

System przekazywania jednostek miary wielkości elektrycznych

System przekazywania wartości jednostek parametrów obwodów elektrycznych obejmuje układy pomiarowe oraz złożony zespół wzorców jednostek miary: pojemności, indukcyjności, rezystancji, tangensa kąta stratności, dobroci itp. Jest to uwarunkowane tym, że element obwodu elektrycznego (impedancja) przy prądzie przemiennym charakteryzuje się nie jednym, a dwoma parametrami, które ponadto zależą od rodzaju impedancji zespolonej. Utworzenie całego szeregu niezbędnych wzorców, precyzyjnej aparatury do przekazywania wartości jednostek parametrów impedancji w warunkach ograniczeń finansowych jest praktycznie niemożliwe. Stąd wynika konieczność rozwiązania zadania optymalizacji systemu parametrów układów elektrycznych i przekazywania ich wartości. Taka optymalizacja stanowi istotne uproszczenie i co najważniejsze, potaniecie systemu metrologicznego, zapewniającego pomiar parametrów impedancji przy zachowaniu jego zdolności utrzymania jednolitości pomiarów w rozpatrywanej dziedzinie, na niezbędnym poziomie.

Przy rozwiązywaniu zadania optymalizacji systemu wzorców konieczne jest uwzględnienie następujących uwarunkowań:

- 1) zasadniczo, wzorce jednostek parametrów obwodów prądu przemiennego stanowią (lub mogą stanowić) wzorce jednocześnie dwóch parametrów. Na przykład wzorzec pojemności (lub rezystancji) może występować jednocześnie jako wzorzec zerowej wartości tangensa kąta stratności (kąta fazowego),
- 2) wzorce powyższych jednostek wielkości fizycznych powinno rozpatrywać się jako impedancje zespolone, pomiędzy którymi zachodzi silne wzajemne powiązanie, wyznaczone przy zastosowaniu wzorca częstotliwości.

Współczesne środki techniczne pozwalają przeprowadzać proste, z wykorzystaniem wzorca częstotliwości, porównanie parametrów niejednorodnych wzorców, ze względu na charakter ich głównej składowej. Analiza zagadnienia pozwala na następujące stwierdzenia dotyczące struktury bazy wzorców w zakresie pomiarów parametrów impedancji:

- 1) do zapewnienia pomiaru parametrów impedancji niezbędne są, co najmniej dwa wzorce: wzorzec jednego z parametrów impedancji i wzorzec częstotliwości,
- 2) stosowany wzorzec parametru impedancji powinien być jednocześnie wzorcem podstawowego parametru i uzupełniającego o zerowej wartości (lub wystarczająco małej) tangensa kąta stratności lub tangensa kąta fazowego,
- 3) minimalny system wzorców pozwala na pomiar wzorców jednostki miary impedancji o dowolnym charakterze dwu parametrów,
- 4) do zapewnienia powiązania wzorców z systemem metrologicznym zapewniającym pomiar przy prądzie stałym (w tym również z wzorcami dla prądu stałego i przemiennego

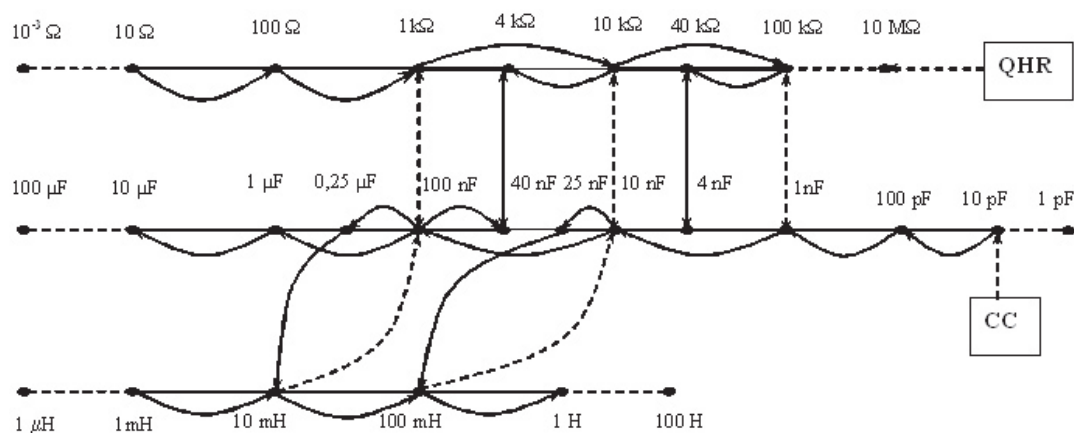
przy wykorzystaniu kwantowego efektu Halla) zestaw wzorców powinien obejmować wzorzec rezystancji,

- 5) do zapewnienia powiązania z wzorcem pojemności (kondensatorem obliczeniowym) pożądane byłoby uzupełnić zestaw o wzorzec pojemności.

W ten sposób ostateczna optymalizacja systemu wzorców w dziedzinie pomiaru parametrów impedancji obejmuje wzorce pojemności, rezystancji i częstotliwości. Wzorce pojemności i rezystancji powinny jednocześnie być wzorcami zerowej wartości tangensa kąta stratności i tangensa kąta fazowego.

Do przekazania (lub odtwarzania) wartości jednostki parametru impedancji koniecznym jest posiadanie zespołu środków pozwalających na porównanie między sobą impedancji z parametrami o takim samym charakterze lub ortogonalnymi (kwadraturowymi). Rozpatrywane zestawy wzorców i środków przekazywania powinny tworzyć jednolity układ pomiarowy, w ramach, którego możliwe jest odtwarzanie i przekazywanie wartości dowolnych, stosowanych obecnie parametrów impedancji.

Wyżej opisana struktura odtwarzania jednostek paramentów impedancji daje możliwość istotnego uproszczenia procesu odtwarzanie jednostek oraz zwiększenia niezawodności. Przytoczony opis tej struktury, jest jednak niewystarczający do utworzenia optymalnego układu sprawdzeń i określenia wymagań dotyczącej aparatury, zapewniającej jego działanie.



Rys. 1. Schemat przekazywania wartości jednostek parametrów impedancji zespolonych: QHR – wzorzec rezystancji wykorzystujący kwantowy efekt Halla, CC – kondensator obliczeniowy

Rys. 1 przedstawia dynamiczne zakresy, w których położone są impedancje wzorców. Linie ciągłe dotyczą przekazania C-R oraz C-L przy częstotliwości 1 kHz, a linie przerywane – przy częstotliwości 1,59 kHz. Jak widać na rysunku, zakresy, w których rozmieszczone są impedancje wzorców miar oddzielnych parametrów, jak również impedancji samych wzorców tych wielkości fizycznych, istotnie się różnią. Powoduje to, że aparatura do przekazywania wartości różnych jednostek, oddzielnych parametrów impedancji również istotnie różni się i zależy od rodzaju mierzonych parametrów. Próby związane z problemem czy stosować dotychczasową aparaturę, czy tworzyć nową aparaturę do przekazywania wartości

jednostek parametrów impedancji, wymaganych dzisiaj, prowadzą nieuchronnie do gromadzenia różnego rodzaju drogiego, precyzyjnego wyposażenia.

Do przekazania wartości jednostki głównych parametrów impedancji konieczne jest zbudowanie komparatora, który cechuje się następującymi funkcjami:

- pozwala na przeprowadzanie porównań parametrów wzorców miar dowolnego rodzaju,
- pozwala na przeprowadzanie porównań parametrów wzorców jednostek miar przy ich dziesiętnym stosunku,
- pozwala na przeprowadzanie porównań parametrów wzorców miar dowolnego rodzaju przy dowolnej wartości parametru dodatkowego (w zakresie do jedności).

Komparator, spełniający przytoczone powyżej wymagania (nazywany współfazowo-przeciwfazowym), pozwoli nie tylko na przekazanie wartości jednostki pojemności, rezystancji i indukcyjności w zakresie wartości, ale także umożliwi przekazanie wartości tych jednostek od odpowiednich wzorców pierwotnych do wzorców miar wielkości fizycznych. Oczywiście urządzenie spełniające przytoczone powyżej wymagania, nie pozwala na realizację powiązań między wzorcami różnych wielkości fizycznych. Jak pokazano na rys. 1 możliwe są trzy rodzaje powiązań między wzorcami różnych wielkości fizycznych:

$$1) C \rightarrow R \text{ lub } R \rightarrow C$$

$$2) L \rightarrow R \text{ lub } R \rightarrow L$$

$$3) C \rightarrow L \text{ lub } L \rightarrow C$$

Powiązanie typu 1 występuje najczęściej przy obecnym sposobie przekazywania jednostki omówienia z rezystancji do reaktancji o charakterze pojemnościowym. Do realizacji tego powiązania konieczny jest komparator kwadraturowy. Należy dodać, że przy realizacji tego powiązania komparator kwadraturowy pracuje w korzystniejszych warunkach, ponieważ tangens kąta stratności i tangens kąta fazowego wzorców miar rezystancji jest zwykle bardzo mały. Tego typu komparatory, będące bardzo skomplikowanymi przyrządami, są szeroko stosowane do porównań impedancji kondensatora obliczeniowego i kwantowego wzorca wykorzystującego efekt Halla.

Powiązanie typu 2 występuje przy przekazywaniu kwadraturowym, które powinno być realizowane przy wartościach tangensa kąta stratności wzorcowej cewki indukcyjnej zbliżonych do jedności. Realizacja takiego powiązania zwykle istotnie komplikuje konstrukcję komparatora i pogarsza jego dokładność.

Powiązanie typu 3 odpowiada klasycznemu układowi odtwarzania jednostki indukcyjności z jednostki pojemności i częstotliwości. Do realizacji tego powiązania nie jest konieczne przekazywanie kwadraturowe. W tym przypadku przeprowadzane jest porównanie reaktancji opatrzonych różnymi znakami. Taki rodzaj powiązania może być realizowany przy zastosowaniu omawianego wcześniej komparatora współfazowo-przeciwfazowego, jeśli w nim przewidziano funkcję uzupełniającą porównywania reaktancji o różnych znakach, co nie jest zadaniem trudnym technicznie.

Przytoczona analiza pokazuje, że optymalny komparator wzorców powinien spełniać również dwie dodatkowe funkcje:

- przekazywanie kwadraturowe impedancji od wzorca pojemności do wzorca rezystancji i odwrotnie,
- przeciwfazowe przekazywanie wartości reaktancji od wzorca pojemności do wzorca indukcyjności i na odwrót.

Funkcja przekazywania może być realizowana w oddzielnym komparatorze kwadraturowym. W takim przypadku pojawia się pytanie, przy jakich wartościach impedancji powinno zachodzić to porównanie. Z analizy wynika, że przekazywanie kwadraturowe $C \rightarrow R$ lub $R \rightarrow C$ jest najbardziej uzasadnione w zakresie impedancji $(1 \div 100)$ k Ω przy porównaniach wzorców o równych wartościach nominalnych impedancji. W tym zakresie znajduje się również klasyczny punkt porównywania pojemności i rezystancji (rezystancja 100 k Ω i pojemność 1000 pF przy częstotliwości 1,59 kHz).

Przekazywanie jednostek $C \rightarrow R$ lub $R \rightarrow C$ przy częstotliwości 1 kHz musi być wykonywane przy zastosowaniu R i C, o wartościach odpowiadających tej samej impedancji. Problem polega na dobraniu takich wartości R i C, które zapewnią najmniejszą niepewność przy zastosowaniu najprostszyc komparatorów. Proponujemy przenoszenie jednostek w punktach: R o wartościach 400 Ω , 4 k Ω i 40 k Ω oraz C o wartościach 400 nF, 40 nF i 4 nF. W takim przypadku łatwe przenoszenie wartości R lub C z wartości decymalnych do powyższych wartości może mieć miejsce przy zastosowaniu komparatora współfazowo-przeciwfazowego o stosunku ramion 0,4, np. ze 100 k Ω do 40 k Ω lub ze 100 nF do 40 nF.

Funkcja przekazywania przeciwfazowego $C \rightarrow L$ lub $L \rightarrow C$ może być połączona, jak wynika to z analizy, z przekazywaniem dziesiętnym. Realizacja takiego przekazywania pokazana jest na rys. 1. Przy tym udaje się obniżyć liczbę przekazania dziesiętnych od wzorca pojemności do punktu przejścia $C \rightarrow L$ i przeprowadzić przekazania od wzorców pojemności do wzorców indukcyjności, których reaktancja jest dziesięciokrotnie mniejsza. Najbardziej racjonalne okazuje się przekazywanie wartości od wzorców jednostek miar pojemności $(10 \div 100)$ nF do wzorców jednostek miar indukcyjności $(10 \div 100)$ mH. Pozwala to podwyższyć dokładność przekazywania wartości reaktancji od wzorców pojemności do wzorców indukcyjności.

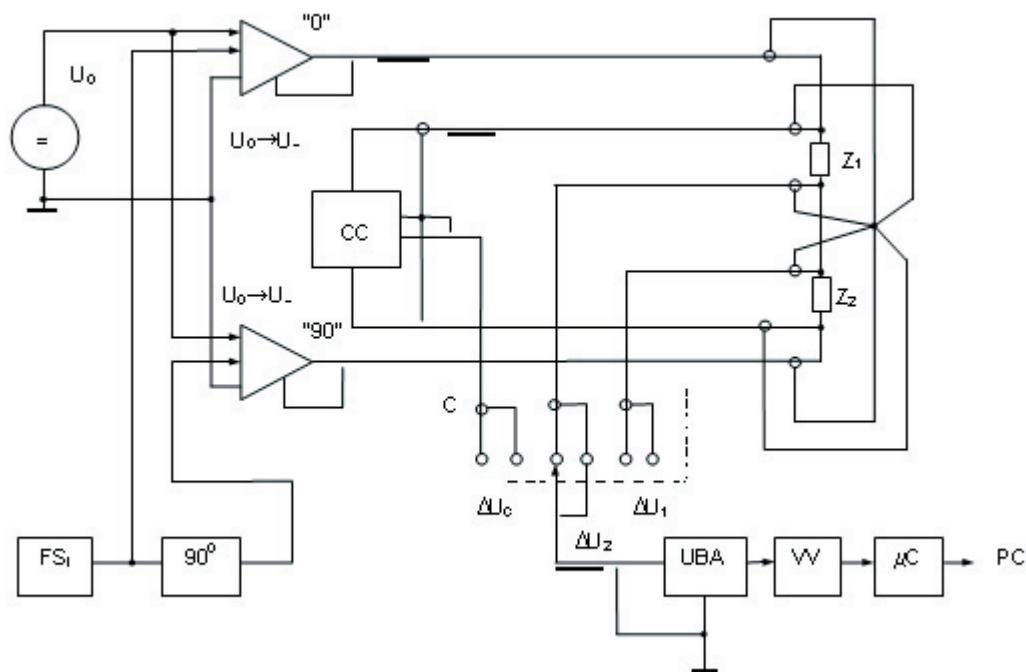
Do realizacji przeniesienia jednostek $C \rightarrow L$ przy częstotliwości 1 kHz proponujemy przeniesienie jednostki z 25 nF do 100 mH lub z 250 nF do 10 mH. W takim przypadku do wyznaczania wartości wzorców pojemności możemy również zastosować komparator o stosunku ramion 0,4, np. z 10 nF do 25 nF. Rys. 1 pokazuje również punkty przeniesienia przy częstotliwości 1,59 kHz.

Integralną częścią optymalizowanego systemu wzorców jest zespół komparatorów:

- kwadraturowy komparator impedancji,
- współfazowo-przeciwfazowy komparator impedancji.

Na rys. 2 przedstawiono schemat struktury komparatora kwadraturowego. Komparator składa się z dwóch cyfrowych generatorów kwadraturowych napięcia „0” i „90” i obwodu kalibracyjnego CC. Generatory kwadraturowe wykonane są przy zastosowaniu precyzyjnych przetworników cyfrowo-analogowych. Współzależności fazowe i amplitudowe sygnałów tych przetworników sterowane są przez PC. Obwód kalibracyjny i specjalna procedu-

ra kalibrowania (adiustacja), pozwalają na wyznaczenie z dużą dokładnością zespolonych stosunków sygnałów generatorów kwadraturowych. Sygnały niezrównoważenia obwodu kalibracyjnego i komparatora w procesie porównania wzorców, mierzone są woltomierzem wektorowym, składającym się z przedwzmacniacza UBA, detektorów synchronicznych VV oraz mikroprocesorowego przetwornika analogowo-cyfrowego μC , którego sygnał wyjściowy wchodzi do PC w celu jego przetworzenia oraz obliczenia wyniku pomiaru.

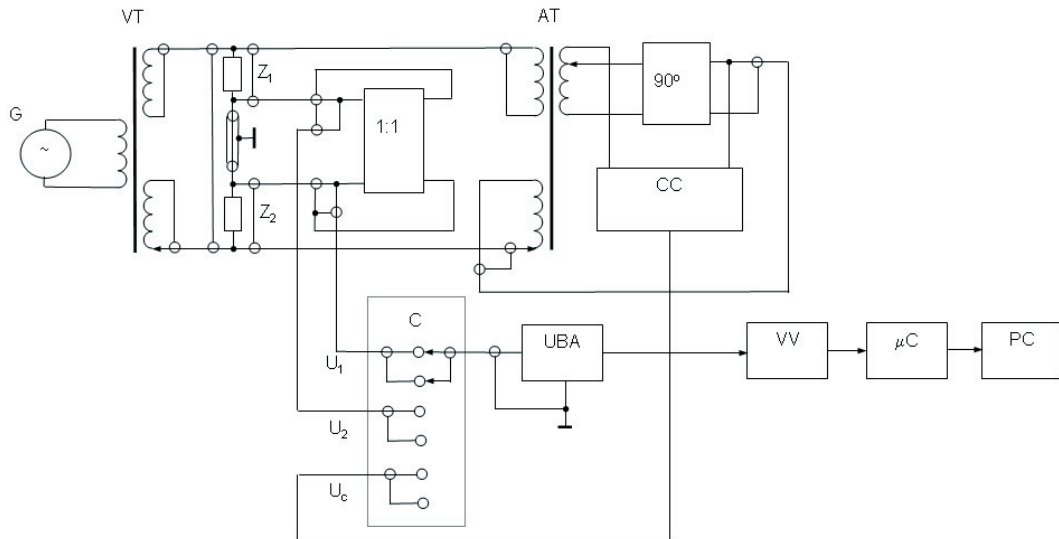


Rys. 2. Komparator kwadraturowy

Charakterystyki techniczne komparatora kwadraturowego:

Częstotliwość pracy (kHz)	1 i 1,59
Przedział porównywanych impedancji (k Ω)	od 1 do 100
Błędy porównania (%)	mniej niż 0,00001

Schemat struktury komparatora współfazowo-przeciwfazowego przedstawiono na rys. 3. Komparator zawiera generator G, ekwipotencjalny transformator VT, autotransformatorowy dzielnik napięcia AT kwadraturowy kanał z systemem kalibracji kwadraturowej i woltomierz wektorowy, składający się z węzłów wspólnych dla komparatorów kwadraturowego i współfazowo-przeciwfazowego. Wspólne sterowanie pracą i obliczenia stosunków porównywanych impedancji odbywa się w PC. Błędy porównania parametru głównego w przedziałach podstawowych są mniejsze niż 0,00001 %.



Charakterystyki techniczne komparatora współfazowo-przeciwfazowego:

Częstotliwość pracy (kHz)	1 i 1,59
Przedział porównywanych impedancji dla:	
– pojemności	od 10^{-7} nF do 10 F
– rezystancji	od $10^{-7}\Omega$ do $10\text{ T}\Omega$
– indukcyjności	od 10^{-11} H do 10 MH
– tangensa kąta stratności lub tangensa kąta fazowego	od 10^{-6} do 10^6

Komparatory kwadraturowy i współfazowo-przeciwfazowy są umieszczone w jednej obudowie i sterowane przez PC z wykorzystaniem różnych pakietów oprogramowania. Praktyczną realizacją przedstawionej aparatury jest komparator model 2100 oraz współpracujący z nim zestaw termostatowanych wzorców pojemności i rezystancji model CA5200RC, stosowany w Zakładzie Elektrycznym GUM.

*Michał Surdu, Aleksander Lameko,
Antoni Tarłowski, Robert Rzepakowski*

*Michał Surdu oraz Aleksander Lameko są pracownikami
Instytutu Elektrodynamiki Ukraińskiej Akademii Nauk w Kijowie.*