

Janusz GUZIK

Brunon SZADKOWSKI

UKŁADY POMIAROWE DO BADANIA DIELEKTRYKÓW PRĄDEM PRZEMIENNYM O INFRANISKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI

Streszczenie. W artykule dokonano przeglądu znanych w literaturze rozwiązań układów pomiarowych do badania dielektryków prądem przemiennym o infraniskiej częstotliwości (10^{-3} - 10) Hz. Następnie podjęto próbę pewnej syntezy wszystkich zestawionych układów i na tej podstawie wskazano klasę rozwiązań układowych najlepiej nadających się do takich badań oraz zasygnalizowano możliwości dalszego udoskonalenia wybranej klasy układów.

MEASURING CIRCUITS FOR DIELECTRIC AC INVESTIGATIONS IN ULTRA-LOW FREQUENCY RANGE

Summary. The paper presents the review of measuring circuits for dielectric ac investigations in ultra-low frequency range (10^{-3} - 10) Hz which have been described in scientific literature so far. A synthesis of the all presented circuits has been undertaken and on the ground of it the best circuit class for such investigations has been chosen. Possibility of further improvement of the chosen circuit class has been discussed as well.

1. WPROWADZENIE

Rozwój współczesnych technologii wytwarzania dielektryków powoduje zainteresowanie doskonaleniem stosowanej do ich badań aparatury pomiarowej. Prowadzone często pomiary przy jednej częstotliwości (np. 50 Hz) mogą być niewystarczające dla pełnego ujawnienia właściwości badanego dielektryka, przydatnych do oceny jego stanu.

W szczególności — badania w zakresie infraniskich częstotliwości (10^{-3} - 10) Hz stwarzają możliwości ujawnienia makroskopowych defektów w dielektryku (spowodowanych np. zawilgoceniem) ze znacznie większą czułością niż w innych zakresach częstotliwości [1].

Badania takie wymagają zazwyczaj specyficznej aparatury pomiarowej. W literaturze znane są wprawdzie dość liczne rozwiązania odpowiednich układów pomiarowych, lecz są to na ogół rozwiązania prototypowe i niedostępne w handlu, o silnie zróżnicowanych właściwościach i niejednorodnych opisach literaturowych. Wybór najkorzystniejszego układu pomiarowego, w zależności od założonych warunków pomiarów, jest w tej sytuacji bardzo utrudniony. Ponadto, większość znanych układów wymaga pod wieloma względami dalszego udoskonalenia.

Wydaje się zatem celowe dokonanie możliwie szerokiego przeglądu znanych układów, a następnie podjęcie próby jednolitego ich opisu metrologicznego oraz wskazania najkorzystniejszych rozwiązań.

Budowa układów pomiarowych do badania dielektryków przy infraniskich częstotliwościach wymaga rozwiązania przede wszystkim następujących problemów:

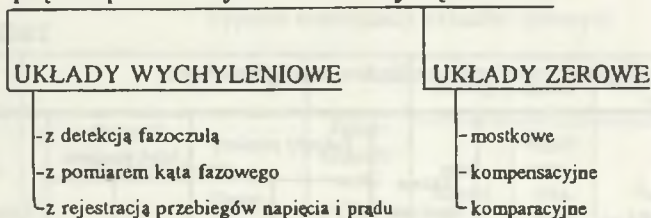
- uzyskania zadowalającej czułości, co jest szczególnie trudne w przypadku pomiarów modułów impedancji dielektryków, z reguły o bardzo dużej wartości. Ponadto wiele układów pomiarowych charakteryzuje się silnym zmniejszeniem czułości wraz ze zmniejszeniem częstotliwości (np. właściwości takie wykazuje powszechnie stosowany do pomiarów dielektryków mostek Scheringa [2]);
- odpowiedniego doboru podzespołów konstrukcyjnych, umożliwiających przenoszenie sygnałów o infraniskiej częstotliwości. Zwróćmy tutaj uwagę, że zastosowanie podzespołów indukcyjnych nie jest możliwe, jak również nie jest możliwe zastosowanie mostków transformatorowych, skądinąd doskonale nadających się do badania dielektryków, np. przy 50 Hz lub 1000 Hz [2], [20];
- konieczności minimalizacji czasu pomiaru, który zazwyczaj jest pewną wielokrotnością okresu zastosowanego napięcia pobieranego; w przypadku układów zerowych — np. przy częstotliwościach poniżej 0,05 Hz konieczne jest zautomatyzowanie procesu równoważenia (por. np. [3]).

Sposób rozwiązania wyżej wymienionych problemów, w podanych w dalszym ciągu układach pomiarowych (znanych z literatury), nie zawsze jest wystarczająco opisany. Dlatego w tym miejscu zwraca się uwagę na konieczność sprawdzania zastosowanych rozwiązań przed zastosowaniem któregośkolwiek z prezentowanych układów.

2. PRZEGLĄD STOSOWANYCH ROZWIĄZAŃ UKŁADOWYCH

Z metrologicznego punktu widzenia badania dielektryków prądem przemiennym sprowadzają się do pomiaru immitancji (tj. impedancji lub admitancji) kondensatora pomiarowego wypełnionego badanym dielektrykiem. Przedstawione w dalszym ciągu rozwiązania układowe będą zatem układami do pomiaru immitancji.

Układy pomiarowe do badania dielektryków prądem przemiennym o infraniskiej częstotliwości



Rys.1. Ogólny podział układów pomiarowych do badania dielektryków prądem przemiennym o infraniskiej częstotliwości

Fig.1. General division of measuring circuits for dielectric ac investigation in ultra-low frequency range

Ogólny podział omawianych układów pomiarowych przedstawiono na rys.1.

Układy wychyleniowe bazują zazwyczaj na pośrednich pomiarach napięcia i prądu, natomiast w układach zerowych badana immitancja jest bezpośrednio porównywana z immitancją wzorcową.

W tablicach 1 i 2 zestawiono kolejno typowe rozwiązania układów wychyleniowych (tablica 1) oraz układów zerowych (tablica 2) wraz ze wskazaniem odpowiednich pozycji literatury (wg załączonego wykazu).

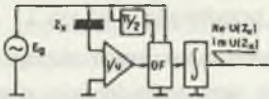
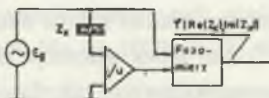
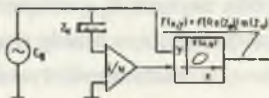
Wspólną cechą układów wychyleniowych jest stosunkowo szeroki zakres możliwych do zastosowania częstotliwości pomiarowych (10^{-4} - 10^{+5}) Hz, łatwa adaptacja do pomiaru dielektryków o nieliniowych charakterystykach prądowo-napięciowych, jak również stosunkowo krótki czas pomiaru, porównywalny z okresem zmian napięcia zasilającego badany dielektryk.

Podstawową wadą układów wychyleniowych jest trudność w uzyskaniu stałości parametrów metrologicznych (głównie czułości) w szerokim zakresie częstotliwości pomiarowych. Ta ostatnia cecha jest silnie związana z właściwościami źródła napięcia E_s zasilającego badany dielektryk. Zwróćmy uwagę, że z powodu niewystarczającej czułości — układy wychyleniowe nie nadają się do pomiarów niskostratnych dielektryków o wartości współczynnika strat $\text{tg}\delta$ mniejszych niż 10^{-3} [4], [5].

Podstawową cechą wyróżniającą grupę układów zerowych od grupy układów wychyleniowych — oprócz obecności odpowiedniego wzorca immitancji — jest stosunkowo długi czas pomiaru, będący zazwyczaj wielokrotnością okresu zmian napięcia zasilającego badany dielektryk. Związane jest to z koniecznością doprowadzenia układu zerowego do stanu równowagi w warunkach zachowania maksymalnej zbieżności i czułości układu (np. mostkowego [7]), co przy pracy układu w zakresie infraniskich częstotliwości (10^{-3} - 10) Hz prowadzi do odpowiedniej automatyzacji procesu równoważenia [3], [7].

Tablica 1

Typowe rozwiązania układów wychyleniowych

Lp.	Schemat ideowy	Zakres częstotliwości [Hz]	Zakresy pomiaru		Względny błąd pomiaru		Literatura
			pojemności C_x [F]	współczynnika strat $\operatorname{tg} \delta_x$ [-]	δ_{C_x} [%]	$\delta_{\operatorname{tg} \delta_x}$ [%]	
1.	<p>układ z detekcją fazoczułą</p> 	10^{-4} - 10^{+3}	10^{-6} - 10^{-12}	10^3 - 10	0,5-1	1-10	[11-12]
2.	<p>układ z pomiarem kąta fazowego</p> 	10^{-3} - 10^{+3}	10^{-9} - 10^{-12}	10^3 -1	1-3	5-20	[13-20]
3.	<p>układ z rejestracją przebiegów napięcia i prądu</p> 	10^{-4} - 10^{+4}	10^9 - 10^{+11}	10^2 -1	1-5	1-10	[14]

Zaletą układów zerowych jest natomiast łatwiejsze spełnienie wymagań maksymalnej zbieżności i zadowalającej czułości, jak również eliminacja wpływu niestabilności napięcia zasilającego badany dielektryk na wynik pomiaru.

Tablica 2

Typowe rozwiązania układów zerowych

Lp.	Schemat ideowy	Zakres częstotliwości [Hz]	Zakresy pomiaru		Względny błąd pomiaru		Literatura
			pojemności C_x [F]	współczynnika strat $\text{tg}\delta_x$ [-]	δ_{C_x} [%]	$\delta_{\text{tg}\delta_x}$ [%]	
1.	<p>układ mostkowy</p>	$10^3 \cdot 10^{+2}$	$10^{-5} \cdot 10^{-11}$	$10^{-5} \cdot 1$	0,05-0,5	0,5-1	[2-3] [6-8] [15-16]
2.	<p>układ kompensacyjny</p>	$50 \cdot 10^6$	$10^{-4} \cdot 10^{-12}$	$10^{-4} \cdot 2$	0,1-0,2	0,5-2	[17-18]
3.	<p>układ komparacyjny</p>	$50 \cdot 10^3$	$10^{-4} \cdot 10^{-12}$	$10^{-5} \cdot 1$	0,5-1	1-2,5	[19-20]

Powyższe wymagania można osiągnąć stosując różne środki techniczne — np. włączając układy aktywne w ramiona układu mostkowego [8]. Z drugiej strony efektywne, szybkie równoważenie układu zerowego, a co za tym idzie — pewne skrócenie czasu pomiaru — można uzyskać zarówno na drodze sprzętowej (równoważenie sterowanymi cyfrowo źródłami napięcia [3]) lub programowej (np. przy realizacji metody najmniejszych kwadratów [7]). Ponadto dostosowanie układów zerowych do potrzeb pomiaru niskostratnych dielektryków jest również łatwiejsze i na ogół sprowadza się do konieczności zapewnienia odpowiednio niskostratnego wzorca immitancji [2].

3. SYNTEZA ROZWAŻANYCH UKŁADÓW POMIAROWYCH

W dalszym ciągu przedstawiona zostanie propozycja uogólnionego opisu całych grup układów pomiarowych zamieszczonych wcześniej w tablicach 1 i 2, która może być przydatna zarówno do szybkiego dokonania wyboru najkorzystniejszego układu, jak również do wskazania możliwości udoskonalenia znanych układów wraz ze wskazaniem nowych rozwiązań.

W związku z tym, zgodnie z wywodami podanymi w pracy [9], rozpatrywane (wychyleniowe i zerowe) układy pomiarowe można przedstawić w postaci uogólnionego schematu strukturalnego zamieszczonego na rys.2.



Rys.2. Ogólny schemat strukturalny układów do pomiaru immitancji

Fig.2. General structural diagram of circuits for immitance measurement

Poszczególne symbole występujące na schemacie z rys.2 oznaczają:

X; N - bloki reprezentujące obwody, w których wytwarzane są sygnały pomiarowe U_X i I_X oraz U_N i I_N , związane ze sobą następującymi zależnościami:

$$\frac{U_X}{I_X} = Z_X \text{ oraz } \frac{U_N}{I_N} = Z_N;$$

H_U^X ; H_I^X ; H_U^N ; H_I^N — transmitancje przetworników w (odpowiednio) torach przesyłania sygnałów U_X i I_X oraz U_N i I_N ;

w_U^X ; w_I^X ; w_U^N ; w_I^N — sygnały wyjściowe z (odpowiednio) przetworników o transmitancjach H_U^X ; H_I^X ; H_U^N ; H_I^N .

Wszystkie wielkości występujące w schemacie według rys.2, tj. U_X , I_X , U_N , I_N , Z_X , Z_N , H_U^X , H_I^X , H_U^N , H_I^N , w_U^X , w_I^X , w_U^N i w_I^N , są wielkościami danymi w postaci zespolonej.

Mając na uwadze, że zaproponowany schemat strukturalny reprezentuje wszystkie analizowane wcześniej układy do pomiaru immitancji, korzystne wydaje się zamieszczenie wariantów tego schematu dla poszczególnych grup układów wychyleniowych i zerowych. Odpowiednie zestawienie zawiera tablica 3.

Z porównania odpowiednich schematów zamieszczonych w tej tablicy wynika, że analizowane układy różnią się między sobą stopniem uproszczenia ogólnego schematu strukturalnego na rys.2. Jedynym wyjątkiem jest tu klasa układów mostkowych, gdzie liczba

zmiennych wymagających ewentualnie dalszej optymalizacji (H_U^X ; H_I^X ; H_U^N ; H_I^N , Z_N) jest największa. Z uwagi na tak postawione kryterium optymalizacji strukturalnej analizowanych układów kolejność wyboru poszczególnych grup układów powinna być następująca:

1. układy z detekcją fazoczułą (zmienna H_I^X);
2. układy z pomiarem kąta fazowego i rejestracją przebiegów napięcia i prądu (zmienna H_U^X ; H_I^X);
3. układy kompensacyjne i komparacyjne (zmienne H_I^X ; H_I^N , Z_N);
4. układy mostkowe (H_U^X ; H_I^X ; H_U^N ; H_I^N , Z_N).

Drugim kryterium wyboru układu o najkorzystniejszych parametrach może być postać równania przetwarzania, na podstawie którego wyznacza się szukaną wartość impedancji Z_X .

Dla układów wychyleniowych wartość impedancji Z_X wyznacza się z definicji

$$Z_X = \frac{U_X}{I_X} = \frac{W_U^X}{W_I^X} \cdot \frac{H_I^X}{H_U^X}, \quad (1)$$

natomiast dla układów zerowych obowiązuje równanie komparacji w postaci

$$W_U^X - W_U^N = W_I^X - W_I^N = 0, \quad (2)$$

dające się po pewnych przekształceniach sprowadzić do postaci [9]

$$\frac{W_U^X}{W_I^X} = \frac{W_U^N}{W_I^N}, \quad (3)$$

z której ostatecznie wartość impedancji Z_X wyznacza się na podstawie zależności

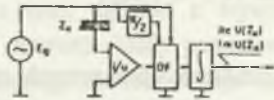
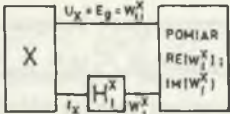
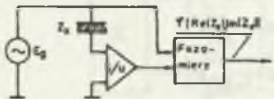
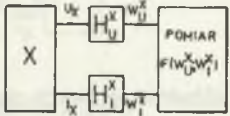
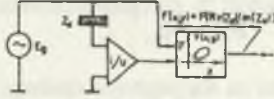
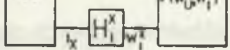
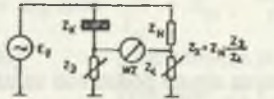
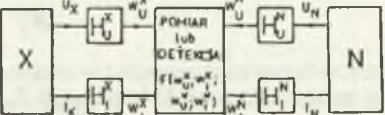
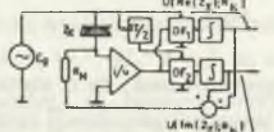
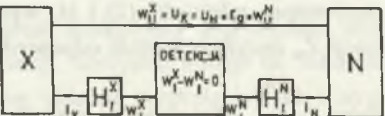
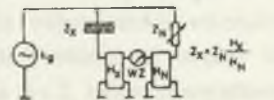
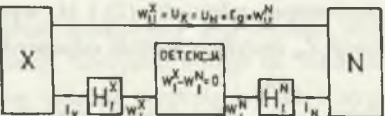
$$Z_X = Z_N \frac{H_U^N}{H_U^X} \cdot \frac{H_I^X}{H_I^N}. \quad (4)$$

Z porównania zależności (1) i (4) wynika łączny wniosek, że o wartości wyznaczonej impedancji Z_X decyduje wartość odpowiedniego stosunku transmitancji zastosowanych prze-

tworników $\frac{H_I^X}{H_U^X}$ - dla układów wychyleniowych i $\frac{H_U^N}{H_U^X} \cdot \frac{H_I^X}{H_I^N}$ - dla układów zerowych.

Tablica 3

Warianty ogólnego schematu strukturalnego analizowanych układów pomiarowych

Lp. (wg tabl. 1 i 2)	Schemat ideowy	Schemat strukturalny
	UKŁADY WYCHYLENIOWE	
1	<p>układ z detekcją fazoczułą</p> 	
2	<p>układ z pomiarem kąta fazowego</p> 	
3	<p>układ z rejestracją przebiegu napięcia i prądu</p> 	
UKŁADY ZEROWE		
1	<p>układ mostkowy</p> 	
2	<p>układ kompensacyjny</p> 	
3	<p>układ komparacyjny</p> 	

Mając przy tym na uwadze, że zastosowane rzeczywiste przetworniki (o transmitancjach $H_U^X, H_I^X, H_U^N, H_I^N$) odznaczają się zarówno błędami amplitudowymi, jak i fazowymi — trudniejsza wydaje się minimalizacja błędów przetworników różnego typu (I/W i U/W o transmitancjach odpowiednio równych H_I^X i H_U^X) — jak to ma miejsce w przypadku układów wychyleniowych. Dla układów zerowych minimalizacji podlegają odpowiednie błędy przetworników tego samego rodzaju (I/W o transmitancjach H_I^X i H_I^N oraz U/W o transmitancjach H_U^X i H_U^N) — co jest znacznie łatwiejsze w technicznej realizacji.

Warto zwrócić uwagę na fakt, że w przypadku układów zerowych równanie komparacji jest niezależne od wartości sygnałów wyjściowych ($W_U^X, W_I^X, W_U^N, W_I^N$) z odpowiednich przetworników, co nie jest regułą w przypadku układów wychyleniowych. Dodatkowemu uproszczeniu może podlegać równanie komparacji:

- dla układów mostkowych wartość odpowiedniego stosunku transmitancji sprowadza się do wartości [9]

$$\frac{H_U^N}{H_U^X} \cdot \frac{H_I^X}{H_I^N} = \frac{Z_3}{Z_4}, \quad (5)$$

- dla układów komparacyjnych (i kompensacyjnych)

$$\frac{H_U^N}{H_U^X} = 1 \quad \text{lub} \quad \frac{H_I^X}{H_I^N} = 1, \quad (6)$$

przy czym pierwszy przypadek odpowiada komparacji równonapięciowej, a drugi — komparacji równoprądowej.

Uwzględniając specyfikę pomiaru impedancji dielektryków — bardziej korzystne wydaje się przyjęcie komparacji równonapięciowej [9], przez co równanie komparacji (4) sprowadza się do postaci

$$Z_X = Z_N \frac{H_I^X}{H_I^N}. \quad (7)$$

Podsumowując — kryterium wynikające z postaci równania przetwarzania (wzory (1) i (4)) analizowanych układów pomiarowych pozwala ustawić kolejność wyboru najkorzystniejszych układów wg następującej hierarchii:

1. Równonapięciowe układy komparacyjne i układy kompensacyjne,
2. Układy mostkowe,
3. Układy z detekcją fazoczułą,
4. Układy z pomiarem kąta fazowego i rejestracją przebiegów napięcia i prądu.

Wnioskiem z łącznego zastosowania powyższych kryteriów do omawianych układów pomiarowych jest wybór klasy równonapięciowych komparatorów impedancji i układów kompensacyjnych jako najkorzystniejszych do założonych na wstępie celów (badania dielektryków w zakresie infraniskich częstotliwości). Z drugiej strony, mając na uwadze fakt, że układy kompensacyjne są szczególnym przypadkiem układów komparacyjnych (por. [9]) — ostatecznie taką najkorzystniejszą klasą układów będzie klasa równonapięciowych komparatorów impedancji.

Osobnego ustosunkowania wymaga kwestia dalszego udoskonalenia wybranej klasy układów. W związku z tym, analizując równanie komparacji (7), należy rozpatrzyć 3 przypadki:

a) $H_I^X = H_I^N = 1$,

b) $H_I^X = 1$,

c) $H_I^N = 1$.

W pierwszym, rzadko występującym w praktyce, przypadku a) komparacja dotyczy dielektryków o wartościach impedancji $|Z_X| \equiv |Z_N|$. Przypadki b) i c) dotyczą sytuacji pomiaru impedancji $|Z_X|$ — odpowiednio — $|H_I^N|$ — razy mniejszej b) lub $|H_I^X|$ — razy większej od impedancji zastosowanego wzorca $|Z_N|$. Pozwala to na zastosowanie pojedynczego wzorca $|Z_N|$ przy zmniejszających się na ogół o kilka rzędów wartości impedancji $|Z_X|$ w założonym paśmie częstotliwości (10^{-3} - 10) Hz [10].

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Zastosowanie wybranej wcześniej najkorzystniejszej klasy układów — równonapięciowych komparatorów impedancji — do badań dielektryków w zakresie infraniskich częstotliwości (10^{-3} - 10) Hz czyni koniecznym odpowiedni dobór podzespołów konstrukcyjnych przetworników I/W umożliwiających przenoszenie sygnałów o infraniskiej częstotliwości. Postulowane w literaturze [8] zastosowanie układów aktywnych do budowy przetworników (o transmitancjach H_I^X , H_I^N) pozwala także na jednoczesne uzyskanie zadowalającej czułości w założonym paśmie częstotliwości, a zautomatyzowanie równoważenia (np. w procedurze podanej w pracy [3]) — na odpowiednią minimalizację czasu pomiaru.

Podsumowując — klasą układów najlepiej nadających się do badania dielektryków w zakresie infraniskich częstotliwości (10^{-3} - 10) Hz jest klasa aktywnych, równonapięciowych komparatorów impedancji z automatyczną procedurą równoważenia układu.

LITERATURA

1. Pluciński M., Szadkowska T., Szadkowski B.: O pewnych praktycznych aspektach niskoczęstotliwościowych badań warstwowych materiałów elektroizolacyjnych. ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z. 27 (str. 95-111), Gliwice 1970.
2. Rost A.: Messung Dielektrischer Stoffeigenschaften. Vieweg, Braunschweig 1978.
3. Rybski R.: Pomiar impedancji w układzie mostkowym z cyfrowymi źródłami napięcia. Metrologia i Systemy Pomiarowe, z. 12 (str. 67-74), Warszawa 1992.
4. Zajt T. i inni: Programowa korekcja właściwości metrologicznych komputerowo sterowanego miernika admitancji tranzystorów. ZN Pol. Śl., ser. Automatyka, z. 98 (str. 23-32), Gliwice 1989.
5. Witek W.: Wpływ błędu pomiaru przesunięcia fazowego na dokładność wyznaczenia $\text{tg}\delta_x$ kondensatorów przy sygnale sinusoidalnym. ZN Pol. Łódzkiej, ser. Elektryka, z. 84 (str. 147-157), Łódź 1993.
6. Szadkowski B.: Optymalizacja układu mostkowego do badań dielektryków w zakresie częstotliwości podakustycznych. Praca doktorska, Pol. Śl., Gliwice 1969.
7. Dutta M. i inni: An Application of an LMS Adaptive Algorithm for a Digital AC Bridge. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. IM-34, N° 4 (pp. 894-897), December 1987.
8. Kaplan B.Z. i inni: An Instrument for Continuously Measuring Capacitance Changes. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, vol. IM-27, N° 1 (pp. 43-45), March 1978.
9. Szadkowski B.: Synteza metod pomiaru immitancji. ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z. 93, Gliwice 1984.
10. Guzik J., Szadkowski B.: Komparator do badań dielektryków w zakresie infraniskich częstotliwości (10^{-3} - 10) Hz. ZN Pol. Śl., ser. Elektryka, z. 136 (str. 41-51), Gliwice 1994.
11. Hoja J., Szczypta A., Tłaga W.: System pomiarowy do diagnostycznej i funkcjonalnej kontroli pakietów urządzeń elektronicznych. ZN Pol. Śl., ser. Automatyka, z. 98 (str. 15-22), Gliwice 1989.
12. Bachtizin P.Z. i inni: Ustanowka dla izmierienija kompleksnoj dielektrической pronicajemosti w infranizkich czastotach. Pribory i Tiechnika Eksperimenta, N° 1 (str. 115-118), 1983.
13. Finak J., Nitsch K.: Pomiar C i $\text{tg}\delta$ w zakresie bardzo małych częstotliwości metoda cyfrowego pomiaru przesunięcia fazowego. PAK, N° 12 (str. 538-540), 1973.
14. Bąk W. i inni: Low Frequency Admittance Measurements of Polycrystalline Sodium Niobate. Acta Universitatis Wratislaviensis, N° 1084 (pp. 177 -184), 1988.
15. Scheiber D.J.: An Ultra-Low Frequency Bridge for Dielectric Measurements. Journal of Research of the NBS, vol. 65 C, N° 1 (pp. 23 - 42), January-March 1961.

16. Helbach W. i inni: High-Precision Automatic Digital AC Bridge. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. IM-32, N° 1 (pp. 159 - 162) March 1983.
17. Zdanowicz P.: Układ kompensacyjny do pomiaru współczynnika strat dielektrycznych. ZN Pol. Śl. ser. Elektryka, z. 119 (str. 25 - 35), Gliwice 1990.
18. Zinn E. i inni: Kapazitäts - und Verlustfaktormesseinrichtung mit selbsttätiger Abgleichung. Technisches Messen, vol. 44, N° 2 (pp. 67 - 73), 1977.
19. Tokoro T. i inni: High-Field Dielectric Properties and ac Dissipation Current Waveforms of Polyethylene Film. IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 27, N° 3 (pp. 482 - 487), June 1992.
20. Milek M.: Magnetyczne komparatory prądów w pomiarach elektrycznych. WNT, Warszawa 1990.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zygmunt Kuśmierk

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 kwietnia 1995 r.

Abstract

In the paper the review of unbalanced and balanced measuring circuits applied to dielectric ac investigations in ultra-low frequency range (10^{-3} - 10) Hz has been presented. General classification of these circuits is shown in Fig.1. Typical unbalanced circuits are presented in Table 1 and typical balanced circuits are shown in Table 2. The synthesis of the analysed measuring circuits has been made basing on a generalized model (Fig.2) which is described in [11]. According to the synthesis the best measuring circuits for dielectric ac investigations can be arranged as follows:

1. eqvoltage comparators and compensators,
2. bridge circuits,
3. PSD circuits,
4. phase measuring circuits or voltage and current recording circuits.

Possibilities resulting from application of active circuits to converter construction with transmittances H_1^X , H_1^N have been discussed to reach sufficient sensitivity in analysed frequency range (10^{-3} - 10) Hz.