

Sławomir GÓRKA  
Andrzej LEBIEDZKI

## MIERNIK REZYSTANCJI UKŁADÓW IZOLACYJNYCH

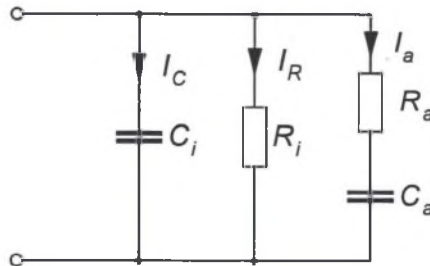
**Streszczenie.** W artykule opisany został mikroprocesorowy miernik rezystancji układów izolacyjnych pozwalający równocześnie na wyznaczenie współczynnika absorpcji badanej izolacji.

## INSTRUMENT FOR INSULATION SYSTEMS MEASUREMENT

**Summary.** In the paper microprocessor instrument for insulation systems measurement has been presented. Absorption coefficient of the tested insulation can be determined in the instrument as well.

### 1. WPROWADZENIE

Właściwości układów izolacyjnych odwzorować można stosując schemat zastępczy układu izolacyjnego, złożonego z równolegle połączonych rezystancji  $R_i$ , pojemności  $C_i$ , pojemności  $C_a$  i rezystancji  $R_a$ . Schemat taki pokazano na rysunku 1 [3].



Rys. 1. Schemat zastępczy układu izolacyjnego  
Fig. 1. Substitute diagram of insulation system

Izolowane części metalowe urządzeń elektrycznych stanowią swego rodzaju kondensator. Przy pomiarach rezystancji izolacji występuje więc pewna pojemność  $C_i$ . W celu wyeliminowania jej wpływu, pomiary wykonuje się napięciem stałym. Pojemność ta odgrywa istotną rolę podczas pomiaru, bowiem w chwili skokowego włączenia napięcia probierczego zaczyna płynąć prąd ładowania, który stopniowo zanika. Wynika stąd wniosek, że odczytu wskazania miernika izolacji należy dokonać dopiero po pewnym czasie, gdy zaniknie prąd ładowania, a prąd kondukcyjnościowy ustali się. Zwykle czas ten nie przekracza 60 s. Zjawisko to występuje szczególnie wyraźnie przy pomiarach rezystancji izolacji urządzeń o dużych pojemnościach, np. kondensatorów czy kabli energetycznych.

Prąd płynący przez układ izolacyjny pod wpływem stałego napięcia pomiarowego jest sumą trzech prądów składowych [3] (rys. 1):

- prądu przewodzenia lub upływności -  $I_R$ ,
- prądu absorpcji (polaryzacji) -  $I_a$ ,
- prądu ładowania pojemności -  $I_C$ .

**Prąd ładowania pojemności** – prąd ten w początkowej fazie pomiaru jest duży i zanika do zera w miarę ładowania pojemności. Szybkość jego zaniku jest uzależniona od wartości pojemności badanego obiektu  $C_i$ .

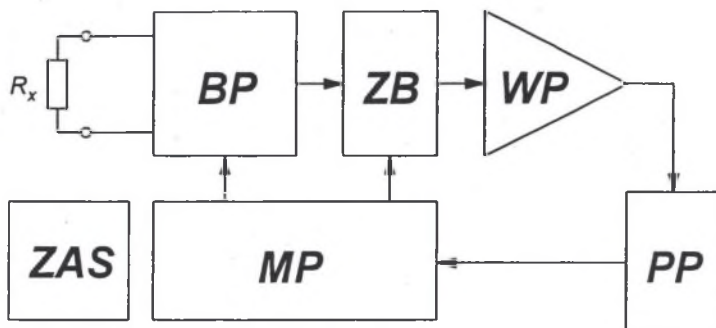
**Prąd absorpcji (polaryzacji)** – prąd ten jest również początkowo duży, maleje jednak w dużo wolniejszym tempie niż prąd ładowania pojemności. Jest wynikiem przemieszczania się ładunków oraz dipoli wewnątrz izolatora pod wpływem pola elektrycznego. Absorpcja jest w dużej mierze powodowana przez wilgoć i zanieczyszczenia izolacji.

**Prąd przewodzenia lub upływności** – jest to mały ustalony prąd o charakterze rezystancyjnym. Prąd upływności narasta szybko do pewnej stałej wartości i pozostaje niezmienny dla danego napięcia probierczego. Zwiększenie tego prądu jest oznaką pogorszenia się stanu izolacji. Pomiar prądu przewodzenia lub upływności powinien być mierzony, kiedy układ jest w pełni naładowany i ustały zjawiska absorpcji.

## 2. UKŁAD POMIAROWY MIERNIKA REZYSTANCJI IZOLACJI

Schemat blokowy miernika rezystancji izolacji [1] przedstawiono na rysunku 2. Na schemacie tym wyróżnić można następujące bloki funkcjonalne miernika:

- BP** - blok pomiarowy złożony ze źródła napięcia pomiarowego, rezystorów wzorcowych  $R_{n1} \div R_{n3}$ , dodatkowego rezystora  $R_w$ , oraz styków przekaźników przełączających rezystory wzorcowe  $SK_3 \div SK_5$ .
- ZB** - blok zabezpieczający, w którego skład wchodzi elementy zabezpieczające oraz styk  $SK_2$  przekaźnika wykonawczego.
- WP** - blok wzmacniacza pomiarowego.
- PP** - blok przetwornika pomiarowego.
- MP** - blok systemu mikroprocesorowego złożonego z układu mikroprocesora, klawiatury i wyświetlacza tekstowego LCD.
- ZAS** - blok zasilacza napięcia stałego.



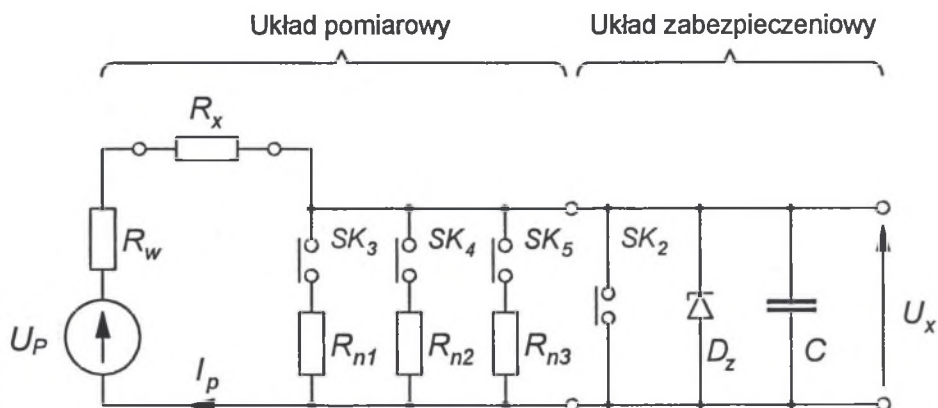
Rys.2. Schemat blokowy miernika rezystancji izolacji.  
Fig.2. Blok diagram of insulation resistance instrument

Poniżej opisane zostaną funkcje oraz zasada działania poszczególnych bloków funkcjonalnych, wchodzących w skład miernika.

### 2.1. Układ pomiaru prądu

Jako sposób pomiaru wartości rezystancji izolacji  $R_x$  przyjęto koncepcję pomiaru prądu  $I_p$  płynącego przez badany układ izolacyjny pod wpływem przyłożonego stałego napięcia pomiarowego  $U_p = 1000$  V.

Pomiar prądu  $I_p$  zrealizowano pośrednio przez pomiar spadku napięcia  $U_x$  na rezystorze wzorcowym  $R_n$  w układzie pomiarowym przedstawionym na rys.3.



Rys.3. Schemat układu pomiarowego i zabezpieczającego miernika  
Fig.3. Diagram of measuring and protection system

W obwodzie tym rezystancja  $R_x$  reprezentuje rezystancję badanej izolacji. Wprowadzenie do obwodu pomiarowego dodatkowego rezystora ograniczającego  $R_w$  podyktowane jest względami bezpieczeństwa osób obsługujących miernik (ograniczenie prądu rażenia) oraz ograniczeniem wartości prądu w przypadku zwarcia końcówek pomiarowych ( $R_x \rightarrow 0 \Omega$ ).

Obwód pomiarowy opisuje następująca zależność:

$$R_x = \frac{R_n U_p}{U_x} - (R_n + R_w). \quad (1)$$

Parametrami stałymi w trakcie pomiaru są: napięcie probiercze  $U_p = 1000 \text{ V}$ , rezystancja wzorcowa  $R_n$ , rezystancja ograniczająca  $R_w$ , parametrem zmiennym natomiast jest spadek napięcia  $U_x$  na rezystorze wzorcowym, który odpowiada wartości mierzonej rezystancji izolacji.

Wartości rezystancji rezystorów wzorcowych dla poszczególnych zakresów pomiarowych miernika zestawiono poniżej:

$R_{n1} = 100 \text{ k}\Omega$	- dla zakresu pomiarowego	10 M $\Omega$	...	100 M $\Omega$ ,
$R_{n2} = 1 \text{ M}\Omega$	- dla zakresu pomiarowego	100 M $\Omega$	...	1 G $\Omega$ ,
$R_{n3} = 10 \text{ M}\Omega$	- dla zakresu pomiarowego	1 G $\Omega$	...	10 G $\Omega$ .

## 2.2. Układ zabezpieczający

Układ zabezpieczający ma za zadanie zabezpieczyć część elektroniczną miernika od powstających w układzie pomiarowym przepięć. Przepięcia takie są spowodowane:

- ładowaniem pojemności izolacji  $C_i$  w początkowej fazie pomiaru (prąd ładowania pojemności),
- możliwością obniżenia się wartości rezystancji  $R_x$  poniżej wartości progowej - około 8 M $\Omega$  (szczególnym przypadkiem jest zwarcie końcówek pomiarowych  $R_x = 0 \Omega$ ),
- przełączaniem zakresów pomiarowych (moment czasowy, w którym przełączane są rezystory wzorcowe  $R_n$ ).

W tym celu w układzie pomiarowym miernika zastosowano dwa rodzaje zabezpieczeń (rys.3).

Pierwszym zabezpieczeniem jest wprowadzenie styku SK<sub>2</sub> przekaźnika, który jest zwarty w początkowej fazie ładowania pojemności  $C_i$  układu izolacyjnego, oraz w trakcie przełączania zakresu (zmiana rezystora wzorcowego  $R_n$ ). Styk SK<sub>2</sub> pozostaje także zwarty wówczas, gdy miernik nie dokonuje aktualnie pomiaru.

Drugim rodzajem zabezpieczenia miernika jest wprowadzenie diody Zenera  $D_Z$ . Wartość napięcia zadziałania diody (napięcia Zenera) wynosi 12 V. Dioda  $D_Z$  wraz z rezystorem  $R_w$  tworzą układ stabilizujący, który nie dopuszcza do wzrostu spadku napięcia  $U_x$  powyżej wartości 12 V, nawet w przypadku zwarcia rezystancji  $R_x$ . Dodatkowo równolegle z diodą Zenera włączony został kondensator  $C_Z$ . Tłumi on ewentualne przepięcia o charakterze tzw. „szpilek” napięciowych o dużej amplitudzie i krótkim czasie trwania, mogących przedostać się przez diodę  $D_Z$ .

### 2.3. Układ wzmacniacza pomiarowego

Ponieważ rezystancja badana  $R_x$  i rezystancja wzorcowa  $R_n$  tworzą dzielnik napięciowy, przetwornik pomiarowy **PP** nie może obciążać wyjścia dzielnika, czyli musi zostać spełniona nierówność  $R_n \ll R_{PP}$ . Spełnienie tego warunku możliwe jest poprzez odseparowanie układu pomiarowego od przetwornika pomiarowego **PP** za pomocą wtórnika napięciowego **WP** – rys.2. Ze względu na dużą rezystancję wejściową i małą wyjściową układ ten doskonale nadaje się jako bufor dopasowujący układ pomiarowy do przetwornika pomiarowego **PP**. Jako wtórnik użyty został niskoszumny wzmacniacz operacyjny **TL071**. Dzięki zastosowaniu przez producenta układu tranzystorów polowych JFET na wejściach wzmacniacza, jego rezystancja wejściowa wynosi około  $10^{12} \Omega$ . Zatem dla największego z rezystorów wzorcowych  $R_{n3} = 10^7 \Omega$  spełniona jest nierówność  $R_n \ll R_{PP}$ .

### 2.4. Układ przetwornika pomiarowego

Układ przetwornika pomiarowego **PP** służy do przetworzenia wartości napięcia  $U_x$  z układu pomiarowego na sygnał dyskretny (cyfrowy) o częstotliwości  $f_x$  odpowiadającej wartości mierzonej rezystancji  $R_x$ . Wyjściowy sygnał częstotliwościowy zostaje doprowadzony do układu mikroprocesorowego. Jako przetwornika pomiarowego użyto precyzyjnego przetwornika napięcie-częstotliwość ( $U/f$ ) typu **LM331N**. Układ ten charakteryzuje się bardzo małym błędem nieliniowości przetwarzania, rzędu 0,01%. Przy czym najlepsze wyniki daje praca przetwornika przy napięciu wejściowym  $1 \div 10$  V. Taki zakres napięć wejściowych przetwarzany jest na ciąg impulsów prostokątnych o współczynniku wypełnienia  $\varepsilon = 0,5$ . Stała przetwarzania przetwornika  $c_{U/f}$  jest równa  $1000 \text{ Hz/V}$ . Układ **LM331N** jest wyposażony w wyjście typu otwarty kolektor, dzięki czemu możliwe jest ustalenie poziomu sygnału wyjściowego  $0; +5$  V odpowiadającego poziomom sygnałów części mikroprocesorowej miernika.

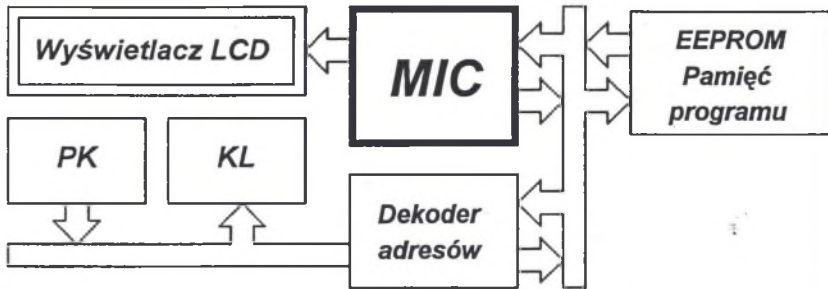
### 2.5. Źródło napięcia probierczego

Jako źródło napięcia probierczego **UP** zdecydowano się użyć przetwornicy wysokiego napięcia. Głównym elementem przetwornicy jest transformator wysokiego napięcia. Uzwojenia dolnego napięcia tego transformatora są naprzemiennie dołączane do źródła napięcia zasilającego  $12$  V poprzez tranzystory pracujące w charakterze kluczy elektronicznych. Taki sposób zasilania transformatora wysokiego napięcia powoduje powstanie w jego obwodzie magnetycznym zmieniającego się liniowo strumienia magnetycznego, który indukuje po stronie uzwojenia górnego napięcia siłę elektromotoryczną. Przebieg czasowy napięcia, jakie indukuje się na wyjściu transformatora, ma kształt prostokątny przemienny. Ze względu na stosunkowo dużą wartość napięcia probierczego  $U_p = 1000$  V, a co za tym idzie, konieczności zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości napięciowej izolacji transformatora, zdecydowano się transformować napięcie niskie do poziomu  $500$  V, a następnie podwoić wartość tego napięcia w typowym podwajaczu diodowym. Podwajacz napięcia pełni dodatkowo rolę układu prostowniczego, na którego wyjściu otrzymuje się napięcie stałe o wartości  $1000$  V.



## 2.6. System mikroprocesorowy miernika

Schemat blokowy układu mikroprocesorowego, sterującego pracą miernika, pokazano na rysunku 4.



Rys.4. Schemat blokowy systemu mikroprocesorowego. Oznaczenia: PK – bufor przekaźników, KL – bufor klawiatury, MIC – mikrokontroler 80C32

Fig.4. Blok diagram of mikroprocessor system. PK - relay buffer, KL - keyboard buffer, MIC - microcontroller 80C32

System mikroprocesorowy pełni funkcję układu sterującego pracą miernika rezystancji izolacji oraz układu przetwarzającego dane pochodzące z przetwornika pomiarowego PP. Dodatkowo układ mikroprocesorowy odczytuje stan trójprzyciskowej klawiatury, steruje ciekłokrystalicznym wyświetlaczem tekstowym i kontroluje pracę pięciu przekaźników wykonawczych  $PK_1 \div PK_5$ . Jako jednostkę centralną wybrano mikrokontroler 80C32. Mikrokontroler ten w swej architekturze wewnętrznej posiada trzy układy czasowlicznikowe, z których dwa, T0 i T1, pełnią rolę układów pomiaru czasu i częstotliwości przebiegu wyjściowego przetwornika pomiarowego PP. System mikroprocesora współpracuje z zewnętrzną pamięcią programu EEPROM o pojemności 8 kB, ponieważ dołączona do mikroprocesora pamięć wykorzystuje jedynie 12 z 16 bitów adresowych (8192 B).

Niewykorzystana przestrzeń adresowa została użyta do sterowania przez mikrokontroler przekaźnikami wykonawczymi oraz do odczytu klawiszy sterujących miernikiem. Stan pracy przekaźników  $PK_3 \div PK_5$  sygnalizowany jest za pomocą diod świecących  $LED_2 \div LED_4$ , świecenie poszczególnych diod informuje użytkownika o tym, który z zakresów pomiarowych jest aktualnie używany. Do wyjść portu P1 mikroprocesora został dołączony moduł wyświetlacza tekstowego LCD. Wyznaczona przez mikroprocesor wartość częstotliwości  $f_x$ , która odpowiada wartości mierzonej rezystancji izolacji, oraz sposób pomiaru czasu są podstawą działania programu miernika rezystancji izolacji. Każdy zakres pomiarowy ma odrębną procedurę pomiaru rezystancji izolacji. Podstawową różnicą dzielącą te procedury są dane wejściowe do obliczenia rezystancji mierzonej  $R_x$ , a ściślej, wartość rezystancji wzorcowej  $R_n$ .

Procedura ta wyznacza wartość mierzonej rezystancji izolacji w oparciu o wzór:

$$R_x = \frac{R_n U_o}{U_x} - (R_n + R_w). \quad (2)$$

Zamiast spadku napięcia  $U_x$  daną wejściową jest mierzona częstotliwość  $f_x$  pochodząca z przetwornika pomiarowego  $U/f$ .

Największa wartość, jaką może przyjąć równanie (2) określona jest liczbą 16-bitową (0+65535), przyjęto zatem maksymalną wartość na poziomie 50 000, w rezultacie czego dokładność wskazania miernika na poszczególnych zakresach jest taka, jak zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Wskazania miernika współczynnika absorpcji na poszczególnych zakresach

Zakres	Wskazania	Błąd pomiaru
100 MΩ	(8,00 ÷ 500,00) MΩ	± 10 kΩ
1 GΩ	(90,0 + 5000,0) MΩ	± 100 kΩ
10 GΩ	(900 ÷ 50,000) GΩ	± 1 MΩ

Operacje matematyczne wykonywane są na liczbach całkowitych, kropka dziesiętna jest umieszczana w odpowiednim dla danego zakresu pomiarowego miejscu, rozdzielając wynik na część całkowitą i ułamkową. W trakcie działania procedury obliczającej wartość rezystancji  $R_x$  cały czas kontrolowana jest wartość częstotliwości  $f_x$  pochodzącej z przetwornika pomiarowego PP. Jeśli wartość ta przekracza zakres wyliczanych dla poszczególnego zakresu wartości, to pomiar zostaje zatrzymany i wyświetlony zostaje odpowiedni komunikat. Oprócz kontroli wartości częstotliwości sprawdzany jest także wpływający czas. Działanie opisywanej procedury kończy się z chwilą, gdy upłynie czas pomiaru – odpowiednio 60 lub 300 s.

## 2.7. Współczynnik absorpcji

Wykonany miernik rezystancji izolacji w końcowej fazie pomiaru oblicza dodatkowo współczynnik absorpcji izolacji  $w$ . Danymi wejściowymi dla tej procedury są zapamiętane w trakcie pomiaru rezystancji izolacji wartości częstotliwości  $f_x$  (po 15 lub 60 s) oraz częstotliwość odpowiadająca wartości rezystancji odpowiednio po 60 lub 300 s.

Na podstawie danych wejściowych ponownie obliczona zostaje rezystancja z końca pomiaru, jej wartość zostaje zapamiętana i wyświetlona na wyświetlaczu. Następnie wartość tej rezystancji jest dzielona przez wartość rezystancji obliczonej na podstawie zapamiętanej w trakcie pomiaru częstotliwości  $f_{15}$  lub  $f_{60}$ . Obliczony w ten sposób współczynnik absorpcji izolacji wyświetlany jest na wyświetlaczu.

### 3. POMIARY KONTROLNE MIERNIKA

Wykonany miernik został poddany badaniom laboratoryjnym. Badania te miały na celu oszacowanie błędu pomiaru rezystancji izolacji wykonanego miernika. Jako wzorce do pomiaru rezystancji, użyte zostały następujące rezystory wzorcowe:

- $39,2 \text{ M}\Omega \pm 2\%$  - 3 sztuki,
- $\text{M}\Omega \pm 5\%$  - 10 sztuk.

Łącząc szeregowo wymienione rezystory uzyskano wartość rezystancji wzorcowej  $R_{\max}=2,5 \text{ G}\Omega$ .

W tabeli 2 przedstawiono wyniki pomiarów rezystancji na poszczególnych zakresach miernika.

Tabela 2

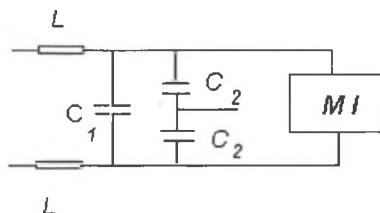
Zestawienie wyników pomiarów rezystancji

Zakres pomiarowy	$R_n$	$R_x$	$\delta\%$
	$\text{M}\Omega$	$\text{M}\Omega$	%
Zakres 1: $100 \text{ M}\Omega$	39,2	39,27	0,17
	78,4	78,41	0,012
	117,6	117,51	0,076
Zakres 2: $1 \text{ G}\Omega$	250	246,6	1,36
	500	494,3	1,14
	750	733,9	2,26
	1000	985,1	1,49
Zakres 2: $10 \text{ G}\Omega$	1250	1212	3,04
	1500	1452	3,2
	1750	1680	4,0
	2000	1908	4,6
	2250	2170	3,5
	2500	2390	4,4

### 4. POMIARY REZYSTANCJI IZOLACJI KONDENSATORÓW

W charakterze obiektów pomiarowych użyte zostały kondensatory filtrów przeciwzakłóceń (rys.5). W tabeli 3 zestawiono wyniki pomiarów rezystancji i współczynnika absorpcji badanych obiektów, charakteryzujących się stosunkowo dużą pojemnością.





Rys.5. Schemat układu pomiarowego; **MI** - miernik rezystancji izolacji  
 Fig.5. Measuring system diagram; **MI** - insulation resistance instrument

Tabela 3

Wyniki pomiarów rezystancji i współczynnika absorpcji izolacji badanych filtrów

<b>Typ</b>	<b>FP pz – B 16C</b>		
<b>C</b>	500 nF / 0 ± + 25% 2 × 27 000 pF / 0 ± + 40%	/C <sub>1</sub> - kondensator klasy X /C <sub>2</sub> - kondensator klasy Y	
<b>L</b>	2 × 1 mH / -25 ± + 50% / dławik w. cz.		
<b>U<sub>n</sub></b>	220 V / 50 Hz		
<b>I<sub>n</sub></b>	16 A		
Lp.	R <sub>60</sub>	$w = \frac{R_{60}}{R_{15}}$	Uwagi
1	20,149 GΩ	2,532	Badane filtry spełniają normę: PN-IEC-939-2
2	>50 GΩ	-	
3	20,658 GΩ	2,598	
<b>Typ</b>	<b>FP pz – B 08</b>		
<b>C</b>	100 nF ± 20% 2 × 2 500 pF / 0 ± + 40%	/C <sub>1</sub> - kondensator klasy X /C <sub>2</sub> - kondensator klasy Y	
<b>L</b>	2 × 2,5 mH / ± 30% / dławik w. cz.		
<b>U<sub>n</sub></b>	220 V / 50 Hz		
<b>I<sub>n</sub></b>	4 A		
L.	R <sub>60</sub>	$w = \frac{R_{60}}{R_{15}}$	Uwagi
4	1689,0 MΩ	3,074	Badane filtry nie spełniają normy: PN-IEC-939-2
5	2234,1 MΩ	3,116	
6	12,288 GΩ	3,246	Filtr spełnia normę: PN-IEC-939-2

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE

Wykonany i przebadany miernik spełnia następujące wymagania:

- napięcie probiercze miernika wynosi 1000 V,
- realizowany jest pomiar rezystancji izolacji w zakresie od 8 MΩ do 50 GΩ w trzech podzakresach oraz współczynnik absorpcji:  $w = \frac{R_{60}}{R_{15}}$  lub  $w = \frac{R_{300}}{R_{60}}$ ,
- wyświetlany jest na bieżąco czas pomiaru i wartość mierzonej rezystancji izolacji,
- pomiar odbywa się w pełni automatycznie.

Wartość wyznaczonego błędu pomiaru wartości rezystancji nie przekracza wartości założonej na wstępie ( $\pm 5\%$ ). Szczególnie dużą dokładność pomiaru uzyskano dla pierwszego zakresu pomiarowego: (10 ÷ 100) MΩ – błąd nie przekracza w tym przypadku  $\pm 0,2\%$ . Duży wpływ na uzyskaną dokładność miernika ma zastosowanie precyzyjnego wzmacniacza i przetwornika pomiarowego, a także uwzględnienie przez układ pomiarowy parametrów obwodu pomiarowego - rezystancji  $R_w$  i rezystancji wzorcowych  $R_{n1} + R_{n3}$ .

## LITERATURA

1. Górka S.: Mikroprocesorowy miernik współczynnika absorpcji izolacji. Praca dyplomowa inżynierska, filia Politechniki Łódzkiej w Bielsku-Białej, maj 2000.
2. Kuśmierek Z., Groszek S.: Technika pomiarów i badań urządzeń elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 1993.
3. Kasperczyk B., Lebiezki A., Pająk K., Ziolo K.: Materiałoznawstwo elektryczne. Skrypt uczelniany Politechniki Śląskiej nr 1631, Gliwice 1991.
4. Glinka T.: Badania Diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle. Komel, Katowice 1998.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zygmunt KUŚMIEREK

Wpłynęło do Redakcji dnia 22 sierpnia 2002 r.

## Abstract

In the paper microprocessor instrument for insulation systems measurement like condensers, cables and transformers has been described. Block diagram of the instrument has been presented in Fig. 2. Measurement of insulation resistance is carried out in the range 8MΩ – 50 GΩ in three sub-ranges. Testing voltage of the instrument is 1000 V. While testing current time and measured insulation resistance are being displayed. After the measuring test the value of absorption coefficient is also displayed. Measuring error of insulation resistance in the high range is less than  $\pm 5\%$ . For the first sub-range the error is less than  $\pm 0,2\%$ . The applied precise amplifier and resistors have influenced the obtained measuring errors.