowych (np. multimetr Keysight 3458A i miernik częstotliwości Agilent 53220A), wtedy o niepewności pomiaru pojemności pasożytniczej będzie decydował pierwszy składnik niepewności wyrażonej zależnością (3), związany z pomiarem składowej biernej prądu za pomocą LIA:

$$(4) \quad u(C_{HV}) \approx \sqrt{\left(\frac{1}{2\pi f U_s} \cdot u(I_y)\right)^2}$$

Złożona standardowa niepewność pomiaru prądu I_y jest wyznaczona z zależności (5):

$$(5) \quad u(I_y) = \sqrt{u_{I_A}^2 + u_{I_{B1}}^2 + u_{I_{B2}}^2 + u_{I_{B3}}^2}$$

gdzie: u_{I_A} – niepewność typu A pomiaru prądu wyznaczona z serii pomiarów prądu I_y , każdy pomiar jest poprzedzony fizycznym odłączeniem i ponownym podłączeniem badanego rezystora; $u_{I_{B1}}$ – niepewność typu B pomiaru prądu związana z rozdzielczością pomiaru; $u_{I_{B2}}$ – niepewność typu B pomiaru prądu związana ze specyfikowaną maksymalną wartością błędu wzmocnienia LIA; $u_{I_{B3}}$ – niepewność typu B pomiaru prądu związana ze specyfikowanym maksymalnym błędem ortogonalności LIA.

Pomiar pojemności pasożytniczej z zastosowaniem automatycznego mostka impedancji

Dodatkową weryfikację dokładności pomiarowej przedstawionych powyżej metod pomiaru pojemności pasożytniczej wysokonapięciowych sensorów prądu przemiennego przeprowadzono za pomocą precyzyjnego miernika RLC HP4284A, który pracuje w układzie elektronicznego 4-portowego mostka impedancji z funkcją automatycznego równoważenia [17]. Rodzaj badanych obiektów: równoległe połączenie dużej rezystancji o wartości rzędu 100 MΩ i pojemności o wartości mniejszej od 1pF wymaga zastosowania odpowiedniej procedury pomiarowej

[17]. W przypadku stosowania niższej klasy mierników RLC taki pomiar może być obciążony dużym błędem.

Wyniki pomiarów

Badane obiekty podzielono na trzy grupy: rezystory wysokonapięciowe, zmodyfikowane sensory, w których usunięto rezystor niskonapięciowy oraz głowicę konektorową w której umieszczano zamiennie sensory nr 1 i nr 2. W badaniach zastosowano 3 metody pomiarowe. Ze względu na cenę i łatwość wdrożenia na linii produkcyjnej preferowany był układ pomiarowy z modułem EVAL-AD7746EB. Dwie pozostałe metody zastosowano do uwiarygodnienia pierwszej metody pomiarowej. W artykule zaprezentowano przykładowe wyniki badań obiektów należących do trzeciej grupy, najważniejszej z punktu widzenia kalibracji sensorów. Dobór częstotliwości pomiarowych dla danej metody pomiarowej był podyktowany zasadą działania przypisanych do danej metody przyrządów pomiarowych oraz charakterem badanego obiektu. Uzyskane wyniki pomiarów zaprezentowano w tabeli 1 i w tabeli 2.

Tabela 1. Wyniki pomiarów głowicy konektorowej z sensorem nr 1

Badany obiekt	Układ pomiarowy	f (Hz)	C_{HV} (pF)	$U(C_{HV})$ (pF) $k=2$
Głowica konektorowa z sensorem nr 1	LIA SR830	10 000	0,410	$\pm 0,005$
	LIA SR7265	10 000	0,395	$\pm 0,004$
	Precyzyjny miernik LCR HP4284A	10 000	0,415	$\pm 0,016$
	Moduł EVAL-AD7746EB	32 000 (sygnał prostokątny)	0,411	$\pm 0,009$

Tabela 2. Wyniki pomiarów głowicy konektorowej z sensorem nr 2

Badany obiekt	Układ pomiarowy	f (Hz)	C_{HV} (pF)	$U(C_{HV})$ (pF) $k=2$
Głowica konektorowa z sensorem nr 2	LIA SR830	10 000	0,055	$\pm 0,001$
	LIA SR7265	10 000	0,037	$\pm 0,001$
	Precyzyjny miernik LCR HP4284A	10 000	0,045	$\pm 0,005$
	Moduł EVAL-AD7746EB	32 000 (sygnał prostokątny)	0,042	$\pm 0,010$

Podsumowanie

Na podstawie uzyskanych wyników można wskazać zalecaną metodę pomiaru pojemności pasywnościowej rezystorów wysokonapięciowych stosowanych w sensorach napięciowych UR-66 oraz pojemności pasywnościowej samych sensorów, w których nie zainstalowano płytki z rezystorem niskonapięciowym. Ze względu na cenę, parametry metrologiczne, łatwość wdrożenia i obsługi preferowana jest metoda bazująca na module ewaluacyjnym EVAL-AD7746EB firmy Analog Devices. Wiarygodność uzyskanych wyników została potwierdzona dwoma odmiennymi metodami, których wdrożenie wymaga wielokrotnie większych nakładów finansowych. Należy podkreślić dużą zgodność uzyskanych wyników w sytuacji zastosowania tak mocno różniących się metod pomiarowych

i sposobu podłączenia badanych obiektów. Dodatkową zaletą modułu ewaluacyjnego EVAL-AD7746EB jest możliwość jednoczesnego pomiaru pojemności pasywnościowej dwóch sensorów napięciowych w trybie różnicowym, co pozwala na wyznaczanie różnic w wartościach pojemności pasywnościowej pomiędzy sensorem referencyjnym, którego pojemność pasywnościowa może być wyznaczona inną metodą, i sensorem badanym. Ta właściwość może być wykorzystana do korekcji charakterystyk fazowych sensorów UR-66 w trakcie procesu produkcji.

Autorzy: dr hab. inż. Janusz Kaczmarek, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki, ul. Prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra, E-mail: j.kaczmarek@imei.uz.zgora.pl; prof. dr hab. inż. dr inż. Ryszard Rybski, Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii, Elektroniki i Informatyki, ul. Prof. Z. Szafrana 2, 65-516 Zielona Góra, E-mail: r.rybski@imei.uz.zgora.pl; mgr inż. Dariusz Kapelski, Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Tele- i Radiotechniczny, ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa, E-mail: dariusz.kapelski@itr.lukasiewicz.gov.pl

LITERATURA

- [1] Tenbohlen S., Kattmann C., Brügger T., Siegel M., Konermann M., Junge E., Christian J., Power Quality Monitoring in Power Grids focusing on Accuracy of High Frequency Harmonics, C4-122, CIGRE 2018 Paris, (2018)
- [2] Garnacho F., Khamlichi A., Rovira J., The Design and Characterization of a Prototype Wideband Voltage Sensor Based on a Resistive Divider, *Sensors*, 17.11 (2017): 2657
- [3] Crotti G., Gallo D., Giordano D., Landi C., Luiso M., Modarres M., Zucca M., Frequency Compliance of MV Voltage Sensors for Smart Grid Application, *IEEE Sensors Journal*, 17 (2017), No. 23, 133-137
- [4] Kozyra J., Łukasik Z., Kuśmińska-Fijałkowska A., Kaszuba P., An analysis of remote voltage measurement in the medium voltage cable networks, *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (2022), nr 10, 299-306
- [5] Błażczak G., Olak J., Rezystancyjny dzielnik napięcia do pomiarów wyższych harmonicznych w sieciach 400 kV, *Energetyka*, (2011), nr 8, 473-476
- [6] Pawełek R., Wasiak I., Pomiar porównawczy wyższych harmonicznych napięcia w sieci przesyłowej 400 kV, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 7, 230-233
- [7] Crotti G., Gallo D., Giordano D., Landi C., Luiso M., A Characterized Method for the Real-Time Compensation of Power System Measurement Transducers, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64 (2015), No. 6, 1398-1404
- [8] Lisowiec A., Chudorliński J., Kowalski G., Kalibracja precyzyjnych przetworników prądu i napięcia dla sieci SN i nn, *Elektro.info*, (2022), nr 11, 28-31
- [9] Riba J-R., Capelli F., Moreno-Eguilaz M., Analysis and Mitigation of Stray Capacitance Effects in Resistive High-Voltage Dividers, *Energies* 12, (2019), 12: 2278
- [10] Zucca M., Modarres M., Giordano D., Crotti G., Accurate Numerical Modelling of MV and HV Resistive Dividers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32 (2015), Issue: 3, 1645-1652
- [11] Jia N., ADI Capacitance-to-Digital Converter Technology in Healthcare Applications, *Analog Dialogue*, 46 (2012), nr 2, 11-13
- [12] Pietrzyk P., Przetworniki CDC (1) Modulacja Sigma-Delta w przetwornikach pojemność-cyfra, *Elektronika Praktyczna*, (2009), nr 3, 62-65
- [13] AD7746 Evaluation Board, Data Sheet, *Analog Devices*, (2011)
- [14] AD7745/AD7746 Data Sheet, *Analog Devices*, rev.0, (2005)
- [15] Model 830 DSP Lock-in Amplifier, *Stanford Research Systems*, rev.2.5, (10/2011)
- [16] Model 7265 DSP Lock-in Amplifier, Instruction Manual, AMETEK, (2002)
- [17] 4284A Precision LCR Meter, User Manual, *Agilent Technologies*, (2000)