

Zielona Góra, 26 marca 2024 r.

---

## ANALIZA I BADANIE WŁAŚCIWOŚCI CYFROWYCH NIEZRÓWNOWAŻONYCH KOMPparatorÓW IMPEDANCJI

---

### STRESZCZENIE

---

Układy przeznaczone do dokładnych pomiarów impedancji są stosowane przede wszystkim do porównań wzorców impedancji. Coraz częściej potrzeba ich stosowania wiąże się z pomiarami parametrów komponentów elektronicznych i czujników impedancyjnych. Inny przykład wykorzystania tego typu układów dotyczy spektroskopii impedancyjnej stosowanej w różnego typu badaniach fizyko-chemicznych.

Pomiary wzorców R, C, L są zazwyczaj wykonywane przy użyciu układów zrównoważonych (komparatory zrównoważone, mostki zrównoważone). Układy pomiarowe zrównoważone w porównaniu z układami niezrównoważonymi zapewniają mniejszą niepewność porównania. W ostatnich latach jednym z możliwych i stale udoskonalanych rozwiązań mostków impedancyjnych są obwody z cyfrowymi źródłami napięcia sinusoidalnego (w pełni cyfrowe mostki impedancyjne), w których stan równowagi osiąga się poprzez precyzyjną regulację amplitudy i fazy napięć sinusoidalnych generowanych za pomocą metod cyfrowych - metod wykorzystujących bezpośrednią syntezę cyfrową. Stosunek porównywanych impedancji wyznaczany jest na podstawie wartości amplitud i faz napięć wyjściowych źródeł cyfrowych w stanie równowagi (mostki cyfrowe z kalibrowanymi źródłami napięcia) lub poprzez pomiar stosunku spadków napięć na porównywanych wzorcach za pomocą dodatkowego obwodu pomiarowego realizującego próbkowanie (mostki cyfrowe próbkujące, mostki cyfrowe z pomiarem zespolonego stosunku napięć). Zastosowanie cyfrowych źródeł napięcia sinusoidalnego (CZNS) ułatwia automatyzację procesu równoważenia mostków. Pozwala to na wyeliminowanie eksperymentatora z czasochłonnego procesu porównywania wzorców impedancji. Jednak zrównoważone mostki cyfrowe wymagają wysokiej rozdzielczości regulacji amplitudy i fazy stosowanych cyfrowych źródeł napięcia w procesie równoważenia. Proces równoważenia wymaga również wielokrotnych, fazoczułych pomiarów bardzo małych napięć niezrównoważenia, co prowadzi do wydłużenia procesu równoważenia, a co za tym idzie - wydłużenia czasu pomiaru.

Wyeliminowanie powyższych wad jest możliwe w układach niezrównoważonych (komparatorach niezrównoważonych, mostkach niezrównoważonych). W cyfrowych komparatorach niezrównoważonych, które najczęściej są układami z pomiarem zespolonego stosunku napięć, stosunek porównywanych impedancji wyznacza się poprzez pomiar stosunku spadków napięć na porównywanych impedancjach oraz poprzez pomiar napięcia niezrównoważenia w stanie zbliżonym do równowagi układu. Nie ma wtedy potrzeby stosowania źródeł z precyzyjną regulacją amplitudy i fazy napięć wyjściowych. To znacznie upraszcza konstrukcję mostka i równocześnie skraca czas niezbędny do przeprowadzenia komparacji wzorców.

W pracy autor stawia tezę, że przy wykorzystaniu cyfrowych niezrównoważonych komparatorów impedancji z pomiarem zespolonego stosunku napięć, w pewnych warunkach

można mierzyć stosunek impedancji z dokładnością na poziomie, jaki jest osiągalny w cyfrowych układach zrównoważonych. Jest ona udowodniana poprzez:

- przeprowadzenie analizy i porównania właściwości metrologicznych wybranych niezrównoważonych komparatorów impedancji z pomiarem zespolonego stosunku napięć,
- przeprowadzenie analizy, badań symulacyjnych dokładności pomiaru zespolonego stosunku napięć realizowanego z zastosowaniem wybranego algorytmu cyfrowego przetwarzania sygnałów,
- opracowanie i badania modelu fizycznego niezrównoważonego cyfrowego komparatora impedancji z pomiarem zespolonego stosunku napięć oraz opracowanie budżetu niepewności pomiaru stosunku impedancji typu R-R, C-C i R-C,
- porównanie wyników badań eksperymentalnych otrzymanych przy wykorzystaniu cyfrowego komparatora niezrównoważonego z tymi otrzymanymi przy wykorzystaniu komparatora zrównoważonego.

W rozprawie przedstawiona jest charakterystyka cyfrowych niezrównoważonych komparatorów impedancji. Przedstawiony jest ich podział ze względu na sposób pomiaru napięć oraz ze względu na sposób wyznaczenia stosunku impedancji. Opisane są dwie metody pomiarowe różniące się sposobem wykonywania obliczeń stosunku impedancji. Przy wykorzystaniu pierwszej wykonywany jest pomiar stosunku impedancji w sposób klasyczny tzn. poprzez obliczanie w kolejnych krokach równoważenia wartości nastaw amplitudy i fazy napięć generowanych przez cyfrowe źródła, natomiast przy wykorzystaniu drugiej stosowana jest metoda interpolacji zaproponowana przez autora. W pracy przedstawiony jest schemat elektryczny i model matematyczny cyfrowego komparatora niezrównoważonego. Przedstawione są modele komparowanych wzorcowych impedancji i na ich podstawie opracowane są zależności, dzięki którym można oszacować niepewność pomiaru stosunku składowych dominujących i różnicy lub sumy składowych resztkowych różnych typów porównywanych impedancji. Przedstawiona jest analiza niepewności pomiaru składowych zespolonego stosunku napięć przy uwzględnieniu m.in. błędów kwantyzacji i liniowości układu pomiarowego oraz przy założeniu, że do wyznaczenia amplitudy i kąta przesunięcia fazowego wykorzystywane jest dyskretne przekształcenie Fouriera (ang. *Discret Fourier Transform* – DFT). Przedstawione są wyniki badań symulacyjnych wpływu niepewności pomiaru składowych względnego napięcia niezrównoważenia i pojemności pasożytniczych dla różnych częstotliwości napięć odtwarzanych przez CŹNS na dokładność pomiaru składowych stosunku impedancji. Jeden z rozdziałów pracy dotyczy badań eksperymentalnych nad wybranymi układami cyfrowych niezrównoważonych komparatorów impedancji. Przedstawione są schematy opracowanych dwóch fizycznych układów komparatorów. Szczegółowo opisany jest sposób, w jaki należy skonfigurować poszczególne elementy układu. W rozdziale zawarte są wyniki pomiarów stosunku impedancji typu R-R, C-C oraz R-C dla różnych kombinacji wartości komparowanych wzorców oraz dla różnych częstotliwości pomiarowych. Opracowane są budżety niepewności pomiaru składowych stosunku impedancji. Wyniki pomiarów wartości stosunku składowych dominujących oraz różnic składowych resztkowych przedstawione są w formie wykresów, na których uwzględniono wyniki otrzymane przy wykorzystaniu przedstawionych komparatorów niezrównoważonych i komparatora zrównoważonego. Badania przeprowadzone są również dla wzorców wywzorcowanych w Głównym Urzędzie Miar. Na podstawie wyników pomiarów przedstawione są warunki w jakich powinien pracować cyfrowy komparator niezrównoważony, aby dokładność pomiaru stosunku impedancji była na poziomie jaki osiągalny jest w cyfrowym komparatorze zrównoważonym. W ostatnim rozdziale, który poświęcony jest podsumowaniu wyników badań przedstawionych w rozprawie, podano również wkład własny autora oraz zarysowano przyszłe plany i kierunki dalszych badań nad cyfrowymi niezrównoważonymi komparatorami impedancji.