ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1976

Seria: Elektryka z. 55 Nr kol. 499

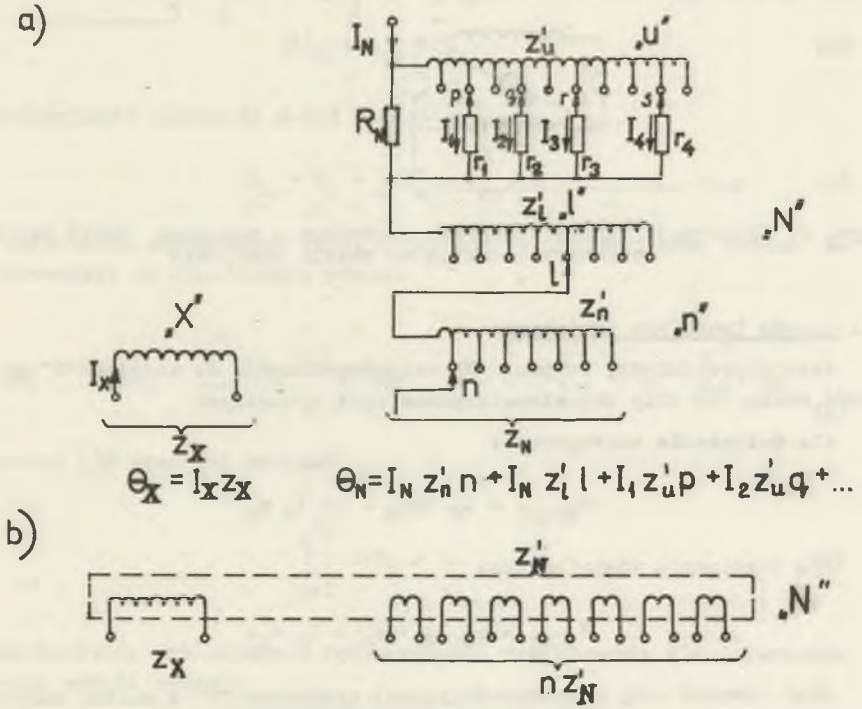
Marian Miłek
Instytut Metrologii Elektrycznej i Elektronicznej
Politechniki Śląskiej

ZASADA TRANSFERU PRĄDOWEGO ORAZ JEJ ZASTOSOWANIE W PROCESIE UWIERZYTELNIENIA KOMPARATORA PRĄDÓW STAŁYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono zasadę transferu prądowego. Transfer ten umożliwia porównanie dwóch prądów o wartościach różniących się o rząd, z pomijalnie małym błędem, rzędu 10^{-9}. Przedstawiono sposób wykorzystania zasady transferu prądowego w procesie uwierzytelnienia komparatora prądów stałych.

1. Wstęp

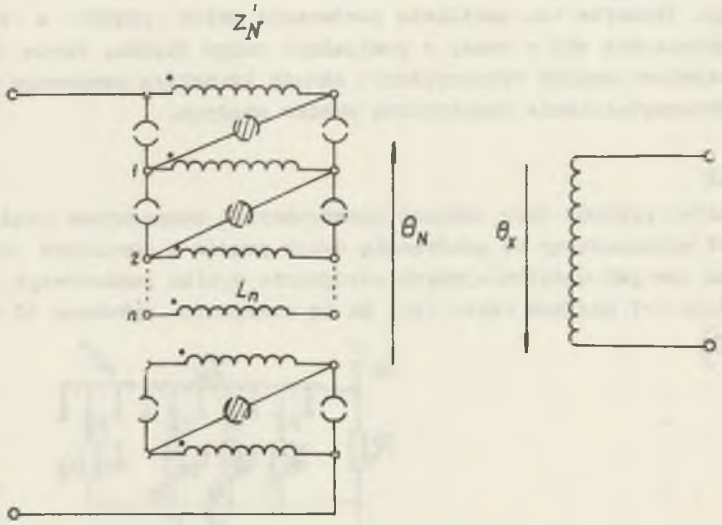
Transfer prądowy jest odmianą konstrukcyjną komparatora prądów stałych (KP). KP przeznaczony do porównania dwóch prądów o dowolnych wartościach ma kilka uzwojeń umożliwiających otrzymanie wyniku pomiarowego z rozróżnialnością 6-7 miejsca (rys. 1a). Są to uzwojenia wykonane 10 przewodową



Rys. 1. Schematy uzwojeń porównawczych
a) komparatora prądów, b) transferu prądowego

wiązką multifilarną [1] o liczbach zwojów w sekcji 100, 10, 1 itd. Powiększenie liczby miejsc znaczących można otrzymać za pomocą uzwojenia realizującego zwoje ułamkowe [3], [4], przez które płynie dokładnie określona część prądu porównywanego - na rysunku 1a, prądy I_1, I_2, I_3, I_4.

Transfer prądowy ma tylko jedno uzwojenie wykonane wiązką multifilarną 11 przewodową (rys. 1b). Z wiązki tej wydziela się jedną sekcję stanowiącą uzwojenie oznaczone na rysunku przez "X"; pozostałe sekcje tworzą uzwojenie oznaczone przez "N". Liczbę zwojów uzwojenia "X" oznaczono z_X, jednej sekcji uzwojenia "N" - z_N. Sekcje uzwojenia "N" można łączyć w sposób szeregowy lub równoległy (rys. 2).



Rys. 2. Ilustracja zasady transferu prądowego - włączone kołki realizują połączenie szeregowe sekcji uzwojenia

2. Zasada transferu prądowego

Jeżeli przyjmiemy, że prąd I_N w doprowadzeniu do uzwojeń "N" ma wartość stałą, to siły magnetomotoryczne będą wynosiły:

dla połączenia szeregowego:

$$\theta_{N(sz)} = I_N \, 10z_N' = 10 \, I_N \, z_N' \tag{1}$$

dla połączenia równoległego:

$$\theta_{N(r)} = \frac{1}{10} I_N \, 10z_N' = I_N \, z_N'. \tag{2}$$

Stąd równość siły magnetomotorycznej uzwojenia "X" z siłami magnetomotorycznymi uzwojenia "N", w przypadku połączeń szeregowego oraz równo-

ległego sekcji, zachodzi dla wartości sił magnetomotorycznych o rząd mniejszych. Następnie zostanie wykazane, że zmiana rzędu wartości sił magnetomotorycznych i jednocześnie prądu w uzwojeniu "X", jest realizowana z pomijalnie małym błędem.

Parametrami charakterystycznymi uzwojenia "X" oraz sekcji uzwojenia N" są indukcyjności: główne L_{Xo} oraz L_{no} i rozproszenia L_{Xs} oraz L_{ns}. Indukcyjności te określa się z wartości energii magnetycznej związanej ze strumieniem w rdzeniu - L_{Xo} oraz L_{ns} i ze strumieniem nie zamykającym się przez rdzeń - L_{Xs} oraz L_{ns}.

Dla prądów o jednakowej wartości, płynących przez dwie sekcje przeciwnie połączone, o równej liczbie zwojów, różnica strumieni w ogólnym przypadku nie będzie równa zeru. Stąd wynika wniosek, że indukcyjności L_{no} oraz L_{ns} przyjmują różne wartości dla każdej sekcji uzwojenia multifilarnego. Przyjęto średnią indukcyjność główną sekcji uzwojenia multifilarnego:

$$L_o = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} L_{no} \tag{3}$$

oraz

$$\Delta L_n = L_{no} - L_o. \tag{4}$$

Stąd indukcyjność całkowita n-tej sekcji ywynosi:

$$L_n = L_o + \Delta L_n + L_{ns}. \tag{5}$$

Dla połączenia szeregowego (rys. 2) wypadkowe indukcyjności główne oraz rozproszenia są odpowiednio równe:

$$L_{o(sz)} + L_{s(sz)} = \sum_{n=1}^{10} (L_o + \Delta L_n + L_{ns}) = 10\, L_o + \sum_{n=1}^{10} \Delta L_n + \sum_{n=1}^{10} L_{ns}. \tag{6}$$

Z zależności (3) oraz (4) wynika:

$$\sum_{n=1}^{10} \Delta L_n = 0. \tag{7}$$

Stąd błąd względny wynikający z indukcyjności rozproszenia dla połączenia szeregowego sekcji wynosi:

$$\delta L_{(sz)} = \frac{L_{s(sz)}}{L_{o(sz)}} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} \frac{L_{ns}}{L_o} = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} \delta L_{ns}, \tag{8}$$

przy czym:

δL_{ns} - błąd względny wynikający z indukcyjności rozproszenia n-tej sekcji.

Indukcyjność zastępcza połączenia równoległego sekcji:

$$\frac{1}{L_{o(r)}+L_{s(r)}} = \sum_{n=1}^{10} \frac{1}{L_o+\Delta L_n+L_{ns}} = \sum_{n=1}^{10} \frac{1}{L_o\left(1+\frac{\Delta L_n+L_{ns}}{L_o}\right)} \tag{9}$$

Rozwijając obydwie strony równania w szereg otrzymano:

$$\frac{1}{L_{o(r)}}\left(1-\delta L_{(r)}+\delta L^2_{(r)}-\ldots\right) = \sum_{n=1}^{10}\frac{1}{L_o} - \frac{1}{L_o}\sum_{n=1}^{10}\left(\frac{\Delta L_n}{L_o}+\frac{L_{ns}}{L_o}\right)+$$

$$+\frac{1}{L_o}\sum_{n=1}^{10}\frac{\Delta L_n}{L_o}+\frac{L_{ns}}{L_o}^{2}-\ldots \tag{10}$$

Uwzględniając zależność (7), mamy:

$$\frac{1}{L_{o(r)}}\left(1\cdot\delta L_{(r)}+\delta L^2_{(r)}-\ldots\right) = \frac{10}{L_o} - \frac{1}{L_o}\sum_{n=1}^{10}\delta L_{ns}+$$

$$\frac{1}{L_o}\sum_{n=1}^{10}\left(2\frac{\Delta L_n}{L_o}\delta L_{ns}+\delta L^2_{ns}\right)-\ldots \tag{11}$$

Ponadto zachodzi:

$$2\sum_{n=1}^{10}\frac{L_n}{L_o}\delta L_{ns} \ll \sum_{n=1}^{10}\delta L^2_{ns}.$$

Stąd błąd względny wynikający z indukcyjności rozproszenia dla połączenia równoległego sekcji wynosi:

$$\delta L_{(r)} = \frac{1}{10}\sum_{n=1}^{10}\delta L_n. \tag{12}$$

Porównując wyrażen. a (8) oraz (12), otrzymano:

$$\delta L_{(sz)} = \delta L_{(r)}. \tag{13}$$

Z zależności (13) wynika wniosek, że błędy spowodowane nierównością wartości indukcyjności głównych oraz indukcyjności rozproszenia dla przypadków połączenia sekcji szeregowego oraz równoległego są identyczne.

Przedstawione rozumowanie jest słuszne przy założeniu, że indukcyjności rozproszenia nie zmieniają swojej wartości w funkcji natężenia pola magnetycznego. Indukcyjności te są związane ze strumieniem rozproszenia, który można podzielić na dwie części:

- strumień obejmujący wyłącznie niemagnetyki jest to część liniowa,
- strumień obejmujący częściowo niemagnetyk, częściowo magnetyk; uwzględniając jednak, że w stanie równowagi przenikalność jest stała, równa początkowej można przyjąć, że i ta część strumienia rozproszenia jest liniową funkcją prądu.

Stąd wynika wniosek, że wartości indukcyjności rozproszenia nie są funkcją natężenia pola magnetycznego. Wniosek ten wynika również z pomiarow przeprowadzonych przez Hilla i Deacona [2], którzy wykazali, że indukcyjności rozproszenia mierzone prądem zmiennym w funkcji prądu oraz częstotliwości zmieniają swoją wartość w sposób pomijalnie mały.

Właściwość polegająca na zmianie o rząd wartości prądu na wejściu uzwojeń "N", poprzez zmianę kombinacji połączeń sekcji z szeregowej na równoległą, realizowanej z błędem pomijalnie małym nazwano zasadą transferu prądowego.

Zasada ta ma zastosowanie w procesie porównywania rezystancji wzorcowych, w przypadku, gdy ich wartości różnią się o rząd. Umożliwia również realizację procesu uwierzytelnienia komparatora prądowego.

3. Metoda uwierzytelnienia KP

Zdefiniowano błąd KP jako:

$$\delta\theta = \frac{\theta_X - \theta_N}{N}, \tag{14}$$

gdzie:

θ_X - siła magnetomotoryczna uzwojenia "X",

θ_N - siła magnetomotoryczna uzwojenia "N".

Błąd ten jest najważniejszym parametrem metrologicznym KP. Jest on wypadkową szeregu błędów omówionych w pracy [4]. Wartość jego wyznacza się w procesie uwierzytelnienia KP.

Rząd spodziewanych wartości błędów $\delta\theta \cong (10^{-7}...10^{-8})$ uniemożliwia zastosowanie wzorca prądu, stąd jedyną metodą umożliwiającą pomiar błędu jest metoda różnicowo-zerowa. Podstawowe układy jej realizacji przedstawiono na rys. 3.

W układzie na rysunku 3a zachodzi równość $I_X = I_N$. Prądy przepływając przez połączone przeciwsobnie uzwojenia z_X oraz z_N wskutek istnienia błędu komparatora spowodują wychylenie miernika napięcia drugiej harm

nicznej, na rysunku zaznaczonego symbolicznie, o wartość ΔU_{2ha}. Z zależności wyprowadzonej z pracy [4], można obliczyć względny błąd siły magnetomotorycznej:

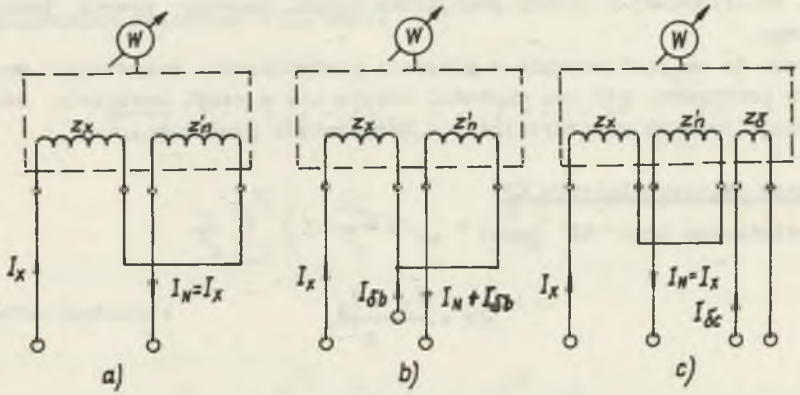
$$\delta\theta_a = \frac{\Delta U_{2ha}\, l_r}{16\, f\, z_d s_r \mu_o \mu_o I_X z_X} \tag{10}$$

gdzie:

l_r - średnia długość drogi magnetycznej,
z_d - liczba zwojów uzwojenia detekcyjnego,
s_r - średnia wartość pola przekroju poprzecznego rdzenia.

W układzie podanym na rysunku 3b wymusza się dodatkowy prąd $I_{\delta b}$, przepływający przez jedno z uzwojeń. Posiada on wartość i kierunek taki, że miernik napięcia parzystych harmonicznych wskaże zero. Błąd względny przepływu będzie wtedy równy:

$$\delta\theta_b = \frac{I_{\delta b} z_X}{I_X z_X} = \frac{I_{\delta b}}{I_X} \cong \frac{I_{\delta b}}{I_N}. \tag{11}$$



Rys. 3. Schematy układów uwierzytelnienia komparatora prądów

Proces uwierzytelnienia KP wg schematu podanego na rysunku 3c, polega na wymuszeniu, w dodatkowym uzwojeniu z_δ, prądu $I_{\delta c}$ o wartości sprowadzającej wskazanie miernika parzystych harmonicznych do zera. Błąd względny porównania przepływów będzie równy:

$$\delta\theta_c = \frac{I_{\delta c}\, z_\delta}{I_X\, z_X} \cong \frac{I_{\delta c}\, z_\delta}{I_N\, z_N}. \tag{12}$$

Z praktycznego punktu widzenia najkorzystniejszym jest układ przedstawiony na rys. 3a. Uwzględniając, że czułość modulatora parzystych harmo-

nicznych, dla małych wartości natężenia pola magnetycznego stałego, nie zmienia swojej wartości można w łatwy sposób otrzymać wynik, korzystając z zależności (10).

Druga metoda, której układ przedstawiono na rysunku 3b, ze względu na trudno mierzalny rząd prądu $I_{\delta b}$ (ułamki mikroamperów) ma znaczenie teoretyczne. Układ 3c jest praktyczną realizacją metody przedstawionej na rysunku 3b. Liczba zwojów z_δ może być wielokrotnie mniejsza niż liczba zwojów z_X oraz z_N - stąd prąd $I_{\delta c}$ będzie wielokrotnie większy niż $I_{\delta b}$, a więc łatwo mierzalny. Wadą jest konieczność nawijania dodatkowego uzwojenia z_δ.

Uwierzytelnienie KP przeprowadzono według diagramu przedstawionego na rysunku 4. Na rysunku zaznaczono uzwojenia pomiarowe komparatora "n" oraz "1" nawinięte 11 przewodową wiązką multifilarną. Proces uwierzytelnienia przebiega według następujących punktów, przy założeniu, że w każdym doświadczeniu pomiarowym wymusza się w uzwojeniach siły magnetomotoryczne o jednakowej wartości bezwzględnej.

a) Z 11 przewodów wiązki wybiera się przewód o względnym błędzie pochodzącym od indukcyjności rozproszenia δL_{ns} w przybliżeniu równym błędowi równolegle połączonych sekcji $\delta L_{(r)}$. Wyboru dokonuje się realizując dziesięciokrotnie porównanie sił magnetomotorycznych poszczególnych uzwojeń (operacja I), z pozostałymi przewodami połączonymi równolegle. Przewód, który charakteryzuje się minimalną wartością bezwzględnego błędu (Δ "n"$_{min}$) przyjmuje się jako uzwojenie "X"; pozostałe przewody tworzą sekcje uzwojenia "n".

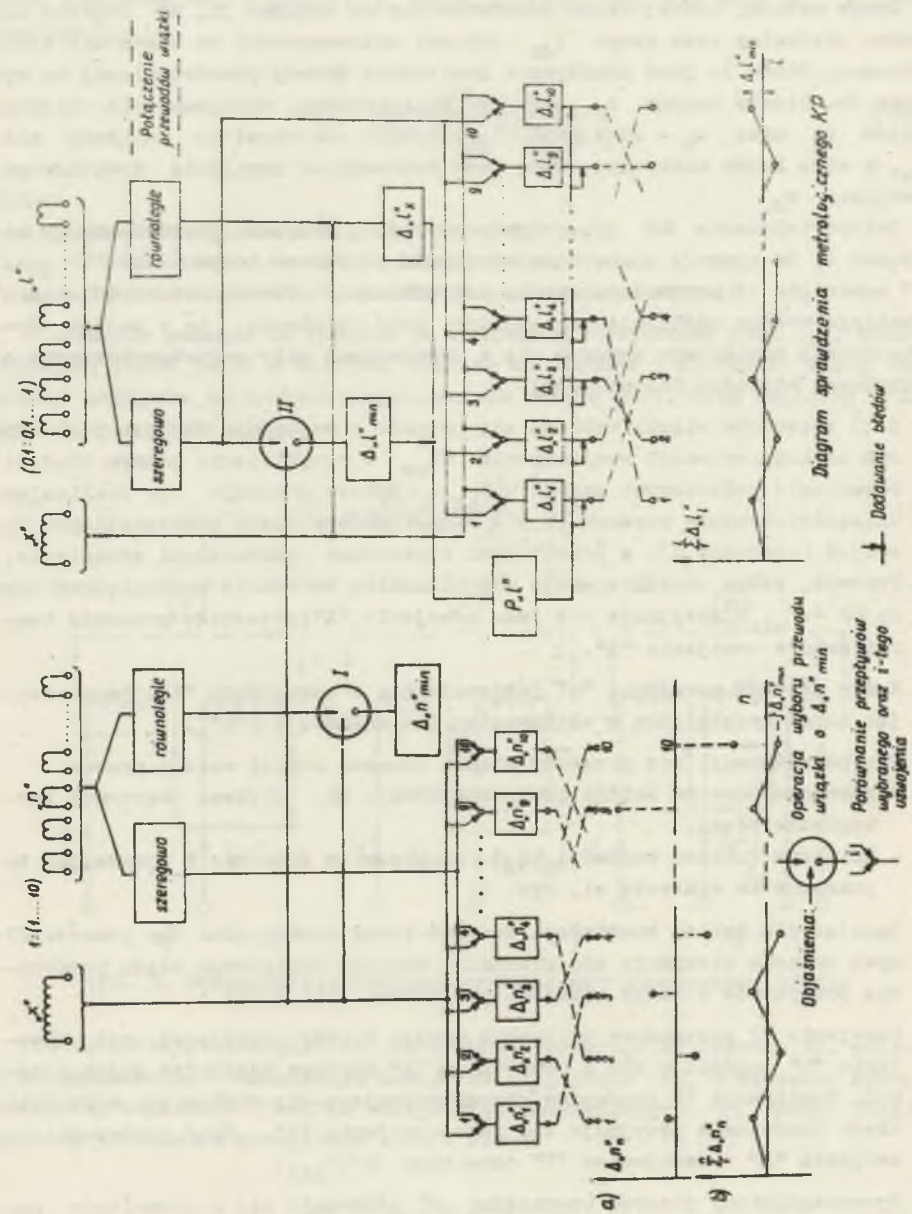
b) Każdy przewód uzwojenia "n" porównuje się z uzwojeniem "X", wyznaczając błędy bezwzględne z zachowaniem ich znaków: $\pm\Delta$"n"$_n$.

c) Przyporządkowuje się przewody wiązki numerom sekcji według prawa:
   - rosnącym numerom sekcji przyporządkowuje się większe wartości bezwzględne błędu,
   - kolejnym numerom wartości błędu na przemian dodatnie i ujemne, jak to pokazano na wykresie a), rys. 4.

d) Sumując dla takiej kombinacji uzwojeń błędy bezwzględne dla poszczególnych numerów otrzymuje się minimalną wartość względnego błędu porównania przepływów w całym zakresie przekładni 1:(1...10).

e) Uzwojenie 11 przewodowe o liczbie zwojów o rząd mniejszej niż uzwojenie "n" porównuje się z uzwojeniem "X" kolejno włączając jeden przewód. Kombinację 10 przewodów charakteryzującą się minimalną wartością błędu porównania przyjmuje się jako uzwojenie "1". Błąd porównania uzwojenia "1" z uzwojeniem "X" oznaczono Δ"1"$_{min}$.

f) Wyszczególniony przewód (oznaczony x) porównuje się z równolegle połączonymi pozostałymi przewodami wiązki, określając błąd Δ"1"$_x$. Suma błędów bezwzględnych $\pm\Delta$"1"$_{min}$ $\pm\Delta$"1"$_X$ wyznacza błąd bezwzględny pomi



Rys. 4. Diagram uwierzytelnienia komparatora prądów

dzy uzwojeniami X oraz x'. Błąd ze znakiem ujemnym stanowi poprawkę którą należy dodać do błędów poszczególnych przewodów wiązki.

g) Uzwojenie x' porównuje się kolejno z pozostałymi przewodami uzwojenia "l" wyznaczając błędy $\Delta"l"_l$. Do wartości błędu dodaje się poprawkę.

h) Postępując analogicznie jak w punktach c) oraz d) otrzymujemy kombinację o minimalnej wartości błędu względnego porównania sił magnetomotorycznych θ_x oraz θ_l. Uzwojenie x można wykorzystać do zmiany zakresu porównywanych prądów lub pozostawić nie podłączone.

4. Wyniki pomiarów

Postępując w sposób opisany w rozdziale 3 dokonano uwierzytelnienia KP stosując układ przedstawiony na rysunku 3a. W układzie łączono przeciwsobnie wydzielone z wiązki multifilarnej uzwojenie "X" z kolejnymi sekcjami uzwojenia "n". Następnie wymuszano w uzwojeniach siłę magnetomotoryczną o wartości 3 A i wyznaczano błędy $\Delta"n"_n$. Łącząc przewody wiązki w sposób opisany w punkcie c) rozdziału 3, otrzymano wartość błędu względnego porównania przepływów mniejszą niż 10^{-6}.

W sposób identyczny wyznaczono błąd porównania sił magnetomotorycznych uzwojenia "x" z uzwojeniem "l". Jego wartość była mniejsza niż 5.10^{-6}.

Siła magnetomotoryczna wywołana w uzwojeniu zwojów ułamkowych daje wartość trzeciego miejsca znaczącego w wyniku pomiaru, stąd błąd wprowadzony przez uzwojenie "u" nie odgrywa istotnej roli.

RECENZENT:

doc. dr hab. Zbigniew Orzeszkowski
Politechnika Wrocławska

LITERATURA

[1] Grocholski A.L., Kaszczajejew E.L.: Metody obespiecziwanija tiesnoj swjazi pliecziewych induktiwno swjaznych eliemjentow na osnowie multifilarnych sistiem. Probliemy Eliektomietrij, Nowosibirsk 1971.

[2] Hill J.J., Deacon T.A.: Theory, design and measurement of inductive voltage dividers. Proc. of the IEE. May 1968, No 5.

[3] Kusters N.L., Moore W.J.H., Miljanic P.N.: A current comparator for the precision measurement of D-C ratios. IEEE. Trans. on Instr. and Meas. Jauary 1964.

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

ПРИНЦИП ТРАНСФЕРА ТОКОВ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
В ПРОЦЕССЕ ЭТАЛОНИРОВАНИЯ КОМПАРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Р е з ю м е

Рассмотрен принцип трансфера токов. Этот трансфер создаёт возможность сравнения двух токов, из которых один в 10 раз больше другого, с очен малой погрешностью порядка 10^{-9}. Приведён метод использования принципа трансфера токов в процессе эталонирования компаратора постоянных токов.

THE PRINCIPLE OF CURRENT TRANSFERER AND ITS APPLICATION
TO D.C.COMPARATOR ATTESTATION

S u m m a r y

The work principle of the current transferer has been presented. The current transferer is used to compare two currents, when one of them is ten times bigger than the second. The error of this comparison is not more than 1.10^{-9}. The application of the current transferer's principle to the attestation of the d.c.comparator has been presented.