

Piotr Filipski

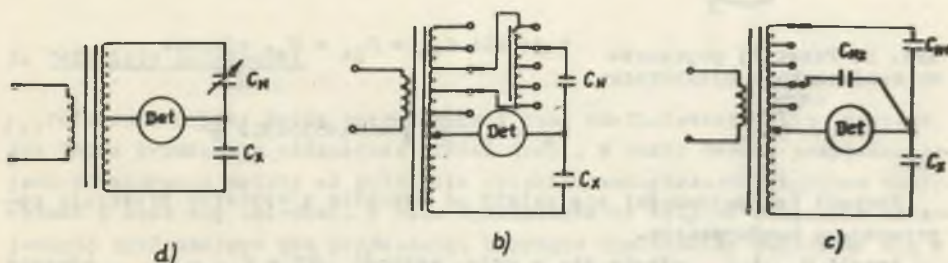
Instytut Metrologii i Maszyn Elektrycznych
Politechniki Śląskiej

KONDENSATOR WZORCOWY O ZMIENNEJ POJEMNOŚCI

Streszczenie. W pracy opisano konstrukcję zmiennego kondensatora wzorcowego zbudowanego na zasadzie kondensatora Lamparda-Thompsona.

1. Wprowadzenie

Do precyzyjnych pomiarów małych pojemności, tzn. pojemności mniejszych niż 10 pF, używane są mostki transformatorowe. W mostkach tych stosuje się indukcyjne dzielniki napięcia, które pozwalają otrzymać stosunki napięć 1:1, 1:10, 1:100, z błędem dokładności $1 \cdot 10^{-7}$ i mniejszym. Klasę mostków z indukcyjnymi dzielnikami napięcia określają głównie zastosowane w mostku wzorce pojemności. Dla zrównoważenia mostka transformatorowego do pomiaru pojemności używane są metody pokazane w uproszczeniu na rys. 1.



Rys. 1. Sposoby równoważenia mostków transformatorowych do pomiaru pojemności

W precyzyjnych mostkach transformatorowych do pomiaru pojemności najczęściej stosuje się sposób przedstawiony na rys. 1a. Wymagane jest w nim użycie kilku stałych wzorców pojemności.

Wykonanie stałych wzorców o małej pojemności w klasie lepszej niż 0,05 napotyka na liczne trudności. Wynikają one z konieczności kompensacji temperaturowych zmian pojemności oraz zapewnienia dobrej stałości w czasie.

Na przykład kondensatory o małych pojemnościach produkowane w ZSRR typu KME-4M, KWM-3, KWD, mają niestabilność czasową rzędu $\pm (0,02 \dots 0,05)\%$ /rok i nie mogą być uwierzytelnione z większą dokładnością [1].

Innym sposobem powiększenia dokładności mostka transformatorowego do pomiaru małych pojemności może być zastosowanie sposobu a) lub b) z rys. 1.

W IMiE Politechniki Śląskiej podjęto próbę wykonania precyzyjnego kondensatora zmiennego o małej pojemności klasy 0,01 o konstrukcji umożliwiającej współpracę z przenośnym mostkiem laboratoryjnym. Konstrukcję tego kondensatora oparto na zasadzie kondensatora liczalnego Lamparda-Thompsona. Na tej zasadzie budowane są absolutne wzorce pojemności.

2. Kondensator liczalny Lamparda-Thompsona

Zasadę podaną przez Lamparda, [2], [3] można przedstawić następująco:

Niech krzywa S, na rys. 2, przedstawia przekrój poprzeczny nieskończonej długiej przewodzącej powierzchni cylindrycznej, podzielonej na cztery części nieskończenie małymi odstępami izolacyjnymi wzdłuż tworzących cylindra. Pojemności pomiędzy przeciwległymi częściami cylindra obliczone na jednostkę długości cylindra niech wynoszą C_{13} i C_{24} . Wartości tych pojemności związane są ze sobą następującą zależnością (w próżni):



$$\exp\left(-\frac{\pi C_{13}}{C_0}\right) + \exp\left(-\frac{\pi C_{24}}{C_0}\right) = 1 \quad (1)$$

Rys. 2. Przekrój poprzeczny kondensatora cylindrycznego

i jeżeli $C_{13} = C_{24} = C_0$, wówczas

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{\ln 2}{\pi} \frac{F}{m} = 1,95354902 \frac{pF}{m} \quad (2)$$

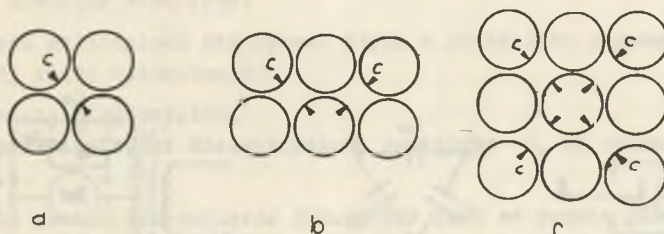
Wartość tej pojemności nie zależy od kształtu i wymiarów przekroju poprzecznego kondensatora.

Jeżeli C_{13} i C_{24} różnią się o małą wartość $\Delta C = C_{13} - C_{24}$, wówczas średnia pojemność C_m jest równa:

$$C_m = \frac{C_{13} + C_{24}}{2} = C_0 \left[1 + \frac{\ln 2}{8} \left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \dots \right] \approx C_0 \left[1 + 0,0866 \left(\frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \dots \right] \quad (3)$$

Równość dwóch pojemności skrośnych C_{13} i C_{24} najłatwiej można uzyskać w układzie symetrycznym.

W oparciu o teoretyczną analizę właściwości różnych przekrojów poprzecznych Thompson [4] zaproponował jako najlepszy do realizacji praktycznej wzorca absolutnego kondensator składający się z czterech kołowych walców usytuowanych w wierzchołkach kwadratu, o przekroju pokazanym na rys. 3a.



Rys. 3. Przekrój poprzeczny kondensatora liczalnego Lamparda-Thompsona; a) układ pojedynowy, b) układ podwójny, c) układ poczwórny

Kondensator Lamparda-Thompsona ma dwie własności, które w szczególności predystynują go do budowy wzorców:

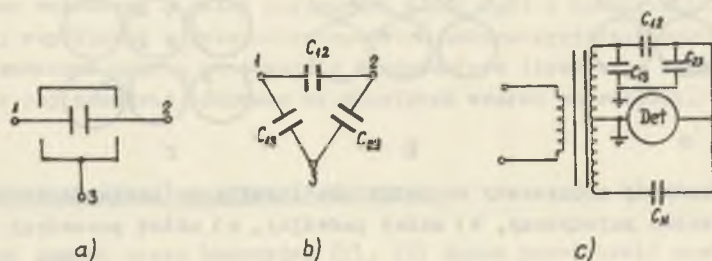
- 1) dla określenia jego pojemności wystarczy pomiar tylko jednego wymiaru liniowego - długości,
- 2) mała asymetria przekroju poprzecznego ma drugorzędny wpływ na określenie pojemności średniej C_m (por. równanie 3).

Ze względu na małą pojemność jednostkową, która wynosi około 0,02 $\frac{pF}{cm}$ kondensatory Lamparda-Thompsona budowane są jako podwójne, np. [4], [7] i poczwórne [6], (rys. 3b,c).

Do budowy wzorca laboratoryjnego wybrano układ poczwórny, wg rys. 3c.

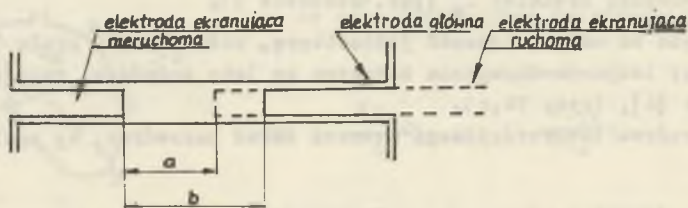
3. Definicja pojemności

Pojemność między dwoma przewodnikami jest zdefiniowana tylko wówczas, gdy jeden przewodnik całkowicie otacza drugi. W takim jednak przypadku pojemność mierzona zależy od położenia obiektów zewnętrznych względem doprowadzeń i może się zmieniać. W celu wyeliminowania wpływów otoczenia na pojemność kondensatora dwa przewodniki tworzące kondensator umieszcza się w ekranie elektrostatycznym. Otrzymuje się w takim przypadku kondensator trójzaciaskowy (rys. 4a). Schemat zastępczy kondensatora trójzaciaskowego i sposób jego włączenia do układu pomiarowego pokazano na rys. 4b,c. W takim układzie pomiarowej pojemności C_{13} i C_{24} nie wpływają na wyniki pomiaru, a jedynie zmniejszają osułość układu pomiarowego. Sposób określenia długości czynnej kondensatora Lamparda-Thompsona pokazano na rys. 5. W metodzie tej długość czynna jest zmieniana za pomocą ruchomej elektrody ekranującej, której przemieszczenie jest mierzone. Zmiany pojemności w funkcji przemieszczenia są liniowe, jednakże gdy ruchoma elektroda ekranująca znajduje się zbyt blisko nieruchomej elektrody ekranującej, wówczas zmiany pojemności stają się nieliniowe ze względu na występujący efekt brzo-
gowy.



Rys. 4

a) Kondensator trójzaciskowy, b) schemat zastępczy kondensatora trójzaciskowego, c) sposób włączenia kondensatora trójzaciskowego do układu pomiarowego



Rys. 5. Sposób definiowania długości czynnej kondensatora przy pomocy elektrod ekranujących

Dlatego pojemność wzorcowa określana jest jako

$$C_N = C_0 (b - a)$$

dla tak dobranego odstępu początkowego "a", przy którym otrzymuje się liniowy przyrost pojemności.

4. Konstrukcja i wykonanie modelu

Przy projektowaniu modelu oparto się na następujących założeniach [4], [5], [6], [7]:

- zachować dokładność wykonania wymiarów geometrycznych konstrukcji mechanicznej $\pm 0,01$ mm,

- zachować odstęp izolacyjny pomiędzy sąsiednimi elektrodami nie większy niż 0,1 średnicy elektrody.

Przy tych założeniach największe błędy w określeniu pojemności wzorca zamierzonej klasy wprowadzają:

- błąd pomiaru przesunięcia,
- zmiana przenikalności dielektrycznej powietrza ϵ_p ze zmianą warunków otoczenia.

W modelu pomiar przesunięcia dokonywany jest za pomocą głowicy mikrometrycznej stalowej o zakresie 0 ... 2 oale i błędzie odczytu $1 \cdot 10^{-4}$ oala.

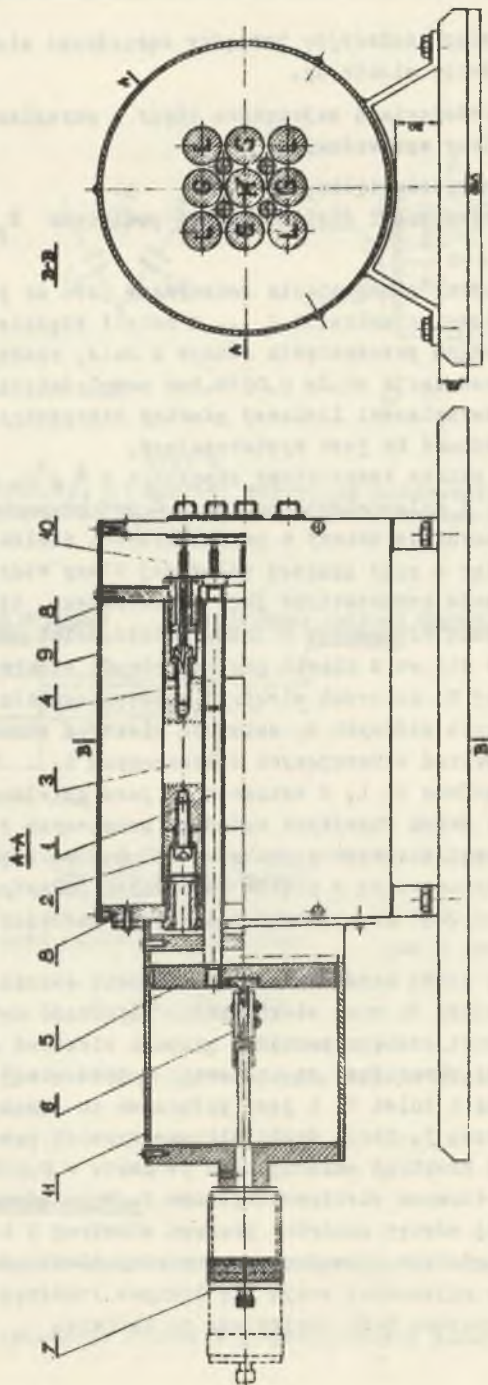
Przy oalkowitym przesunięciu równym 2 oale, rozdzielczość $1 \cdot 10^{-4}$ oala daje błąd przesunięcia około 0,005%, bez uwzględnienia nieznanego współczynnika rozszerzalności liniowej głowicy mikrometrycznej. Dla oalów modelowych dokładność ta jest wystarczająca.

Według [6] zmiana temperatury otoczenia o $\pm 2^\circ\text{C}$, ciśnienia atmosferycznego o ± 20 Tr i wilgotności powietrza $\pm 20\%$ od warunków normalnych (20°C 760 Tr, 60%) powoduje zmiany w przenikalności dielektrycznej powietrza o $\pm 2 \cdot 10^{-5}$, a więc o rząd poniżej założonej klasy wzorca. Dzięki temu możliwe jest wykonanie kondensatora jako powietrznego, bez hermetyzacji.

Schemat modelu wykonanego w ZDEMP Politechniki Śląskiej pokazano na rys. 6. Składa się on z pięciu grup elektrod: elektrody centralnej wysokopotencjałowej H, czterech elektrod niskopotencjałowych L, czterech elektrod ekranujących głównych G, czterech elektrod ekranujących ruchomych 1 i czterech elektrod ekranujących nieruchomych 4.

Elektrody główne H, L, G wykonane są jako dzielone i składają się z trzech części: dwóch skrajnych końcówek ochronnych 2 oraz odizolowanej od nich przekładkami mikowymi o grubości ok. 0,1 mm części centralnej 3. Elektrody główne wykonane są z prętów mosiężnych pokrytych niklem; średnica elektrod wynosi 26,5 mm, odstępy izolacyjne pomiędzy sąsiednimi elektrodami wynoszą ok. 2 mm.

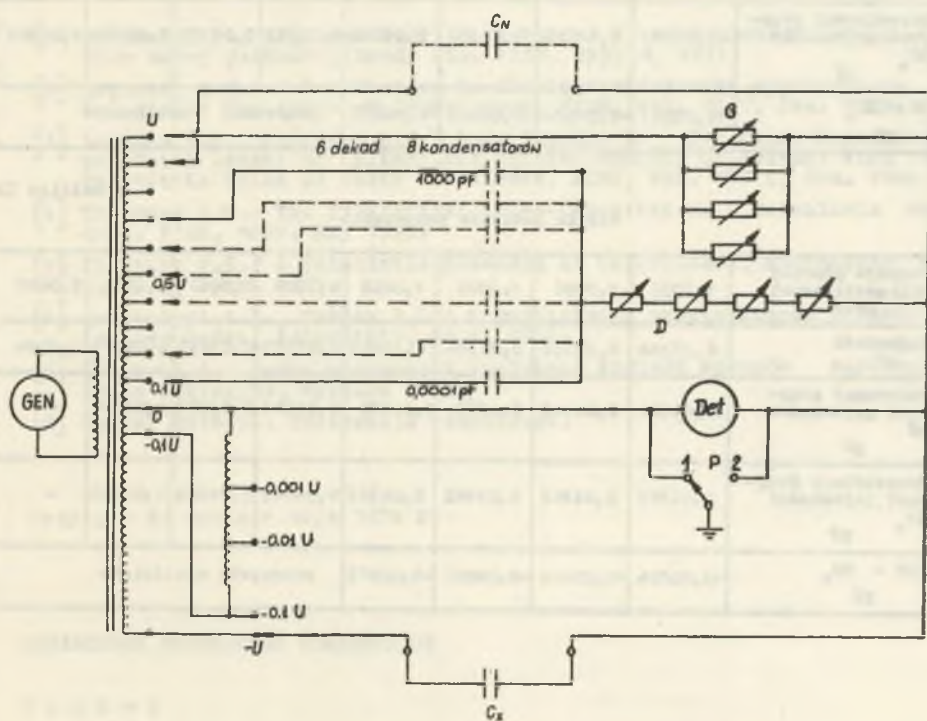
Konstrukcję nośną kondensatora tworzą dwie aluminiowe płyty kołowe 8 wraz z umocowanymi do nich elektrodami. Pojemność kondensatora definiowana jest w funkcji odstępów pomiędzy grupami elektrod ekranujących 1 i 4. Ruchome elektrody ekranujące są umocowane w przesuwnej płycie kołowej 5, która przesuwa się w tulei 11 i jest połączona za pomocą przegubu 6 z głowicą mikrometryczną 7. Obrót śruby mikrometrycznej powoduje zmianę odstępów między grupami elektrod ekranujących (1 obrót = 0,025 oala). Kondensator otoczony jest ekranem elektrostatycznym 5. W położeniu początkowym śruby mikrometrycznej odstęp pomiędzy grupami elektrod 3 i 4 wynosi około 1 mm. Po określeniu odstępów początkowego pomiędzy elektrodami począwszy od którego przyrosty pojemności stają się liniowe ("odstęp początkowy") ruchome elektrody ekranujące będą wymienione na krótsze.



Rys. 6. Schemat kondensatora

5. Wyniki pomiarów i wnioski

Pomiary pojemności modelu wykonano za pomocą mostka transformatorowego f-ny General Radio typ GR1615A. Schemat tego mostka pokazano na rys. 7, [8]). Jako wskaźnika równowagi użyto nanowoltomierza selektywnego f-ny Unipan typ 237. Pomiary wykonano przy częstotliwości 1000 Hz. Pomiary pojemności wykonano dwukrotnie, przy jednokierunkowym przesuwaniu elektrod ekranujących. Tym sposobem wyeliminowano z wyników pomiaru wpływ luzu posiowego przegubu.



Rys. 7. Uproszczony schemat mostka GR 1615A

C_N - wzorcowo zewnętrzny, G, D - rezystory nastawne służące do równoważenia składowej czynnej mierzonej impedancji, P - przełącznik rodzaju pracy, położenie 1 - pomiar pojemności trójzwoicowych, położenie 2 - pomiar pojemności dwuzwoicowych

Wyniki pomiarów podane w tablicach I i II odpowiadają obrotowi głowicy mikrometrycznej w kierunku zgodnym i przeciwnym z ruchem wskazówek zegara.

Gdy odległość między elektrodami ekranującymi wynosi powyżej 1 cala (≈ 25 mm), błąd przyrostu pojemności nie przekracza oczekiwanej wartości

Tabela I

Wyniki pomiarów pojemności

Pozycja głowicy mikrometrycznej oale	1,7500	1,5000	1,2500	1,0000	0,7500	0,5000	0,2500	0,0000
Pojemność pF	0,27366	0,22401	0,17441	0,12494	0,07605	0,03082	0,00284	0,0004
Zmierzony przy- rost pojemności ΔC pF	0,04965	0,04960	0,04947	0,04889	0,04523	0,02798	0,02440	-
Teoretyczny przy- rost pojemności ΔC_0 pF	0,04962	0,04962	0,04962	0,04962	0,04962	0,04962	0,04962	0,04962
$\Delta C - \Delta C_0$ pF	+0,00003	-0,00002	-0,00015	-0,00073	przyrosty nieliniowe			

Tabela II

Wyniki pomiarów pojemności

Pozycja głowicy mikrometrycznej oale	1,7500	1,5000	1,2500	1,0000	0,7500	0,5000	0,2500	0,0000
Pojemność pF	0,27308	0,22342	0,17394	0,12441	0,07555	0,03045	0,00274	0,0004
Zmierzony przy- rost pojemności ΔC pF	0,04966	0,04948	0,4953	0,04884	0,04501	0,02871	0,02340	-
Teoretyczny przy- rost pojemności ΔC_0 pF	0,04962	0,04962	0,04962	0,04962	0,04962	0,04962	0,04962	-
$\Delta C - \Delta C_0$ pF	+0,00004	-0,00014	-0,00007	-0,00078	przyrosty nieliniowe			

Wynika stąd, że konieczny odstęp początkowy winien być nie mniejszy niż 25 mm.

Błąd dokładności pomiaru małych pojemności za pomocą mostka GR1615A jest większy niż błąd wynikający ze spodziewanej klasy modelu, jednak autor nie napotkał w literaturze krajowej wzmianki o wykonaniu mostka do pomiaru małych pojemności o mniejszym błędzie dokładności.

Dokładniejsze pomiary umożliwi wielodekadowy indukcyjny dzielnik napięcia obecnie konstruowany w IMiE Politechniki Śląskiej.

LITERATURA

- [1] Girżman N.I., Loginova I.S.: Rozrabortka i issledovanie obrazowych mier małej jomkosti, Trudy SiB. NIIM, vyp. 8, 1971.
- [2] Lampard, D.G.: A New Theorem in Electrostatics with Applications to Calculable Standards of Capacitance, PEE, vol. 104C, Jan. 1957.
- [3] Lampard D.G., Cutkosky R.D.: Some Results on the Cross-Capacitances per Unit Length of Cylindrical Three-Terminal Capacitors with Thin Dielectric Films on their Electrodes, PEE, vol. 107 C, Jan. 1960.
- [4] Thompson A.M.: The Cylindrical Cross-Capacitor as a Calculable Standard. PEE, 106B, May 1959.
- [5] Clothier W.K.: A Calculable Standard of Capacitance, Metrologia, vol. 1, Nr 2, April 1965.
- [6] Grochalski A.L., Kašćev E.L.: O pastrojenii precizjonnoho transformatornoho mosta, Avtometria, Nr 1, 1966.
- [7] Zborucki A.: Próba utworzenia krajowego systemu wzorców pojemności, Praca doktorska, Wrocław 1966.
- [8] Mostek GR1615A. Instrukcja techniczna.

Przyjęto do druku w maju 1974 r.

ОБРАЗЦОВЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ КОНДЕНСАТОР

Резюме

Описывается конструкция переменного образцового конденсатора. Приведены результаты измерений модели конденсатора.

STANDARD CAPACITOR OF VARIABLE CAPACITY

Summary

In this paper the construction of the variable standard capacitor of the Lampard-Thompson type is described and the results of the initial measurements are given.

Parameter	Value	Unit	Notes
Capacitance C_1	1000	pF	
Capacitance C_2	1000	pF	
Capacitance C_3	1000	pF	
Capacitance C_4	1000	pF	
Capacitance C_5	1000	pF	
Capacitance C_6	1000	pF	
Capacitance C_7	1000	pF	
Capacitance C_8	1000	pF	
Capacitance C_9	1000	pF	
Capacitance C_{10}	1000	pF	
Capacitance C_{11}	1000	pF	
Capacitance C_{12}	1000	pF	
Capacitance C_{13}	1000	pF	
Capacitance C_{14}	1000	pF	
Capacitance C_{15}	1000	pF	
Capacitance C_{16}	1000	pF	
Capacitance C_{17}	1000	pF	
Capacitance C_{18}	1000	pF	
Capacitance C_{19}	1000	pF	
Capacitance C_{20}	1000	pF	
Capacitance C_{21}	1000	pF	
Capacitance C_{22}	1000	pF	
Capacitance C_{23}	1000	pF	
Capacitance C_{24}	1000	pF	
Capacitance C_{25}	1000	pF	
Capacitance C_{26}	1000	pF	
Capacitance C_{27}	1000	pF	
Capacitance C_{28}	1000	pF	
Capacitance C_{29}	1000	pF	
Capacitance C_{30}	1000	pF	

1955