

Mieczysław Pluciński
Brunon Szadkowski
Instytut Metrologii i
i Maszyn Elektrycznych

MOSTEK DO BADANIA DYSPERSJI DIELEKTRYKÓW W ZAKRESIE MAŁYCH I BARDZO MAŁYCH CZĘSTOTLIWOŚCI

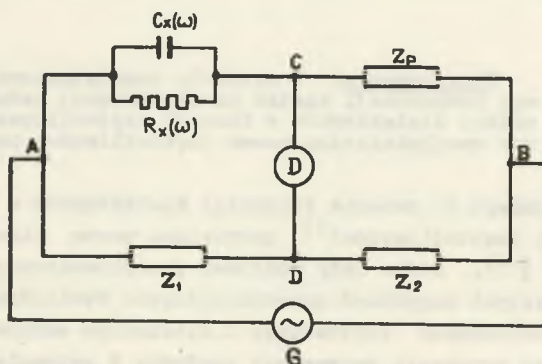
Streszczenie. W artykule przedstawiono propozycję nowej konstrukcji mostka umożliwiającej badanie zmian własności dielektryków w funkcji częstotliwości ze szczególnym uwzględnieniem pasma częstotliwości podakustycznych.

Układom mostkowym do badania dyspersji dielektryków w zakresie małych i bardzo małych częstotliwości^{x)} poświęcono pewną liczbę prac [1], [3], [4], [6], [7], [13], które były podstawą przeprowadzonej w pracy [9] bliższej charakterystyki zagadnień konstrukcyjnych. Stwierdzono, że w rozważanych układach mostkowych podstawowym i niezbędnym warunkiem ich realizacji w ogóle jest uzyskanie optymalnej czułości i optymalnej zbieżności w obranym zakresie częstotliwości pomiarowych. Dopiero w dalszej kolejności o konstrukcji mostka decydują inne czynniki, jak np. rozwiązanie układu elementów regulacyjnych, eliminacja szkodliwych sprzężeń itp. Tak sformułowane warunki muszą być szczególnie przestrzegane w obszarze częstotliwości podakustycznych, natomiast przy częstotliwościach pasma akustycznego wymagania stają się znacznie łagodniejsze. Dlatego też w konstrukcji mostka przewidywanego do eksploatacji w obu wymienionych pasmach, decydują kryteria pasma podakustycznego.

Z porównania mostków proponowanych w cytowanej literaturze wynika, że wszystkie można sprowadzić do jednego podstawowego schematu zastępczego, tj. czteroramiennego mostka o rezystancyjnych ramionach stosunkowych a zakres częstotliwości pomiarowych tych mostków zawiera się w granicach 10^{-2} ... 50 lub max 200 Hz (oprócz mostka odchyłowego Morel'a [4]). To też skłoniło autorów niniejszego opracowania do badań nad możliwościami utworzenia innych konstrukcji w ogóle, jak również nad możliwościami

^{x)} tj. w pasmach akustycznym i podakustycznym do 10^{-2} Hz.

ich optymalizacji, poszerzenia zakresu pomiarowego itp. [8], [9], [11], Wnioski z przytoczonych prac wykorzystane będą w dalszym ciągu dla uzyskania proponowanej konstrukcji opartej o metodę zerową. Należy jeszcze zaznaczyć, że proponowana konstrukcja opracowana została w celu przeprowadzenia badań izolacji maszyn elektrycznych i transformatorów, w przypadku których najbardziej charakterystyczne zjawiska relaksacyjne (wolnozmiennne) występują w pasmach: podakustycznym oraz akustycznym do $10^4 \dots 10^5$ Hz. Zakresu tego nie obejmują mostki przedstawione w przytoczonej literaturze, zaś zmiana narzędzia pomiarowego w toku badań byłaby tutaj bardzo niepożądana.



Rys. 1. Schemat podstawowy mostka

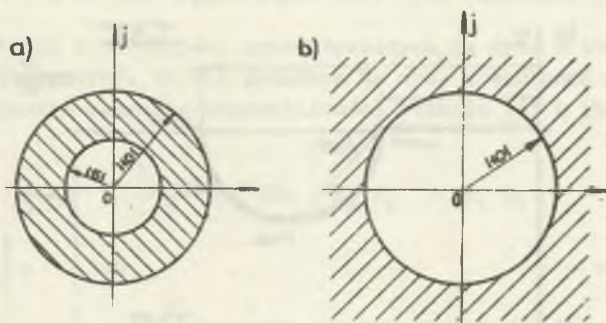
Projektowany układ mostkowy wywodzi się z podstawowego schematu czteroramiennego mostka typu Wheatstone'a (rys. 1).

Na rys. 1 wprowadzono oznaczenia: Z_1 i Z_2 - impedancje stosunkowe (pomocnicze), Z_p - impedancja porównawcza, C_x i R_x - elementy schematu zastępczego obiektu badanego traktowane jako zależne od częstotliwości (wg definicji zespolonej przenikalności dielektrycznej - [2]), D i G - detektor oraz generator zasilający. Charakterystyczną cechą podanego schematu podstawowego jest założenie, że elementy regulacyjne skupione są w jednym ramieniu mostka tworząc impedancję Z_p . Założenie to nie jest przypadkowe lecz konieczne dla uzyskania największej zbieżności mostka i co istotne, niezależnej od częstotliwości [11]. Zagadnienie zbieżności jest szczególnie ważne przy eksploatacji mostka w zakresie częstotliwości podakustycznych. Duże wartości okresów zmian napięcia zasilania powodują znaczne wydłużenie czasu trwania pomiaru, a zatem liczba regulacji niezbędnych dla zrównoważenia mostka powinna być możliwie mała.

Obok zbieżności, podstawowym warunkiem prawidłowej konstrukcji rozważanego układu mostkowego jest uzyskanie optymalnej czułości, tzn. możliwie dużej i praktycznie niezależnej od częstotliwości w obranym zakresie.

O spełnieniu tego warunku, niezależnie od doboru źródła zasilania oraz detektora, decyduje struktura impedancji ramion mostka, a w szczególności impedancji stosunkowych Z_1 i Z_2 .

W pracy [10] wykazano, że zachowanie optymalnej czułości wymaga takiego dobrania stosunków impedancji Z_x/Z_1 oraz Z_1/Z_2 , aby ich charakterystyki amplitudowo-fazowe odwzorowywały w zadanym zakresie częstotliwości pewne funkcje (otrzymane ze szczegółowej analizy czułości rozważanych mostków), zwane funkcjami celu. Dla najczęściej występującego w praktyce przypadku, gdy impedancja wejściowa detektora jest mała w porównaniu z impedancją badanego dielektryku^{x)}, funkcje celu przedstawiają pewne obszary na płaszczyźnie Gaussa, pokazane na rys. 2.



Rys..2. Funkcje celu (obszary zakreskowane wraz z obwodami okręgów) a) dla stosunku impedancji Z_1/Z_2 , b) dla stosunku impedancji Z_x/Z_1

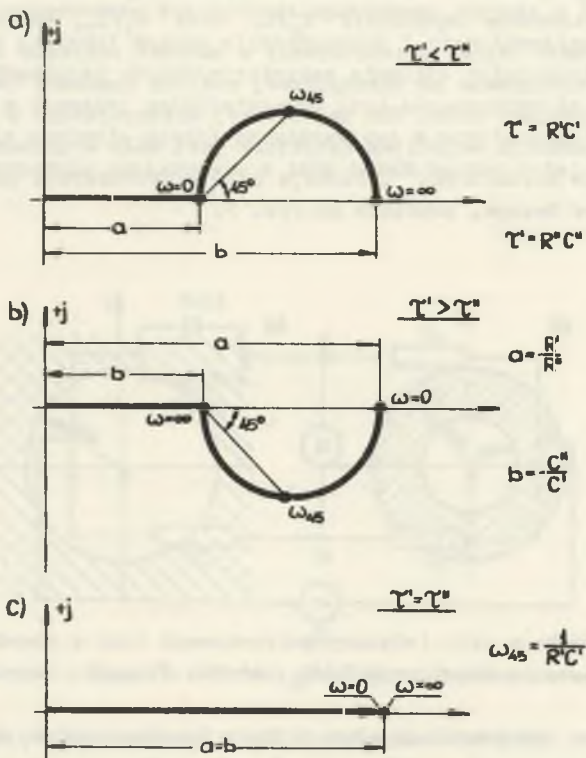
Należy zatem tak dobrać impedancje Z_1 i Z_2 przy zadanej Z_x , aby charakterystyki amplitudowo-fazowe określonych uprzednio stosunków tych impedancji, w obranym zakresie częstotliwości przebiegały w obszarach określonych na rys. 2. Rozważając z takiego punktu widzenia różne warianty strukturalne ramion Z_1 i Z_2 , proponuje się dla obu impedancji przyjęcie identycznych struktur, stanowiących równoległe połączenie rezystancji i pojemności. Stosunki impedancji Z_1/Z_2 i Z_x/Z_2 mają w tym przypadku analogiczne charakterystyki amplitudowo-fazowe, zilustrowane równaniem (1) oraz wykresami na rys. 3.

$$\frac{Z'}{Z''} = \frac{\frac{1}{R''} + j\omega C''}{\frac{1}{R'} + j\omega C'} \quad (1)$$

^{x)} co najmniej 100 razy mniejsza; w innym przypadku funkcje celu są inne - [10].

gdzie

indeksy "prim" i "bis" rozróżniają elementy licznika i mianownika.



Rys. 3. Amplitudowo-fazowe charakterystyki stosunku impedancji wg równania (1)

a) $T' < T''$, b) $T' > T''$, c) $T' = T''$

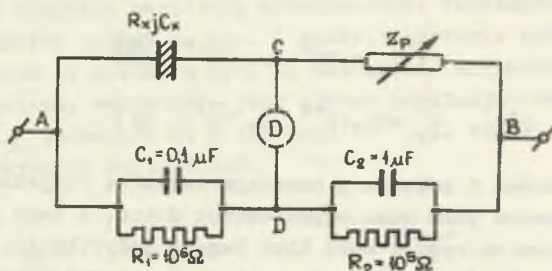
Przedstawione na rys. 3 charakterystyki mają tę zaletę w porównaniu z innymi, możliwymi do utworzenia charakterystykami, że w szerokim zakresie częstotliwości ich zmienność może być dowolnie ograniczona. Ma to szczególne znaczenie dla realizacji funkcji celu wg rys. 2b.

Jeśli założyć, że obiekt badany w zakresie częstotliwości podakustycznych i akustycznych zmieniać będzie swoje parametry w granicach podanych w relacji (2) i (3),

$$R_x = 10^7 \dots 10^{12} \quad [\Omega] \quad (2)$$

$$C_x = 5 \cdot 10^{-10} \dots 10^{-8} \quad [F], \quad (3)$$

to dalsze obliczenia elementów ramion stosunkowych Z_1 i Z_2 mostka prowadzą do wartości podanych na schemacie przedstawionym na rys. 4. Można spr-



Rys. 4. Mostek o rezystancyjno-pojemnościowych ramionach pomocniczych

wdzić, korzystając z zależności przedstawionych na rys. 3 (związki geometryczne charakterystyk), że dla podanych na rys. 4 wartości otrzymuje się w dowolnie szerokim zakresie częstotliwości relacje (4) i (5).

$$\left| \frac{Z_x}{Z_1} \right| \geq \left\{ \begin{array}{l} \frac{R_x \min}{R_1} \quad \text{dla} \quad R_x C_x < R_1 C_1 \\ \text{lub} \\ \frac{C_1}{C_x \max} \quad \text{dla} \quad R_x C_x > R_1 C_1 \end{array} \right\} = 10 \quad (4)$$

$$\left| \frac{Z_1}{Z_2} \right| = \left| \frac{\frac{1}{R_2 + j\omega C_2}}{\frac{1}{R_1 + j\omega C_1}} \right| = 10 \quad (5)$$

Oznacza to, że spełnione są wymagania określone funkcjami celu wg rys. 2.

Zależność (5) nie jest jedyną możliwą kombinacją struktur impedancji Z_1 i Z_2 , która spełnia wymagania odpowiedniej funkcji celu. Umożliwia ona jednak znaczne uproszczenie równań równowagi mostka, co przesądziło o jej wyborze. Praktyczna realizacja zależności (5) wymaga starannego wyselekcjonowania niezbędnych rezystorów i kondensatorów. Dobrane kondensatory nie powinny wykazywać zjawisk polaryzacyjnych; doświadczalnie stwierdzono że w rozważanym zakresie częstotliwości najlepiej stosować kondensatory styrorefleksowe.

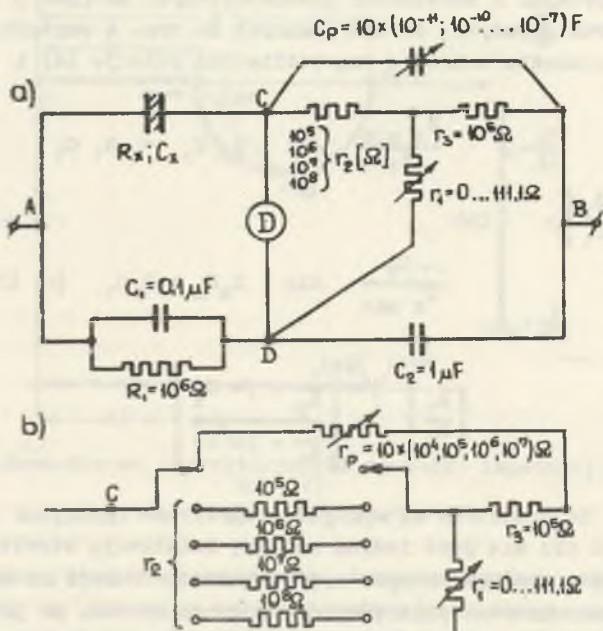
Impedancję porównawczą Z_p najdogodniej utworzyć z równoległe połączonych elementów regulowanych R_p , C_p . Taka struktura umożliwia realizację niezależnego odczytu, pozwala na zastosowanie dokładniejszych, trójelektrodowych, regulowanych wzorców pojemności, a ponadto, co wyjaśniono w dalszym ciągu, umożliwia zastosowanie bardzo korzystnego układu "gwiazdy rezystorów".

Z warunków równowagi mostka (rys. 4) oraz przyjętych założeń (2) i (3) wynika, że wartości elementów regulowanych R_p i C_p powinny zawierać się w granicach (6) i (7).

$$R_p = 10^6 \dots 10^{11} \quad [\Omega] \quad (6)$$

$$C_p = 5 \cdot 10^{-9} \dots 10^{-7} \quad [F] \quad (7)$$

Duża co do wartości i zmienna w szerokim zakresie rezystancja R_p nie mogła być zrealizowana jako suma odpowiednich dekad. Z tego powodu konstrukcja przedstawiona na rys. 4 musi ulec pewnej modyfikacji, w której niezbędny zakres regulacji R_p (6) można osiągnąć, stosując rezystory o znacznie mniejszej wartości. Odpowiedni schemat przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Proponowany układ mostkowy

a) schemat ideowy, b) propozycja rozwiązania układu regulacji rezystancji porównawczej (R_p)

Schemat przedstawiony na rys. 5a można sprowadzić do układu podanego na rys. 4 stosując przekształcenie gwiazdy rezystorów r_1 , r_2 , r_3 na odpowiedni trójkąt, którego rezystory (R_{CB} ; R_{CD} ; R_{DB}) łączą punkty B, C i D mostka. Rezystory R_{CB} i R_{DB} są odpowiednikami rezystorów R_p i R_2 mostka z rys. 4, natomiast rezystor R_{CD} bocznikuje detektor, a więc nie zmienia warunków równowagi. Wartości rezystorów r_1 , r_2 , r_3 są tak dobrane, że

regulując wartość r_1 , powoduje się praktycznie tylko zmianę rezystancji stransformowanej R_{CB} , a więc rezystancji porównawczej, natomiast rezystancje R_{CD} i R_{DB} w zasadzie pozostają niezmienione. Przytoczone rozumowanie wskazuje, że mostek podany na rys. 5 spełnia kryteria przyjęte przy wyprowadzaniu konstrukcji mostka z rys. 4, natomiast najistotniejszą zaletą zastosowanej gwiazdy rezystorów jest płynna regulacja rezystancji porównawczej $R_p = R_{CB}$ (równanie 8) w zakresie $10^8 \dots 10^{11} \Omega$ przy użyciu rezystorów o mniejszych wartościach.

$$R_p = R_{CB} = r_2 + r_3 + \frac{r_2 r_3}{r_1} \quad (8)$$

Poszerzenie zakresu regulacji rezystancji porównawczej w dół, poniżej $10^8 \Omega$ zgodnie z wymaganiami (6), poprzez inny dobór wartości rezystorów gwiazdy r_1, r_2, r_3 prowadzi do niedopuszczalnego zwiększenia zmienności rezystancji R_{DB} lub zmniejszenia rezystancji R_{CD} bocznikującej detektor. Dlatego też proponuje się zastosować np. układ podany na rys. 5b, w którym dla zakresu $10^6 \dots 10^8 \Omega$ wykorzystuje się dekady $10 \times (10^4, 10^5, 10^6, 10^7) \Omega$ zaś dla zakresu $10^9 \dots 10^{11} \Omega$ - gwiazdę rezystorów r_1, r_2, r_3 . Za pomocą odpowiednio zaprojektowanego przełącznika, w miejsce wymiennych rezystorów r_2 można wykorzystać poszczególne dekady stosowane w zakresie $10^6 \dots 10^8 \Omega$. Zaletą proponowanego układu regulacji jest użycie w nim rezystorów o wartości co najwyżej $10^7 \Omega$, a więc dostępnych na rynku krajowym i wykonywanych ze stosunkowo dużą dokładnością (np. 0,1%).

Przedstawione w niniejszym opracowaniu rozważania oraz wynikająca z nich konstrukcja mostka (rys. 5) obejmują najistotniejsze aspekty, decydujące o działaniu mostka w ogóle, tj. zachowanie optymalnej zbieżności, czułości oraz regulacji w przyjętym zakresie częstotliwości. Dalsze niezbędne kryteria konstrukcyjne związane z systemem ekranowań mogą być zachowane przez wykorzystanie znanych w literaturze (np. [2], [6]) szczegółowych opisów i przykładów rozwiązań.

Proponowana struktura ramion mostka wyprowadzona została przy założeniu pełnym wymagań istotnych przy doborze detektora. Sprowadzają się one do żądania odpowiedniej impedencji wejściowej, małej w porównaniu z impedancją obiektu badanego, co w praktyce najczęściej jest spełnione. Wymaga na czułość prądowa detektora S_{di} zależy od wartości napięcia zasilania mostka U , admitancji badanej Y_x , współczynnika K_1 charakterystycznego dla danej struktury mostka i może być wyznaczona z równania (9) na czułość całego układu mostkowego S , która jest parametrem narzuconym w projektowaniu.

$$S = Y_x U K_1 S_{di} \quad (9)$$

Współczynnik K_1 ([10]) może teoretycznie osiągnąć największą wartość równą 1, zaś dla proponowanej konstrukcji zawiera się w granicach 0,1 0,5 (1,0). Należy wspomnieć, że w konstrukcjach mostków, które nie

zachowują opisanych warunków optymalizacji, wartość K_1 jest znacznie mniejsza (10^{-2} ... 10^{-3}) i wykazuje dużą zmienność z częstotliwością.

W konstrukcji mostka z rys. 5 założono jedynie, że źródło zasilania nie wykazuje zmienności amplitudy napięcia pod wpływem obciążania i regulacji elementami mostka.

Wymienione wymagania dotyczące doboru detektora i źródła zasilania są niezbędne z punktu widzenia przedstawionej konstrukcji. Dodatkowe wymagania wynikające z innych, pożądaných własności eksploatacyjnych układu pomiarowego (np. obwodu wyjściowego detektora lub eliminacji zakłóceń powodowanych przez generator zasilający) stanowią odrębne, obszerne zagadnienie, częściowo rozwiązane w cytowanej literaturze i przede wszystkim zależne od konstrukcji samego detektora czy generatora.

LITERATURA

1. Dzijubenko I.W.: Metody izmierencja elektriczeskich parametrov dielektrikow na infraniskich czastotach; Izmerit. Tjechn. nr. 10, 1970 r.
2. Hippel A.R.: Dielektryki i fale; PWN, W-wa 1963 r.
3. Mole G., Smith D.C.G.: Bridge for the measurement of the admittance of electrical insulation at very-low frequencies; Rapport ERA, ref. V/T116, 1953 r.
4. Morel J.F.: Un pont pour les mesures á très basse fréquence sur les diélectriques; Rev.Gen.de L'Electr., Février 1966 r.
5. Pander K.: Dielektrische Untersuchungen im Gebiet tiefer Frequenzen 0,5 bis 50 Hz.; A.T.M., V 942-10, 1963 r.
6. Scheiber D.J.: An ultra low frequency bridge for dielectric measurement; J. Res. NBS, 65C, 23-42, 1961 r.
7. Schlosser E., Horn G.: Messanordnung für die komplexe Dielektrizitätskonstante Polymerer im Frequenzbereich 1-100 Hz., Exp.Technder Phys. nr. 2, 145-150, 1963 r.
8. Szadkowski B.: Optymalizacja układu mostkowego do badań dielektryków w zakresie częstotliwości podakustycznych; Praca doktorska, Politechnika Śl., Wydz.Elekt. Gliwice-1969 r.
9. Szadkowski B.: Problemy konstrukcji mostków do badań dielektryków w zakresie częstotliwości podakustycznych; Zesz.Nauk.Pol.Śl. ELEKTRYKA, nr 33, Gliwice, 1972 r.
10. Szadkowski B.: Wybór układu mostkowego o optymalnej czułości do badań dielektryków w zakresie częstotliwości podakustycznych; WSI Zielona Góra, Biuletyn nr. 4, 1970 r.
11. Szadkowski B.: Warunek optymalnej zbieżności mostków do badań dielektryków w zakresie częstotliwości podakustycznych. Zesz.Nauk. Pol. Śl. ELEKTRYKA, nr 33, Gliwice, 1972 r.
12. Tieplinskij A.M.: Mosty dla izmierencja vysokoomnych soprotiwlenij i małych postojannyh tokow;"Energija", Leningrad, 1970 r.
13. Vince P.M.: Apparatus for the measurement of the permittivity and loss tangent of galsses ad audio and sub-audio frequencies; Proc.IEE, vol 112, nr 2, 432-8, Feb. 1965 r.

МОСТ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ДИСПЕРСИИ ДИЭЛЕКТРИКОВ
В ДИАПАЗОНЕ МАЛЫХ И СВЕРХМАЛЫХ ЧАСТОТ

Р е з ю м е

В статье предложена новая конструкция моста, дающая возможность исследования изменений свойств диэлектрика в функции частоты, особенно частоты подакустичной.

THE BRIDGE FOR THE EXAMINATION OF THE DIELECTRICS
DISSPERION IN LOW AND VERY LOW FREQUENCY RANGE

S u m m a r y

This article presents the proposition of new bridge construction, enabling testing of dielectrics properties changes according to frequency. The sub - audio frequency band is particularly taken into consideration.

