

Chociaż możliwa jest obecnie realizacja jednostki rezystancji przez bezpośrednie odniesienie do stałych fizycznych, to jednak nie są znane zjawiska kwantowe pozwalające na realizację jednostki pojemności i indukcyjności. Jediną opcją jest porównanie pojemności lub indukcyjności z oporem wyznaczonym z kwantowego efektu Halla. W tym celu niezbędne jest zastosowanie odpowiednio dokładnych układów (tzw. komparatorów impedancji). Zasada działania tych układów opiera się na bezpośrednim porównaniu obiektu badanego (DUT) z wzorcem odniesienia (REF) o wystarczająco wysokiej dokładności i stabilności. Wyróżnić można różnicowe i ilorazowe układy komparacji. Obecnie, szczególnie w pomiarach impedancji, głównie ze względu na dynamiczny rozwój kwantowych i cyfrowych źródeł napięcia AC, dominują pomiary ilorazowe. W takich pomiarach parametry DUT są obliczane na podstawie dokładnie zmierzonego (zazwyczaj tzw. układem mostkowym) stosunku nieznannej impedancji do impedancji odniesienia o dobrze znanych parametrach. Najdokładniejsze porównanie impedancji wymaga użycia tzw. współosiowego obwodu czteroprzewodowego (4TP). Nerozwiązanym problemem w układach komparacji 4TP pozostaje kwestia zmniejszenia niepewności pomiarów impedancji do poziomu 10^{-6} bez konieczności stosowania bardzo drogiego kwantowego wielokanałowego wzorca napięcia przemiennego, wykorzystującego efekt Josephsona. Kolejnym problemem naukowym jest opracowanie skutecznych metod testowania tak dokładnego systemu pomiarowego, co pozwoliłoby oszacować niepewność systemu i wykryć źródła błędów już na etapie budowy prototypu. Oba wyżej wymienione problemy zostaną rozwiązane w ramach niniejszego projektu. Celem badawczym projektu jest opracowanie cyfrowego niekwantowego systemu do porównań impedancji, który będzie dokładniejszy niż obecnie dostępne układy. Powodem podjęcia tej tematyki badawczej jest to, że:

1) Pomiary impedancji elektrycznej są wszechobecne w produkcji i badaniu urządzeń elektrycznych i elektronicznych oraz w projektowaniu, produkcji i testowaniu układów elektronicznych. Przykładowo różne typy czujników: termometry oporowe, pojemnościowe czujniki przemieszczenia, czujniki zbliżeniowe (w tym ekrany dotykowe), barometry i higrometry, przekształcają nieelektryczną wielkość wejściową w impedancję elektryczną. Spektroskopia impedancyjna, odgrywająca bardzo ważną rolę w badaniach mieniszczących w szerokim zakresie analiz, takich jak chemiczna i biologiczna charakterystyka ciał stałych, cieczy i materiałów biologicznych oraz w pomiarach właściwości elektrycznych materiałów (przenikalność, przepuszczalność, straty dielektryczne), także opiera się na dokładnym pomiarze impedancji układu lub próbki. Metrologiczna spójność pomiarów impedancji, rozumiana jako odniesienie wyników pomiarów na dowolnym poziomie dokładności do wzorców państwowych, jest zatem warunkiem koniecznym wiarygodności i porównywalności wyników takich analiz. Zapewnienie spójności w pomiarach impedancji wymaga natomiast stosowania wzorcowych układów i systemów pomiarowych, pozwalających odnieść mierzoną impedancję do wzorca o wysokiej dokładności.

2) Brak jest wystarczająco dokładnych systemów pomiaru impedancji dostępnych dla małych krajowych instytutów metrologicznych i innych laboratoriów metrologicznych. Jedyne dostępne systemy do porównywania impedancji na poziomie niepewności 10^{-6} to złożony, niezwykle kosztowny i wymagający wysoko wykwalifikowanego personelu kwantowy mostek z wzorcem Josephsona.

Z ostatnio przeprowadzonych badań wynika wniosek, iż zmniejszenie niepewności niekwantowego systemu komparacji impedancji do poziomu 10^{-6} wymaga opracowania układu ze specjalistycznym dwukanałowym źródłem napięcia zmiennego i powiązanych z nim układami, takimi jak multiplexer, transformator iniekcyjny i sampler. W takim systemie konieczne jest stosowanie wielu technik pomiarów bezzakłóceńowych. Techniki te, takie jak wyrównywanie prądów, bardzo dobre ekranowanie magnetyczne i elektryczne, projektowanie precyzyjnych niskosumnych obwodów elektronicznych, detekcja fazoczuła, eliminacja sił termoelektrycznych, izolowanie elementów generujących zakłócenia, eliminowanie sprzężeń indukcyjnych, metody próbkowania i wiele innych, nie są powszechnie stosowane w komercyjnych precyzyjnych przyrządach do pomiaru składowych impedancji.

Nasza koncepcja układu do porównywania impedancji 4TP opiera się na układzie mostkowym, złożonym z dedykowanego dwukanałowego źródła napięcia przemiennego i porównywanych impedancji. Równoważenie mostka wymaga użycia trzech dodatkowych źródeł sinusoidalnego napięcia przemiennego i dwóch detektorów zera. Po uzyskaniu stanu równowagi mostka spełnione są warunki definicyjne komparacji wzorców 4TP, a zespolony stosunek impedancji może być wyznaczony na podstawie zespolonego stosunku napięć na zaciskach porównywanych wzorców impedancji. Pomiary stosunku napięć odbywają się poprzez ich próbkowanie za pomocą pojedynczego samplera systemu komercyjnego PXI i współosiowego multiplexera. Proponowana technika powoduje, że oba napięcia nie są mierzone jednocześnie, lecz sukcesywnie. Główną zaletą tej metody jest to, że błędy wzmocnienia układu próbkującego, o ile są stabilne w czasie potrzebnym do zmierzenia dwóch napięć, nie wpływają na końcowy wynik komparacji. Dwa kolejne samplery systemu PXI będą służyły do monitorowania równowagi Kelvina układu, co eliminuje wpływ impedancji łączącej porównywane wzorce.

Jak wspomniano powyżej, kluczową kwestią dla poprawy dokładności porównywania impedancji jest opracowanie nowego, wysokoprecyzyjnego dwukanałowego źródła napięcia przemiennego. Źródło opracowane w ramach projektu będzie charakteryzować się bardzo stabilną amplitudą i fazą, a także wysoką rozdzielczością nastawy amplitudy i fazy (odpowiednio: nV i μ rad). Ponadto źródło będzie w pełni zsynchronizowane z samplerelem i multiplexerem. Wykorzystane zostaną wspomniane wyżej techniki pomiarów bezzakłóceńowych. Zostaną zbadane właściwości metrologiczne źródła, w szczególności stabilność stosunku napięć i wartości impedancji wyjściowych. Ponadto zostanie zbadany błąd nieliniowości układu próbkującego. Przewiduje się, że błąd nieliniowości będzie jednym z głównych składników niepewności systemu. Kolejnym zadaniem, niezbędnym do spełnienia założonej dokładności systemu, jest opracowanie, zbudowanie i zbadanie precyzyjnego współosiowego multiplexera, transformatora iniekcyjnego i permutacyjnego układu pojemnościowego. Multiplexer i transformator iniekcyjny stanowią niezależne elementy systemu, natomiast permutacyjny układ pojemnościowy będzie używany do testowania nieliniowości układu próbkującego. W ramach tego zadania pojawi się wiele wątków badawczych, takich jak np. odpowiednie ekranowanie elektrostatyczne, minimalizacja i wyrównanie impedancji bocznikujących czy badanie parametrów RLC elementów przełączających. Wszystkie wcześniej skonstruowane i przetestowane elementy zostaną połączone w jeden system. Zostanie opracowany program sterujący procesem równoważenia układu i obliczający stosunek impedancji. Ze względu na konieczność zrównoważenia dwóch wielkości zależnych, konieczne będzie opracowanie algorytmu równoważenia, który zaimplementowany w programie sterującym umożliwi pełną automatyzację procesu porównywania. System zostanie kompleksowo przebadany za pomocą tradycyjnej metody z kalibrowanymi wzorcami i za pomocą tzw. metody trójkątów, która jest innowacyjna w obszarze komparacji ilorazowych i w której rozwój autorzy wnieśli duży wkład. W oparciu o uzyskane wyniki badań zostanie opracowany budżet niepewności i wyciągnięte zostaną wnioski odnośnie finalnej dokładności systemu.