ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1976

Seria: Elektryka z. 55 Nr kol. 499

Ryszard Gotszalk
Instytut Metrologii Elektrycznej
Politechniki Wrocławskiej

Ryszard Hagel
Instytut Metrologii Elektrycznej i Elektronicznej
Politechniki Śląskiej

WŁAŚCIWOŚCI I ZASTOSOWANIA KOMPARATORÓW PRĄDÓW

Streszczenie. Opisano zasadę działania komparatorów prądów stałych i przemiennych. Wymieniono ich właściwości i podstawowe zastosowania, ilustrowane przykładami.

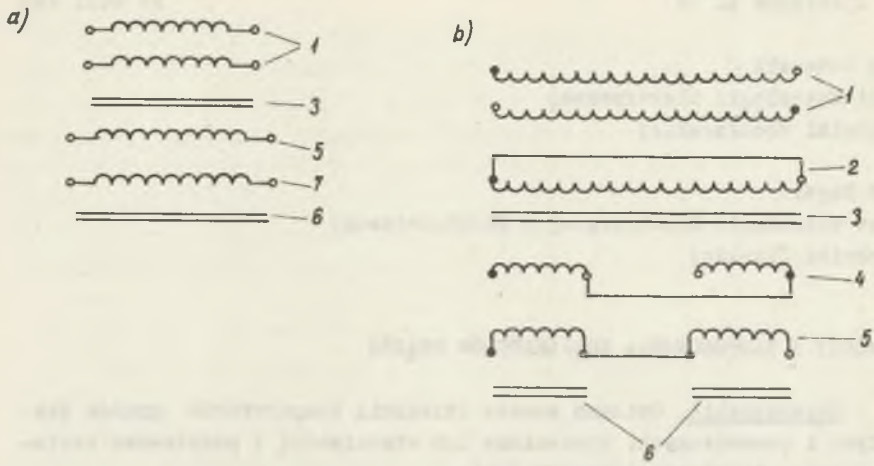
Nowoczesne materiały magnetyczne o dużej przenikalności umożliwiły wykonanie komparatorów, realizujących funkcję porównania dwóch prądów o jednakowych lub różnych natężeniach, z niedokładnością mniejszą niż 10^{-7} ... 10^{-8} [6]. W celu realizacji funkcji porownania, doprowadza się porównywane prądy do dwóch uzwojeń nawiniętych na jednym lub dwóch jednakowych rdzeniach toroidalnych. Przy odpowiednim nawinięciu uzwojeń i doborze liczby zwojów siły magnetomotoryczne (smm) wytwarzane przez obydwa prądy są przeciwnie skierowane i kompensują się. Do detekcji stanu kompensacji (równość przeciwnie skierowanych smm) potrzebne są dodatkowe uzwojenia.

W przypadku komparatorów prądów stałych wykorzystuje się generację parzystych harmonicznych w rdzeniu doprowadzonym do stanu nasycenia, za pomocą dodatkowego uzwojenia wzbudzającego, wytwarzającego przemienny strumień magnetyczny. Istnienie w rdzeniu (lub w rdzeniach) stałego strumienia magnetycznego wpływa na kształt i wartość napięć przemiennych, powodując indukowanie się w uzwojeniach detekcyjnych napięć o podwójnej częstotliwości wzbudzającego napięcia przemiennego. Uproszczone schematy komparatorów prądów stałych i przemiennych przedstawiono na rys. 1.

Równość smm porównywanych prądów może być stwierdzona za pomocą detektora napięcia przemiennego. Jest jednak celowym, np. przy sterowaniu automatycznym stosunku prądów, wyprostowanie napięcia drugiej harmonicznej.

W literaturze przyrządy, których funkcją jest porównywanie dwóch prądów, niezależnie od fizycznej zasady działania, nazywa się komparatorami prądów. Istotą komparatorów prądów jest porównanie dwóch sił magnetomotorycznych $z_x I_x$ oraz $z_N I_N$. Iloczyn zI nazywa się także przepływem. W komparatorze przepływ prądu o nieznanym natężeniu kompensuje się znanym przepływem, skąd wynika druga stosowana nazwa: komparator przepływu prądów.

W przedstawionej pracy będą stosowane równolegle obydwie nazwy, choć autorzy artykułu uważają za poprawną nazwę komparator prądów.

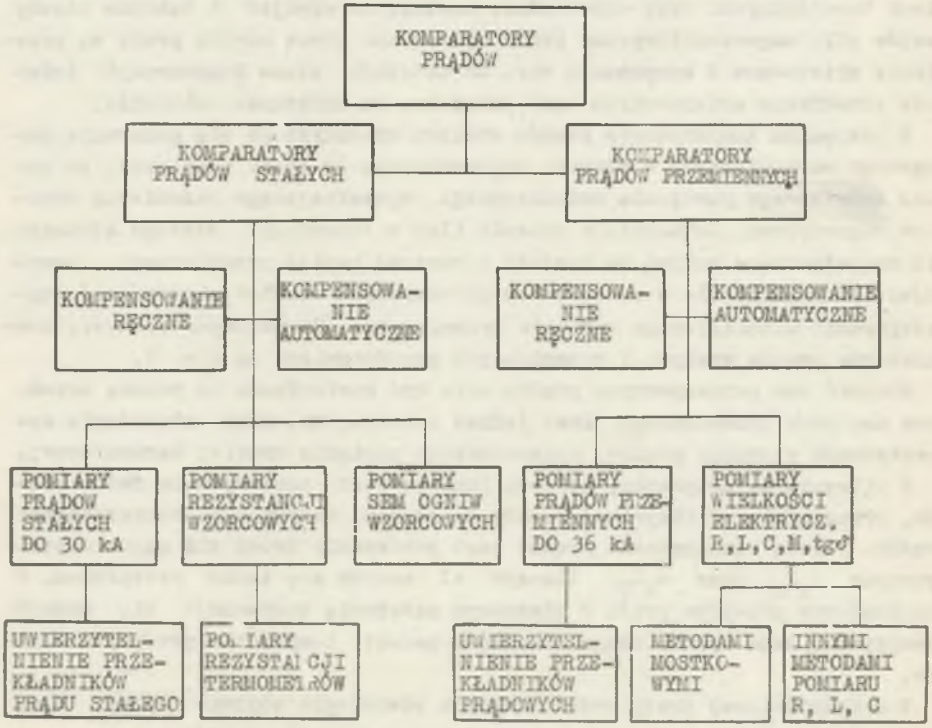


Rys. 1. Schematy rozmieszczenia uzwojeń komparatorów prądów

a) komparator prądów przemiennych, b) komparator prądów stałych; 1 - uzwojenie pomiarowe; 2 - uzwojenie tłumiące; 3 - ekran magnetyczny; 4 - uzwojenie wzbudzające; 5 - uzwojenie detekcyjne; 6 - rdzenie magnetyczne

Tablica 1

Przegląd zastosowań komparatorów prądów



Nazwa kompensator przepływu jest stosowana między innymi w pracy [9].

Główne zastosowanie komparatorów prądów zestawiono w tabl. 1. W technice pomiarów precyzyjnych obecnie najważniejsze są zastosowania komparatorów prądów stałych. Niektóre problemy konstrukcji komparatorów prądów stałych są podane w pracach [2, 3, 4, 5, 10].

Najważniejszymi zagadnieniami występującymi przy budowie i zastosowaniach komparatorów są:

a) uzyskanie małego progu pobudliwości detektora strumienia stałego;

b) zmniejszenie pól rozproszenia uzwojeń;

c) zmniejszenie zerowych napięć spowodowanych wpływami magnetycznymi.

Zdolność reagowania detektora mna małe pola stałe - pobudliwość decyduje o niedokładności porównania prądów. Parametrami decydującymi o pobudliwości są między innymi: liczba zwojów uzwojenia detekcyjnego, częstotliwość wzbudzającego prądu przemiennego, przekrój i maksymalna różniczkowa przenikalności rdzenia magnetycznego. Osiągany obecnie próg pobudliwości układów pomiarowych z komparatorami prądów stałych jest ograniczony niestabilnością detektora, a określająca go smm wynosi ok. 3 μA. Wpływ szumów magnetycznych jest obecnie jeszcze do pominięcia.

Warunek b) realizuje się nawijając uzwojenia multifilarne (dla natężeń prądów do 1 A) na rdzeniach o dużej przenikalności magnetycznej ($\mu_r \approx 10^5 \ldots 10^6$). Spełnienie warunku c) wymaga doboru rdzeni magnetycznych o możliwie jednakowych charakterystykach statycznych i dynamicznych [6, 7].

Jeżeli warunek jednakowych charakterystyk magnesowania obydwu rdzeni ferromagnetycznych może być spełniony tylko w przybliżeniu wówczas korzystniejsze jest prostowanie napięcia wyjściowego za pomocą prostownika sterowanego. W tym przypadku napięcie niesymetrii występujące na wyjściu detektora w stanie równości smm może być w znacznym stopniu zmniejszone. Dodatkową zaletą prostownika sterowanego w porównaniu z niesterowanym jest możliwość wykrycia znaku wypadkowej smm.

Dwa układy połączeń detektorów przedstawiono na rys. 2. W stanie równości przeciwnie skierowanych smm obu uzwojeń 1 prądu stałego, w uzwojeniach detekcyjnych 5 (rys. 2a) indukują się sem $e_1(t)$ oraz $e_2(t)$.

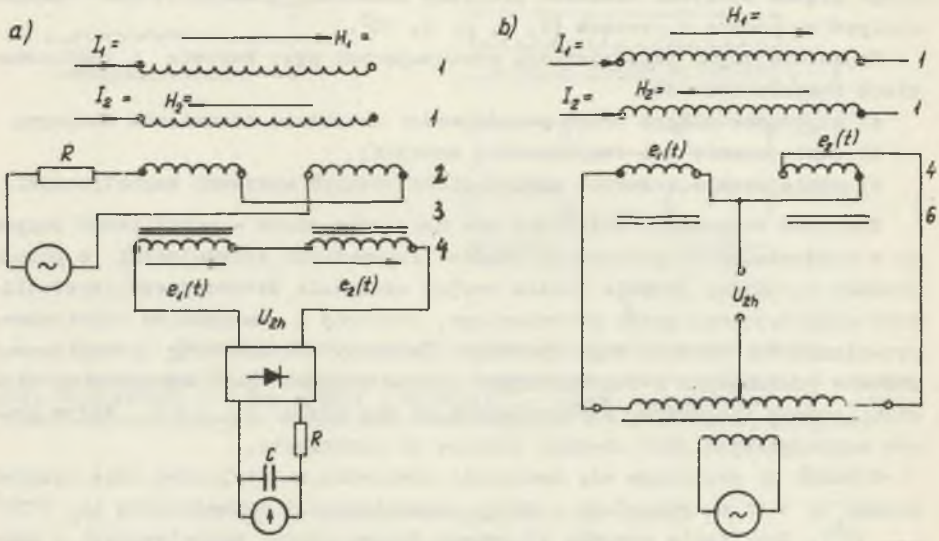
Sem wypadkowa na zaciskach uzwojeń

$$u_{2h}(t) = e_1(t) + e_2(t)$$

jest w przybliżeniu równa zeru, jeżeli wypadkowy kontrolowany strumień stały jest równy zeru. Napięcie u_{2h} może być bezpośrednio doprowadzone do wskaźnika prądu przemiennego.

W mostkowym układzie połączeń komparatora (rys. 2b) uzwojenia 4 spełniają rolę uzwojeń wzbudzających i detekcyjnych. Indukowane w tych uzwojeniach sem $e_1(t)$, $e_2(t)$ porównuje się z napięciami na indukcyjnym lub rezystancyjnym dzielniku napięć. W tym układzie połączeń istnieje możliwość zmniejszenia (w ograniczonym zakresie) różnic wynikających z nie

symetrii geometrycznej rdzeni, przez przesuwanie suwaka dzielnika napięć. Tym sposobem nie można jednak wyrównać całkowicie różnic wynikających z niejednakowych charakterystyk $\mu(H)$ i zmiennych strat od prądów wirowych



Rys. 2. Schematy połączeń komparatorów prądów
a) szeregowe połączenie uzwojeń detekcyjnych; b) układ mostkowy, 1 - uzwojenie pomiarowe, 2 - uzwojenie wzbudzające, 3 - uzwojenie detekcyjne, 4 - rdzenie magnetyczne

Jeżeli uwzględnić jednakową liczbę zwojów uzwojeń detekcyjnych w obydwu układach, to w układzie mostkowym czułość jest dwa razy mniejsza.

Podstawowymi źródłami błędów w klasycznych układach mostkowych i kompensacyjnych jest nieliniowość rezystorów nastawnych, niepewność określania wartości stosunku rezystorów i ich zmienność w czasie. W układach pomiarowych z komparatorami prądów, o dokładności pomiarów decyduje stosunek liczby zwojów, na który ma wpływ niejednorodność obwodu magnetycznego. Stosunek liczby zwojów może być wyznaczony z błędem mniejszym od 10^{-7}. Stosunek liczby zwojów nie zależy od czasu, temperatury ani od zastosowanych materiałów. Te zalety komparatorów prądów stałych są wykorzystywane przede wszystkim do porównywania rezystancji o wartościach od 10^{-6} do $10^{6}\,\Omega$ oraz w kompensatorach napięć stałych. Następne przykłady ilustrują możliwości wykorzystania komparatorów w układach pomiarowych.

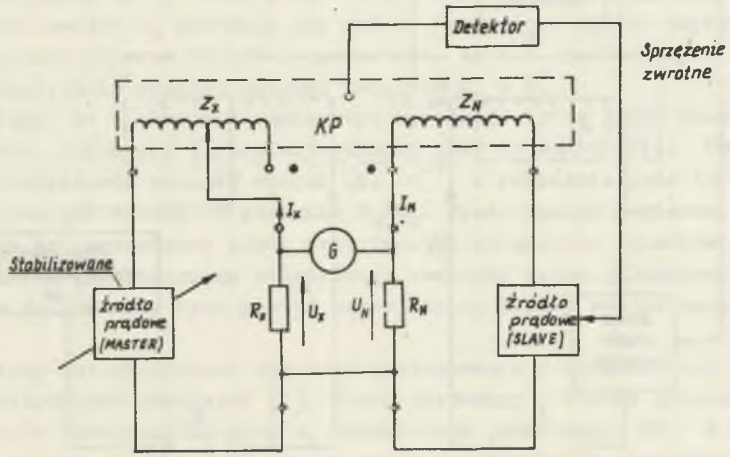
Schemat układu pomiarowego rezystancji [2, 3, 4] z komparatorem prądów stałych i automatycznym nastawianiem jednego prądu przedstawia rys. 3. Stan równowagi układu jest opisany równaniami:

$$R_x I_x = R_N I_N \tag{1}$$

$$z_x I_x = z_N I_N \tag{2}$$

z których wynika:

$$R_x = R_N \frac{z_x}{z_n}. \tag{3}$$



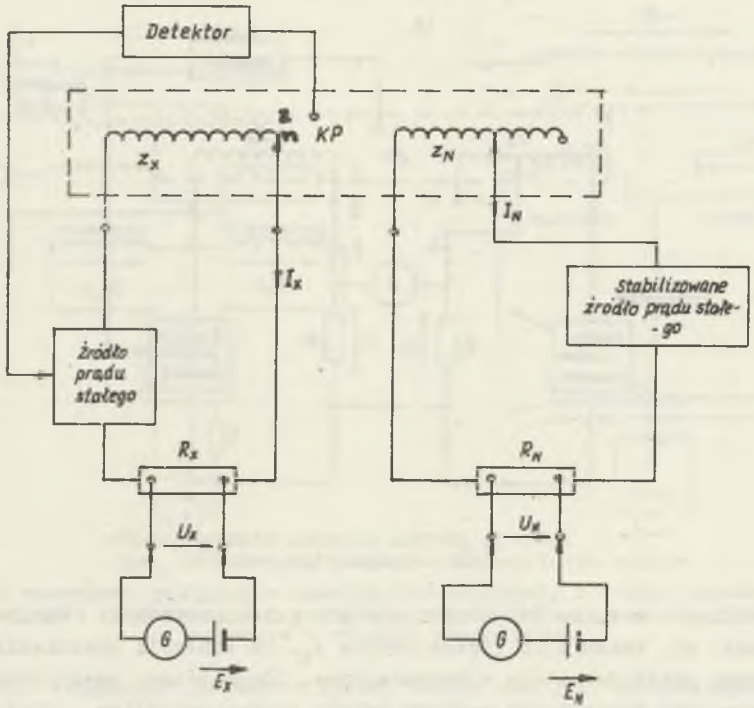
Rys. 3. Mostek z komparatorem prądów
KP - komparator prądów

Spełnienie warunku (1) kontroluje się galwanometrem G. Warunek drugi realizuje się zmieniając liczbę zwojów z_x. Do kontroli spełnienia warunku (2) służy układ detektora w komparatorze. Równoczesne spełnienie obydwu warunków przy nastawianiu ręcznym byłoby bardzo uciążliwe. Dlatego jedno z niezależnych źródeł zasilania (np. źródło prądu I_N) jest sterowane napięciem wyjściowym z detektora komparatora prądów, tak aby uzyskać żądany stosunek prądów I_N/I_x. Źródła prądowe stosowane w tych układach mają dużą rezystancję wewnętrzną (rzędu $10^9\Omega$) oraz możliwość nastawiania prądu z rozróżnialnością 10^{-7}. W stanie zrównoważenia, przez przewody potencjałowe nie płynie prąd. Układ pomiarowy ma więc zalety kompensatora. Drugą ważną zaletą opisywanego układu jest to, że w rezystorze o mniejszej wartości traci się większą moc. Istnieje więc możliwość porównywania za pomocą jednego pomiaru rezystorów o znacznie różniących się wartościach, np. o stosunku rezystancji 1:1000. W szczególności można bezpośrednio przekazywać jednostkę miary od etalonu 1Ω wzorcom o innych wartościach.

Błędy układu pomiarowego nie zależą od temperatury ani od czasu. W przeciwieństwie do układów rezystancyjnych nie jest więc potrzebna kontrola okresowa. Możliwości realizacji zwojów ułamkowych uzyskuje się przez zastosowanie dzielników rezystancyjnych [6].

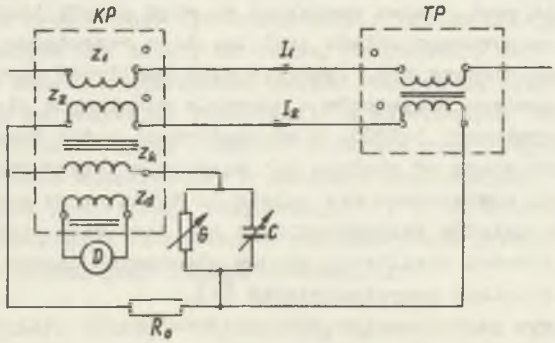
Drugim ważnym zastosowaniem komparatorów prądów stałych są kompensatory. Zastosowanie komparatorów prądów umożliwia istotną poprawę dokładności kompensacji napięć w porównaniu np. z metodą Lindecka-Rothego. Układ

kompensatora napięć z zastosowaniem komparatora [11] przedstawiony na rys. 4, jest w istocie bardzo podobny do mostka z komparatorem prądów (rys. 3).



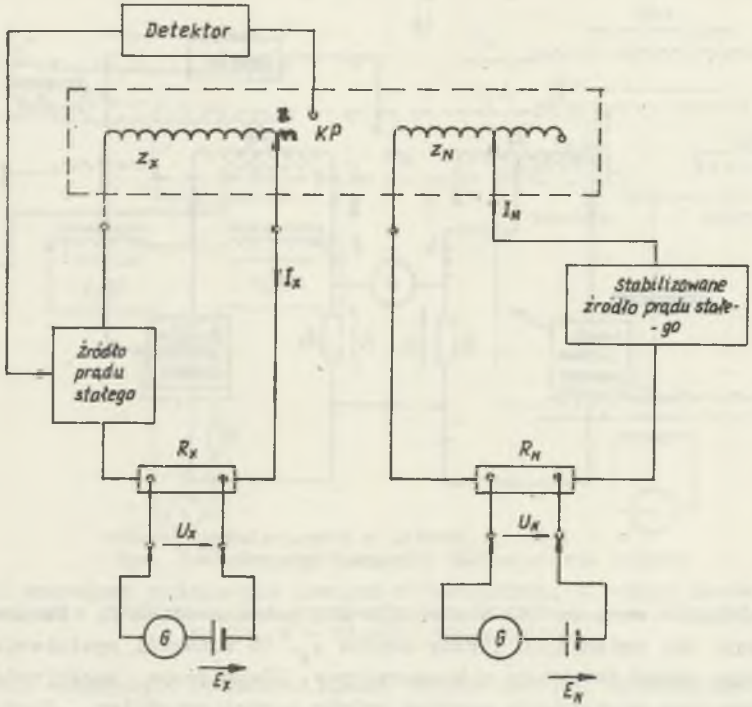
Rys. 4. Kompensator z komparatorem prądów KP

Siła magnetomotoryczna wytwarzana przez prąd I_N może być nastawiana przez zmianę liczby zwojów z_N, z bardzo dużą rozróżnialnością(rys.4 np. 20.10^{-6} [12]).



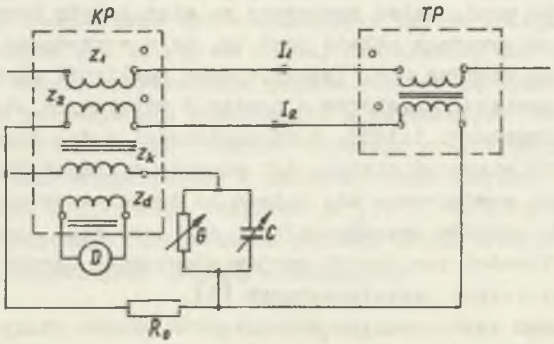
Rys. 5. Układ do kontroli przekładników prądowych
KP - komparator prądów; TP - badany przekładnik prądowy

kompensatora napięć z zastosowaniem komparatora [11] przedstawiony na rys. 4, jest w istocie bardzo podobny do mostka z komparatorem prądów (rys. 3).



Rys. 4. Kompensator z komparatorem prądów KP

Siła magnetomotoryczna wytwarzana przez prąd I_N może być nastawiana przez zmianę liczby zwojów z_N, z bardzo dużą rozróżnialnością(rys.4 np. 20.10^{-6} [12]).



Rys. 5. Układ do kontroli przekładników prądowych
KP - komparator prądów; TP - badany przekładnik prądowy

LITERATURA

[1] Grocholskij A.L., Kaszczajew E.L.: Metody obiespiecziwanija tiesnoj swjazi pliecziewych induktiwno swjazannych eliemientow na osnowie multifiljarnych sistiem. Probliemy Eliektromietrij. Nowosibirsk 1971.

[2] Helke H.: Gleichstrommessbrücken, Gleichspannungs-kompensatoren und ihre Normale. R. Oldenbourg Verlag, Wien 1974.

[3] Kusters N.L., Moore W.J.H.: A current comparator for the precision measurement of the d-c ratios. IEEE Trans. on. Instr and Meas. vol. 82 March 1963.

[4] Kusters N.L., Mac Martin M.: A direct current Comparator bridge for high resistance measurements. IEEE Trans. on Instr. and Meas. No 4, p. 22, 1973.

[5] Kusters N.L., Moore W.J.M.: The Current comparator and its application to the Absolute Calibration of current transformers. IEEE Trans on Instr. and Meas, April, 1961.

[6] Miłek M.: Analiza i konstrukcja magnetycznego kompensatora przepływu prądu stałego w układzie porównania rezystancji. Praca doktorska. Gliwice, Luty, 1976.

[7] Miłek M.: Analiza błędu pobudliwosci komparatora prądów stałych i sposoby jego minimalizacji. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka, z. 55, 1976.

[8] Miłek M.: Zasada transferu prądowego oraz jej zastosowanie w procesie uwierzytelnienia komparatora prądów stałych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka, z. 55, 1976.

[9] Słuszkiewicz T.: Kompensacyjny pomiar przepływu prądu. Rozprawa habilitacyjna, Kraków, 1965.

[10] Schmidt H.: Uber Stromkomparatoren, ihre Eigenschaften und ihre Anwendungen in der Niederfrequenz-Messtechnik. Z.E.I. Leipzig, No 2, 1972.

[11] Sutcliffe J.: Messbrücke und Kompensator nach dem Gleichstrom - Komparator - Prinzip. Messtechnik nr 4, 1970.

[12] Bulletin 7412 - DC Potentiometers. DCC Potentiometers Model 9930. Prospekt firmy Guildline Modern Electronic Metrology.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ КОМПАРАТОРОВ ТОКОВ

Р е з ю м е

В этой статье разработаны теоретические основы и практические возможности измерений при помощи компараторов токов. Рассмотрены практические воз -

можности построения компараторов токов, их метрологические свойства,а также применение в технике электрических измерений.

PROPERTIES AND APPLICATIONS OF CURRENT COMPARATORS

S u m m a r y

The paper concerns the theoretical and practical basis of the measurements by means od the d.c. and a.c. comparators. The practical possibilities of realization, the metrological properties and applications in electrical measurements have been discussed.