Seria: ELEKTRYKA z. 92

Tadeusz SKUBIS Andrzej MET

MOSTEK DO POMIARÓW WZORCÓW INDUKCYJNOŚCI

Streszczenie. W artykule przedstawiono zagadnienia konstrukcji mostka do pomiaru indukcyjności w zakresie 1 µH ... 1 H przy częstotliwości 1 kHz z niedokładnością mniejszą od -0,01%. Mostek opracowano wykorzystując układy dokładnych dwurdzeniowych dzielnikow i autotransformatorów, wspomaganych układami elektronicznymi.Określono głównie źródła błędów mostka.

rowikit a presidente of to enideliadoisjongh preside instructor and loode indukteriestei a Twinkin Sectoric Mormalianoit, Mint i Jaineot. No.

and antering introles alexante i alectors

### 1. Wprowadzenie

Spośród trzech składowych impedancji obecnie najmniej dokładnie mierzona jest składowa indukcyjnościowa [9]. Wynika to z ograniczeń występujących przy odtwarzaniu miary wzorcowej indukcyjności (trudne do spełnienia warunki techniczne), a także przy jej pomiarach (m.in. znaczny udział strat, zależność od częstotliwości, prądu, temperatury itp.).

Do pomiarów indukcyjności w zakresie częstotliwości akustycznych stosuje się przede wszystkim mostki klasyczne (Maxwella-Wiena, Owena, Haya) oraz transformatorowe. Mostkami klasycznymi indukcyjność jest mierzona z niedokładnością <sup>±</sup>0,1% lub metodą podstawienia z niedokładnością <sup>±</sup>(0,03... ...0,01)%. Natomiast dwa wzorce indukcyjności o nominalnie takiej samej wartości impedancji mogą być porównywane za pomocą mostka klasycznego z niedokładnością <sup>±</sup> (0,003...0,001)% lub w komparatorach indukcyjności z niedokładnością <sup>±</sup> (0,002...0,0002)%.

Fonieważ wśród wzorców impedancji najdokładniej mogą być odtwarzane wzorce pojemności (np. kondensatory Lamparda-Thompsona o niedokładności rsędu  $\stackrel{+}{}$  0,1 ppm) [9], więc korzystne jest wykonywanie pomiarów indukcyjności w odniesieniu do wzorców pojemności. Z tego powodu zbudowano mostek transformatorowy, który realizuje deny teoretycznie związek L<sub>x</sub> = f(C<sub>n</sub>) z niedokładnością mniejszą niż 0,01% w dużym zakresie 0,1 $\mu$ H ... 1 H, przy częstotliwości 1 kHz. Zastosowanie metody podstawienia zmniejsza tę niedokładność o rząd. Zasadniczymi podzespołami mostka są dokładne transformatory i autotransformatory prądowe i napięciowe oraz dzielniki i mnożniki indukcyjne prądu. Te klasyczne urządzenia zastosowane s korekcyjnymi układami elektronicznymi dają szereg nowych możliwości budowy układów pomierowych o bardso dużej dokładności.

Nr kol. 801

Serie: ELEXTRUES a. W

## 2. Założenia i warunki realizacji mostka

Założenia i wymagania metrologiczne, które powinien spełniać mostek, wynikły s przeznaczenia go do najdokładniejszych pomiarów krajowych etalonów indukcyjności w Polskim Komitecie Normalizacji, Miar i Jakości. Założony zakres pomiaru indukcyjności wynosił 0,1  $\mu$ H ... 1 H przy częstotliwości 1 kHz. Mostek miał realizować metodę bespośredniego porównania indukcyjności z jednym, jednomicrowym kontrolnym wsorcem pojemności. Błąd  $\delta^{\circ}$  odtwarzania związku  $L = f(C_{\rm B})$  przez mostek w całym zakresie indukcyjności, dobroci i prądu nie powiniem przekraczać  $\pm$ 0,01%, aby można nim było sprawdzać wzorce indukcyjności klasy 0,02. Dla etanu równowagi błąd ten zdefiniowany jest równaniem (1):

$$\approx \frac{f^{\#}(C_{n}) - f(C_{n})}{f(C_{n})}$$
(1)

pray caya:

5

f<sup>#</sup>(C<sub>n</sub>) - funkcja rzeczywista, realizowana przez mostek; f(C<sub>n</sub>) = kC<sub>n</sub> - funkcja modelowa; k - stała mostka (wynikająca z równania równowagi).

Wsorce indukcyjności (w sależności od producenta i od wartości indukcyjności) mają różne snamionowe wartości prądu i dobroci. Przyjęto (uwsględniając dane firmowe wsorców), że w mostku wystarczy zakres dobroci 0,16 ... 1600, sakres pomiaru rezystancji 10QuQ ... 1,1 MQ oraz sakres natężenia prądu pomiarowego 0 ... 3 A. Wartość natężenia prądu pomiarowego, płynącego przez mierzony wsorzec indukcyjności w stanie równowagi mostka, pewinna być nastawialna i mierzena.

Mostek powinien mieć niesależne równoważenie, optymalną zbieżność (%290°) oras niesależny odczyt indukcyjności i zastępczej rezystancji w układzie równoległym lub indukcyjności i dobroci. Podzekresy pomiarowe indukcyjności powinny się pokrywać na brzegach. W tablicy i zestawiono przyjęto pod-

Tablica 1

Lp.	Podsakres pomiaru L <sub>x</sub> [µH]	Zakres napięcia U <sub>r</sub> [V]	Zakres impedancji  Z <sub>x</sub>  . [Ω]	Zakres prądu I <sub>X</sub> [A]
1	0,1 1,1	0,053	~0,015	~3,5
2	. 1 11	0,53	0,015 0,15	180000
3	10 *** 110	an, <b>1, 1</b> , 1, 1, 1, 1, 1, 1	0,15 0,7	7,5
-4	100 1100	5,3	0,7 7	7,5
15 mm	1000 11000	27	7 70	4,0
6	10000 110000	53	70 700	0,76
7	100000 1100000	265	700 7000	0,76

## Nostek do pomiarów wsorców indukcyjności

sakresy mostka oras odpowiadające im szacunkowe wartości impedancji Z<sub>z</sub>, napięcia U<sub>z</sub> na tej impedancji oras prądu I<sub>z</sub>.

## 3. Autotransformatory sasilane pradowo

W wyniku badań laboratoryjnych stwierdzono, że żaden ze snanych układów mostków nie gwarantuje osiągnięcia sałożonych wymagań. Stworzono oryginalny układ mostka, oparty na dzielnikach i transformatorowych układach swielokrotniających (mnożnikach) prądu przemiennego, o dużej dokładności i nastawialnym przełożeniu. Zastosowano do tego celu wielodekadowe autotransformatorowe dzielniki indukcyjne w układzie Kelvina-Varleya, które swykle służą do podziału napięć przemiennych z błędem nie przekraczającym  $\pm 1.10^{-6}$ . Z literatury [2] snane są ich konstrukcje i różne aplikacje, ale nie ma informacji o zastosowaniu ich do dokładnego zwielokrotniania lub dzielenia prądu. Na rys. 1 przedstawiony jest autotransformator zasilany wymussonym prądem I<sub>w</sub>, przy zwartej drugiej parze sacisków. Jeżeli D jest przekładnią zwojową (napięciową) autotranzformatora idealnego, to w przypadku zasilania wymussonym prądem całego uzwojenia (od strony zacisków 0 - 1) wkład zwielokrotnia prąd (rys. 1a):





Rys. 1. Autotransformatory sasilane wymussonym prądem smiennym a) mnożnik; b) dzielnik

W przypadku sasilania autotransformatora idealnego wymussonym prądem od strony sacisków O - D układ pracuje jako dsielnik prądowy (rys. 1b):

$$I_b = D I_w$$

Penieważ spełniony jest warunek 0 < D < 1, więc  $I_a > I_w$  oras  $I_b < I_w$ Wynika stąd bespośredni powód wprowadzenia nazw mnożnik i dzielnik dla autotransformatora w tych dwu stanach pracy. Drugim powodem ich rozróżnienia jest inny model matematyczny błędów.

41

(2)

(3)

Równania (2) oraz (3) obowiązują także w przypadku kaskadowego połączenia autotransformatorów idealnych w układzie Kelvina-Varleya.

W autotransformatorze rzeczywistym uzwojenie ma niezerowe wartości rezystancji i indukcyjności rozproszenia, występuje prąd magnesujący, a także zwarcie wyjścia i wymuszenie na wejściu nie są idealne. Z tego powodu zależność I<sub>a,b</sub> = f(I\_) zawiera oprócz przekładni D również impedancje rozproszenia uzwojeń bedące funkcjami tej przekładni oraz impedancje wejácia i wyjácia. Ich uwzględnienie bardzo skomplikowałoby funkcję modelową mostka, w którym współdziała, ale i wzajemnie oddziałuje na siebie wiele takich autotransformatorów. Uzyskanie niezależnego równoważenia i bezpośredniego odczytu byłoby niemożliwe. Zignorowanie wpływu niepożądanych impedancji prowadziłoby do zbyt grubego przybliżenia funkcji modelowej mostka, które nie mogło być przyjęte ze względu na wymaganą dokładność. Z tego powodu należało zbudować wielodekadowe autotransformatorowe dzielniki i układy zwielokrotniające prąd, realizujące przełożenie z dużą dokładnością wg przekładni swojowej autotranaformatora. Analize dokładności i wyniki pomiarów takiego dzielnika prądu przedstawiono w pracy [5], natomiast zasady konstrukcji rzeczywistego, indukcyjnego układu zwielokrotniającego prąd przedstawiono w pracy 4. Układy te umożliwiły realizację dokładnego mostka o właściwościach podanych we wstępie.

## 4. Rozwiązanie układowe

Uproszczony schemat ideowy zrealizowanego mostka, spełniającego przyjęte założenia przedstawiono na rys. 2. Układ należy do klasy mostków transformatorowych i obejmuje następujące zespoły:

1) Precyzyjny transformator napięciowy TN, o dużej obciążalności, w  $U_x$  oraz  $U_x$  są równe przekładni zwojowej i na tej podstawie są obliczone z bardzo dużą dokładnością.

2) Indukcyjny dzielnik prądu DP1, który ma kilka dyskretnych wartości przedkładni D..

3) Indukcyjne mnożniki prądu MP2 (pięciodekadowy) i MP3 (zsterodekadowy), które umożliwiają nastawienie przekładni  $D_2$  i  $D_3$ , w zakresie 0,1...1 z dużą rozdzielczością.

Zakładając, że DP1, MP2 i MP3 mają zerowe impedancje wejściowe, oblicza się prądy głównych obwodów mostka:

$$I_{x} = U_{x} \left( \frac{1}{R_{y}} + \frac{1}{3\omega L_{y}} \right)$$

 $I_{c} = jU_{c} \omega C_{n}$ 

(4)





$$I_R = U_R \frac{1}{R_W}$$

Makaymalny prąd  $|I_x|$  może mieć wartość kilkudziesięciu miliamperów przy indukcyjnościach  $L_x$  rzędu 1 H i kilku amperów przy indukcyjnościach rzędu 1 µH. Przy zastosowaniu wzorców  $C_n = 1000$  pF i  $R_n = 10$  kil oraz przy f = 1 kHz,  $U_C = 530$  V i  $U_R = 53$  V otrzymuje się:  $|I_C| \approx 3$  mA,  $|I_R| \approx 5$  mA. Zakładając, że detektor ma zerową impedancję wejściową otrzymuje się:

$$I_{1} = D_{1}I_{x}$$
(7)  

$$I_{2} = \frac{1}{D_{2}}I_{C}$$
(8)  

$$I_{3} = -\frac{1}{D_{3}}I_{R}$$
(9)

W stanie równowagi w węźle W:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0.$$

(6)

(13)

Uwzględniając równamia (4) ... (10) otrzymuje się równania układu:

$$= \frac{u_x}{u_c} \frac{D_1 D_2}{\omega^2 c_n}$$
(11)

$$R_{\mathbf{x}} = \frac{\sigma_{\mathbf{x}}}{\sigma_{\mathbf{R}}} R_{\mathbf{n}} D_{\mathbf{1}} D_{\mathbf{3}}.$$
 (12)

Zmiana zakresu pomiarowego  $L_x$  i zmiana prądu  $I_x$  nie sąw układzie współzależne. Zmian tych dokonuje się przełącznikami  $P_1$  i  $P_2$ .  $P_1$  zapewnia zmianę zakresu pomiaru  $L_x$  bez zmiany prądu  $I_x$ , a  $P_2$  zmienia zakres pomiaru  $L_x$ oraz prąd  $I_x$ . Uniezależnienie napięcia  $U_x$  od obciążenia (na najniższych zakresach) oraz wyeliminowanie wpływu przewodów doprowadzających osiągnięto w układzie pokazanym na rys. 3.



Rys. 3. Schemat układu redukującego wpływ niepożądanych impedancji szeregowych na wyniki pomiarów

 $Z_u$ ,  $Z_d$  - impedancje uzwojeń transformatora i dzielnika;  $Z_{\overline{p}1}$ ,  $Z_{\overline{p}2}$  - impedancje dancje doprowadzeń

W obwodzie prądu I<sub>x</sub> spadki napięcia na impedancjach uswojeń transformatora TN i przewodów doprowadzających mogą być tego samego rzędu co napięcie U<sub>x</sub> na indukcyjnońci L<sub>x</sub>. Napięcie U<sub>x</sub> porównywane jest więc z siłą elektromotoryczną E<sub>x</sub>, indukowaną w dodatkowym uswojeniu. Różnicą napięć E<sub>x</sub> - U<sub>x</sub> steruje wzmacniacz K, którego wyjście samyka pętlę ujemnego sprsężemia swrotnego całego układu. Napięcie wejściowe wsmacniacza wynosi:

$$U_{we} = E_x - I_x Z_x$$

4.6

Prad pomiarowy I\_:

$$I_{x} = \frac{KU_{we} + E_{x}}{Z_{u} + Z_{p1} + Z_{p2} + Z_{x}}$$
(14)

Z równań (13) i (14) oblicsa się:

$$I_{\mathbf{x}} = \frac{E_{\mathbf{x}}}{Z_{\mathbf{x}}} \left[ \frac{1}{\frac{Z_{\mathbf{u}} + Z_{\mathbf{d}} + Z_{\mathbf{p}1} + Z_{\mathbf{p}2}}{(\mathbf{x} + 1)Z_{\mathbf{x}}}} \right] \approx \frac{E_{\mathbf{x}}}{Z_{\mathbf{x}}} \left[ 1 - \frac{Z_{\mathbf{u}} + Z_{\mathbf{d}} + Z_{\mathbf{p}1} + Z_{\mathbf{p}2}}{(\mathbf{x} + 1)Z_{\mathbf{x}}} \right]$$
(15)

W stanie ustalonym, dla K-> 🗠 :

$$I_{x} = \frac{E_{x}}{Z_{x}}$$
(16)

W układsie sastosowano dodatkowy transformator prądowy (T1), transformujący prąd I<sub>C</sub> na I'<sub>C</sub> w stosunku 100/432<sup>2</sup>, w celu usyskania bespośredniego odcsytu wartości L<sub>x</sub>. Równanie równowagi (11) układu dla f = 1000 Hs prsyjmuje postać (17):

$$L_{x} = \frac{U_{x}}{U_{c}} \cdot \frac{D_{1}D_{2}}{C_{n}} \cdot 10^{-8}$$
 (17)

Prąd I<sub>3</sub> jest również dodatkowo transformowany na I<sub>3</sub> w stosunku 1:10 lub 10:1, w sależności od sakresu dobroci (transformator T2).

Osobne zagadnienie stanowi pomiar prądu  $I_x$  płynącego przez miersoną indukcyjność w stanie równowagi mostka. Do tego celu opracowano przetwornik natężenia prądu o zerowej impedancji wejściowej i o wejściu transformatorowym [3].

Do sasilania mostka wykonano wysokostabilny generator o csęstotliwości 1.kHz i o nastawianym w sposób ciągły napięciu wyjściowym (rys. 4).

Detektor stanu równowagi umożliwia niesależną obserwację równoważenia obu składowych impedancji Z. Logarytmiczny przetwornik I/U na wejściu zapewnia odpowiednią charakterystykę detektora w procesie równoważenia (rys. 5).

Pełny schemat ideowy mostka przedstawiono na rys. 6. Na rysunku tym nie zasnaczono oddzielnie układów elektronicznej korekcji.







Rys. 5. Schemat blokowy detektora stanu równowagi układu

### 5. Blad mostka

Mostek został wykonany jako komparator impedancji o liczalnym błędzie. We wszystkich fazach projektowania i konstrukcji mostka nadrzędnym kryterium decyzji konstrukcyjnych było spełnienie wymagań dokładnościowych w całym zakresie pomiarowym. Najważniejszymi składowymi niedokładności mo-



#### Rys. 6. Pełny schemat ideowy mostka

K - wzmaćniacz układu redukującego wpływ impedancji doprowadzeń, TN -wejściowy transformator napięciowy, T1, T2 - dodatkowe transformatory dopasowujące, DP1 - dzielnik prądu; MP2, MP3 - mnożniki prądu

stka są: a) błąd przekładni  $U_x/U_C$  wejściowego transformatora zasilającego TN; b) błąd spowodowany impedancją rozproszenia w obwodzie prądu I<sub>x</sub>; c) błąd przekładni D<sub>1</sub> dzielnika prądu DP1; d) błąd przekładni D<sub>2</sub> mnożnika prądu MP2; e) błąd przekładni 100/4 $\Re^2$  transformatora dopasowującego; f) błąd wzorca C<sub>n</sub>; g) błąd składowej resztkowej wzorca resystancji R<sub>n</sub>; h) błąd stałości częstotliwości zasilania.

Poszczególne podzespoły mostka zaprojektowano i wykonano tak, aby błąd żadnego z nich (punkty a ... h) nie przekraczał wartości ±0,001%.

Błąd poszczególnych przekładni zminimalizowano przez zastosowanie transformatorów dwurdzeniowych [1], [5], [7]. Błąd przekładni poszczególnych

### Tadeuss Skubis, Andrzej Met

transformatorów obliczano rachunkowo, wykorzystując doświadczalne dane s badań. Błędy te są funkcją nastawionych wartości  $P_2$ ,  $D_1$  oras  $D_2$ . Przekładnie  $P_2$ .  $D_1$  oras  $D_2$  uzyskano przez kaskadowe połączenie transformatorów dwurdzeniowych. Największy, wypadkowy błąd każdej kaskady nie przekracza  $\pm$  0,001%.

Błąd, którego źródłem jest obwód prądu  $I_x$ , sależy od zakresu pomiarowego. Na małych podzakresach o błędzie decydują spadki napięcia na impedancjach przewodów i uzwojeń, ponieważ prąd  $I_x$  ma dużą wartość. Na dużych podzakresach o niedokładności decydują prądy płynące przez pojemności oraz konduktancje montażowe, ponieważ występują duże różnice potencjałów. Układ przedstawiony na rys. 3 redukuje wpływ impedancji doprowadzeń i uzwojeń na tyle, że ta składowa błędu jest mniejsza od 6.10<sup>-6</sup>. Wpływ pojemności oraz konduktancji montażowych minimalizowano przez ekranowanie przewodów i podzespołów. Oszacowano, że błą. resztkowy spowodowany niedoskonałym ekranowaniem jest mniejszy od 2.10<sup>-6</sup>.

Przekładnia 100/492, jako liczba niewymierna, została wykonana z przybliżeniem o błędzie mniejszym od 2.10<sup>-6</sup>,  $\frac{100}{227} \approx \frac{575}{227}$ . Zastosowano trans-

formator dwurdzeniowy o przekładni zwojowej  $\frac{575}{227}$  i przekładni prądowej różniącej się od tej wartości mniej niż  $3.10^{-6}$ .

W układzie zastosowano kondensator wsorcowy o pojemności nominalnej 1000 pF klasy 0,001 (firmy General Radio).

Składowa bierna impadancji wsorca  $R_n$  powoduje dopływ do węsła W niepożądanej składowej prądu, o fasie zgodnej lub przeciwnej z fasą prądu Im  $\{I_x\}$ . Obliczono, że jeżeli składowa bierna wzorca  $R_n$  jest mniejsza od 1.10<sup>5</sup>  $R_n$  (w szeregowym układzie zastępczym), to przy żadnej konfiguracji przełączników mostka błąd względny zależny od tej składowej nie przekracza wartości 0,001%.

Błąd cząstkowy, sależny od niestałości częstotliwości, obliczony z równania (11) wynosi  $2 \Delta_{\bullet}^{0}$ . W generatorze zasilającym mostek zastosowano rezonator kwarcowy w termostacie, o względnej niestałości częstotliwości około 1.10<sup>-8</sup>. Błąd cząstkowy stąd wynikający nie przekracza 2.10<sup>-8</sup>.

Oprócs omówionych wyżej źródeł błędu, swiązanych z possczególnymi podsespołami, w mostku wyodrębniono jeszcze błąd pobudliwości, swiązany z całym układem. Na jego wartość wpływają sniekształcenia napięcia generowanego w układzie zasilania, zakłócenia na wejściu detektora oraz ograniczona czułość detektora.

Mostek jest zależny od cząstotliwości, wobec czego również w stanie bliskim równowagi prądy wyższych harmonicznych pojawiają się na wejściu detektora o ograniczonej selektywności. Maskują one sygnał podstawowej harmonicznej, co bezpośrednio wpływa na zmniejszenie możliwej rozdzielczości równoważenia. Na wejście detektora przedostają się również zakłócenia, które zmuszają do ograniczenia czułości detektora.Wpływ zniekształceń zazilania oraz zakłóceń zminimalizowano za pomocą filtrów selektywnych o f<sub>m</sub> = 1 kHz, które znajdują się zarówno w obwodach generatora jak

#### Mostek do pomiarów wzorców indukcyjności

i detektora. Dalesą minimalizację tego wpływu daje detekcja fazoczuła sygnału równowagi. Błąd pobudliwości układu, zmierzony na wszystkich zakresach, jest mniejszy od 5.10<sup>-6</sup>.

Błąd pomiaru składowej czynnej  $R_x$  mierzonego wzorca analizowano w taki sposób, jak błąd pomiaru indukcyjności  $L_x$ . Założony błąd pomiaru  $R_x$  wyno-sił 0,1%, a poszczególne błędy cząstkowe były mniejsze od 0,01%.

W mostku nie przewidziano żadnych elementów umożliwiających adiustację. Jest to istotna cecha mostka. Wynika ona stąd, że o niedokładności pomiaru mostkiem decydują przede wszystkim transformatory o znanych i stałych w czasie wartościach przekładni, natomiast układy elektroniczne minimalizują tylko wielkości wpływowe. Stałość czasowa wzmocnienia tych układów ma drugorzędne znaczenie. W przypadku uszkodzenia któregokolwiek układu elektronicznego ujawnia się błąd nadmierny pomiaru, łatwo zauważalny przez obsługę.

Końcowym sprawdzeniem błędów mostka były pomiary wsorców indukcyjności serii 1482 firmy General Radio oraz serii R 1200 firmy Sullivan. Wzorce miały klasę 0,01, a ich wartości poprawne były znane. Wskazania mostka na wszystkich zakresach nie różniły <sup>j</sup>zię od wartości poprawnych wzorców więcej niż o <sup>±</sup>0,01%.

#### 6. Podsumowanie i wnioski

W oparciu o technikę precysyjnych transformatorów i dzielników indukcyjnych został sbudowany mostek pomiarowy indukcyjności o błędzie pomiaru mniejszym od 0,01% w zakresie 1  $\mu$ H ... 1 H, przy f = 1 kHz.

Założoną dokładność pomiaru osiągnięto dsięki sastosowaniu dwurdzeniowych transformatorów oraz dwurdzeniowych indukcyjnych dzielników i mnożników prądów. Są one wspomagane układami elektronicznymi, sbliżającymi ich właściwości do wartości modelowych. Zwiększenie dokładności mostka można osiągnąć przez udoskonalenie konstrukcji tych układów.

Mostek byž projektowany i sbudowany jako układ o liczalnym błędzie, bez elementów umożliwiających adiustację. Taka metoda może i powinna być stosowana przy projektowaniu i konstrukcji innych układów do pomiaru najdokładniejszych wzorców impedancji.

# LITERATURA

- Deacon T.A., Hill J.J.: Two-stage anductive voltage dividers. Proc. of IEE, June 1968, vol. 115, nr 6.
- [2] Hill J.J., Miller A.P.: A seven-decade adjustable-ratio inductively--coupled voltage divider with 0,1 ppm accuracy. Proc. of IEE, March 1962. vol. 109 B, nr 44.
- [3] Zatka A., Met A.: Bezdotykowy miernik natężenia prądu zmiennego o znikomym oddziażywaniu na badany obiekt. PAK nr 6, 1981.

- [4] Met A.: Analiza błędów transformatorowych wzorców przekładni. Mat.XVI Konf. Metrol., Wyd. Pol. Lubelskiej, seria C nr 11, Lublin 1983.
- [5] Met A.: Układ aktywny redukujący prąd magnesujący zwłeszcza dla transformatora pomiarowego. Pat. PRL 124 054.
- [6] Met A.: Układy elektroniczne do minimalizacji błędów transformatorowych wzorców przekładni. Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej. Elektryka nr 92, Gliwice 1984.
- [7] Met A., Łatka A.: Układ aktywny redukujący prąd magnesujący w transformatorach pomiarowych. PAK, nr 12, 1981.
- [B] Skubis T.: Calibration of the precise inductive current divider. Mat. konf. EMISCON 81, Strbske Pleso, Czechosłowacja, 1981.
- [9] Sorokowski S. (red.): Wybrane zagadnienia miernictwa elektronicznego. PKNMiJ, Warszawa 1978.

Recenzent: doc. inż. Światozar Sorokowski

Wpłynężo do Redakcji dnia 15.XI.1983 r.

МОСТ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИИ ОБРАЗЦОВЫХ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

#### Резюме

В статье представляются проблемы конструирования моста для измерения индуктивности в диапазоне 1 µН ... 1 Н при частоте 1 кГц с неточностью меньшей, чем ±0,01%. Мост был разработан используя системы точных двусердечниковых делителей и автотрансформаторов поддерживаемых электронными системами. Определяются главные источники одибок моста.

A BRIDGE FOR MEASURING INDUCTANCE STANDARDS

#### Summary

Problems of constructing a bridge for inductance measurements in the range 1  $\mu$ H ... 1 H at frequency 1 kHz and inaccuracy slower than  $\pm 0,01\%$  have been described. In the bridge some systems of precise two-stage dividers and autotransformers assisted with the electronic circuits have been applied. Main sources of bridge errors have been depicted.