

Brunon Szadkowski
Katedra Technologii
i Metrologii Elektrycznej

PROBLEMY KONSTRUKCJI MOSTKÓW DO BADAŃ DIELEKTRYKÓW
W ZAKRESIE CZĘSTOTLIWOŚCI PODAKUSTYCZNYCH

Streszczenie. Na tle zestawienia stosowanych układów mostkowych do badań dielektryków w zakresie częstotliwości podakustycznych omówiono najważniejsze czynniki warunkujące poprawność ich konstrukcji.

1. Wstęp

Obserwowany w ostatnich latach dynamiczny rozwój nauki o dielektrykach wskazuje na szczególne znaczenie badań własności dielektryków w zmiennym polu elektrycznym o częstotliwości podakustycznej ("oz.p.")^{*}. Badania takie wymagają stosowania specjalnej aparatury pomiarowej, która aktualnie reprezentowana jest stosunkowo niewielką liczbą układów pomiarowych [3], wymagających pod wieloma względami dalszego udoskonalenia. Wśród zalecanych w literaturze układów pomiarowych odrębną grupę stanowią układy mostkowe. Dokonując przeglądu stosowanych mostków można zauważyć, że nie ma między nimi niektórych układów mostkowych, ogólnie znanych jako układy nadające się do badań dielektryków. Np. nie wymienia się mostka Soheringa, który w zakresie oz.p. wykazuje znaczny wzrost niedokładności pomiaru. Oznacza to, że konstrukcje mostków do badań dielektryków w zakresie oz.p. odpowiadać muszą pewnym specjalnym wymaganiom, których przestrzeganie przy jednej jedynej częstotliwości pomiarowej (50 Hz) lub w zakresie częstotliwości akustycznych nie było konieczne. Uwaga powyższa sugeruje potrzebę bliższego zapoznania się z problemami decydującymi o odmienności konstrukcji mostków oz.p. i problemy te stanowić będą cel dalszych rozważań, przeprowadzonych na tle zestawienia stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych.

*) tzn. poniżej 16 Hz, do 10^{-2} Hz, a nawet 10^{-3} Hz.

2. Przegląd stosowanych konstrukcji

Z dostępnej literatury związanej z omawianym zagadnieniem [1], [2], [4] [5], [6], [7], [8], [9], [11], [13] wynika, że pierwsze konstrukcje mostków opracowane były już w latach 1953-59, jednak większość opracowań nowych lub będących udoskonaleniem poprzednich przypada na lata 1961-66. Na podstawie przytoczonych prac, uwzględniając rozwiązania podobne, wyróżnić można 6 typowych konstrukcji, które zestawiono w załączonej tablicy.

Wszystkie przedstawione układy mostkowe zasilane były napięciem o wartości (10...100) V_{max} , zaś niedokładność pomiarów rezystancji i pojemności wynosiła (1 ... 5)%.

Impedancje wejściowe detektorów miały wartości duże, porównywalne z wartością impedancji obiektu mierzonego (izolacja). Przepiętny czas potrzebny na wykonanie jednego pomiaru przy częstotliwości 0,1 Hz zawarty był w granicach (20 ... 40) minut. Porównując zestawione w tablicy układy mostkowe można wyróżnić 3 grupy układów o odmiennych sposobach wyznaczania wyniku pomiaru:

- a. układy zrównoważone (tabl. - l.p. 1,2,3,5), w których wynik pomiaru obliczany jest po uprzednim doprowadzeniu układu do stanu równowagi;
- b. układy w quasi równowadze (tabl. - l.p. 4), w których wynik pomiaru obliczany jest z charakterystycznych związków, słusznych po uprzednim doprowadzeniu układu do stanu quasi równowagi (prostokątność napięć w gałęziach detektorów X i Y);
- c. układy odchyłowe (tabl. - l.p. 6), w których wynik pomiaru ustalany jest na podstawie odczytów wartości odchylenia miernika wyjściowego bez potrzeby doprowadzania układu do stanu równowagi (wymiaru elipsy obserwowanej na ekranie oscyloskopu).

Wspólną cechą przedstawionych układów mostkowych jest podobny dobór gałęzi stosunkowych oraz w przypadku mostków grup (a) i (b) - podobny rozkład elementów regulacyjnych. Przy doborze gałęzi stosunkowych w każdym przypadku zakładano ich rezystancyjny charakter, zaś wartości rezystancji stosunkowych były znacznie mniejsze od wartości impedancji obiektu mierzonego i najczęściej (za wyjątkiem układu Mole'a - Smitha, tabl. - l.p. 4) były to wartości jednakowe. Nawet w układzie Mole'a-Smitha zalecano, aby wartości stosunków rezystancji zachowane były w granicach $1/10 \dots 10/1$, co odpowiadało optymalnym warunkom pracy układu mostkowego. Natomiast podobieństwo rozkładu elementów regulacyjnych polega na tym, że zmienna pojemność i zmienna rezystancja skupione są w tej samej gałęzi mostka. Pozornie wydaje się to niesłuszne w odniesieniu do tych mostków, w których zastosowana jest charakterystyczna "gwiazda" rezystancji.

W rzeczywistości jednak rezystancje połączone w gwiazdę mają specjalnie dobrane wartości - tak, że po wykonaniu transformacji "gwiazda - trójkąt" tylko jedna z rezystancji "trójkąta" zmienia swą wartość pod wpływem zmian regulowanej rezystancji "gwiazdy", zaś pozostałe dwie stanowią

"trójkąta" praktycznie zachowują wartość stałą. Zmienna rezystancja "trójkąta" w każdym z mostków wchodzi w skład tej gałęzi, w której znajduje się regulowana pojemność. Istotną zaletą stosowanych w niektórych układach mostkowych połączeń trzech rezystancji w "gwiazdę" jest to, że przy odpowiednim doborze wartości tych rezystancji możliwe jest płynne regulowanie składowej czynnej w szerokim zakresie ($10^6 \dots 10^{14}$ omów) przy pomocy rezystancji posiadających wartości znacznie mniejsze, a więc rezystancji łatwo dostępnych w handlu i odznaczających się większą dokładnością.

Wszystkie przedstawione w załączonej tablicy układy mostkowe podano bez uwzględnienia systemów ekranowań, zaś dla uzyskania jeszcze lepszej przejrzystości przy porównywaniu poszczególnych konstrukcji – zastosowano ujednolicony sposób rysowania schematów połączeń.

3. Czynniki warunkujące poprawność konstrukcji

Budowa układu mostkowego do badań dielektryków w zakresie częstotliwości podakustycznych związana jest z koniecznością pokonania szeregu trudności. Trudności te, najogólniej biorąc, wynikają z faktu zastosowania bardzo małych częstotliwości oraz z tego, że obiektem mierzonym jest impedancja o bardzo dużej wartości.

W rozważanym zakresie częstotliwości nie mogą być stosowane cewki indukcyjne, gdyż osiągnięcie odpowiednich wartości reaktancji wymagałoby nawijania nadmiernie dużej liczby zwojów, co z wielu powodów nie byłoby ani celowe ani pożądane. Tak więc jako składowe w gałęziach mostków oz.p. stosowane są wyłącznie elementy RC.

Z analogicznych powodów nie mogą być stosowane transformatorowe sprzężenia układu mostkowego ze źródłem zasilania; powszechnie produkowane transformatory nie przenoszą już sygnałów o częstotliwości mniejszej od 10 Hz.

Napięcie zasilania generatora oz.p., zasilającego bezpośrednio mostek, powinno być możliwie dokładnie zbliżone do przebiegu sinusoidalnego. Obecność wyższych harmonicznych lub składowej stałej powoduje, że pomiar jest bardzo utrudniony lub wręcz niemożliwy. Zastosowanie filtrów lub kondensatorów odcinających składową stałą, w rozważanym zakresie częstotliwości i przy obiektach badanych będących izolatorami, nie może być brane pod uwagę. Oznacza to, że uniknięcie szkodliwych wpływów odkształczonego napięcia zasilania jest przede wszystkim zagadnieniem odpowiedniej konstrukcji generatora oz.p. W zakresie częstotliwości poniżej 1 Hz, wskaźnik równowagi powinien posiadać cechy urządzenia pomiarowego stałoprądowego. Obserwacja sygnału nierównowagi w tym zakresie częstotliwości jest dość kłopotliwa z powodu zbyt powolnych zmian odohylania miernika wyjściowego, w związku z czym wskazane jest np. zastosowanie rejestracji.

Szczególne istotnym przy bardzo małych częstotliwościach staje się zagadnienie zbieżności układu mostkowego. Wobec długiego czasu potrzebnego

na zrównoważenie mostka (np. 20 ... 40 minut przy 0,1 Hz) liczba niezbędnych regulacji dla osiągnięcia stanu równowagi powinna być jak najmniejsza. Potrzeba uzyskiwania możliwie największej zbieżności wynika tu nie tylko z niedogodności w samym procesie równoważenia, lecz także stąd, że przy zbyt długim czasie trwania tego procesu mogą ulegać zmianom obiektywne warunki pomiaru. Z podobnych przyczyn bardzo niewygodne, a często niepożądane staje się stosowanie dodatkowych gałęzi Wagnera w układzie mostkowym bądź też stosowanie metod podstawienia. Prowadzi to bowiem do co najmniej dwukrotnego wydłużenia czasu równoważenia.

Podstawowym problemem budowy mostków cz.p. do badań dielektryków, obok zagadnień zbieżności, jest uzyskanie wystarczająco dużej oszułości. Zasadnicze trudności wynikają z tego, że obiekt badany jest impedancją o bardzo dużej wartości, przeciętnie zawierającej się w granicach $10^8 \dots 10^{16}$ omów. Zwiększenie oszułości układu mostkowego drogą podwyższania napięcia zasilania jest w praktyce bardzo ograniczone możliwościami konstrukcji odpowiednich generatorów. Aktualnie stosowane generatory mają napięcia wyjściowe nie przekraczające 10 ... 100 V_{max} , zaś konstruowane prototypy elektromechanicznych zasilaczy cz.p. dają wprawdzie możliwość generowania bardzo dużych napięć (nawet rzędu $10^3 \dots 10^5 V$), lecz udział wyższych harmonicznych, a przede wszystkim składowej stałej jest tu także odpowiednio duży, co uniemożliwia zrównoważenie mostka.

Dla podanych wartości impedancji mierzonych i stosowanych napięć zasilania, wymagana oszułość wskaźnika równowagi powinna zawierać się w granicach $10^9 \dots 10^{16}$ dz/A. Budowa wskaźników równowagi o tak dużej oszułości i spełniających jednocześnie szereg innych wymagań niezbędnych dla pracy w zakresie cz.p. jest zagadnieniem na tyle trudnym, że uzyskanie jeszcze większych oszułości byłoby w praktyce zadaniem niewykonalnym. Tak więc szczególnie ważnym staje się tutaj zagadnienie odpowiedniego zaprojektowania gałęzi mostka. Impedancja obiektu badanego, będąca równocześnie jedną z gałęzi mostka, wzrasta w miarę obniżania częstotliwości pomiarowej. Niewłaściwy dobór pozostałych gałęzi może spowodować, że oszułość układu mostkowego mimo optymalnego doboru źródła zasilania i wskaźnika równowagi zmaleje pod wpływem zmniejszania oszułości nawet o kilka rzędów wielkości w skali dziesiętnej. Zjawisko takie jest praktycznie jedyną przyczyną nieprzydatności mostka Soheringa do pomiarów w zakresie cz.p., jak wynika bowiem ze znanych zależności - przejście z oszułości 50 Hz do 0,05 Hz powoduje 1000-krotny wzrost uchybu nieoszułości.

Uzyskanie wystarczającej dokładności pomiarów w rozważanych układach mostkowych, oprócz wymienionych problemów, wymaga również uwzględnienia wielu innych zagadnień, charakterystycznych dla układów do badań impedancji o dużych wartościach. Najważniejsze z nich, to optymalne rozwiązanie układu elementów regulacyjnych (bez potrzeby stosowania nadmiernie dużych rezystancji), konieczność wyjątkowo starannego eliminowania wpływów szkodliwych sprzężeń pojemnościowych i galwanicznych. W cytowanej literaturze

(p. 2) zagadnieniom tym poświęcono wiele uwagi, wskazując m.in. najkorzystniejsze systemy regulacji oraz ekranowań.

W podsumowaniu przedstawionych informacji można stwierdzić, że w rozważanych układach mostkowych podstawowym i niezbędnym warunkiem ich realizacji w ogóle jest uzyskanie optymalnej osułości i optymalnej zbieżności. Inne czynniki decydujące o zadowalającej pracy mostka wymagają przedyskutowania dopiero w odniesieniu do układów odznaczających się wystarczająco dużą osułością i zbieżnością.

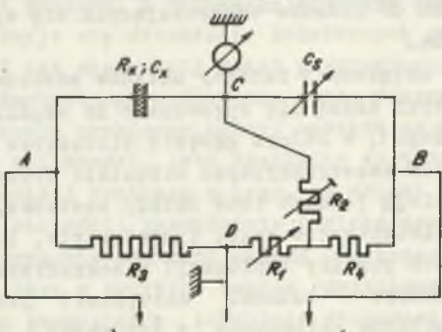
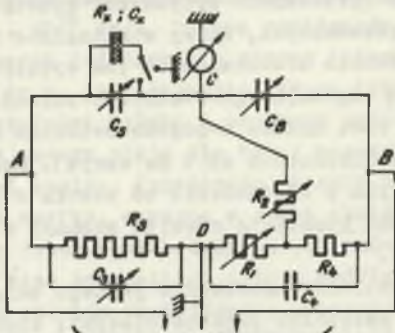
Z analizy zestawionych w załączonej tabeli układów mostkowych wynika, że wszystkie proponowane mostki dadzą się sprowadzić do wspólnego schematu zastępczego (ozterogałęźnego), w którym gałęzie stosunkowe są rezystancjami. Takie podobieństwo cech konstrukcyjnych aktualnie stosowanych mostków nasuwa pytanie, czy istnieją jeszcze inne układy mostkowe, równie dobrze nadające się do badań dielektryków cz.p. Teoretycznie, liczba układów mostkowych umożliwiających pomiary impedancji o charakterze rezystancyjno-pojemnościowym (dielektryk - schemat zastępczy) jest przecież znacznie większa od liczby układów zalecanych w cytowanej literaturze. Częściową odpowiedź na tak sformułowane pytanie stanowią mogą wnioski uzyskane przez autora w pracy [12], dotyczącej ogólnej analizy osułości grupy mostków RC w funkcji częstotliwości w zakresie cz.p. W cytowanej pracy wykazano, że największą osułością w zakresie cz.p. przy badaniach dielektryków odznaczają się dwa typy mostków: o rezystancyjnych gałęziach stosunkowych oraz o pojemnościowych gałęziach stosunkowych. Szczególnie interesujące wydaje się dalsze opracowanie optymalnej konstrukcji mostka o pojemnościowych gałęziach stosunkowych, który w aktualnie dostępnej literaturze nie znalazł potwierdzenia stosowalności (za wyjątkiem komunikatu firmy "Tettex" - Zurich [14] opisującego własności uniwersalnego układu mostkowego, który w wersji tzw. układu 4-pojemnościowego umożliwiał badania dielektryków przy częstotliwościach od 1 Hz wzwyż). Mostek o pojemnościowych gałęziach stosunkowych w odróżnieniu od mostka o gałęziach stosunkowych będących rezystancjami umożliwia również pomiary w zakresie bardzo dużych częstotliwości [10].

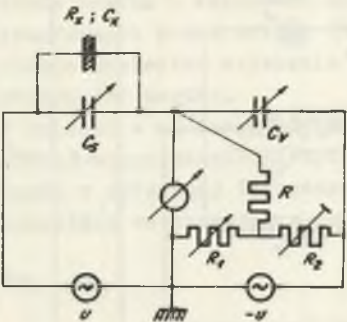
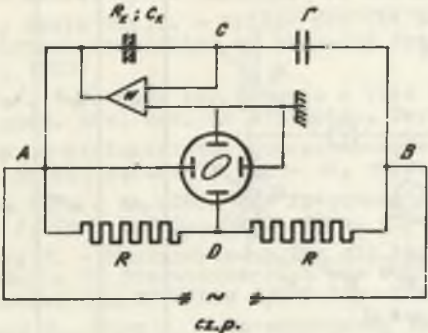
Zdaniem autora istnieje możliwość zbudowania jednego układu mostkowego, opartego na konstrukcji z gałęziami pojemnościowymi, który umożliwiłby pomiary w bardzo szerokim zakresie częstotliwości od pasma częstotliwości podakustycznych począwszy. Potrzeba przeprowadzania takich pomiarów uzasadniona jest bardzo szerokim widmem zjawisk dyspersyjnych występujących w dielektryku.

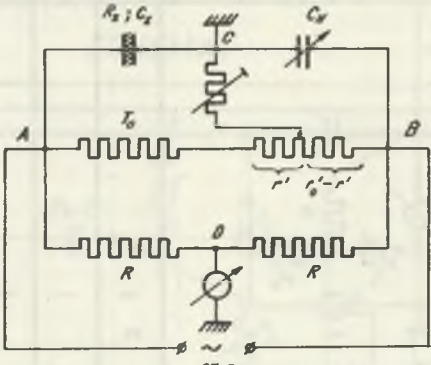
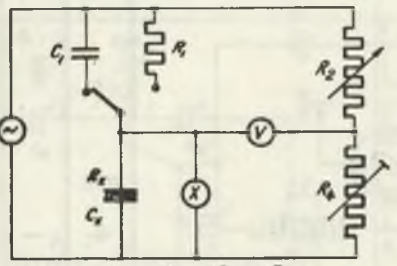
Inną zaletą mostka o pojemnościowych gałęziach stosunkowych jest również to, że gałęzie pojemnościowe mogą odznaczać się znacznie mniejszymi wartościami wielkości reszkowych niż w przypadku gałęzi rezystancyjnych.

Opracowanie optymalnej konstrukcji układu mostkowego do badań dielektryków w zakresie cz.p., podobnie do ogólnej analizy osułości mostków RC, ogólnego ustalenia najkorzystniejszych warunków bezpieczeństwa

Typowe rozwiązania układów mostkowych

Lp.	SCHEMAT	zakres pomiarowy			dane mg lit
		f	R_x	C_x	
1	2	3	4	5	6
1	 <p>do 3 zacisk generatora c.z.p. R_2 - reg. $0-10^6 \Omega$ $R_3 = R_4 = 10^9 \Omega$ R_2 - nastaw. $10^3-10^9 \Omega$ C_5 - reg. $10-10^6$ pF. Wskaźnik równowagi: rejestrator $50 \mu V/dz$ (układ Weingartena - 1955 r.)</p>	0,000 ÷ 200	10^5 ÷ 10^{16}	10^6 ÷ 10^6	[5] [9] [4]
2	 <p>do 3-zacisk. generatora c.z.p. R_1 - reg. $0-111 \Omega$ $R_3 = R_4 = 10^5 \Omega$ R_2 - nastaw. $10^6-10^{10} \Omega$ C_3 i C_5 - reg. $10-125$ pF. C_3, C_5 - wyrówn. pojemn. doziemnych p. A i B Wskaźnik równowagi: rejestrator $2 \times 10^{-5} V/dz$ (układ Scheiberga - 1961 r.) $R_{na} = 10^{10} \Omega$</p>	0,008 ÷ 200	10^6 ÷ 10^{18}	10^8 ÷ 10^8	[9] [6]

1	2	3	4	5	6
5	 <p>$-U; U$ - dwa generatory cz.p. o napięciach przesuniętych w fazie o 180° wzgl. siebie ($R_{wewn. gen.} \approx 1 \Omega$)</p> <p>zakres pomiarowy: $\operatorname{tg} \delta_x = 10^{-3} \dots 1$</p> <p>wskaznik równowagi: elektrometr $2 \times 10^{-4} \text{ V/dz}$ $R_{wb} = 10^9 \dots 10^{15} \Omega$</p> <p>(układ Vince'a - 1955 r.)</p>	10^{-3} \div 50	-	-	[13]
6	 <p>Układ detektora: wzmacniacz (W) + oscylograf (gdy $wzmocn. W \rightarrow \infty, R_{cd} \rightarrow \infty$) przy $R_{osc} \approx 10^7 \Omega$</p> <p>$R \ll 10^7 \Omega$; Γ rzędu C_x</p> <p>(układ Morela, 1966 r, odchyłowy)</p>	0,01 \div 10^9	-	-	[7] [2]

1	2	3	4	5	6
3	 <p> R_V - nastaw. $10^6 - 10^9 \Omega$ $T_0 = 10111 \Omega$ $T' = 10111 \Omega$ r' - reg. $0 - 1111 \Omega$ C_N - reg. $10^2 - 10^3 \text{ pF}$ $R \geq 5000 \Omega$ Wskaźnik równowagi: wzmacniacz - oscyloskop $R_W \geq 10^{11} \Omega$ (układ Nakajimy - Kondo, 1956 r.) </p>	<p>0,5</p> <p>÷</p> <p>100</p>	<p>10^7</p> <p>÷</p> <p>10^{10}</p>	<p>10^2</p> <p>÷</p> <p>10^3</p>	<p>[11]</p> <p>[8]</p>
4	 <p> $C_1 = 10^{-10}, 10^{-9}, 10^{-8}, 10^{-7} \text{ F}$ $R_1 = 10^7, 10^8, 10^9 \Omega$ $R_2 = 10^2 - 10^5 \Omega$ $R_0 = 10^2 - 10^6 \Omega$ $\frac{R_2}{R_0} \approx \frac{1}{10} \dots \frac{10}{1}$ optymalne </p> <p> Detektor X ⊥ Y: wzmacniacz oscyloskop $R_{w0} \geq 10^{12} \Omega$ (układ Maja'a - Szutka, 1953 r. kwasi-równ.) </p>	<p>0,05</p> <p>÷</p> <p>150</p>	<p>10^6</p> <p>÷</p> <p>10^{10}</p>	<p>10</p> <p>÷</p> <p>10^6</p>	<p>[5]</p>

szybkie zrównoważenie mostka w warunkach zmieniających się częstotliwości. Z rozważań przeprowadzonych przez autora [15] wynika, że możliwe jest sformułowanie ogólnego kryterium uzyskania maksymalnej i nieziennej z częstotliwością zbieżności mostka.

Wydaje się, że wnioski z ogólnych analiz ozułości i zbieżności mostków RC stanowiłyby istotne uzupełnienie bardzo obszernych i szczegółowych opracowań istniejących w cytowanej literaturze i ułatwiłyby dalsze doskonalenie omawianej aparatury mostkowej.

LITERATURA

- [1] Astier M. - Appareillage pour la mesure des constantes dielectriques aux tres basses frequences. *Onde Electr.*, 44, nr 442, 1964, 88-89.
- [2] Bouvier B., Morel J.F. - Mesure du taux d'humidite dans une isolation complexe par des mesures en tres basse frequence. *Rev. Gen. de l'Electr.*, November 1966.
- [3] Dzjubenko I.W. - Metody izmierenija elektrieskich parametrov dielektrikow na infraniskich czastotach. *Izmierit. Tichn.*, nr 10, 1970
- [4] Giesseke F.W. - An ultra-low frequency bridge for the measurement of large capacitances and conductances. *Journ. of Sc. Instr.*, nr 2, 1966
- [5] Heroux L. - Dielectric Relaxation Spectra of Lithium Borosilicate Glasses. *Journ. Appl. Physios*, 29, 1958, 1639-45.
- [6] Mole G., Smith D.C.G. - Bridge for the measurement of the admittance of electrical insulation at very-low frequencies. *Rapport ERA*, ref. V/T 116, 1953.
- [7] Morel J.F. - Un pont les mesures a tres basse frequence sur les dielectriques. *Rev. Gen. de l'Electr.*, Fevrier 1966.
- [8] Pander K. - Dielektrische Untersuchungen im Gebiet tiefer Frequenzen 0,5 bis 50 Hz. *A.T.M.*, V 942 - 10, 1963.
- [9] Scheiber D.J. - An ultra low frequency bridge for dielectric measurement. *J. Res. N.B.S.*, 65 C, 1961, 23-42.
- [10] Schlosser E. - Messanordnung für die komplexe Dielektrizitätskonstante Polymerer im Frequenzbereich von 100 kHz bis 240 MHz und im Temperaturbereich von 20°C bis 130°C *Exp. Techn. der Phys.*, X, 1962, H.3.
- [11] Schlosser E., Horn G. - Messanordnung für die komplexe Dielektrizitätskonstante Polymerer im Frequenzbereich 1 - 100 Hz. *Exp. Techn. der Phys.* nr 2, 1963, 145 - 150.
- [12] Szadkowski B. - Wybór układu mostkowego o optymalnej ozułości do badań dielektryków w zakresie częstotliwości podakustycznych. *Biuletyn nr 4, WSI Zielona Góra*, 1970.
- [13] Vince P.M. - Apparatus for the measurement of the permittivity and loss tangent of glasses at audio and sub - audio frequencies. *Proc. IEE*, Feb. 1965, vol 112, nr 2, 432 - 8.
- [14] - Tettex Information, nr 301, Januar 1969, Zurich,
- [15] Szadkowski B. - Warunek optymalnej zbieżności mostków do badań dielektryków w zakresie częstotliwości podakustycznych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Elektryka nr 33 1971 r.*

ПРОБЛЕМЫ КОНСТРУКЦИИ МОСТОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ
В ОБЛАСТИ ПОДТОНАЛЬНЫХ ЧАСТОТ

Р е з ю м е

На фоне составления применяемых мостовых цепей для исследований диэлектриков в области подтональных частот рассмотрены важнейшие факторы, которые обуславливают правильность их конструкции.

SOME PROBLEMS OF CONSTRUCTION OF BRIDGES USED FOR DIELECTRIC TESTING
IN SUB-AUDIO FREQUENCIES RANGE

S u m m a r y

On the background of comparison of bridge systems used for dielectric testing in sub-audio frequencies range, the most important factors conditioning the correctness of their construction have been discussed.