

Andrzej MET

## UKŁADY ELEKTRONICZNE DO MINIMALIZACJI BŁĘDÓW TRANSFORMATOROWYCH WZORCÓW PRZEKŁADNI

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono koncepcję i zasady działania pięciu układów elektronicznych minimalizujących błędy transformatorowych wzorców przekładni prądowej i napięciowej, stosowanych w zakresie częstotliwości od kilku Hz do kilku kHz. Podano wyniki badań doświadczalnych.

### 1. Wprowadzenie

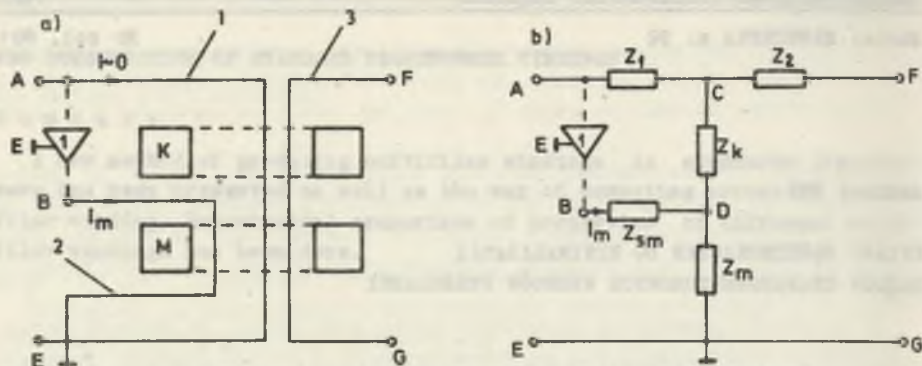
Błąd przekładni transformatora prądowego lub napięciowego określany jest jako różnica przekładni nominalnej, np. zwojowej i przekładni rzeczywistej [3]. Błąd przekładni zależy głównie od stosunku impedancji poprzecznych do szeregowych w schemacie zastępczym transformatora i jest do tego stosunku odwrotnie proporcjonalny [5]. Zmniejszenie błędu przekładni wymaga powiększenia impedancji poprzecznej i zmniejszenia impedancji szeregowej. Dobrej jakości materiały i odpowiednia technologia wykonania transformatora zapewniają stosunek impedancji poprzecznej do szeregowej rzędu kilku tysięcy [8]. Dalsze powiększenie tego stosunku może się odbyć przez zastosowanie elektronicznych układów aktywnych.

### 2. Układy powiększające impedancję poprzeczną

#### 2.1. Zakres średnich częstotliwości

Układ aktywny służący do powiększenia impedancji poprzecznej transformatora w paśmie od około 100 Hz do około 1000 Hz oparto na klasycznej konstrukcji dwurdzeniowej [1] (rys. 1a). Dotychczas analizowano układ [2], [4] przy użyciu schematu zastępczego nie uwzględniającego strat czynnych w rdzeniach magnetycznych. Ich uwzględnienie w analizie jest trudne. Proponuje się więc nowy schemat zastępczy (rys. 1b), którego przydatność została potwierdzona pomiarowo.

Warunkiem koniecznym funkcjonowania układu transformatora dwurdzeniowego są takie same liczby zwojów uzwojeń 1 i 2. Jeżeli punkty A i B zostaną zwarte, to przez uzwojenie 2 popłynie prąd magnesujący, który w rdzeniu M wytworzy strumień magnetyczny. Strumień ten wyindukuje w uzwojeniu 1 SEM mniejszą (o spadek napięcia) od napięcia zasilania. Prąd pły-



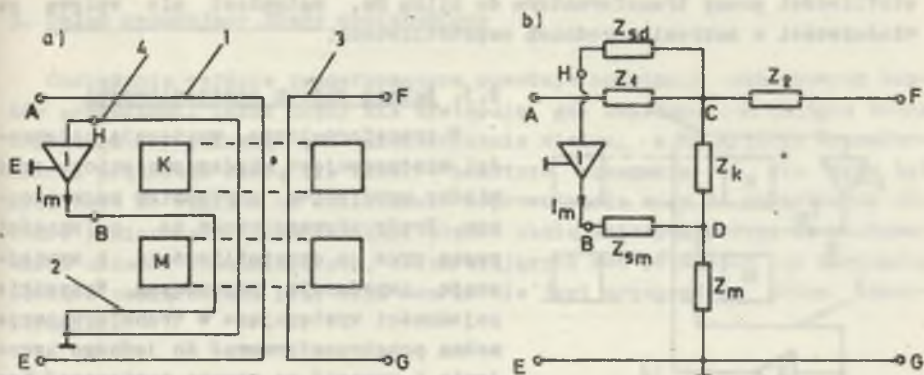
Rys. 1. Transformator dwurdźeniowy

a) schemat idealowy, b) schemat zastępczy ( $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_{sm}$  impedancje szeregowe uzwojeń 1, 3, 2;  $Z_k$ ,  $Z_{sm}$  impedancje poprzeczne związane z rdzeniami ko- rekcyjnym i magnesującym

nący w uzwojeniu 1 oraz strumień magnetyczny w rdzeniu K są bliskie zera, tzn. impedancja uzwojenia 1 jest bardzo duża. Zwarcie punktów A i B powoduje równoległe połączenie bardzo dużej impedancji uzwojenia 1 z niewielką impedancją uzwojenia 2, wobec czego efekt powiększenia impedancji na zaciskach wejściowych jest znikomo mały. Ogranicza to zastosowanie takiego transformatora do przypadków, w których występuje niezależne źródło zasilania uzwojenia 2 o napięciu zgodnym co do wartości i fazy z napięciem wejściowym. Ograniczenie to usunięto przez włączenie wejścia wtórnika napięciowego równoległe do zacisków transformatora (punkty A, E), zaś z jego wyjścia zasilono uzwojenie magnesujące (punkty B, E). Na wejściu transformatora jest w tym układzie wtórnik, który zapewnia zasilanie uzwojenia 2 napięciem zgodnym co do wartości i fazy z napięciem wejściowym oraz zapewnia dużą impedancję wejściową. Transformator tak wykonany ma impedancję wejściową, np. kilka MΩ dla  $f = 1$  kHz i może zapewnić dokładne przesłanie napięcia, natomiast nie zapewnia dokładnego przełożenia prądu.

Prąd płynący przez impedancję  $Z_1$  wytwarza na niej spadek napięcia i powiększa różnicę potencjałów między punktami A i C. Następstwem tego jest wzrost różnicy potencjałów między punktami C i D i wzrost prądu w gałęzi poprzecznej. Wejście wtórnika napięciowego powinno być w tym przypadku włączone między punkty C oraz E. Punkt C jest jednak fizycznie niedostępny. Problem ten rozwiązano nawijając na rdzeń dodatkowe uzwojenie detekcyjne 4 o takiej samej liczbie zwojów jak uzwojenie pierwotne 1 i magnesujące 2 [6]. Układ połączeń takiego transformatora przedstawiono na rys. 2a, a jego schemat zastępczy na rys. 2b [7].

Napięcie uzwojenia detekcyjnego podawane jest na wejście wtórnika. Ze względu na dużą impedancję wejściową wtórnika spadek napięcia na impedancji  $Z_{sd}$  jest bliski zera, czyli punkt B ma taki sam potencjał jak punkt C



Rys. 2. Transformator z elektronicznym układem powiększającym impedancję poprzeczną

a) schemat idealowy, b) schemat zastępczy ( $Z_{sd}$  impedancja szeregowo uszwojenia 4)

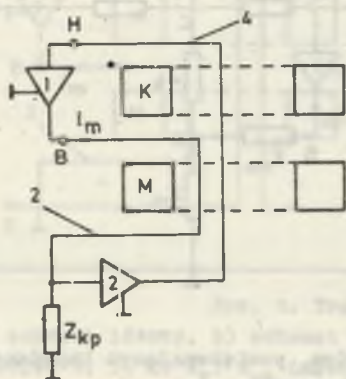
Napięcia na uzwojeniu detekcyjnym i magnesującym są jednakowe. Tak wykonany transformator zapewnia również mały błąd przekładni prądowej. Uzwojenie detekcyjne, magnesujące i wtórnik napięciowy mogą być oddzielone galwanicznie od uzwojenia pierwotnego i wtórnego obwodów pomiarowych. Uzwojenie detekcyjne musi mieć taką samą liczbę zwojów jak uzwojenie magnesujące. Uzwojenie pierwotne może mieć inną liczbę zwojów, ale tak dobraną, aby zapewnić optymalny zakres dynamiczny pracy wtórnika napięciowego. Przedstawiony na rys. 2 transformator z elektronicznym układem powiększającym impedancję poprzeczną pracuje dobrze w zakresie częstotliwości 100 ... 1000 Hz.

## 2.2. Zakres małych częstotliwości

W zakresie małych częstotliwości, np. kilku Hz, impedancja  $Z_m$  o charakterze indukcyjnym maleje, a prąd przez nią płynący różnie i wytwarza duże spadki napięcia na impedancji szeregowo  $Z_{sm}$  (o charakterze rezystancyjnym) uzwojenia magnesującego. Powiększa się błąd przekładni, ponieważ wzrasta różnica pomiędzy napięciem na impedancji  $Z_m$  i napięciem na uzwojeniu detekcyjnym. Aby napięcia te wyrównać, zastosowano układ przedstawiony na rys. 3.

W szereg z uzwojeniem magnesującym włączono impedancję  $Z_{kp}$  równą impedancji szeregowo  $Z_{sm}$  uzwojenia magnesującego. Spadek napięcia na impedancji  $Z_{kp}$  (taki sam jak na  $Z_{sm}$ ) jest wzmacniany dokładnie dwukrotnie i dodawany do napięcia indukowanego na uzwojeniu detekcyjnym. W efekcie takiego rozwiązania napięcie na impedancji  $Z_m$  jest takie samo jak na uzwojeniu detekcyjnym, a napięcie wyjściowe wzmacniacza kompensuje spadki napięcia na impedancjach  $Z_{sm}$  i  $Z_{kp}$ . Układ ten rozszerza dolny zakres czę-

stotliwości pracy transformatora do kilku Hz, natomiast nie wpływa na właściwości w zakresie średnich częstotliwości.

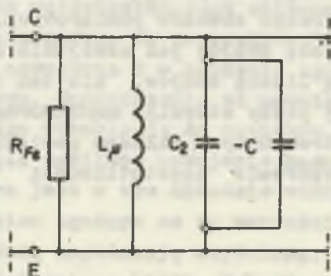


Rys. 3. Schemat ideowy układu kompensującego impedancję  $Z_{sm}$

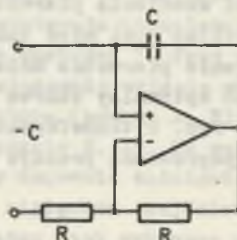
### 2.3. Zakres dużych częstotliwości

W transformatorze występują pojemności międzyzwojowe, międzyuzwojeniowe oraz między uzwojeniem a rdzeniem magnetycznym. Prądy płynące przez te pojemności rosną wraz z częstotliwością i zmniejszają impedancję poprzeczną. Wszystkie pojemności występujące w transformatorze można przetransformować do jednego uzwojenia i wyrazić za pomocą zastępczej pojemności  $C_z$  transformatora, połączonej w schemacie zastępczym równolegle do danego uzwojenia (rys. 4a). Wartość pojemności zastępczej  $C_z$  jest zależna zarówno od przestrzennego rozkładu uzwojeń, jak i od rozkładu potencjałów. Na rys. 4b

a)



b)



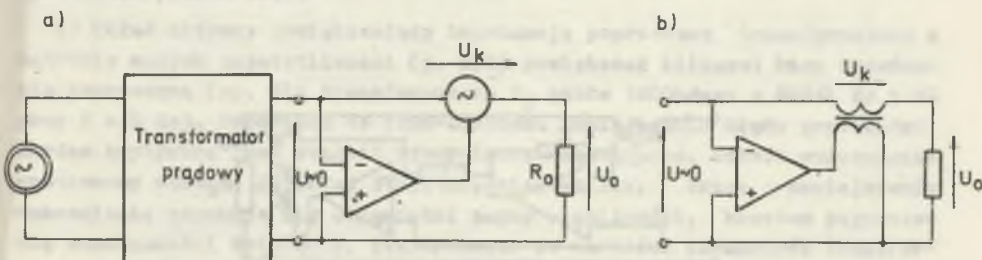
Rys. 4. Kompensacja pojemności wewnętrznych transformatora

a) schemat ideowy, b) układ elektroniczny realizujący ujemną pojemność

przedstawiony jest układ elektroniczny symulujący ujemną pojemność. Połączenie ujemnej pojemności o wartości równej pojemności zastępczej transformatora równolegle z uzwojeniem powoduje skompensowanie wpływu pojemności uzwojeń transformatora. Wzrasta impedancja poprzeczna i zmniejszają się błędy przekładni w zakresie dużych częstotliwości (do kilku kHz). Pojemność zastępcza  $C_z$  jest funkcją przekładni. Przedstawioną metodę można łatwo wykorzystać w transformatorach o stałej przekładni. Rozwiązanie zagadnienia przełączania pojemności kompensującej w transformatorach o zmiennej przekładni jest trudne w realizacji.

### 3. Układ redukujący błędy obciążeniowe

Obciążenie wyjścia transformatora powoduje powstanie dodatkowych błędów przekładni. Takie błędy nie występują, gdy impedancja na wyjściu transformatora napięciowego jest nieskończenie wielka, a na wyjściu transformatora prądowego równa się zero. W praktyce wymagania te nie mogą być spełnione ze względu na konieczność doprowadzania mocy do połączonych obwodów pomiarowych. Idea redukcji błędów obciążeniowych polega na zastosowaniu układów wzmacniających, dostarczających moc potrzebną do zasilania obwodów pomiarowych, przy czym moc ta nie jest przenoszona przez transformator.

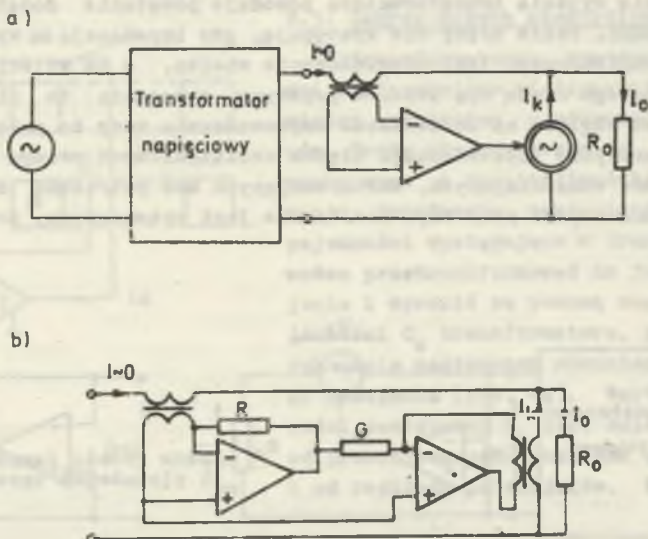


Rys. 5. Układ redukujący błędy obciążeniowe transformatora prądowego  
 a) schemat ideowy, b) praktyczna realizacja

Schemat blokowy układu redukcji błędów transformatora prądowego przedstawiono na rys. 5a. Do zacisków wyjściowych transformatora prądowego przyłączone jest wejście wzmacniacza. Sygnał wyjściowy ze wzmacniacza generuje napięcie o fazie przeciwnej do napięcia występującego na impedancji obciążenia. W wyniku ujemnego sprzężenia zwrotnego napięcie na wyjściu transformatora jest bliskie zero, co odpowiada pozornemu zwarciu jego zacisków wyjściowych. Praktyczna realizacja tego układu przedstawiona jest na rys. 5b.

Schemat blokowy układu redukującego błąd obciążeniowy transformatora napięciowego przedstawiono na rys. 6a. Szeregowo z obwodem wtórnym transformatora włączono czujnik prądowy. Sygnał wyjściowy z czujnika jest wzmacniany za pomocą wzmacniacza, który steruje źródłem prądowym. Źródło to dostarcza prąd obciążenia, a prąd wtórny transformatora ma wartość bliską zero, co odpowiada pozornej przerwie na zaciskach wyjściowych. Praktyczna realizacja tego układu przedstawiona jest na rys. 6b. Czujnik prądowy wykonany jest w postaci przekładnika prądowego. Z wyjściem czujnika połączony jest przetwornik prądu na napięcie o transrezystancji równej  $R$ . Napięcie z wyjścia przetwornika podawane jest na wejście przetwornika napięcia na prąd o transkonduktancji  $G$ . Prąd wyjściowy z przetwornika transformowany jest do obwodu obciążenia. Pomędzy przetwornik prądu na napię-

cie i przetwornik napięcia na prąd można włączyć dodatkowy wzmacniacz napięciowy w celu powiększenia stopnia skompensowania.



Rys. 6. Układ redukujący błędy obciążeniowe transformatora napięciowego  
a) schemat idealny, b) praktyczna realizacja

#### 4. Wyniki badań doświadczalnych

Przedstawione układy elektroniczne zostały zbudowane, przebadane i zastosowane do poprawy właściwości metrologicznych transformatorów napięciowych i prądowych. Do badań doświadczalnych zastosowano transformatory z rdzeniami toroidalnymi swijanymi z taśmy permalowej o grubości 0,1 mm o danych:

- $T_1$  - wymiary rdzenia korekcyjnego i magnesującego: 50/30/10 mm.  
 - Uzwojenie detekcyjne i magnesujące: 100 swajów, drut Cu  $\phi$  0,5 mm.  
 - Uzwojenie pierwotne: dziesięciodrutowy przewód wstążkowy, 20 swajów, odstęp 1/10 uzwojenia.
- $T_2$  - wymiary rdzenia korekcyjnego i magnesującego 90/60/10 mm.  
 - Uzwojenie detekcyjne i magnesujące: 240 swajów, drut Cu  $\phi$  0,4 mm.  
 - Uzwojenie pierwotne: dziesięciodrutowy przewód wstążkowy, 38 swajów, odstęp 1/10 uzwojenia.

Opisane układy wykorzystano do budowy urzędów:

- a) transformatora podwyższającego prąd o przekładni 1:100 przy  $f = 1000$  Hz, o dopuszczalnym błędzie  $10^{-5}$ ,

- b) pięciodekadowego mnożnika prądu w układzie Kelvina-Varleya przy  $f = 1000$  Hz, o błędzie dopuszczalnym  $6 \cdot 10^{-6}$ ,
- c) precyzyjnego mostka do pomiaru indukcyjności przy  $f = 1000$  Hz o niedokładności  $10^{-5}$ .

Wyniki badań upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

1) Układ aktywny powiększający impedancję poprzeczną transformatora w zakresie średnich częstotliwości (p. 2.1) umożliwił kilkusetkrotne powiększenie impedancji poprzecznej (np. dla transformatora  $T_1$  około 800-krotnie z  $10$  k $\Omega$  na  $8$  M $\Omega$  przy  $f = 1000$  Hz). Odpowiada to 800-krotnemu zmniejszeniu błędu przekładni. Układ pracował stabilnie (nie miał tendencji do wzbudzania się).

2) Układ aktywny powiększający impedancję poprzeczną transformatora w zakresie małych częstotliwości (p. 2.2) powiększał kilkaset razy impedancję poprzeczną (np. dla transformatora  $T_2$  około 1200 razy z  $800$   $\Omega$  do  $1$  M $\Omega$  przy  $f = 8$  Hz). Odpowiada to 1200-krotnemu zmniejszeniu błędu przekładni. Bardzo krytyczna jest stałość wzmocnienia wzmacniacza. Jeżeli wzmocnienie przekroczy wartość 2, układ staje się niestabilny. Przez zmniejszenie wzmocnienia uzyskuje się odpowiedni zapas stabilności, kosztem pogorszenia skuteczności działania. Stwierdzono, że wartości parametrów transformatora i impedancja  $Z_{kp}$  muszą być stałe, aby układ pracował stabilnie. Szczególną wrażliwość wykazuje układ na zmianę rezystancji uzwojenia magnesującego. Zapas stabilności układu należy dobierać w zależności od stałości elementów.

3) Układ aktywny powiększający impedancję poprzeczną w zakresie dużych częstotliwości (p. 2.3) może zmniejszyć kilkadziesiąt razy prądy pojemnościowe uzwojeń transformatora (np. dla  $T_1$  20-krotnie). Dla transformatora  $T_1$  częstotliwość rezonansową gałęzi poprzecznej powiększył 4-krotnie (z  $800$  Hz do  $3500$  Hz). Ograniczeniem była konieczność zachowania odpowiedniego zapasu stabilności, która zależy głównie od stałości pojemności międzyuzwojeniowych.

4) Układ redukujący wpływ obciążenia zmniejsza kilkaset razy napięcie na wyjściu transformatora prądowego (np. dla  $T_1$  700 razy), natomiast w transformatorze napięciowym zmniejsza kilkadziesiąt razy prąd obciążenia (np. w  $T_1$  80 razy). Wymagania ze względu na stabilność układu ograniczają wzmocnienie wzmacniaczy.

5) Wyżej wymienione urządzenia (p. a), b), c)) pracują poprawnie i nie przekraczają założonych wartości błędów.

## 5. Wnioski

1. Skuteczność działania układów ograniczona jest ich stabilnością. Jedynie układ przedstawiony na rys. 2 jest zawsze stabilny.

2. Stabilność układów opisanych w p. 2.2 i 2.3 zależy od stałości elementów impedancyjnych użytych w tych układach oraz od stałości impedancji wewnętrznych transformatora.

3. Stabilność układów redukujących wpływ obciążenia zależy od transmutancji pętli sprzężenia zwrotnego. Zastosowanie rozbudowanych wzmacniaczy zawierających filtry synchroniczne, pozwala na dowolnie dużą redukcję wpływu obciążenia.

4. W zależności od zakresu częstotliwości można stosować układy, opisane w p. 2.1, 2.2, 2.3, pojedynczo lub wzajemnie połączone.

5. Wyniki pomiarów potwierdziły przydatność tych układów do budowy precyzyjnych transformatorów napięć i prądów.

6. Dalsze prace powinny być prowadzone w kierunku poprawy stabilności układów przedstawionych w p. 2.2 i 2.3 poprzez zmiany struktury układów, które uniezależniałyby stabilność od zmian impedancji.

#### LITERATURA

- [1] Brooks H.B., Holtz P.C.: The two-stage current transformer. Trans. Amer. Electr. Engrs., 1922, s. 382-393.
- [2] Deacon T.A., Hill J.J.: Two-stage inductive voltage dividers. Proc. IEE, 1968, t. 115, nr 6.
- [3] Dudziewicz J. red.: Etalony i precyzyjne pomiary wielkości elektrycznych. WKŁ, Warszawa 1982.
- [4] Jaskulski J.: Możliwości budowy dwurdzeniowych dzielników napięcia i ich zastosowania na przykładzie mostka Thomsona. Praca doktorska. IME Politechnika Wrocławska, Wrocław 1975.
- [5] Met A.: Analiza błędów transformatorowych wzorców przekładni. Materiały XVI Międzyuczelnianej Konferencji Metrologów, Lublin 1983.
- [6] Met A.: Układ aktywny redukujący prąd magnesujący zwłaszcza dla transformatora pomiarowego. Patent, 124054, 30.8.80.
- [7] Met A., Łatka A.: Układ aktywny redukujący prąd magnesujący w transformatorach pomiarowych. PAK, nr 12, 1981.
- [8] Petersons O.: A self - balancing high - voltage capacitance bridge. Trans. IEEE USA, IM 13, p. 216-24 1964.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Wojciech Fuliński

Wpłynęło do Redakcji dnia 15.XI.1983 r.



ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ОШИБОК  
ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ОБРАЗЦОВ ПЕРЕДАЧ

Р е з ю м е

В статье излагается концепция и принципы действия пяти электронных схем, минимизирующих ошибки трансформаторных образцов передач тока и напряжения применяемых в диапазоне частот от нескольких Гц до нескольких кГц. Даются результаты опытных исследований.

ELECTRONIC CIRCUITS TO MINIMIZE ERRORS  
OF STANDARD TRANSFORMER RATIO

S u m m a r y

The idea and principles of work of five electronic circuits to minimize errors of standard transformers of current and voltage ratio applied in the frequency range of a few Hz to a few kHz have been displayed. Results of the experiments have been given.