

Brunon SZADKOWSKI  
Eligiusz PASECKI  
Bogusław KASPERCZYK

## MIERNIK REZYSTANCJI UZWOJEŃ TRANSFORMATORÓW ENERGETYCZNYCH

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zasadę działania miernika rezystancji uzwojeń transformatorów energetycznych, przeznaczonego do kontroli nagrzewania (lub stygnięcia) transformatorów, zgodnie z wymaganiami odpowiednich norm. Przedstawiono również opis wykonanego modelu miernika i jego właściwości.

## INSTRUMENT FOR MEASURING RESISTANCE OF POWER TRANSFORMER WINDINGS

**Summary.** The paper presents the principle of operation of an instrument for measuring resistance of power transformer windings. The instrument is designed for transformer heating (or self-cooling) control according to the requirements of the respective norm for the instrument. Its properties have been presented as well.

## ИЗМЕРИТЕЛЬ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

**Резюме.** В статье представлен принцип действия измерителя активного сопротивления обмоток энергетических трансформаторов предназначенных для контроля нагревания (или остывания) трансформаторов, согласно требованиям соответствующих норм. Представлено тоже описание изготовленной модели измерителя и его свойств.

## 1. WPROWADZENIE

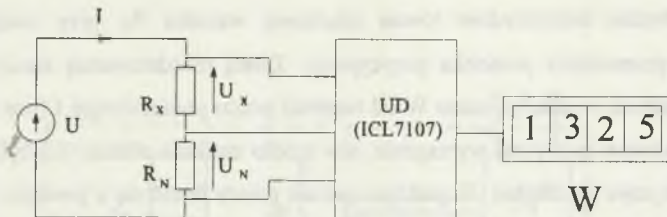
Podczas technicznych odbiorów transformatorów, zarówno nowo wyprodukowanych jak i remontowanych, wymagane jest przeprowadzenie prób nagrzewania [6] polegających między innymi na pomiarach rezystancji uzwojeń dla prądu stałego [7]. Do tych pomiarów zaleca się stosowanie metody mostkowej lub metody technicznej (układy z woltomierzem i amperomierzem) [7]. Zasadniczą wadą wymienionych metod jest na ogół ich nieprzystosowanie do pomiarów dynamicznych, tzn. do ciągłych pomiarów zmian rezystancji w czasie nagrzewania lub stygnięcia transformatora. Równoważenie mostka lub odczytywanie wskazań woltomierza i amperomierza odbywa się w pewnym przedziale czasowym, w którym mierzona rezystancja właśnie ulega zmianie. Innymi wadami wspomnianych metod pomiarowych są: konieczność stosowania dość dużych prądów pomiarowych (do 100 A), konieczność obliczania wyników pomiarowych oraz ograniczone możliwości bezpośredniej współpracy z systemem komputerowym.

Typowe wartości rezystancji uzwojeń transformatorów energetycznych zawierają się w granicach  $10^{-4}$ + $10^2$  omów, przy czym należy zwrócić uwagę, że uzwojenia te charakteryzują się znacznymi indukcyjnościami własnymi - od kilku milihenrów do kilkudziesięciu henrów. Duże indukcyjności własne badanych uzwojeń wymagają specjalnych rozwiązań zarówno obwodów zasilających układy pomiarowe, jak i samych układów pomiarowych, aby nie dopuścić do powstawania przepięć oraz innych zakłóceń w pomiarach.

W dalszym ciągu opisano zasadę działania oraz podstawowe informacje o budowie i właściwościach miernika rezystancji uzwojeń transformatorów, w którym wykorzystano element scalony serii ICL 7106, 07 lub 09 i w którym praktycznie wyeliminowano wszystkie wcześniej wymienione wady dotychczas stosowanych metod pomiarowych.

## 2. ZASADA POMIARU

Zasadę pomiaru rezystancji  $R_x$ , zastosowaną w opisywanym mierniku, ilustruje schemat przedstawiony na rys.1.



Rys.1. Schemat ilustrujący zasadę pomiaru rezystancji  $R_x$ .  $U$  - napięcie zasilania;  $I$  - prąd pomiarowy;  $R_x, R_N$  - rezystory mierzony i wzorcowy;  $U_x, U_N$  - napięcia na rezystorach  $R_x, R_N$ ; UD - układ dzielący; W - wskazanie wskaźnika cyfrowego

Fig.1. Diagram illustrating the principle of resistance  $R_x$  measuring.  $U$  - supply voltage;  $I$  - measuring current;  $R_x, R_N$  - tested resistor and standard resistor;  $U_x, U_N$  - voltages on resistors  $R_x$  and  $R_N$ ; UD - dividing circuit; W - digital display

Zasadniczym elementem podanego schematu jest blok UD (układ dzielący), zbudowany np. na elemencie scalonym ICL 7107. Rezultatem operacji dzielenia realizowanej przez blok UD jest wartość  $W$  wyświetlana na wskaźniku cyfrowym, określona zależnością:

$$W = \frac{U_x}{U_N} \quad (1)$$

gdzie:  $U_x$  - napięcie na mierzonej rezystancji  $R_x$ ,  
 $U_N$  - napięcie na wzorcowej rezystancji  $R_N$ .

Przy założeniu, że blok UD odznacza się pomijalnie małym poborem mocy z obwodów kontrolowanych ( $R_x, R_N$ ), można przyjąć, że przez rezystancje  $R_x$  i  $R_N$  płynie ten sam prąd  $I$ , a zatem równanie (1) można sprowadzić do postaci:

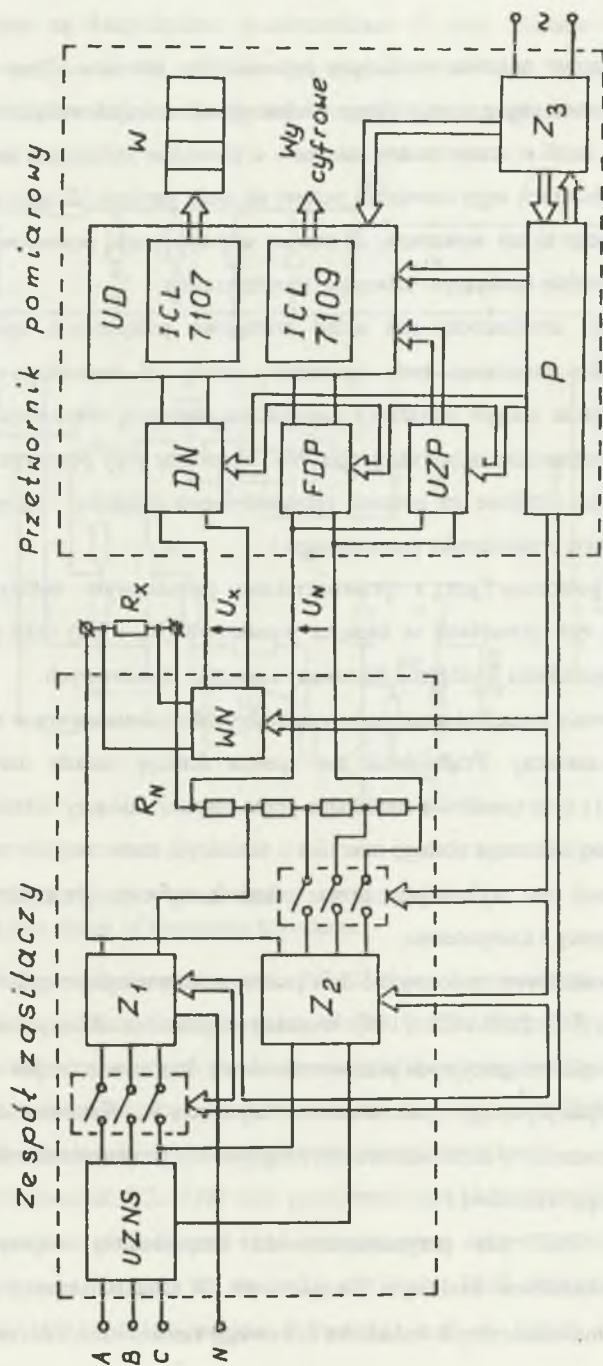
$$W = \frac{IR_x}{IR_N} = \frac{R_x}{R_N} \quad (2)$$

Schemat z rys.1 znany jest w literaturze [3, 5] jako układ równoprądowej komparacji rezystancji  $R_x$  i  $R_N$ , a równanie (2) jest odpowiednio równaniem komparacji. Pewną nowością jest tutaj zastosowanie układu dzielącego UD jako przetwornika wyjściowego komparatora. Sygnał wyjściowy  $W$  jest wprost pro-porcjonalny do mierzonej rezystancji  $R_x$  i może być wykorzystany do ciągłej kontroli zmian  $R_x$ . Ponadto sygnał  $W$  jest sygnałem cyfrowym i tym samym omawiany miernik rezystancji może być z łatwością przystosowany do współpracy z systemem komputerowym. Zauważmy również, że bardzo łatwe jest przystosowanie miernika do bezpośredniego odczytu mierzonej wartości  $R_x$ . W tym celu wystarczy (por. równ. 2) dobrać rezystor wzorcowy o wartości  $R_N = 10^k$ , gdzie  $k$  - liczba całkowita, a otrzymane

wskazanie  $W$  będzie bezpośrednio równe mierzonej wartości  $R_x$  przy uwzględnieniu odpowiedniego przesunięcia przecinka pozycyjnego. Zaletą przedstawionej zasady pomiaru jest także niezależność wyniku pomiaru  $W$  od wartości prądu pomiarowego  $I$  (por. równ. 2), dzięki czemu stawiane zazwyczaj wymaganie, aby źródło zasilania układu ( $U$ ) było źródłem wysokostabilnym, staje się zbędne. W praktyce jednak należy liczyć się z pewnym wpływem niestabilności zasilania, np. gdy prąd  $I$  nie byłby jednakowy w dwóch kolejnych cyklach całkowania realizowanego przez element ICL 7107. Bardziej istotnym wymaganiem dla źródła zasilania (niż wysoka stabilność) jest wymaganie "odporności" na wpływy wynikające z dużej indukcyjności własnej uzwojeń, których rezystancja  $R$  jest przedmiotem pomiaru. Najbardziej niepożądane byłoby tutaj dopuszczenie do skokowych zmian prądu  $I$  (załączanie, wyłączanie, przełączanie zakresów), które w efekcie powodowałyby przepięcia niszczące większość elementów układu pomiarowego. Koncepcje odpowiedniego rozwiązania tego problemu, jak również rozwiązania innych problemów związanych z eliminacją zakłóceń elektromagnetycznych bądź zabezpieczeniami przed uszkodzeniem miernika w toku eksploatacji ujęte zostały w przedstawionym poniżej opisie wykonanego miernika.

### 3. OPIS WYKONANEGO MIERNIKA

Miernik rezystancji uzwojeń transformatorów energetycznych składa się z dwóch części umieszczonych w oddzielnych obudowach: zespołu zasilaczy oraz przetwornika pomiarowego. Schemat blokowy miernika przedstawiony jest na rys.2. Zespół zasilaczy umieszcza się w pobliżu badanego transformatora. Za pomocą przewodów o specjalnie wykonanych końcówkach zespół ten łączy się z wyprowadzeniami uzwojenia transformatora, którego rezystancja ma być mierzona. W zespole zasilaczy umieszczone są stabilizowane zasilacze prądu stałego  $Z_1$  i  $Z_2$ . Zasilacz  $Z_1$  jest źródłem prądu pomiarowego przy pomiarze rezystancji małych, rzędu miliomów. Natomiast zasilacz  $Z_2$  jest wykorzystywany przy pomiarze rezystancji większych, rzędu omów. Zasilacz  $Z_1$  jest zasilany z sieci trójfazowej prądu zmiennego. Ten sposób zasilania zasilacza cechuje znacznie mniejszy poziom tętnień prądu wyprostowanego w porównaniu z zasilaniem jednofazowym.



Rys. 2. Schemat blokowy miernika rezystancji uzwojeń transformatorów energetycznych  
 Fig. 2. Block diagram of the instrument for measuring resistance of power transformer windings

W obwodzie wejściowym zasilacza  $Z_1$  zastosowany jest elektroniczny układ UZNS powodujący, że nie jest możliwe załączenie tego zasilacza przy nadmiernej niesymetrii napięć sieci trójfazowej.

Cały zakres pomiarowy miernika podzielony jest na kilka zakresów. Przy zmianie zakresów zmienia się wartość prądu pomiarowego. Indukcyjność uzwojeń transformatorów energetycznych jest duża. Jeżeli w czasie zmiany zakresów w obwodzie zasilającym uzwojenie wystąpi przerwa, to na zaciskach tego uzwojenia pojawi się duże napięcie. Z tego względu obwody wyjściowe zasilaczy są tak wykonane, że zmiana wartości prądu pomiarowego nie powoduje przerwy w obwodzie zasilającym uzwojenie transformatora.

W zespole zasilaczy umieszczony jest układ szeregowo połączonych oporników wzorcowych  $R_N$ . Wartości rezystancji tych oporników zależą od wybranego zakresu pomiarowego. Przy pomiarze małych rezystancji napięcie na mierzonej rezystancji  $R_X$  jest wzmacniane za pomocą wzmacniacza pomiarowego WN. Natomiast przy pomiarze dużych rezystancji napięcie  $U_X$  jest dzielone za pomocą rezystancyjnego dzielnika napięcia DN (umieszczonego w obudowie przetwornika pomiarowego).

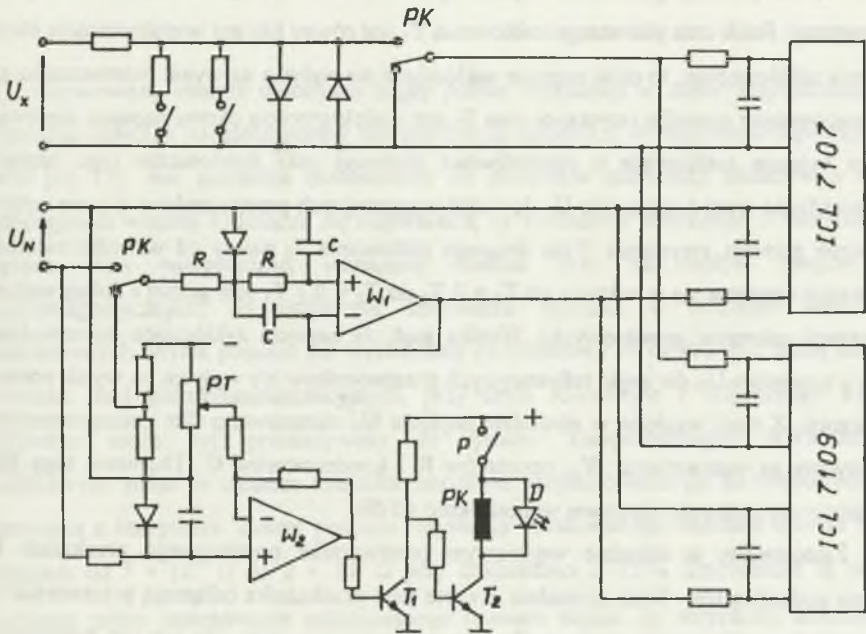
Zespół zasilaczy połączony jest z przetwornikiem pomiarowym wielożyłowym przewodem. Przewodem tym przesyłane są napięcia pomiarowe ( $U_X$  i  $U_N$ ) oraz napięcia sterujące, włączane przełącznikiem P i służące do zmiany zakresów pomiarowych.

Przetwornik pomiarowy może być umieszczony na stanowisku pomiarowym w znacznej odległości od zespołu zasilaczy. Przetwornik ten spełnia funkcję układu dzielącego, realizującego zależność (1) oraz umożliwia sterowanie pracą zespołu zasilaczy. Zastosowany układ sygnalizacji optycznej informuje obsługę miernika o aktualnym stanie zespołu zasilaczy. Wynik pomiaru rezystancji jest wyświetlany przez wskaźnik cyfrowy. Przetwornik jest przystosowany do współpracy z komputerem.

W przetworniku pomiarowym zastosowano dwa przetworniki analogowo-cyfrowe (a/c) o podwójnym całkowaniu (ICL 7107 i ICL 7109). Wejścia tych przetworników połączone są równolegle (rys.3). Do wejść integracyjnych przetworników a/c doprowadzone jest napięcie  $U_X$  proporcjonalne do prądu płynącego przez mierzoną rezystancję  $R_X$ . Natomiast do wejść referencyjnych tych przetworników doprowadzone jest napięcie  $U_N$  proporcjonalne do prądu płynącego przez rezystancję wzorcową  $R_N$ .

Przetwornik ICL 7107 jest przystosowany do bezpośredniej współpracy z siedmiosegmentowym wskaźnikiem diodowym  $3\frac{1}{2}$  cyfrowym. W celu zwiększenia jasności świecenia diod elek-troluminescencyjnych wskaźnika cyfrowego zastosowano tranzystorowo-

rezystancyjny układ pośredniczący. Ponadto w układzie tym zastosowano układ logiczny, wyłączający świecenie zbędnego zera wskaźnika. Przecinki dziesiętne wskaźnika cyfrowego sterowane są bezpośrednio przełącznikiem P przy zmianie zakresów pomiarowych. Przekroczenie zakresu pomiarowego sygnalizowane jest wyłączeniem świecenia trzech ostatnich cyfr wskaźnika oraz świeceniem cyfry 1 na pozycji pierwszej wskaźnika.



Rys.3. Układ wejściowy przetwornika pomiarowego

Fig.3. Input circuit of measuring transducer

Wyjście cyfrowe przetwornika ICL 7109 jest doprowadzone bezpośrednio do zacisków gniazda wyjścia cyfrowego przetwornika pomiarowego. Ponadto do tego wyjścia doprowadzony jest sygnał przekroczenia zakresu pomiarowego oraz sygnał informujący o stanie przetwornika a/c. Sygnał ten zmienia się z zera na jedynkę logiczną w czasie, gdy przetwornik a/c dokonuje całkowania napięć wejściowych.

Przetwornik ICL 7109 jest przetwornikiem 12-bitowym. Ponieważ wejścia obydwu przetworników a/c połączone są równolegle, zatem zakresy pomiarowe tych przetworników są takie same. Oznacza to, że wskazanie liczby 1999 wskaźnika cyfrowego odpowiada stanowi 111111111111 wyjścia cyfrowego, czyli w kodzie dziesiętnym liczbie 4095.

Komputer współpracujący z miernikiem w prosty sposób oblicza poprawną wartość mierzonej rezystancji. Pracą przetwornika ICL 7109 może sterować komputer powodując jego pracę ciągłą lub jednorazową. Ponadto do gniazda wyjścia cyfrowego doprowadzone są sygnały informujące o aktualnie włączonym zakresie pomiarowym.

W przetwornikach a/c o podwójnym całkowaniu [1,2,4] czas pierwszego całkowania ustala się za pomocą generatora zegarowego. Może to być generator zewnętrzny lub wewnętrzny. Jeżeli czas pierwszego całkowania  $T_1$  jest równy lub jest wielokrotnością okresu napięcia zakłócającego, to takie napięcie zakłócające nie wpływa na wynik przetwarzania a/c. W opracowanym mierniku rezystancji czas  $T_1$  jest wielokrotnością okresu napięcia sieciowego. Zatem napięcie zakłócające o częstotliwości sieciowej oraz harmoniczne tego napięcia, doprowadzone wraz z napięciem  $U_X$  do wejść integracyjnych przetworników a/c, nie wpływa na wynik pomiaru rezystancji. Czas drugiego całkowania  $T_2$  zależy od wartości mierzonej rezystancji i zmienia się w zakresie od  $T_2 = 2 T_1$  do  $T_2 = 0,1 T_1$  (dla górnej i dolnej wartości rezystancji zakresów pomiarowych). Wynika stąd, że napięcie zakłócające doprowadzone wraz z napięciem  $U_N$  do wejść referencyjnych przetworników a/c wpływa na wynik pomiaru rezystancji. Z tego względu w obwodzie napięcia  $U_N$  zastosowano filtr dolnoprzepustowy zbudowany ze wzmacniacza  $W_1$ , oporników  $R$  i kondensatorów  $C$ . Tłumienie tego filtra napięcia o częstotliwości sieciowej wynosi około 40 dB.

Zastosowany w układzie wejściowym przetwornika pomiarowego przekaźnik PK spełnia podwójną rolę. Styki normalnie otwarte tego przekaźnika odłączają przetworniki a/c od zacisków wejściowych przetwornika pomiarowego w czasie, gdy nie jest dokonywany pomiar rezystancji. Przekąźnik ten zabezpiecza więc przetworniki a/c przed doprowadzeniem do ich wejść nadmiernych napięć. Ponadto zastosowano w układzie wejściowym przetwornika pomiarowego układy rezystancyjno-diodowe zabezpieczające przetworniki a/c przed nadmiernymi napięciami w czasie, gdy przekaźnik PK jest włączony. Styki normalnie zamknięte przekaźnika PK powodują, że przed pomiarem rezystancji wejścia integracyjne przetworników a/c są zwarte, a do wejść referencyjnych doprowadzone jest napięcie dodatnie. Taki stan wejść przetworników a/c wymusza zerowy stan ich wyjść.

Jeżeli przez opornik  $R_N$  nie płynie prąd pomiarowy, to załączenie przełącznika  $P$  nie spowoduje działania przekaźnika PK. Takie działanie przetwornika pomiarowego realizuje układ zbudowany ze wzmacniacza  $W_2$  oraz tranzystorów  $T_1$  i  $T_2$ . Gdy napięcie  $U_N$  obniży się



ponizej wartości ustalonej potencjometrem PT, wówczas tranzystor  $T_2$  przestaje przewodzić, przekaźnik PK jest wyłączony i dioda elektroluminescencyjna D nie świeci. Wskaźnik cyfrowy wskazuje stan zerowy.

#### 4. WNIOSKI

Opracowany miernik umożliwia ciągły pomiar rezystancji w czasie nagrzewania (lub stygnięcia) uzwojeń transformatorów energetycznych zgodnie z wymaganiami odpowiednich norm [6], [7]. Jest specjalnie dostosowany do pomiarów rezystancji obiektów o dużej indukcyjności własnej. Odznacza się odpornością na zakłócenia wynikające z niestabilności napięcia sieci energetycznej zasilającej miernik oraz na wpływ obcych pól elektromagnetycznych, co umożliwia stosowanie miernika w trudnych warunkach przemysłowych. Wynik pomiaru jest wyświetlany na wskaźniku  $3\frac{1}{2}$  cyfrowym o dużej jasności świecenia diod elektroluminescencyjnych, przy czym równoległe z oddzielnego wyjścia cyfrowego może być przekazywany do systemu komputerowego. Wprowadzenie dodatkowych zmian w układzie miernika umożliwia przystosowanie go do bezpośredniego sterowania z komputera. Zakres pomiaru rezystancji opracowanego miernika zawiera się w granicach od  $5 \cdot 10^{-4} \Omega$  do  $2 \cdot 10^3 \Omega$  przy dokładności  $\pm 0,5\%$ . Dokładność tę można zwiększyć przez zastosowanie jednoczesnego pomiaru napięć na rezystancji mierzonej i wzorcowej.

#### LITERATURA

- [1] Kalinowski B.: Amatorski multimetr cyfrowy. Radioelektronik nr 11/88 i nr 12/88.
- [2] Kulka Z., Libura A., Nadachowski M.: Przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 1987.
- [3] Miłek M.: Komparacja wielkości elektrycznych i magnetycznych. Z.N. Pol. Śl. seria: Elektryka, z. 77, Gliwice 1981.
- [4] Stenzel J.: Voltomierze cyfrowe z układami scalonymi ICL 7107 i ICL 7106 Intersil. Radioelektronik nr 4/82 i nr 5/82.

- [5] Szadkowski B.: Synteza metod pomiaru immitancji. Z.N.Pol. Śl. seria: Elektryka, z. 93, Gliwice 1984.
- [6] PN-86/E-04070/11 Transformatory. Metody badań. Próba nagrzewania.
- [7] PN-81/E-04070.05 Transformatory. Metody badań. Pomiar rezystancji uzwojeń

Recenzent: Prof. dr hab. inż Leszek Kiełtyka

Wpłynęło do redakcji dnia 20 czerwca 1993 r.

### Abstract

The paper presents the principle of operation of an instrument for measuring resistance of power transformer windings. Construction and properties of the instrument are presented as well. It is possible to measure continuously transformer resistance during heating by means of this instrument. The principle of operation is based on the method of equal-current comparison of tested resistance  $R_X$  with standard resistance  $R_N$ . A digital dividing circuit UD (fig. 1) is an output transducer of the comparator. The instrument consists of two parts: a power supply unit and a measuring transducer (fig. 2). These parts are placed in two separate casings. The measuring transducer functionates as a dividing circuit and realizes the equation (1). It enables controlling the power supply unit work, too. The result of resistance measurement is displayed on 3 1/2 digit indicator. It can be transmitted to a computer system. Elektronic circuits of the measuring transducer are protected against too high input voltages (fig.3). Measuring range of the instrument is from  $5 \cdot 10^{-4} \Omega$  to  $2 \cdot 10^3 \Omega$  while inaccuracy is 0,5 %. The instrument is robust to disturbances resulting from supply voltage instability and outside electromagnetic fields.