System pomiarowy do badań kalorymetrycznego przetwornika wartości skutecznej napięcia przemiennego

Marian Kampik, Anna Piaskowy, Krzysztof Kubiczek
Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice

Streszczenie: W artykule opisano zautomatyzowany system pomiarowy, przeznaczony do badań przetwornika kalorymetrycznego (CTVC), który będzie pełnił funkcję pierwotnego wzorca napięcia przemiennego, odtwarzającego wartość skuteczną napięcia o amplitudzie kilku woltów w paśmie od 1 MHz do co najmniej 100 MHz metodą transferu AC-DC oraz RF-AC. W pracy zaprezentowano również procedury pomiarowe. System pomiarowy umożliwia komparowanie termicznych przetworników wartości skutecznej w paśmie od 10 Hz do co najmniej 100 MHz.

Słowa kluczowe: transfer AC-DC, wzorce napięcia przemiennego, termiczny przetwornik wartości skutecznej, system pomiarowy

1. Wprowadzenie

Transfer AC-DC pozostaje jedną z najdokładniejszych metod wyznaczania wartości skutecznej napięcia przemiennego w zakresie od ułamka wolta do 1000 V, typowo w paśmie częstotliwości sięgającym kilkudziesięciu megaherców [1]. W wielu krajowych instytutach metrologicznych wciąż jest to podstawowa metoda odtwarzania napięcia przemiennego o wzorcowej wartości skutecznej. Dzieje się tak pomimo intensywnego rozwoju kwantowych źródeł wzorcowego napięcia przemiennego, wykorzystujących złącza Josephsona. Wzrost niepewności odtwarzanego przez nich napięcia od częstotliwości rzędu kilku kHz oraz ograniczona wartość tego napięcia nadal stanowią istotne ograniczenie praktyczne [2].

W laboratoriach metrologicznych spotyka się zróżnicowane podejścia do badań i wyznaczania charakterystyk przetworników termicznych oraz kalorymetrycznych w szerokim paśmie częstotliwości. Najczęściej są to systemy wykorzystujące metodę transferu AC-DC, zastępowaną niekiedy w paśmie 1–100 MHz metodą transferu AC-AC (RF-AC) [A1]. Kluczową rolę odgrywają w tych systemach stabilne źródła sygnału, przełączniki napięcia wytwarzanego przez te źródła, kontrola poziomu napięcia i warunków dopasowania, a także zsynchronizowany odczyt napięć wyjściowych komparowanych przetworników. W zależności od laboratorium, rozwiązania te są realizowane jako układy w pełni zautomatyzowane lub półautomatyczne (z ręcznym ustawianiem poziomów i ręczną kontrolą sekwencji podstawień AC-DC), często z wykorzystaniem dedykowanych środowisk programistycznych lub zestawów narzędziowych powiązanych z aparaturą [3].

Zaletą istniejących rozwiązań jest możliwość uzyskania wysokiej powtarzalności dzięki ustalonej procedurze pomiarowej i ograniczeniu wpływu czynników losowych, natomiast typowymi ograniczeniami pozostają: czasochłonność pomiarów wynikająca ze stałych czasowych przetworników, wrażliwość wyników na dryft amplitudy i temperatury podczas długich sekwencji oraz brak jednolitego sposobu konfiguracji różnych źródeł sygnału (AC/RF i DC), co utrudnia porównywalność i przenośność procedur między stanowiskami. W tym kontekście przewagą proponowanego w pracy systemu jest integracja obu trybów pomiarowych (AC-DC i RF-AC) w ramach jednego algorytmu sterowania, obejmującego automatyczną korekcję poziomu odniesienia w trakcie sekwencji oraz ujednoliconą konfigurację i obsługę wielu źródeł sygnału w środowisku Excel/VBA.

Zidentyfikowane ograniczenia typowych rozwiązań (czas pomiaru, dryfty oraz brak jednolitej konfiguracji źródeł) stały się jednocześnie przesłanką do kolejnych etapów rozwoju naszej infrastruktury pomiarowej: od rozbudowy stanowiska umożliwiającego pomiary w paśmie 10 Hz – 100 MHz, przez wdrożenie bazy danych wzorców w środowisku Excel, aż po procedury walidacyjne i porównania międzylaboratoryjne o zasięgu międzynarodowym.

W dalszej części artykułu krótko opisano dotychczasowe stanowisko oraz elementy infrastruktury, które stanowią podstawę dla zbudowanego systemu. Punktem wyjścia było wcześniej opracowane stanowisko do napięciowego transferu AC-DC, umożliwiające komparacje przetworników w zakresie 0,5–1000 V i paśmie 10 Hz – 1 MHz z niepewnością typu A, sięgającą 0,1–0,2 µV/V [4]. Konieczność rozszerzenia możliwości pomiarowych tego stanowiska pojawiła się wraz z potrzebą wykonywania badań kalorymetrycznego przetwornika wartości skutecznej napięcia przemiennego CTVC (ang. *Calorimetric Thermal Voltage Converter*). Przetwornik ten, pierwotnie opra-

Autor korespondujący:
Anna Piaskowy, anna.piaskowy@polsl.pl

Artykuł recenzowany
nadesłany 30.01.2026 r., przyjęty do druku 18.05.2026 r.

Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

cowany w National Research Council (NRC) w Kanadzie, został udoskonalony w Katedrze Metrologii, Elektroniki i Automatyki (dalej KMEiA) [5, 6]. Szerokopasmowość CTVC sprawiła, iż nadrzędnym celem prac rozwojowych stało się rozszerzenie pasma, w którym realizowany jest transfer AC-DC do co najmniej 100 MHz.

Kolejnym etapem rozwoju infrastruktury była baza danych wzorców napięcia przemiennego. Zaimplementowano ją w postaci arkuszy Excela, powiązanych z oprogramowaniem stanowisk pomiarowych. Baza przechowuje zarówno bieżące wartości różnic transferowych, jak i ich historię, co pozwala na śledzenie długoterminowej stabilności przetworników. Równolegle rozwijano metodykę wyznaczania różnicy transferowej w paśmie wysokich częstotliwości, czego przykładem są międzylaboratoryjne porównania wzorców AC-DC w paśmie do 30 MHz [7] oraz prace nad matematycznym modelowaniem liczalnych wzorców napięcia AC [8].

Opracowany w KMEiA przetwornik CTVC został zaprojektowany jako szerokopasmowy, liczalny wzorzec różnicy transferowej, którego parametry można zdeterminować na podstawie matematycznego modelu cieplno-elektrycznego. Aby zweryfikować ten model i jednocześnie włączyć CTVC do istniejącego łańcucha spójności wzorców, konieczne było zbudowanie stanowiska zdolnego do wyznaczenia jego różnicy transferowej w szerokim zakresie częstotliwości, sięgającym co najmniej 100 MHz z niepewnością porównywalną z niepewnością stosowanych dotychczas wzorców. W pracy [9] przedstawiono zasadę działania tego przetwornika oraz ogólny schemat stanowiska porównawczego, w którym klasyczny kalibrator Fluke 5700A zastąpiono generatorem RF Siglent SSG5040X, a powyżej 1 MHz zastosowano uproszczoną procedurę RF-AC, polegającą na porównaniu napięcia o dużej częstotliwości z napięciem o częstotliwości 100 kHz zamiast z napięciem stałym.

Dotychczasowy opis systemu pomiarowego koncentrował się głównie na części sprzętowej i ogólnej koncepcji procedury RF-AC, bez szczegółowego omówienia oprogramowania sterującego i sposobu konfiguracji aparatury pomiarowej. Tymczasem to właśnie oprogramowanie systemu pomiarowego, pozwalające na obsługę różnych generatorów AC/RF i DC, kontrolę zakresów napięć i prądów, automatyczną korekcję napięcia stałego oraz integrację z bazą danych wzorców, przesądza o praktycznej użyteczności stanowiska. Celem prezentowanej pracy jest szczegółowy opis zmodernizowanego systemu pomiarowego zarówno od strony sprzętowej, jak i programowej.

2. Przetwornik CTVC i wymagania stawiane systemowi

Przetwornik CTVC składa się z precyzyjnego współosiowego rezystora prętowego, który pełni rolę grzejnika, sprzężonego termicznie z czujnikiem termometrycznym w postaci grubowarstwowego termoelementu typu konstantan–miedź, wykonanego w technologii flex-pcb. Zmiana temperatury grzejnika, spowodowana wydzielaną w nim mocą Joule'a, jest przetwarzana na napięcie stałe rzędu mV, które występuje na wyjściu termoelementu. Zasada działania CTVC jest podobna do zasady działania przetworników SJTC (ang. *Single-Junction Thermal Converters*) i PMJTC (ang. *Planar Multijunction Thermal Converters*), szerzej opisanych m.in. w [4, 7–9]. Tym, co odróżnia CTVC od SJTC i PMJTC jest sposób doprowadzenia napięcia do grzejnika, który ułatwia opracowanie zbudowanie modelu matematycznego, pozwalającego na wyznaczenie jego właściwości metrologicznych w szerokim zakresie częstotliwości.

Termiczna stała czasowa CTVC rzędu kilkunastu sekund jest znacznie większa od stałych czasowych przetworników SJTC i PMJTC (rzędu 1 s). Utrudnia to bezpośrednie stosowanie klasycznych, wielokrotnych sekwencji AC|DC+|AC|DC−|AC. Czas potrzebny na ustalenie się temperatury po każdym przełączeniu napięcia wejściowego jest wtedy bardzo długi, rzędu 300 s. Z drugiej strony konstrukcja współosiowa i rezystor prętowy pozwalają na wykorzystanie CTVC jako wzorca w szerokim paśmie częstotliwości. W badaniach laboratoryjnych przetwornik CTVC był charakteryzowany w zakresie od 1 kHz do 100 MHz. Zmierzona charakterystyka różnicy transferowej była zgodna, w granicach niepewności, z wynikami uzyskanymi na podstawie modelu matematycznego oraz z parametrami podobnych przetworników, opracowanych w NRC.

Podstawowym parametrem CTVC jest różnica transferowa AC-DC, zdefiniowana jako względna różnica między wartościami napięcia stałego i przemiennego na wejściu przetwornika, dla których na jego wyjściu pojawia się to samo napięcie stałe. Dla idealnego przetwornika, reagującego wyłącznie na moc średnią, różnica transferowa byłaby równa zeru w całym zakresie częstotliwości. W rzeczywistości różne zjawiska są przyczyną niezerowej wartości różnicy transferowej. Z uwagi na różny charakter tych zjawisk, parametr ten wyznacza się zazwyczaj w trzech pasmach częstotliwości: małych (10–100 Hz), średnich (100 Hz – 10 kHz) oraz wysokich (od około 10 kHz). Podane przedziały częstotliwości nie są ściśle zdefiniowane i zależą od konstrukcji i właściwości przetwornika.

W procedurze komparacji badany przetwornik CTVC oznaczony jest indeksem „x", a wzorcowy przetwornik (zwykle PMJTC skalibrowany względem wzorców międzynarodowych) indeksem „s". Napięcia wyjściowe obu przetworników w warunkach zasilania napięciem przemiennym oznacza się odpowiednio $E_{x,AC}$ i $E_{s,AC}$, natomiast przy zasilaniu napięciem stałym $E_{x,DC}$ i $E_{s,DC}$. Charakterystykę przetwarzania termicznego przetwornika można lokalnie, w wąskim zakresie napięć opisać zależnością potęgową między napięciem wejściowym a wyjściowym:

$$E = kU^n, \tag{1}$$

gdzie: E – napięcie wyjściowe przetwornika termicznego, U – napięcie wejściowe, k – praktycznie stały współczynnik skalujący w rozpatrywanym zakresie, n – wykładnik charakterystyki przetwarzania, wyznaczony pomiarowo.

Przy takich założeniach różnica transferowa badanego przetwornika $\delta_{x,AC-DC}$ jest opisana równaniem przybliżonym:

$$\delta_{x,AC-DC} \approx \delta_{s,AC-DC} + n_x \frac{E_{x,AC} - E_{x,DC}}{E_{x,DC}} - n_s \frac{E_{s,AC} - E_{s,DC}}{E_{s,DC}}, \tag{2}$$

gdzie: $\delta_{s,AC-DC}$ – różnica transferowa wzorcowego przetwornika (znana z wcześniejszej kalibracji); n_x, n_s – wykładniki charakterystyki przetwarzania odpowiednio badanego i wzorcowego termicznego przetwornika wartości skutecznej TPWS (ang. *Thermal Voltage Converter*).

W procedurze RF-AC realizowanej powyżej 1 MHz, napięcie o wysokiej częstotliwości RF (ang. *radio frequency*), podane na wejścia obu przetworników porównuje się nie z napięciem stałym, lecz z napięciem o mniejszej częstotliwości, typowo 100 kHz. W tym przypadku różnica transferowa jest określona nie względem napięcia stałego (czyli z jej definicji), lecz w odniesieniu do częstotliwości 100 kHz. W procedurze RF-AC na grzejniki obu przetworników kolejno podaje się napięcia U_{RF}, $U_{AC,100\,kHz}$ w sekwencji RF|AC|RF|AC|RF dokonując pomiaru

napięć na wyjściu przetworników. Napięcia te umożliwiają w pierwszym kroku obliczenie różnicy transferowej $\delta_{\mathrm{RF-AC}}(100\ \mathrm{kHz})$ dla obu przetworników. Przy znanej różnicy transferowej $\delta_{\mathrm{AC-DC}}(100\ \mathrm{kHz})$ możliwe jest obliczenie różnicy transferowej $\delta_{\mathrm{AC-DC}}(x)$ dla danej częstotliwości RF.

Specyfika przetwornika CTVC powoduje, że wymagania stawiane systemowi pomiarowemu są bardziej rygorystyczne niż w przypadku klasycznych TPWS. Po pierwsze, konieczne jest zapewnienie bardzo dobrej stabilności amplitudy zarówno źródeł napięcia stałego, jak i przemiennego. Długie stałe czasowe wymuszają wielominutowe czasy oczekiwania na ustalenie się temperatury, co zwiększa wrażliwość na powolne dryfty. Po drugie, przetwornik pracuje w szerokim paśmie, sięgającym 100 MHz. Wymaga to stosowania generatorów RF o małym współczynniku zniekształceń, właściwego dopasowania współosiowego oraz starannego prowadzenia toru pomiarowego, aby zminimalizować wpływ odbić, strat dielektrycznych i sprzężeń pasożytniczych. Po trzecie, ze względu na niewielkie napięcia wyjściowe CTVC rzędu kilku mV niezbędne jest stosowanie nanowoltomierzy o małych szumach i dużej czułości.

System pomiarowy przeznaczony do badań CTVC powinien umożliwiać precyzyjne nastawianie i kontrolę napięć wejściowych, uwzględniać w obliczeniach rzeczywiste wartości rezystancji grzejnika oraz rezystorów zakresowych, a także zapewniać realizację zarówno klasycznej procedury AC-DC w paśmie małych i średnich częstotliwości, jak i procedury RF-AC w paśmie do co najmniej 100 MHz. Spełnienie tych wymagań jest niezbędne, aby przetwornik CTVC mógł skutecznie pełnić funkcję szerokopasmowego wzorca napięcia przemiennego w łańcuchu spójności Laboratorium wzorców AC-DC Politechniki Śląskiej i w realizowanych aktualnie w Laboratorium projektach i porównaniach międzylaboratoryjnych Euramet.

3. Stanowisko pomiarowe

Stanowisko do pomiaru różnicy transferowej CTVC jest zlokalizowane w kabinie ekranowanej wyposażonej w system stabilizujący temperaturę i wilgotność powietrza. Struktura systemu opiera się na dwukanałowym komparatorze TPWS, realizującym procedurę komparacji [5], rozszerzoną o możliwość pracy w trybie RF-AC do co najmniej 100 MHz, która będzie opisana dalej. Badany przetwornik CTVC może być komparowany m.in. z PMJTC i SJTC o nominalnych napięciach wejściowych rzędu 3 V. Napięcie wejściowe obu przetworników doprowadzane jest poprzez współosiowe złącza typu N.

Laboratorium wyposażone jest w źródła napięcia przemiennego: kalibrator Fluke 5700A, generatory z bezpośrednią cyfrową syntezą częstotliwości Tektronix AFG3101, Rigol DG5252 Pro, Tabor WW2572A oraz generatory sygnałowe RF Siglent SSG5040X i Rohde & Schwarz SMB100B. Źródłami napięcia stałego są kalibratory Fluke 5700A, Fluke 5440B, Fluke 5440A (zmodyfikowany). Napięcia wyjściowe przetworników CTVC i PMJTC są mierzone nanowoltomierzami napięcia stałego Keithley 2182A.

4. Oprogramowanie sterujące

Oprogramowanie sterujące zautomatyzowanym systemem realizującym transfer AC-DC i RF-AC zostało zaimplementowane w środowisku Excel/VBA i składa się z modułów odpowiedzialnych za konfigurację przyrządów, definiowanie parametrów pomiaru oraz realizację właściwej procedury pomiarowej. Język programowania VBA umożliwia bezpośrednią integrację warstwy obliczeniowej i raportującej z obsługą przyrządów pomiarowych za pomocą interfejsów GPIB/LAN z użyciem bibliotek VISA dostępnych z poziomu COM. Dzięki temu ten sam plik arkusza pełni funkcję interfejsu użytkownika, modułu sterowania aparaturą oraz modułu rejestracji wyników.

5. Algorytm

Pomiary różnicy transferowej realizowane są w dwóch trybach: AC-DC oraz RF-AC. W implementacji programowej oba tryby są wykonywane w ramach nadrzędnej procedury `MainTransfer`, w której po wstępnej inicjalizacji aparatury (procedura `InstrumInit`) wykonywana jest podwójna pętla po wybranych częstotliwościach i napięciach. Wewnątrz każdej iteracji realizowana jest zadana liczba sekwencji podstawień AC-DC lub RF-AC. Dla procedury AC-DC pojedyncza sekwencja podstawień to $U_{\mathrm{AC1}}|U_{\mathrm{DC+}}|U_{\mathrm{AC2}}|U_{\mathrm{DC-}}|U_{\mathrm{AC3}}$ tj. trzy podstawienia napięcia przemiennego przeplatane dwoma podstawieniami napięcia stałego o przeciwnych polaryzacjach. Napięcia wyjściowe obu przetworników są mierzone dla każdego z pięciu kroków, a do dalszych obliczeń używa się wartości średnich zgodnie z równaniami:

$$E_{\mathrm{DC}} = \frac{E_{\mathrm{DC+}} + E_{\mathrm{DC-}}}{2}, \quad E_{\mathrm{AC}} = \frac{E_{\mathrm{AC_1}} + E_{\mathrm{AC_2}} + E_{\mathrm{AC_3}}}{3}, \tag{3}$$

co minimalizuje wpływ dryftów i szumów nanowoltomierzy.

Następnie realizowane są kolejne sekwencje podstawień AC-DC, a program na bieżąco sprawdza spełnienie warunku liniowości, porównując względną różnicę średnich napięć wyjściowych badanego przetwornika dla napięć wejściowych AC i DC z przyjętą wartością graniczną `LinTol` zawierającą się w przedziale 20–300 μV/V. Parametr ten jest zdefiniowany następująco:

$$\Delta_{\mathrm{lin}} = \frac{E_{\mathrm{x,AC}} - E_{\mathrm{x,DC}}}{E_{\mathrm{x,DC}}\, n_{\mathrm{x}}} \cdot 10^{6}. \tag{4}$$

Jeżeli warunek $\left|\Delta_{\mathrm{lin}}\right| \le \mathrm{LinTol}$ nie jest spełniony, to napięcie odniesienia U_{DC} jest korygowane zgodnie z zależnością:

$$U_{\mathrm{DC}} = U_{\mathrm{DC}}\left(1 + \frac{\Delta_{\mathrm{lin}}}{10^{6}}\right). \tag{5}$$

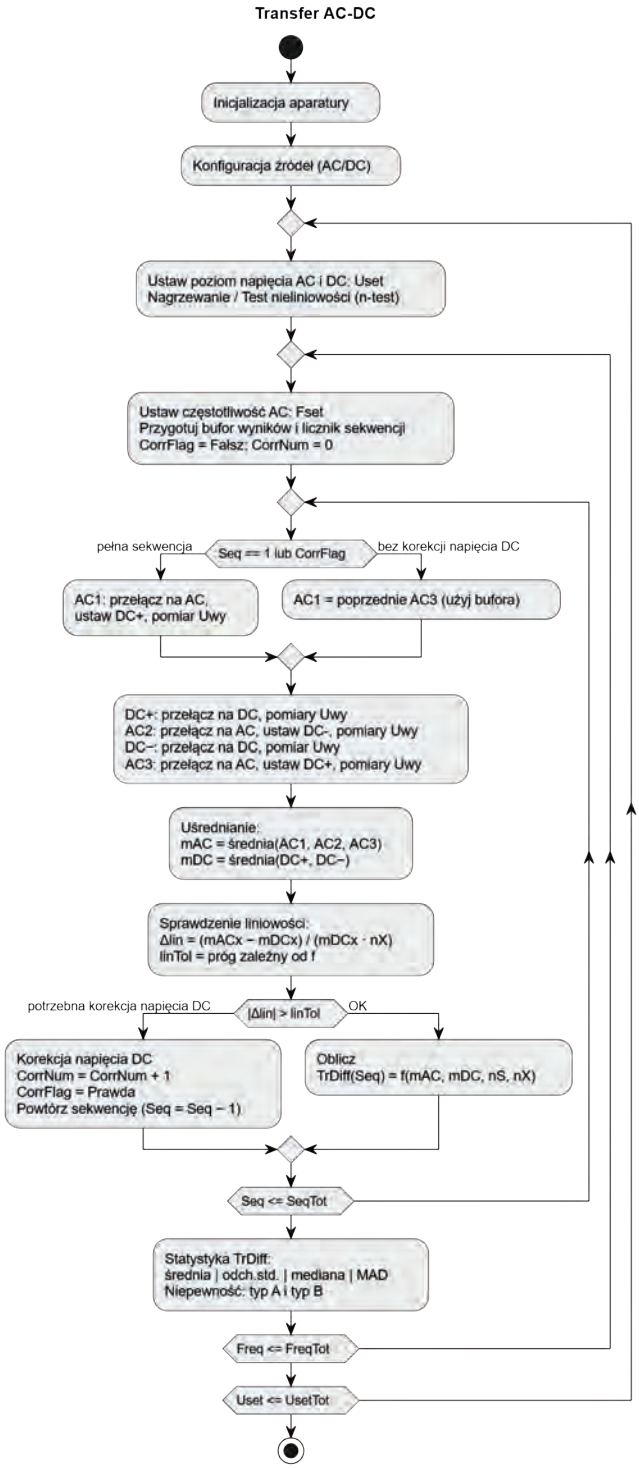
Przebieg procedury pomiarowej AC-DC, realizowanej przez zmodernizowany system pomiarowy, został przedstawiony za pomocą diagramu UML (ang. *Unified Modelling Language*) na rys. 1. Diagram odwzorowuje strukturę pętli nastawy napięć i częstotliwości, sposób realizacji sekwencji podstawień oraz algorytm korekcji napięcia odniesienia i weryfikacji warunku liniowości.

Jeśli źródłem napięcia przemiennego jest generator z bezpośrednią syntezą częstotliwości lub generator sygnałowy, to procedura nastawy napięcia AC jest nieco bardziej złożona. Wynika to stąd, że impedancja wyjściowa tych generatorów jest równa 50 Ω, natomiast w przypadku kalibratora jest ona nominalnie równa zeru. Dla zadanych wartości napięcia i częstotliwości program oblicza wartość nastawy na podstawie podanej przez operatora rezystancji połączonych równolegle wzorców. W dotychczas stosowanych systemach ta dodatkowa czynność nie była wymagana.

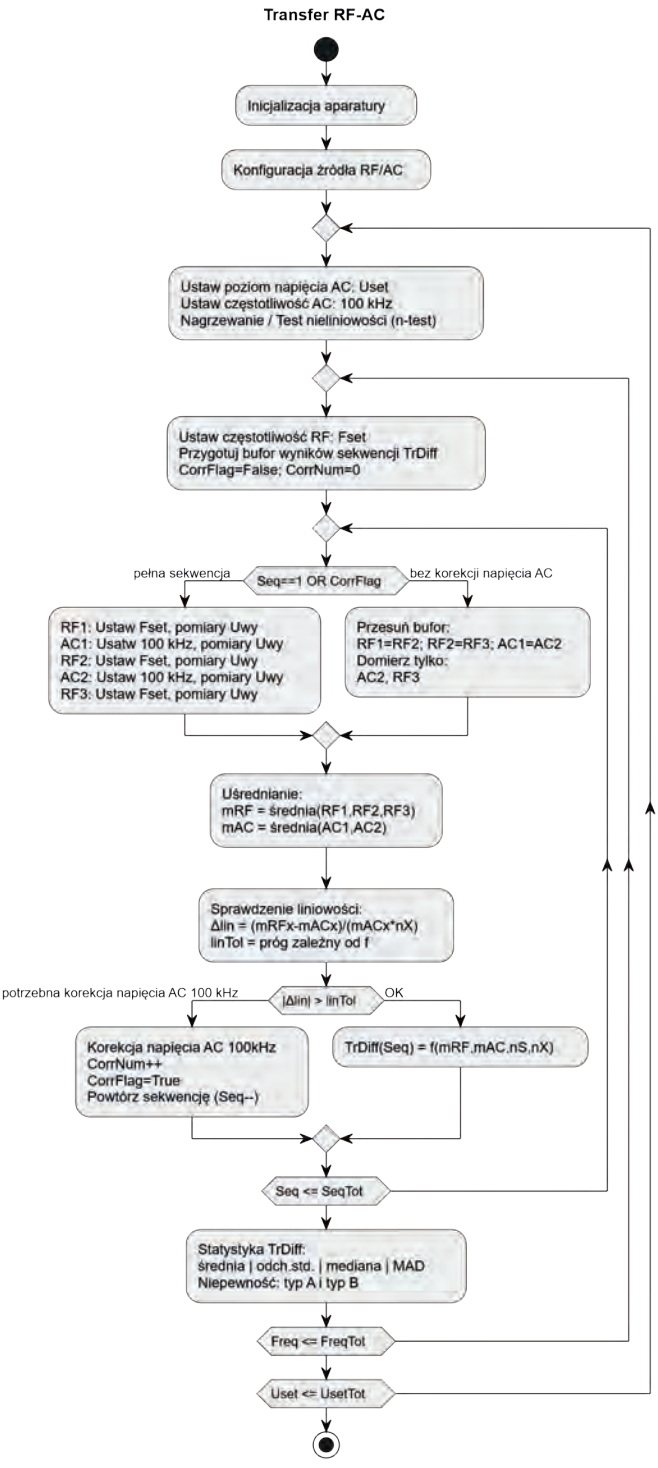
Na rys. 1 przyjęto następujące oznaczenia: `Uset` – zadany poziom napięcia (wartość nominalna punktu pomiarowego), `Fset` – zadana częstotliwość sygnału AC dla danego punktu pomiarowego, `UsetTot` – liczba poziomów napięcia, `FreqTot` – liczba częstotliwości, `CorrFlag` – flaga logiczna informująca, czy w poprzednim przebiegu wykonano korekcję napięcia DC, `CorrNum` – licznik wykonanych korekcji napięcia DC, `TrDiff (Seq)` – różnica transferowa wyznaczona dla danej sekwencji, `Seq` – numer aktualnie wykonywanej sekwencji w danym punkcie (`Uset`, `Fset`), `SeqTot` – liczba sekwencji do wykonania dla danego punktu, DC+ i DC− odpowiada nastawie dodatniej i ujemnej polaryzacji napięcia DC, natomiast `Uwy` oznacza napięcie wyjściowe przetworników zmierzone za pomocą nanowoltomierzy DC.

W trybie RF-AC napięcie stałe zastępowane jest napięciem odniesienia U_{REF} o częstotliwości 100 kHz. Przebieg procedury pomiarowej RF-AC, realizowanej przez zmodernizowany system pomiarowy, został przedstawiony za pomocą diagramu UML na rys. 2. Diagram odwzorowuje strukturę pętli nastawy napięć i częstotliwości, sposób realizacji sekwencji podstawień oraz algorytm korekcji napięcia odniesienia i weryfikacji warunku liniowości.

Właściwa procedura pomiaru różnicy transferowej jest realizowana przez procedurę `MainTransfer`. Po wstępnej inicjalizacji aparatury procedurą `InstrumInit` uruchamiana jest podwójna pętla po zadanych częstotliwościach i napięciach. Wewnątrz każdej z nich wykonywana jest określona liczba sekwencji podstawień AC-DC lub RF-AC. Program wykorzystuje zapisane wcześniej informacje o rezystancji grzejnika i rezystorów



Rys. 1. Diagram UML procedury transferu AC-DC
Fig. 1. UML diagram of the AC-DC transfer procedure



Rys. 2. Diagram UML procedury transferu RF-AC
Fig. 2. UML diagram of the RF-AC transfer procedure

zakresowych, parametrach źródła AC oraz wybranym trybie pomiaru (AC-DC lub RF-AC), aby dla każdej kombinacji częstotliwości i napięcia sprawdzić zgodność z ograniczeniami źródeł oraz przeprowadzić procedurę korekcji napięcia odniesienia U_{DC} lub U_{REF}, jeśli warunek liniowości nie jest spełniony. Wyniki pośrednie (m.in. średnie napięcia wyjściowe przetworników, wartości Δ_{lin}, skorygowane napięcia U_{DC} lub U_{REF} i liczba korekt) są zapisywane w arkuszu „Protocol", natomiast końcowe wartości różnicy transferowej i niepewności w arkuszu „Final protocol".

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono zmodernizowany system pomiarowy umożliwiający pomiar różnicy transferowej kalorymetrycznego przetwornika napięcia przemiennego CTVC w zakresie częstotliwości od 1 kHz do 100 MHz.

Szczególną uwagę poświęcono opisowi oprogramowania sterującego, zaimplementowanemu w środowisku Excel/VBA. Zastosowanie wspólnych struktur danych do opisu przyrządów umożliwia elastyczną konfigurację stanowiska, kontrolę parametrów pracy źródeł oraz automatyczną rejestrację wyników w arkuszach.

Opracowany system stanowi uniwersalną platformę do badań termicznych i kalorymetrycznych przetworników napięcia przemiennego umożliwiający ich włączenie do łańcucha spójności wzorców AC-DC w Laboratorium Wzorców AC-DC Politechniki Śląskiej. W dalszych pracach planowane jest wykorzystanie opisanej infrastruktury do porównań między laboratoryjnych w paśmie do 100 MHz, zwłaszcza w realizowanych obecnie w Laboratorium komparacjach kluczowych Euramet.

Podziękowania

Praca powstała w ramach projektu 022/47/B/ST7/00047, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki (NCN).

Publikacja w ramach projektu finansowanego ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą Wektory Nauki nr projektu WNK/SP/0311/2025/01 kwota finansowania projektu: 276 232,00 zł całkowita wartość projektu: 635 552,00 zł.

Bibliografia

1. Kubiczek K., Kampik M., Grzenik M., Musioł K., Piaskowy A., *Wideband AC Voltage Standards*, „Pomiary Automatyka Robotyka", R. 28, Nr 2, 2024, 81–88, DOI: 10.14313/PAR_252/81.
2. Kubiczek K., Durandetto P., Capra P., Francese C., Lanzillotti M., Roncaglione L., Kampik M., Sosso A., *Direct calibration of a true-rms ac voltmeter against a He-free pulsed Josephson standard*, "Measurement", Vol. 236, 2024, DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114981.
3. Lipe T.E., *Operation and Reference Manual for the NIST Automated AC-DC Calibration Systems and Software*, NIST Special Publication, 2004, DOI: 10.6028/nist.sp.250-61.
4. Kampik M., *Stanowisko do wzorcowania termicznych przetworników wartości skutecznej napięcia przemiennego*, „Przegląd Elektrotechniczny", Vol. 86, Nr 1, 2010, 239–244.
5. Kubiczek K., Grzenik M., Kampik M., *Frequency-dependent component of AC-DC transfer difference of a redesigned calorimetric thermal converter*, "Measurement", Vol. 226, 2024, DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114136.
6. Filipski P.S., Clark R.F., Paulusse D.C., *Calorimetric Thermal Voltage Converter as a Wideband Calculable Standard of AC–DC Difference*, "IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement", Vol. 48, No. 2, 2002, 387–390, DOI: 10.1109/19.769607.
7. Kampik M., Grzenik M., Lippert T., Rydler K.-E., Tarasso V., Trinchera B., *Comparison of a Thermal AC Voltage Standard in the 1 MHz to 30 MHz Frequency Range*, "IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement", Vol. 70, No. 6, 2021, DOI: 10.1109/TIM.2020.3007296.
8. Grzenik M., Kampik M., *Determination of AC–DC Transfer Difference of Calculable Thermal Voltage Converters in 1–30-MHz Frequency Range*, "IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement", Vol. 68, No. 6, 2019, 2072–2077, DOI: 10.1109/TIM.2018.2878632.
9. Kubiczek K., Grzenik M., Kampik M., *Systemy pomiarowe do badań podstawowych parametrów termicznych przetworników wartości skutecznej napięcia przemiennego*, „Przegląd Elektrotechniczny", R. 99, Nr 11, 2023, 265–272, DOI: 10.15199/48.2023.11.51.

Inne źródła

A1. DKD-L 02-2, *Procedures for a traceable RF voltage measurement*, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)/DKD guideline. https://oar.ptb.de/files/download/681c51b053218de84f08e774.

Measurement System for Investigations of Calorimetric Thermal Converter

Abstract: This paper describes an automated measurement system designed to test a calorimetric thermal converter that will serve as a primary AC voltage standard, reproducing the effective value of an AC voltage of several volts from 1 MHz to at least 100 MHz using AC-DC and RF-AC transfer methods. The paper presents also measurement procedures. The measurement system allows for the comparison of thermal converters in a frequency range of 10 Hz to at least 100 MHz.

Keywords: AC-DC transfer, standards of AC voltage, thermal voltage converter, automated measurement systems

dr inż. Krzysztof Kubiczek

krzysztof.kubiczek@polsl.pl
ORCID: 0000-0002-2178-6650

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej (2017). Od 2022 r. adiunkt w Katedrze Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej. Główne obszary zainteresowań to szerokopasmowe precyzyjne termiczne wzorce napięcia, precyzyjne szerokopasmowe boczniki prądowe, kwantowe wzorce napięcia oraz metody numeryczne w modelowaniu wielkości fizycznych. Stypendysta Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej dla 100 wybitnych młodych uczonych na początku kariery naukowej w 2022 roku oraz Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla wybitnych młodych naukowców w 2024 roku. Autor ponad 40 publikacji naukowych, odbył 6 staży naukowych m.in. w Karlsruhe Institute of Technology, Institute for Technical Physics, Karlsruhe, Niemcy, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Turyn, Włochy czy National Scientific and Technical Research Council, Santa Fe, Argentyna. Prowadzi aktywną współpracę z krajowymi instytutami metrologicznymi w tym z National Institute of Standards and Technology, NIST, USA.

prof. dr hab. inż. Marian Kampik

marian.kampik@polsl.pl
ORCID: 0000-0002-4928-3684

Absolwent Politechniki Śląskiej (1988). Dziekan Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej i kierownik Katedry Metrologii, Elektroniki i Automatyki na tym Wydziale. Autor ponad 300 prac naukowych, dotyczących dokładnych pomiarów oraz wzorców wielkości elektrycznych. Laureat Nagrody Siemensa (2003) i Złotego Medalu IEEE (2020). Dwukrotny stypendysta DAAD. Odbył kilkanaście staży w zagranicznych instytutach metrologicznych. Kierownik projektów badawczych i rozwojowych, finansowanych m.in. przez Euramet, KBN, MEiN, NCN i NCBiR.

dr inż. Anna Piaskowy

anna.piaskowy@polsl.pl
ORCID:0000-0001-7577-3946

Absolwentka Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej (2006). Od 2012 r. adiunkt w Katedrze Metrologii, Elektroniki i Automatyki Politechniki Śląskiej. Jej główne zainteresowania naukowe obejmują systemy pomiarowe, precyzyjne pomiary wielkości elektrycznych oraz termiczne wzorce napięcia przemiennego stosowane w transferze AC–DC. Jest autorką i współautorką ponad 60 publikacji naukowych z obszaru pomiarów dokładnych, systemów pomiarowych i systemów zarządzania energią, a także 3 patentów dotyczących nowych metod pomiarowych i wzorcowania. Aktywnie współpracuje z krajowymi instytutami metrologicznymi, m.in. z CMI.