

Eligiusz PASECKI  
Brunon SZADKOWSKI

## PRZYRZĄD DO POMIARU REZYSTYWNOSCI DIELEKTRYKÓW CIEKŁYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcję zmodyfikowanego układu komparacyjnego (z ilorazowym przetwornikiem ICL 7107 na wyjściu) oraz opis przyrządu wykonanego według tej koncepcji. Przedstawiono również parametry techniczne wykonanego przyrządu, przeznaczonego do pomiarów rezystywności oleju transformatorowego oraz wazelinny kondensatorowej.

## INSTRUMENT FOR MEASURING LIQUID DIELECTRIC RESISTIVITY

Summary. The paper presents the idea of a modified comparator system (with ICL 7107 dividing converter at the output) and the description of the instrument made according to that idea. Technical parameters of the executed instrument designed for transformer oil and capacitor vaseline resistivity measurements have been presented.

## ПРОБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Резюме. В статье представлена концепция модифицированного компаратора (с делительным преобразователем ICL 7107 на выходе) и описание прибора изготовленного согласно этой концепции. Представлены тоже технические параметры прибора, который предназначен для измерения удельного сопротивления трансформаторного масла и конденсаторного вазелина.

### 1 Wprowadzenie

Jednym z parametrów określających jakość dielektryków ciekłych jest rezystywność. Kontrolę tego parametru należy przeprowadzać w warunkach wymaganych przez odpowiednie normy [7, 8, 9]. Pomiar rezystywności polega na pośrednim pomiarze rezystancji próbki badanego dielektryku (umieszczonej w znormalizowanym kondensatorze pomiarowym) i wyznaczeniu wyniku z zależności [7]:

$$\rho_x = 0,113 C_o R_x, \quad (1)$$

gdzie:  $\rho_x$  - rezystywność badanego dielektryku w  $\Omega m$ ,  
 $C_o$  - pojemność własna kondensatora pomiarowego w pF,  
 $R_x$  - rezystancja badanego dielektryku w  $\Omega$ .

Stosowane dotychczas układy pomiarowe obejmują następujące rozwiązania:

- układy z amperomierzem i woltomierzem,
- giga - lub teraomomierze (z wymuszonym napięciem zasilania),
- układy porównania prądów,
- układy mostkowe.

Przytoczone rozwiązania spełniają wprawdzie wymagania dotyczące zakresu pomiarowego i dokładności, lecz jednocześnie wykazują pewne wady utrudniające lub uniemożliwiające spełnienie innych wymagań. Na przykład do ciągłej kontroli zmian rezystywności (w funkcji zmian temperatury) nie nadają się układy (a, c), natomiast układy mostkowe (d) wymagałyby zautomatyzowania procesu równoważenia oraz przystosowania do bezpośredniego odczytu lub rejestracji wyniku pomiaru. Najkorzystniejsze byłoby tutaj zastosowanie układów (b), jednak wadami tych układów są: zależność wskazań od napięcia zasilania, nieliniowość równania przetwarzania (podziałki), mniejsza dokładność itp.

W badaniach dielektryków ciekłych normy wymagają kontroli temperaturowych zmian rezystywności. Przedstawiony w dalszym ciągu układ pomiarowy jest odpowiednikiem układów (b), w którym wykorzystano metodę komparacyjną z ilorazowym przetwornikiem na wyjściu, uzyskując możliwość bezpośredniego odczytu rezystancji (także rezystywności) przy zachowaniu liniowości przetwarzania i niezależności wskazań od zmian napięcia zasilania w szerokim zakresie. Bliższe objaśnienie zasady pomiaru przedstawiono w p. 2.

## 2. Zasada pomiaru

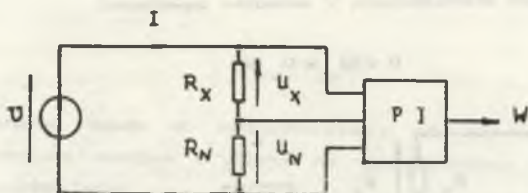
Na rys.1 przedstawiono znany w literaturze [4, 6] schemat ideowy układu do pomiaru rezystancji  $R_x$  metodą komparacji z rezystancją wzorcową  $R_N$ .

Zasadniczym elementem układu pomiarowego z rys. 1 jest przetwornik ilorazowy PI (np. ICL 7107), którego sygnał wyjściowy  $W$  określony jest stosunkiem napięć wyjściowych:

$$W = \frac{U_x}{U_N}, \quad (2)$$

przy czym:  $U_x$  - spadek napięcia na rezystancji mierzonej  $R_x$ ,

$U_N$  - spadek napięcia na rezystancji wzorcowej  $R_N$ .



Rys.1. Układ komparacji rezystancji  $R_x$  i  $R_N$ . PI - przetwornik ilorazowy  
 Fig.1. System for  $R_x$  and  $R_N$  resistances comparison. PI - a dividing converter

Przy założeniu, że przetwornik PI odznacza się pomijalnie małym poborem mocy wyjściowej, można przyjąć, że przez rezystancje  $R_x$  i  $R_N$  płynie ten sam prąd  $I$ . Wówczas równanie (2) można przekształcić do postaci:

$$W = \frac{I R_x}{I R_N} = \frac{R_x}{R_N} \quad (3)$$

Sygnal wyjściowy  $W$  przetwornika jest zatem liniowo zależny od  $R_x$ , a przy odpowiednio dobranej i stałej wartości  $R_N$  można zapewnić bezpośredni odczyt wartości mierzonej rezystancji. Na uwagę zasługuje również niezależność sygnału  $W$  od zmian napięcia  $U$ , którym zasilany jest układ pomiarowy. Są to istotne zalety, których nie mają klasyczne omiomyerze.

Układ z rys. 1 nie nadaje się jednak do bezpośredniego zastosowania w przypadku badań dielektryków. Przy dużych wartościach rezystancji  $R_x$  nie jest spełnione założenie pomijalnie małego poboru mocy przez przetwornik PI (rezystancja wejściowa przetwornika jest porównywalna z rezystancją mierzoną). Ponadto, nie można stosować wymaganych przez normy [7] dużych wartości napięć pomiarowych (np.  $U_x = 100 \dots 1000$  V), znacznie przekraczających wartości dopuszczalne dla przetwornika PI.

W celu uniknięcia podanych niedogodności zastosowano układ zmodyfikowany, przedstawiony na rys. 2.

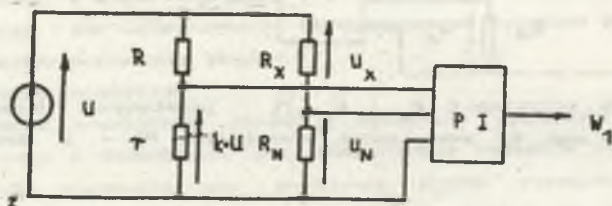
W zmodyfikowanym układzie zastosowano dodatkowy dzielnik rezystancyjny o przekładni  $k = r/(R + r)$ . W ten sposób uzyskano możliwość spełnienia założenia pomijalnie małego poboru mocy przez przetwornik PI, gdyż łatwo można dobrać wystarczająco małe rezystancje  $r$  i  $R_N$ . Jednocześnie możliwe jest stosowanie dużego napięcia pomiarowego  $U_x$ , bowiem nie jest ono bezpośrednio doprowadzane do przetwornika PI.

Sygnal wyjściowy  $W_x$  w układzie z rys. 2 określony jest równaniem:

$$W_1 = \frac{kU}{U_N} = k \left[ \frac{U_x}{U_N} + 1 \right], \quad (4)$$

w którym uwzględniono obowiązującą w układzie zależność:

$$U = U_x + U_N \quad (4a)$$



Rys.2. Zmodyfikowany układ komparacji  $R_x$  i  $R_N$

Fig.2. Modified  $R_x$  and  $R_N$  comparison system

Ponadto, przy pomijalnie małym poborze mocy przez przetwornik PI, spełniona jest relacja:

$$\frac{U_x}{U_N} = \frac{R_x}{R_N} \quad (5)$$

Uwzględniając zależność (5) w równaniu (4), otrzymujemy:

$$W_1 = k \left[ \frac{R_x}{R_N} + 1 \right] \quad (6)$$

Stosunek  $R_x/R_N$ , w przypadku gdy  $R_x$  ma dużą wartość (dielektryk), jest na ogół nie mniejszy niż  $10^3$ , co pozwala wyrazić równanie (6) w postaci przybliżonej:

$$W_1 \cong k \frac{R_x}{R_N}, \quad (7)$$

z błędem nie większym niż 0,1%.

W celu umożliwienia bezpośredniego odczytu mierzonej rezystancji  $R_x$  wprost ze wskazań  $W_1$  wystarczy dobrać wartości  $k$  i  $R_N$  tak, aby ich stosunek miał stałą wartość:

$$\frac{k}{R_N} = 10^{-n}, \quad (8)$$

gdzie:  $n$  - liczba całkowita.

Wówczas po podstawieniu zależności (8) do równania (7) i przekształceniu otrzymamy:

$$R_x = W_1 \cdot 10^n \quad (9)$$

Przystosowanie układu do bezpośredniego odczytu mierzonej rezystywności  $\rho_x$  jest również możliwe i polega na wykorzystaniu zależności (1) i (7), z których otrzymujemy:

$$\rho_x = W_1 \frac{0,113 C_o R_N}{k} \quad (10)$$

Jeżeli nastawimy przekładnię dzielnika na taką wartość  $k$ , aby przy nie zmienionej wartości  $R_N$  (dobrej poprzednio do pomiaru  $R_x$ ) uzyskać stałą wartość wyrażenia:

$$\frac{0,113 C_o R_N}{k} = 10^m, \quad (11)$$

gdzie:  $m$  - liczba całkowita,

wówczas podstawiając zależność (11) do równania (10) otrzymujemy relację umożliwiającą bezpośredni odczyt wartości  $\rho_x$  ze wskazań  $W_1$ :

$$\rho_x = W_1 \cdot 10^m \quad (12)$$

Bezpośredni odczyt  $\rho_x$  możliwy jest tylko przy zachowaniu stałej wartości  $C_o$ , co wiąże się z koniecznością stosowania stale tego samego kondensatora pomiarowego.

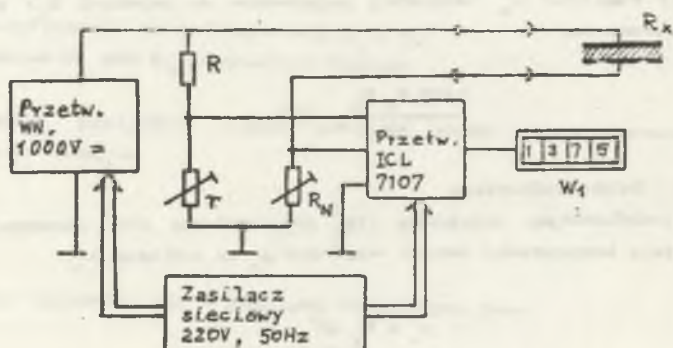
### 3 Opis wykonanego przyrządu

Opierając się na koncepcji przedstawionej w p. 2 (rys. 2), wykonano przyrząd przeznaczony do pomiarów rezystywności oleju transformatorowego oraz wazeliny kondensatorowej, dostosowany do wymagań norm [7, 8, 9] Przyrząd przystosowano do współpracy z kondensatorem pomiarowym firmy Tettex, typ 2903 o następujących parametrach technicznych:

- pojemność własna:  $C_* = 60 \text{ pF}$ ,
- objętość przestrzeni pomiarowej:  $V_p = 40 \text{ cm}^3$ ,
- maksymalne napięcie pomiarowe:  $U_{\text{max}} = 2 \text{ kV}$ .

Odpowiedni schemat ideowy przyrządu przedstawiono na rys.3.

Wskazanie  $W_1$  cyfrowego wskaźnika wyjściowego jest liniowo zależne od wartości mierzonej rezystancji  $R_x$  (por. z równaniem 7) i może być przystosowane do bezpośredniego odczytu  $R_x$  (lub  $\rho_x$ ) przy odpowiednim doborze rezystorów  $R$ ,  $r$  i  $R_N$  (por. równania 9 i 12). W przedstawionym układzie zastosowano analogowo-cyfrowy przetwornik ICL 7107 wykorzystany jako przetwornik ilorazowy (PI - rys. 2), według rozwiązań znanych w literaturze [2, 3, 5]. Wymagania norm [7, 8, 9] odnośnie do napięć, przy których należy mierzyć rezystywność oleju transformatorowego oraz wazeliny kondensatorowej, przesądziły o zastosowaniu w przedstawionym na rys. 3 przyrządzie - przetwornicy WN o napięciu wyjściowym (stałym)  $U = 1000$  V. Rozwiązanie konstrukcyjne przetwornicy WN oparto na rozwiązaniach znanych w literaturze [1].

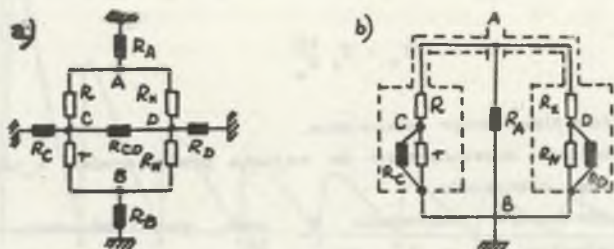


Rys 3 Schemat ideowy wykonanego przyrządu  
Fig.3. Schematic diagram of the executed instrument

Szczegółowy opis rozwiązań poszczególnych obwodów opracowanego przyrządu wykracza poza ramy niniejszego artykułu. W dalszym ciągu zostaną przedstawione tylko niektóre bardziej istotne fragmenty, związane z eliminacją wpływów zakłócających pracę przyrządu oraz zabezpieczeniem przyrządu przed różnego rodzaju uszkodzeniami w toku eksploatacji.

#### a) Eliminacja wpływów upływności izolacji

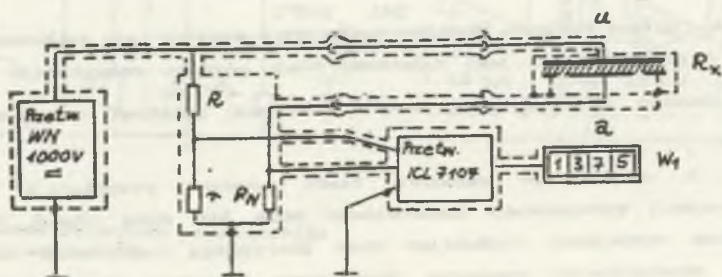
Ze schematu przedstawionego na rys. 2 wynika, że przy dużych wartościach  $R_x$  należy liczyć się ze znaczącymi wpływami upływności izolacji, głównie w obwodzie dzielników  $R_v - R_N$  i  $R - r$ . Na rys. 4a przedstawiono schemat dzielników z uwzględnieniem rezystancji upływnościowych  $R_A$ ,  $R_B$ ,  $R_C$ ,  $R_D$ ,  $R_{CD}$ , które powodują niepożądane zmiany przekładni dzielników.



Rys.4. Schematy wpływów upływności izolacji (a) i koncepcji ekranowania (b)

Fig.4. Diagrams of (a) insulation leakage effects and (b) shielding method

Stosując ekranowanie według koncepcji przedstawionej na rys. 4b, wyeliminowany zostaje wpływ upływności  $R_A$ ,  $R_B$  i  $R_{CD}$  na zmiany przekładni dzielników, natomiast pozostaje wpływ upływności  $R_C$  i  $R_D$ , które bocznikują rezystory  $r$  i  $R_N$ . Jednak wpływ ten jest pomijalnie mały, bowiem rezystory  $r$  i  $R_N$  mają wartości znacznie mniejsze niż  $R$  i  $R_X$  (np. 100 ... 1000 razy) i tym samym łatwo można zapewnić spełnienie relacji  $r \ll R_C$  oraz  $R_N \ll R_D$ . Ekranowanie omawianego przyrządu wykonano według schematu przedstawionego na rys. 5.



Rys.5. Schemat ekranowania przyrządu

Fig.5. Diagram of instrument shielding

#### b) Eliminacja zakłóceń o częstotliwości sieciowej

Przetwornik ICL 7107 jest zintegrowanym układem realizującym funkcje woltomierza cyfrowego z podwójnym całkowaniem [3, 5]. Zasada podwójnego całkowania umożliwia skuteczne wyeliminowanie wpływu zakłócających napięć przemiennych nakładających się na mierzone napięcie stałe. W przypadku

wykorzystania przetwornika ICL 7107 jako przetwornika ilorazowego nie są spełnione warunki zapewniające odporność przetwornika na wymienione zakłócenia, ponieważ przy zmieniającej się wartości napięcia odniesienia  $U_N$  ulega również zmianie czas drugiego całkowania  $T_N$  według zależności:

$$T_N = T_x \frac{kU}{U_N}, \quad (13)$$

gdzie:  $T_x$  - czas pierwszego całkowania,

$kU$  - napięcie doprowadzone do wejścia przetwornika w czasie pierwszego całkowania.

Jeżeli czas pierwszego całkowania  $T_x$  jest wielokrotnością okresu  $T_Z$  napięcia zakłócającego  $u_Z = U_{mZ} \sin \left( \frac{2\pi}{T_Z} t + \varphi_Z \right)$ , to czas drugiego całkowania (z zakłóceniami)  $T_{NZ}$  oblicza się z zależności:

$$U_N T_{NZ} = \int_0^{T_{NZ}} U_{mZ} \sin \left( \frac{2\pi}{T_Z} t + \varphi_Z \right) dt = k U T_x. \quad (14)$$

Załóżmy, że amplituda napięcia zakłócającego  $U_{mZ} = U_N$  oraz faza początkowa  $\varphi_Z$  tego napięcia jest taka, że powoduje maksymalny błąd pomiaru rezystancji. Wówczas rozwiązując równanie (14) i podstawiając zależności (4), (7) i (13), otrzymuje się:

$$\delta_{Rx} = \frac{T_Z}{\pi T_N} \sin \pi \frac{T_{NZ}}{T_Z}, \quad (15)$$

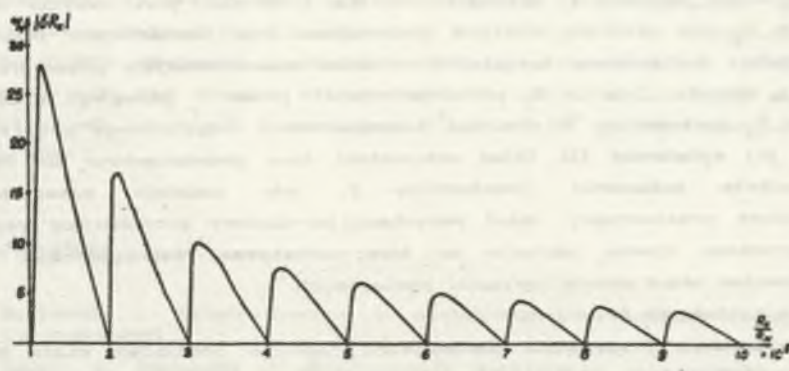
gdzie:  $\delta_{Rx}$  - błąd względny pomiaru rezystancji spowodowany zakłóceniami.

Na rys. 6 przedstawiona jest zależność błędu pomiaru rezystancji w funkcji  $\frac{R}{R_N}$  obliczonego na podstawie wzoru (15) dla zakłóceń o częstotliwości sieciowej.

Z rys. 6 wynika, że składowa błędu pomiaru rezystancji (i rezystywności) spowodowana zakłóceniami może być duża (rzędu 30%). Błąd ten można zmniejszyć wydłużając czas pierwszego całkowania, ale maleje wówczas częstotliwość pomiarów. Skutecznym sposobem ograniczenia wpływu zakłóceń na wynik pomiaru jest zastosowanie filtra dolnoprzepustowego w torze przetwarzania napięcia  $U_N$ . Układ filtra zastosowanego w przyrządzie przedstawiony jest na rys. 7.

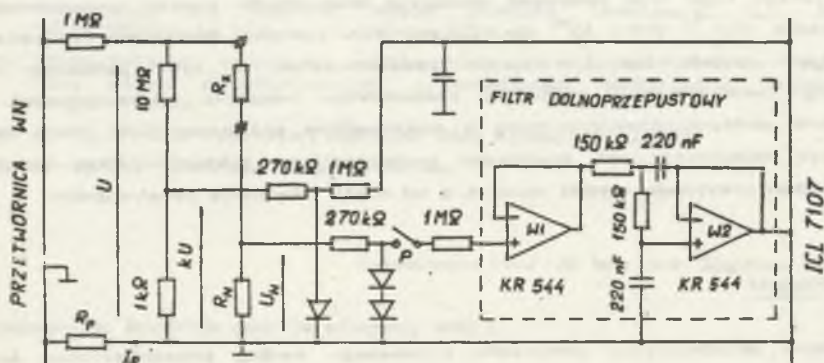
Włókno wejściowe zapewnia wymaganą dużą rezystancję wejściową przetwornika. Tłumienie filtra sygnału zakłócającego o częstotliwości sieciowej wynosi około 40 dB. Oznacza to, że dla napięcia zakłócającego o częstotliwości sieciowej i amplitudzie  $U_{mZ} = U_N$ , maksymalny błąd pomiaru rezystancji spowodowany zakłóceniami maleje do około 0,2%.





Rys.6. Zależność błędu pomiaru rezystancji  $\delta_{R_N}$  w funkcji  $\frac{R_x}{R_N}$  w obecności zakłóceń

Fig.6. Dependence of the resistance measurement error  $\delta_{R_N}$  on the ratio  $\frac{R_x}{R_N}$  when disturbances are present



Rys.7. Układ wejściowy przetwornika  
Fig.7. Converter input circuit

c) Zabezpieczenie przed przepięciami i zwarciami  $R_N$

W opracowanym przyrządzie zastosowano wielostopniowe zabezpieczenie przed możliwością doprowadzenia do wejść przetwornika ICL 7107 napięć wyższych od dopuszczalnych. W torze przetwarzania napięcia kU (rys. 7) zastosowano zabezpieczenie rezystancyjno-diodowo-pojemnościowe. Ze względu na duże mierzone rezystancje takiego zabezpieczenia nie można zastosować w torze przetwarzania napięcia  $U_N$ . W celu ograniczenia spadku napięcia na rezystorze  $R_N$  w czasie ładowania kondensatora pomiarowego zawierającego

badaną próbkę ( $R_x$ ) zastosowano wolne narastanie napięcia wyjściowego przetwornicy. Najbardziej niebezpieczne dla przyrządu jest zwarcie na zaciskach  $R_x$  (np. zwarcie elektrod w kondensatorze pomiarowym). Dlatego w przyrządzie zastosowano trójstopniowy układ zabezpieczający przed skutkami takiego zwarcia. Zwarcie  $R_x$  powoduje wzrost prądu  $I_p$  płynącego przez rezystor  $R_p$  zastosowany w obwodzie zabezpieczenia nadprądowego przetwornicy WN i jej wyłączenie [1]. Układ automatyki (nie przedstawiony na rys. 7) uniemożliwia załączenie przełącznika P, gdy zadziała zabezpieczenie nadprądowe przetwornicy. Układ rezystancyjno-diodowy bocznikujący rezystor  $R_N$  ogranicza spadek napięcia na tym rezystorze, zabezpieczając przed uszkodzeniem układ zmiany zakresów pomiarowych.

d) Dane techniczne przyrządu

W wykonanym przyrządzie zastosowano napięcie pomiarowe stałe 1000 V. Zakres pomiarowy rezystancji (0,1 - 1999)  $10^{\circ} \Omega$  podzielono na cztery podzakresy przełączane przełącznikiem typu "IZOSTAT". Niedokładność pomiaru rezystancji zależy od wartości mierzonej rezystancji i wynosi: 1% przy pomiarze rezystancji w zakresie (0,1 - 1,999)  $10^{\circ} \Omega$ , 2% przy pomiarze rezystancji w zakresie (1 - 199,9)  $10^{\circ} \Omega$  oraz 5% przy pomiarze rezystancji w zakresie (100 - 1999)  $10^{\circ} \Omega$ . Przy współpracy z kondensatorem pomiarowym firmy Tettex typu 2903 przyrząd umożliwia bezpośredni pomiar rezystywności w zakresie (0,1 - 1999)  $10^{10} \Omega m$ . Zakres ten również podzielono na cztery podzakresy, przełączane tym samym przełącznikiem co przy pomiarze rezystancji. Jako wskaźnik wyjściowy zastosowano wskaźnik siedmiosegmentowy z diodami elektroluminescencyjnymi o maksymalnym wskazaniu 1999, przy czym przecinek dziesiętny jest sterowany przełącznikiem zakresów. Czas ustalania wskazań przyrządu wynosi około 4 s od chwili włączenia przetwornicy.

#### 4. Wnioski

Badania laboratoryjne przyrządu wykonanego według przedstawionej koncepcji potwierdziły jego przydatność do pomiaru rezystancji i rezystywności dielektryków ciekłych (zwłaszcza oleju transformatorowego oraz wazeliny kondensatorowej), zgodnie z wymogami odpowiednich norm. Istotnymi zaletami opisanego rozwiązania układowego (z ilorazowym przetwornikiem wejściowym) są:

- możliwość dokonywania ciągłej kontroli zmian badanej rezystancji (np. w funkcji zmian temperatury),
- wyeliminowanie wpływów niestabilności źródła napięcia pomiarowego na wyniki pomiarów,
- liniowość przetwarzania,
- bezpośredni odczyt mierzonych wielkości (bez konieczności dokonywania obliczeń).

Zastosowany w przyrządzie system ekranowań i zabezpieczeń umożliwił osiągnięcie zadowalającej odporności przyrządu na zakłócenia o częstotliwości sieciowej, przepięcia oraz zwarcia zacisków pomiarowych. Przyrząd może być również wykorzystany do badania dielektryków stałych o rezystancjach zawartych w granicach  $10^6 - 2 \cdot 10^{12} \Omega$  przy napięciu pomiarowym 1000 V.

#### LITERATURA

- [1] Borkowski A.: Układy scalone w stabilizatorach napięcia stałego. WNT, Warszawa 1985.
- [2] Keiner J., Pawłowski W.: Rozszerzenie zastosowań przetwornika a/c ICL 7106. Radioelektronik nr 8/1990.
- [3] Kulka Z., Libura A., Nadachowski M.: Przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe. WKŁ, Warszawa 1987.
- [4] Milek M.: Komparacja wielkości elektrycznych i magnetycznych. Z.N. Pol. Śl. "ELEKTRYKA", nr 696, z. 77, Gliwice 1981.
- [5] Stenzel J.: Voltomierze cyfrowe z układami scalonymi ICL 7107 i ICL 7106. Intersil. Radioelektronik nr 41/1982 i nr 5/1982.
- [6] Szadkowski B.: Synteza metod pomiaru immitancji. Z.N. Pol. Śl. "ELEKTRYKA", nr 802, z. 93, Gliwice 1984.
- [7] PN-84/E-04409 Materiały elektroizolacyjne ciekłe. Pomiary współczynnika strat dielektrycznych, przenikalności elektrycznej względnej i rezystywności.
- [8] PN-72/C-96058 Przetwory naftowe. Olej transformatorowy.
- [9] BN-65/0537 Wazelina kondensatorowa.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zygmunt Kusmirek

Wpłynęło do Redakcji dnia 28 stycznia 1992 r.

## INSTRUMENT FOR MEASURING LIQUID DIELECTRIC RESISTIVITY

### A b s t r a c t

The paper presents the idea of a modified comparator system (fig.2). It has been proved that it is possible to check continuously resistivity changes by means of this instrument while preserving conversion linearity, direct read - out (formula 9 and 12), and indication independence of supply voltage changes. Description of the instrument mode according to that idea, with ICL 7107 dividing converter at the output has been given (fig.3). Some conceptions of circuits eliminating the disturbing effects and protecting the instrument from damage during its operation have been suggested (fig.5 and 7). Technical parameters of the executed instrument, designed for transformer oil and capacitor vaseline resistivity measurements, have been presented. The instrument co-operates with a tettec measuring capacitor type 2903.