

## Kondensator wzorcowy 10 nF z dielektrykiem ceramicznym

### 10 nF reference capacitor with a ceramic dielectric

Maciej Koszarny, Jolanta Jursza, Jerzy Szutkowski, Robert Jasiński, Piotr Szterk (Główny Urząd Miar)

W ramach prac badawczo-rozwojowych, w Samodzielnym Laboratorium Elektryczności i Magnetyzmu Głównego Urzędu Miar zaprojektowano, opracowano i wykonano czterozaciskowy kondensator wzorcowy o wartości 10 nF, z dielektrykiem ceramicznym. Kondensator został umieszczony w termostacie z wbudowanym elektronicznym układem sterowania, który zapewnia bardzo precyzyjne utrzymywanie określonej temperatury. Układ sterowania może być zasilany ze stacjonarnego źródła zasilania lub z dodatkowego akumulatora. Opracowany wzorzec charakteryzuje się bardzo dobrą stabilnością wartości pojemności elektrycznej dla danej częstotliwości oraz małą wartością stratności. Wzorzec ten jest niezbędnym elementem dla transferu jednostki miary pojemności elektrycznej z kwantowego efektu Halla.

In Electricity and Magnetism Laboratory of the Central Office of Measures, a four-terminal reference capacitor 10 nF (with a ceramic dielectric) was designed, developed and made. The capacitor has been placed in a thermostat with a built-in electronic control system which can be powered from a stationary power source or from an additional battery. The developed standard is characterized by a very good stability of the capacitance value for a given frequency and a low loss value  $\tan \delta$ . This capacitor is a necessary element for the transfer of the unit of capacitance from the quantum Hall effect.

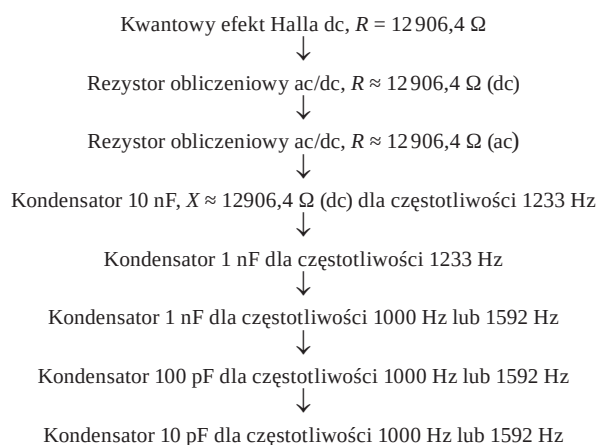
### Wprowadzenie

W Głównym Urzędzie Miar, w Samodzielnym Laboratorium Elektryczności i Magnetyzmu, w Pracowni Wzorców Wielkości Elektrycznych znajduje się państwowy wzorzec jednostki miary rezystancji, oparty na kwantowym zjawisku Halla, a w Pracowni Wielkości Elektrycznych Małej Częstotliwości – państwowy wzorzec jednostki miary pojemności elektrycznej. Trwają prace badawcze nad możliwością powiązania tych jednostek miar.

### Planowany transfer jednostki pojemności elektrycznej

Obecnie jednostka miary pojemności elektrycznej opiera się na państwowym wzorcu, składającym się z grupy czterech bardzo stabilnych kondensatorów wzorcowych 10 pF typu 11A, z dielektrykiem kwarcowym, umieszczonych w ramie termostatyzującej, okresowo wzorcowanych w BIPM. Dzięki posiadanym mostkom pojemności  $C$  typu 2700A-C i 2500A, komparatorowi  $RLC$  typu 2100 oraz wzorcom niższego rzędu typu 11A, 1408, 1404, o wartościach 10 pF, 100 pF, 1000 pF, 1 pF, 0,1 pF, zapewniona jest spójność pomiarowa od wzorca państwowego pojemności elektrycznej do wzorców roboczych pojemności.

Planowany w GUM transfer jednostki pojemności, z wykorzystaniem kwantowego wzorca rezystancji, opartego na efekcie Halla, przedstawiono jak poniżej:



Pracownia Wielkości Elektrycznych Małej Częstotliwości posiada kondensatory 10 pF, 100 pF oraz 1 nF o bardzo dobrych parametrach metrologicznych. Ze schematu powyżej wynika, iż brakującymi elementami transferu są wzorzec pojemności 10 nF oraz wzorcowy rezystor o liczałnej różnicy transferowej ac/dc o rezystancji  $R \approx 12906,4 \Omega$ .

### Konstrukcja i własności wzorca 10 nF

Przy opracowywaniu i wykonywaniu wzorca o pojemności 10 nF głównym założeniem było wyselekcjonowanie kondensatora o założonej wartości pojemności i bardzo dobrej stabilności temperaturowej oraz zaprojektowanie i wykonanie termostatu z elektronicznym

układem sterowania, zapewniającego utrzymywanie temperatury, w której kondensator wykazuje najlepsze parametry.

Wybrano kondensator z dielektrykiem ceramicznym typu GRM55 firmy Murata, dla którego wartość pojemności jest zbliżona do nominalnej 10 nF, tak by zapewnić jak najlepsze dopasowanie impedancji R-C. Wzorzec zbudowany przy wykorzystaniu tego kondensatora charakteryzuje się bardzo dobrą stabilnością wartości pojemności. Współczynnik temperaturowy pojemności tego kondensatora jest równy około  $10 \mu\text{F}/\text{F}/^\circ\text{C}$  dla temperatury z przedziału od  $23^\circ\text{C}$  do  $25^\circ\text{C}$  i około  $0 \mu\text{F}/\text{F}/^\circ\text{C}$  dla  $(25 \div 27)^\circ\text{C}$ . Współczynnik stratności kondensatora  $\text{tg } \delta$  przy 1 kHz jest mniejszy niż  $6,5 \cdot 10^{-5}$ . Kondensator umieszczono wewnątrz bardzo dobrze termicznie zaizolowanej obudowy, w której temperatura utrzymywana jest na poziomie  $(26,44 \pm 0,01)^\circ\text{C}$ , przy temperaturze otoczenia  $(22 \div 24)^\circ\text{C}$ . Temperatura ta zapewnia optymalną stabilność impedancji kondensatora. Układ termostatu stabilizuje temperaturę z błędem  $\pm 0,01^\circ\text{C}$ . Układ ten jest zasilany z zasilacza sieciowego lub z akumulatora o wartości  $(12 \div 14,4) \text{V}$  (DC). Widok prototypu wzorca przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Widok kondensatora wzorcowego 10 nF zbudowanego w GUM

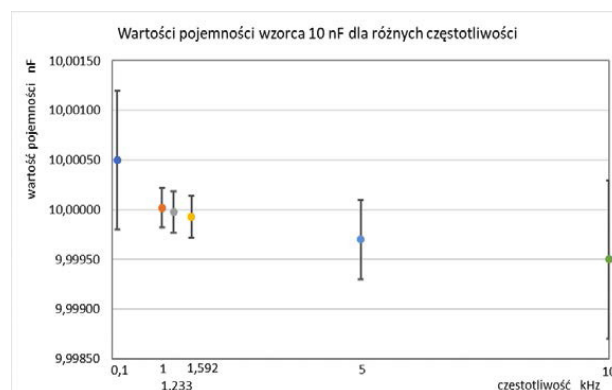
Zastosowanie akumulatora pozwala na wyeliminowanie wpływu zakłóceń sieci zasilającej oraz na bezpieczne przenoszenie i transport wzorca. Wewnątrz obudowy umieszczono czujnik Pt100, pozwalający na pośredni pomiar temperatury wewnątrz termostatu. Zaciski kondensatora połączono przewodami ekranowanymi o odpowiednich własnościach elektrycznych z czterema gniazdami BNC, umieszczonymi na obudowie i odpowiednio oznaczonymi. Taka konstrukcja pozwala na pomiar metodą czteroprzewodową.

Pojemność kondensatora zmierzono metodą bezpośrednią, przy pomocy mostka 2700A-C (firmy

Andeen-Hagerling), przy częstotliwości 100 Hz, 1 kHz, 1,233 kHz, 1,592 kHz, 5 kHz i 10 kHz. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 1 oraz na rys. 2.

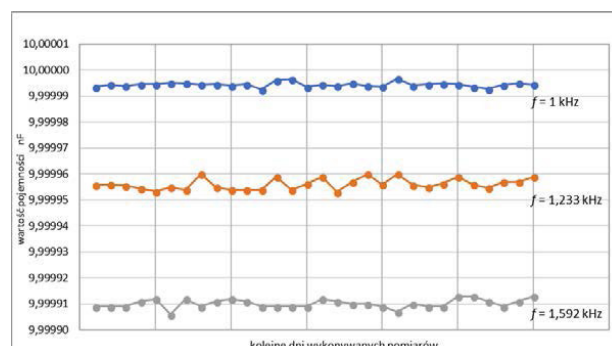
Tabela 1. Zestawienie wyników przeprowadzonych pomiarów

Częstotliwość (Hz)	Wartość zmierzona pojemności (nF)	$\text{tg } \delta$
100 Hz	$10,0005 \pm 0,0007$	$< 2,6 \cdot 10^{-5}$
1 kHz	$10,00002 \pm 0,00020$	$< 6,2 \cdot 10^{-5}$
1,233 kHz	$9,99998 \pm 0,00021$	$< 7 \cdot 10^{-5}$
1,592 kHz	$9,99993 \pm 0,00021$	$< 8,2 \cdot 10^{-5}$
5 kHz	$9,9997 \pm 0,0004$	$< 2 \cdot 10^{-4}$
10 kHz	$9,9995 \pm 0,0008$	$< 3,8 \cdot 10^{-4}$



Rys. 2. Zależność wartości pojemności wzorca od częstotliwości

W paśmie częstotliwości: 100 Hz  $\div$  10 kHz rozrzut wartości wzorca wynosi maksymalnie  $100 \mu\text{F}/\text{F}$ , a w paśmie: 1 kHz  $\div$  1,592 kHz mniej niż  $10 \mu\text{F}/\text{F}$ , co potwierdza małą zależność wartości pojemności wykonanego wzorca od częstotliwości. Wzorzec charakteryzuje się bardzo dobrą stabilnością i powtarzalnością wartości pojemności, co przedstawiono na rys. 3. Współczynnik temperaturowy wzorca jest bliski zeru.



Rys. 3. Stabilność wartości kondensatora przy różnych częstotliwościach



Rys. 4. Widok układu pomiarowego z komparatorem RLC 2100 i kondensatorami wzorcowymi

Na rys. 4 przedstawiono widok układu pomiarowego z wykorzystaniem komparatora RLC 2100 i kondensatorów wzorcowych.

### Podsumowanie

Opracowany i zbudowany wzorzec 10 nF, o bardzo dobrej stabilności temperaturowej i w funkcji częstotliwości, pozwoli w przyszłości na transfer jednostki miary pojemności od kwantowego wzorca jednostki rezystancji, przy wykorzystaniu wzorca  $R_{ac/dc} = 12906,4 \Omega$ . Następnie, przy częstotliwości pomiaru  $f = 1233 \text{ Hz}$ , pozwoli to na

dalszy transfer jednostki pojemności, poprzez kondensatory wzorcowe 1 nF, 100 pF do 10 pF, która jest nominalną wartością państwowego wzorca jednostki miary pojemności elektrycznej. W całym procesie transferu jednostki muszą być spełnione warunki odnośnie do porównywalnych wartości impedancji R-C.

### Literatura

- [1] Kibble B. P., Proposals for Extending Traceable Impedance Measurements to Higher Frequencies, *Metrologia*, vol. 35 (1998), nr 1, s. 17-20.
- [2] Callegaro L., D'Elia V., Serazio D., 10-nF Capacitance Transfer Standard. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, vol. 54 (2005), nr 5, s. 1869-1872.
- [3] Surdu M., Lameko A., Tarłowski A., Rzepakowski R., Utworzenie optymalnej bazy wzorców w dziedzinie pomiaru parametrów impedancji zespolonych, *PAR*, nr 10 (2007), s. 5-10.
- [4] Musioł K., Badania współczynników temperaturowych wzorców impedancji, *PAK*, vol. 59 (2013), nr 7, s. 597-600.

Artykuł jest tekstem referatu (z drobnymi zmianami redakcyjnymi), przedstawionego na XIII konferencji naukowo-technicznej PPM'18, która odbyła się w dniach od 4 do 6 czerwca 2018 roku w Szczyrku.