

System do analizy zawartości harmonicznych sieci elektroenergetycznej z modułem archiwizacji i wizualizacji danych

Streszczenie. Artykuł dotyczy metod kompensacji przekładników pomiarowych, a także opracowania metody pomiarowej wyznaczania parametrów częstotliwościowych przekładników małej mocy LPVT oraz wniosków z eksploatacji stanowiska pomiarowego pozwalających na usprawnienie przetwarzania i analizy danych pomiarowych.

Abstract. The article concerns the methods of compensation of measuring transformers, as well as the development of a measurement method for determining the frequency parameters of low-power LPVT transformers, and conclusions from the operation of the measuring station that allow for improving the processing and analysis of measurement data (**System for analyzing the harmonic content of the power grid with a data archiving and visualization module**)

Słowa kluczowe: przekładniki napięciowe małej mocy, dzielnik napięciowy, harmoniczne, jakość energii.

Keywords: LPVT, voltage divider, harmonics, energy quality.

Wstęp

Energia elektryczna jest towarem o określonych parametrach ilościowych i jakościowych, dlatego też istnieje konieczność pomiaru i rejestracji poszczególnych parametrów i sygnalizacji przekroczeń określonych limitów. Większość parametrów została sprecyzowana w odpowiednich normach i dotyczy częstotliwości, odchylenia napięcia, asymetrii, zapadów napięcia czy zawartości wyższych harmonicznych. Kontrola parametrów jakościowych pozwala na ocenę stanu technicznego poszczególnych instalacji i urządzeń odbiorczych. Parametry jakości energii elektrycznej sprawdza się na granicy pomiędzy dostarczycielem energii elektrycznej i jej odbiorcą.

Akwizycja danych pomiarowych dotyczących napięcia i fazy, niezbędnych do wyznaczenia jakości energii w sieci elektroenergetycznej odbywa się za pomocą przekładników napięciowych, które są wykonywane w trzech technologiach, jako przekładniki transformatorowe, pojemnościowe i rezystancyjne..

Przekładniki elektroenergetyczne

Przekładniki transformatorowe są elementami elektroenergetycznymi obniżającymi napięcie z odpowiednią barierą izolacyjną pomiędzy uzwojeniami pierwotnym i wtórnym. Przekładnia transformatora jest tak dobrana, aby napięcie wyjściowe wynosiło z reguły 100 V przy nominalnym napięciu wejściowym. Przesunięcia fazowe w takich przekładnikach wynikają z indukcyjności uzwojeń oraz właściwości rdzenia magnetycznego. Przekładniki małej mocy LPVT są zazwyczaj dzielnikami napięcia wykonanymi z kondensatorów lub rezystorów. Stopień podziału takiego dzielnika wynika z stosunku reaktancji pojemności kondensatorów lub rezystorów użytych w przekładniku. Górna gałąź dzielnika wykonana jest z specjalnego ceramicznego kondensatora lub rezystora wysokonapięciowego. Taki dzielnik wykazuje także pewne przesunięcie fazowe, ponieważ użyte elementy nie są elementami idealnymi i wymagają kompensacji dla uzyskania odpowiedniej charakterystyki częstotliwościowej. Wymagana przepisami jakość energii musi być analizowana do 40 harmonicznej. Charakterystyki częstotliwościowe przekładników napięciowych małej mocy LPVT nie są znormalizowane. Znormalizowane są za to wymagania co do parametrów mierzonego napięcia. Brak pewności co do poprawności wyników pomiarów z przekładnika może prowadzić do błędnej diagnozy stanu jakości energii

elektrycznej w kontrolowanej sieci dystrybucyjnej. Aby temu zapobiec wymagany jest dobry jakościowo, odpowiednio skompensowany przekładnik LPVT.

Wymagania dotyczące przekładników napięciowych LPVT

Normy PN-EN-IEC 61869-6 [1] i PN-EN-IEC 61869-11 [2] opisują wymagania odnośnie dopuszczalnego przesunięcia fazy wnoszonego przez przekładnik napięciowy. W tabeli 1 przedstawiono dopuszczalny błąd pomiarowy i przesunięcie fazowe dla przekładnika LPVT klasy 0,5P

Tabela 1. dopuszczalny błąd pomiarowy i przesunięcie fazowe dla przekładnika LPVT klasy 0,5P

Klasa przyrządu pomiarowego	maksymalny dopuszczalny błąd pomiarowy napięcia w odniesieniu do znamionowej wartości napięcia strony pierwotnej U_p dla pomiarów ciągłych				
	$0,02 \cdot U_p$	$0,2 \cdot U_p$	$0,8 \cdot U_p$	U_p	$1,2 \cdot U_p$
0,5P	$\pm 2\%$	$\pm 1\%$	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,5\%$
	maksymalny dopuszczalny błąd pomiarowy przesunięcia fazowego w odniesieniu do znamionowej wartości napięcia strony pierwotnej U_p dla pomiarów ciągłych				
	± 80 min	± 40 min	± 20 min	± 20 min	± 20 min

Błąd pomiarowy względny został przedstawiony wzorem (1):

$$(1) \quad \varepsilon = \frac{K_r U_s - U_p}{U_p} \times 100\%$$

gdzie: ε - Błąd pomiarowy względny; $U_p/\sqrt{3}$ V – zmierzone napięcie strony pierwotnej (wartość rms); $U_s/\sqrt{3}$ V - zmierzone napięcie strony wtórnej (wartość rms); K_r - znamionowy współczynnik transformacji (współczynnik przetwarzania). Dla napięć znamionowych $U_p = 20$ kV po stronie pierwotnej i $U_s = 3,25$ V po stronie wtórnej $K_r = U_p/U_s = 6153,85$.

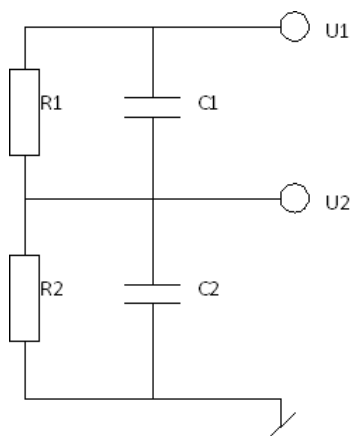
Wymagania dotyczące jakości energii elektrycznej

Wymagania dotyczące jakości energii elektrycznej dostarczonej do odbiorcy reguluje Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Jednym z wymaganych parametrów jest zawartość wyższych harmonicznych opisująca kształt napięcia. Oceny

jej jakości można wykonać poprzez porównanie wyników pomiarów z obowiązującymi przepisami. Jednym z nich jest norma EN 50160:2010 [3] dotycząca zakresu napięć nn i SN i WN do 132 kV. Określono w niej miejsca w których należy oceniać jakość energii elektrycznej, i sposób obróbki i oceny otrzymanych wyników. Norma ta określa parametry napięcia zasilającego w sieciach publicznych, będących własnością dostawcy energii elektrycznej. Dla odbiorcy najbardziej istotne są parametry energii elektrycznej dostarczanej do punktów odbioru. Dlatego też pomiary jakości energii dostarczanej do odbiorców wykonuje się w miejscach zainstalowania układów pomiarowo - rozliczeniowych. Norma ta definiuje, opisuje i precyzuje główne parametry napięcia w miejscu dostarczania energii elektrycznej do użytkowników systemu elektroenergetycznego, zasilanych z publicznych sieci niskiego, średniego i wysokiego napięcia przemiennego w normalnych warunkach pracy systemu.

Metoda pomiaru charakterystyki częstotliwościowej przekładnika

Charakterystyka częstotliwościowa przekładnika napięciowego małej mocy LPVT, wykonanego w postaci rezystancyjnego dzielnika napięciowego, zależy w istotny sposób od dokładności przeprowadzenia kompensacji częstotliwościowej [4–7]. Doboru pojemności kompensującej, dołączonej do rezystora dolnego dzielnika dokonuje się na podstawie znajomości pojemności równoległej do rezystora górnego dzielnika, który jest połączony jedną z końcówek z szyną średniego napięcia. Duża wartość rezystancji rezystora górnego dzielnika sprawia, że wartość jego pojemności jest trudna do wyznaczenia za pomocą miernika RLC. Wartość pojemności równoległej rezystora górnego można wyznaczyć na podstawie znajomości charakterystyki częstotliwościowej przekładnika bez dołączonej pojemności kompensującej. Jednym z istotnych parametrów przekładników napięciowych średniego napięcia jest przesunięcie fazowe wnoszone przez ten przekładnik dla sygnału o częstotliwości 50 Hz. Ma ono znaczenie zarówno podczas pomiarów mocy i energii, jak i przy analizie jakości energii. Dysponując układem do pomiaru charakterystyki częstotliwościowej przekładnika można potwierdzić skuteczność kompensacji. Schemat zastępczy przekładnika napięciowego rezystancyjnego małej mocy został przedstawiony na rysunku 1.



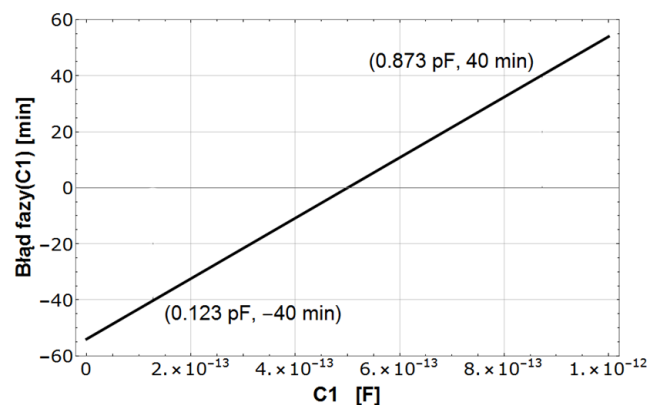
Rys. 1. Elektryczny układ zastępczy dzielnika rezystancyjnego UR

Pojemność C1, składająca się z pojemności pasożytniczej i celowo dodanej w formie okładek kondensatora, jest połączona równolegle do rezystora R1 pracującego na potencjale U1 linii średniego napięcia, natomiast C2 jest pojemnością dołączaną równolegle do rezystora R2 dla skompensowania charakterystyki częstotliwościowej

dzielnika. Zerowe przesunięcie fazy dla przetwornika w całym zakresie częstotliwości uzyskuje się przy spełnieniu warunku przedstawionego wzorem 2

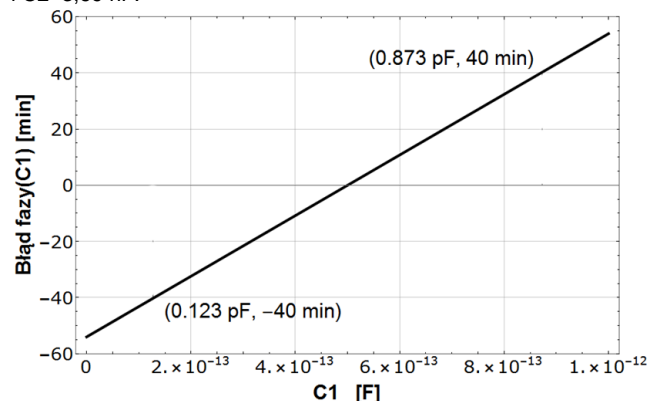
$$(2) \quad C2 = \frac{C1R1}{R2}$$

Norma dotycząca dokładności przetworników UR wymaga aby dla 50 Hz przesunięcie fazowe mieściło się w zakresie ± 20 min. Wartość rezystancji rezystora R1 dzielnika UR wynosi typowo 100 M Ω , a R2 kilkanaście kiloomów w zależności od napięcia znamionowego sieci. Zmierzenie pojemności C1 podłączonej równolegle z rezystancją R1 jest trudne. Znajomość wartości C1 jest istotna dla wyznaczenia C2. Wykres na rysunku 2 przedstawia przesunięcie fazowe transmitancji dzielnika U2/U1 dla 50 Hz, dla wartości C2=3,69 nF (kompensującej tę transmitancję przy C1 = 0,5 pF), w funkcji C1. Wykres pokazuje więc przesunięcie fazy w funkcji niedokładności wyznaczenia C1. Jeśli rzeczywista wartość C1 znajduje się poza przedziałem <0,3 pF, 0,7 pF>, dzielnik UR nie spełnia warunków normy. Wykres ten pokazuje również, że wyznaczenie C1 z dokładnością 10% a następnie C2 z zależności C2=(R1*C1)/R2 pozwala ograniczyć przesunięcie fazy sensora UR do ± 4 min.



Rys. 2. Zależność przesunięcia fazy dzielnika UR od wartości pojemności C1 dla R1=100 M Ω i R2=13,545 k Ω

Dla porównania na rysunku 3 przedstawiono przesunięcie fazy wnoszone przez dzielnik UR w przypadku gdy R1=1 M Ω , R2=135,45 i C2=3,69 nF.



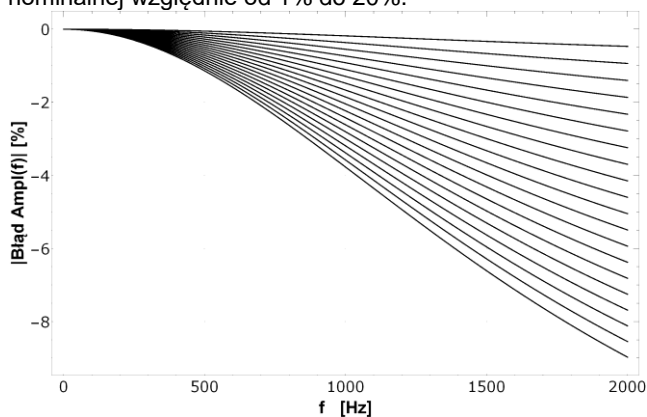
Rys. 3. Zależność przesunięcia fazy dzielnika UR od wartości pojemności C1 dla R1=1 M Ω i R2=135,45 k Ω

Przesunięcie fazy wnoszone przez dzielnik jest mniejsze od 20 min dla C1 w przedziale <0 pF, 19 pF>.

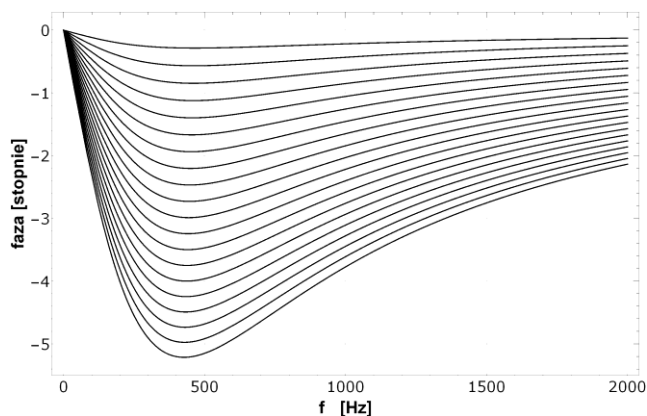
Jak widać z powyższych rozważań, wyznaczenie wartości pojemności kompensującej C2 bazując na pomiarze C1, potencjalnie obciążonym błędem, w przypadku gdy R1 = 100

MΩ, jest trudne. Znacznie lepszą metodą jest wyznaczenie charakterystyki częstotliwościowej sensora, amplitudowej i fazowej, bez dołączonej pojemności kompensującej i na podstawie tej charakterystyki wyznaczenie wartości C1 a następnie wartości pojemności kompensującej C2. Wyznaczenie charakterystyki częstotliwościowej sensora wymaga opracowania metody pomiarowej oraz układu pomiarowego realizującego tę metodę.

Założeniem pracy było opracowanie metody pomiaru charakterystyki częstotliwościowej sensora w celu ostatecznym uzyskania jego parametrów częstotliwościowych, kompensacji jego charakterystyki częstotliwościowej, umożliwiających wykorzystanie go do pomiaru harmonicznych w sieciach średniego napięcia. Jak to zostało pokazane wyżej, charakterystyka częstotliwościowa w istotny sposób zależy od dokładności kompensacji częstotliwościowej sensora. Poniżej, na rysunkach 4 i 5 pokazano rodzinę przebiegów charakterystyki amplitudowej i fazowej sensora dla wartości pojemności kompensującej odbiegającej od wartości nominalnej względnie od 1% do 20%.



Rys. 4. Rodzina amplitudowych charakterystyk częstotliwościowych sensora dla C2 odbiegających od wartości nominalnej od 1% do 20%



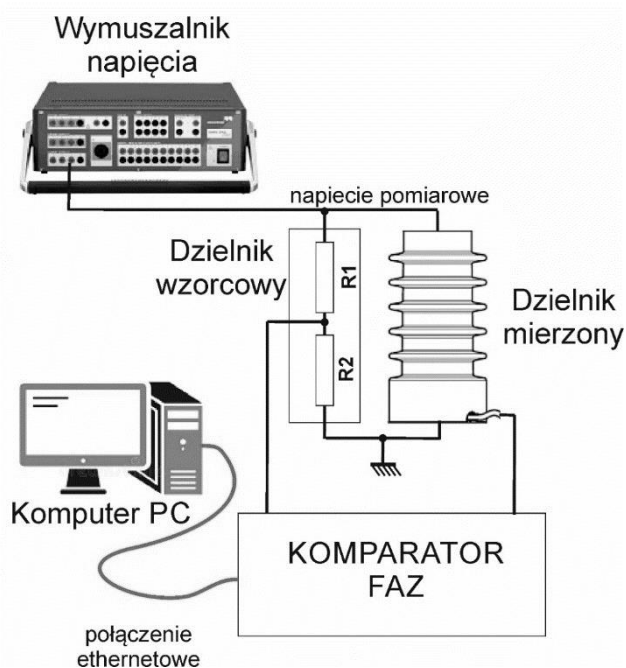
Rys. 5. Rodzina fazowych charakterystyk częstotliwościowych sensora dla C2 odbiegających od wartości nominalnej od 1% do 20%

Na podstawie rysunku 4 można stwierdzić, że niedokładność wyznaczenia wartości kondensatora kompensującego C2 na poziomie 10% powoduje błąd wyznaczenia amplitudy 40 harmonicznej równy ok. 4,5% względem harmonicznej podstawowej.

Układ pomiarowy

Schemat blokowy układu pomiarowego został przedstawiony na rysunku 5. Układ pomiarowy do oceny przesunięcia fazowego rezystancyjnych sensorów napięcia składa się z komparatora faz, dzielników napięcia wzorcowego i

mierzonego, źródła napięcia i komputera z oprogramowaniem. Wymuszalnik napięcia podaje napięcie zmienne równoległe na oba dzielniki, wzorcowy i mierzony. Przy wykorzystaniu generatorów typu Omicron CMC-356 lub Calmet C300B, można korzystać z napięcia do 600 V AC przy częstotliwościach do 1000 Hz. Oba przyrządy podają napięcie z precyzją nastawy do 0,02%. Dla poprawienia wiarygodności pomiarów, napięcie wyjściowe z obu dzielników powinno być zbliżone do siebie, czyli stopień podziału powinien być jednakowy. Dzięki zaawansowanej obróbce obliczeniowej sygnału z komparatora miernika różnicy faz, niewielkie różnice w amplitudzie obu sygnałów nie wpływają na precyzję pomiaru. Dzielnik wzorcowy może być dostosowany do kilku odmian wykonania sensora, czyli dzielnika mierzonego. Dzielnik wzorcowy charakteryzuje się mniejszymi wartościami zastosowanych rezystorów dzięki czemu ich pojemności pasożytnicze wnoszą pomijalne przesunięcia fazowe. Wymuszalnik napięcia podaje napięcie zmienne równoległe na oba dzielniki, wzorcowy i mierzony. Przy wykorzystaniu kalibratorów typu Omicron CMC-356.



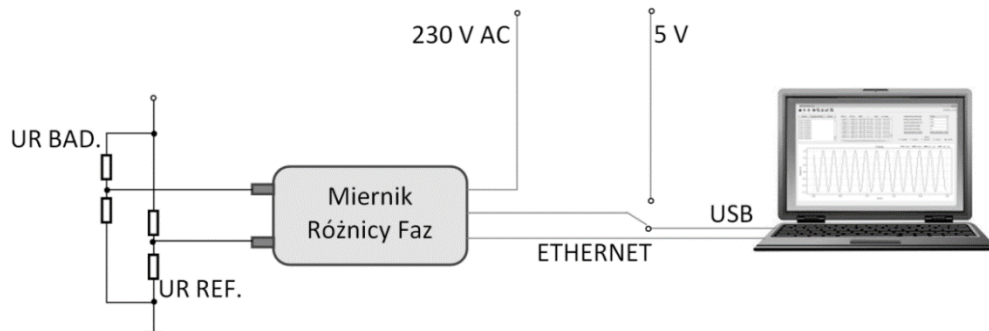
Rys. 5. Schemat stanowiska pomiarowego

Ponieważ pojemność pasożytnicza rezystora głównego, wynosząca np. 1 pF daje dla 50 Hz reaktancję równą 3,18 GΩ, dla rezystora o wartości 100 MΩ wypadkowa rezystancja wyniesie 96,95 MΩ, czyli rezystancja zmniejszy się o ponad 3%. Natomiast w przypadku rezystora wzorcowego R1 o wartości 1 MΩ, rezystancja zmniejszy się o 0,03%, czyli znacznie poniżej dokładności pomiaru.

Oprogramowanie

Stanowisko pomiarowe składa się z miernika różnicy faz, MRF, oraz komputera sterującego, w którym została zainstalowana aplikacja sterująca oraz przetwarzająca dane pomiarowe zwana dalej Aplikacją. Komparator Faz nazywany jest poniżej Miernikiem Różnicy Faz, chociaż w rzeczywistości mierzy on również amplitudę sygnału na wyjściach sensorów. Komunikacja odbywa się za pomocą łącza Ethernetowego, z wykorzystaniem protokołu UDP. MRF dysponuje łączem Ethernetowym o szybkości transmisji równym 100 Mb/sek. Wartość próbki sygnału dla każdego z dwóch kanałów jest przesyłana w postaci czterech bajtów licząc bajt pierwszy jako najbardziej znaczący.

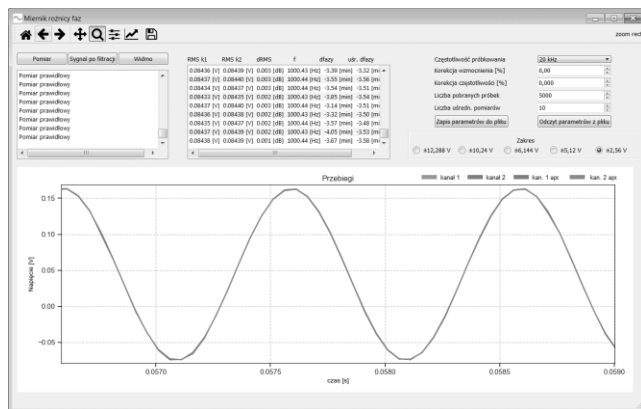
Wartość próbki sygnału jest zapisana w pierwszych 18 bitach (bity 31-14) w kodzie binarnym. Numer kanału jest zapisany w bicie 10 (0 - kanał 1, 1 - kanał 2). Pozostałe bity czterech bajtów są równe 0. Przygotowanie systemu pomiarowego do pracy polega na uruchomieniu Aplikacji na komputerze PC w systemie Windows 7 lub Windows 10, połączeniu MRF z komputerem za pomocą kabla Ethernet oraz dołączeniu zasilania 230 V lub 5 V do MRF. 5 V można doprowadzić do



Rys. 6. Schemat blokowy układu pomiarowego

Badanie układu pomiarowego

Badanie dokładności wyznaczania różnicy faz przez układ pomiarowy polegało na podawaniu sygnału testowego jednocześnie na obydwa kanały i odczytywaniu wyznaczanych wartości RMS mierzonych sygnałów, i różnicy faz oraz częstotliwość sygnału. Badania miały na celu wyznaczenie dokładności pomiaru różnicy faz między sygnałami oraz różnicy amplitud w zależności od poziomu sygnału i częstotliwości składowej podstawowej. MRF radzi sobie dobrze z pomiarem sygnałów o częstotliwości powyżej 50 Hz. Procedury numeryczne w sposób prawidłowy wyznaczają parametry sygnału mierzonego, co przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Wyniki pomiaru dla sygnału wejściowego o częstotliwości 1000 Hz i RMS=84mV;

Podsumowanie

Zastosowanie przekładników napięciowych małej mocy LPVT w systemie kontroli jakości energii wymaga od nich odpowiedniej charakterystyki częstotliwościowej obejmującej minimum 40 harmonicznych częstotliwości sieci 50 Hz. Dla kompensacji częstotliwościowej sensora należy wyznaczyć pojemność C1, a następnie pojemność kondensatora C2 z wyrażenia $C2=R1C1/R2$, uwzględniając przy tym pojemność kabli połączeniowych. Zasadniczą trudnością jest wyznaczenie wartości kondensatora C1 podłączonego równolegle do rezystora R1. Rozdzielczość pomiaru amplitudy oraz fazy transmitancji sensora rezystancyjnego, uzyskana w opracowanym i wykonanym układzie pomiarowym, pozwala wyznaczyć wartość C1 z przebiegu tej transmitancji. Przeprowadzone badania

MRF z tego samego komputera, który jest połączony z MRF kablem Ethernet lub z zewnętrznego źródła 5 V. Aplikacja sterująca i przetwarzająca wyniki pomiarów została napisana w języku Python a następnie skompilowana do pliku wykonywalnego exe. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego z komputerem sterującym został przedstawiony na rysunku 6.

pokazują, że dokładność pomiaru różnicy faz sygnałów na obydwu wejściach jest lepsza od 500 ns a różnica wzmocnienia obydwu kanałów układu pomiarowego jest mniejsza od 0,01%. Pozwala to wykonywać pomiary porównawcze sensorów dla sygnału wejściowego sensorów (tzn. sygnału podawanego od strony średniego napięcia) większego od ok. 560 V. Dokładność pomiaru przesunięcia fazy za pomocą MRF, przedstawiona w artykule daje możliwość wyznaczenia wartości C1 z dokładnością bezwzględną lepszą niż 0,01 pF. Taka dokładność wyznaczenia C1 jest wystarczająca do skutecznej kompensacji częstotliwościowej sensora.

Autorzy: mgr inż. Jerzy Chudorliński, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa. E-mail: jerzy.chudorlinski@itr.lukasiewicz.gov.pl; dr inż. Aleksander Lisowiec, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa. E-mail: aleksander.lisowiec@itr.lukasiewicz.gov.pl; mgr inż. Mariusz Kucharek, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa. E-mail: mariusz.kucharek@itr.lukasiewicz.gov.pl; Grzegorz Kowalski, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Tele- i Radiotechniczny, Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa. E-mail: grzegorz.kowalski@itr.lukasiewicz.gov.pl

LITERATURA

- [1] PN-EN 61869-6:2017-03 - Przekładniki -- Część 6: Dodatkowe wymagania ogólne dla przekładników małej mocy.
- [2] PN-EN IEC 61869-11:2018-07 - Przekładniki -- Część 11: Dodatkowe wymagania dla małej mocy pasywnych przekładników napięciowych, z uwzględnieniem wymagań norm ogólnych
- [3] PN-EN 50160:2010 - Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach elektroenergetycznych
- [4] Walczak J., Pacholski K., Kowalczyk R., Wysokonapięciowy dzielnik rezystancyjny, L Międzyuczelniana Konferencja Metrologów MKM 2018, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 59, DOI: 10.32016/1.59.44
- [5] Nabelec J., Wietula A., Borkowski D., Voltage divider with autocalibration – laboratory studies of a passive version, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 92 NR 11/2016 str. 154-157,
- [6] Dalic M., Mostarac P., Mararic R., Konjevod J. Digital Compensation of a Resistive Voltage Divider for Power Measurement Electronics 2021, 10, 696;
- [7] Winkelholz j., Hitzemann M., Nitschke A. Zygmantowski A., Zimmermann S. Resistive High-Voltage Probe with Frequency Compensation by Planar Compensation Electrode Integrated in Printed Circuit Board Design, *Electronics* 2022, 11, 3446