Seria: ELEKTRYKA z.114

Tadeusz SKUBIS Marian KAMPIK

Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej Politechniki Śląskiej

ANALIZA WYBRANYCH STRUKTUR KOMPARATORÓW DO SPRAWDZANIA GRUPOWYCH ETALONÓW IMMITANCJI

> Streszczenie. W artykule określono podstawowe wymagania stawiane komparatorom do sprawdzania grupowych wzorców immitancji oraz opisano cztery struktury komparatorów realizujących pomiar różnic składowych komparowanych immitancji. W układach wykorzystuje się indukcyjne dzielniki napięcia i prądu, które umożliwiają uzyskanie dużej precyzji pomiaru. Dwie analizowane struktury należą do komparatorów z wymuszeniem napięciowym i szczególnie nadają się do sprawdzania wzorców pojemności. Dwie pozostałe struktury należą do kompparatorów z wymuszeniem prądowym i nadają się do komparowania wzorców indukcyjności. Układy zapewniają bezpośredni i niezależny odczyt różnic obu składowych, niezależne równoważenie oraz niezależność od zmian napięcia zasilającego. Równania równowagi są niezależne od częstotliwości pod warunkiem użycia w torze równoważenia składowej biernej wzorca o takim samym charakterze, jak wzorce komparowane.

### 1. Wprowadzenie

Wzorcowanie etalonu grupowego wymaga komparacji z zewnętrznym etalonem odniesienia, a jego okresowe sprawdzanie polega na porównaniu między sobą (interkomparacji) jego elementów. W przypadku etalonów immitancji, w wyniku interkomparacji przy określonej częstotliwości otrzymuje się warto ści różnic składowych czynnych  $(d_{c,1})$  i biernych  $(d_{b,1})$  komparowanych immitancji F(1).

 $d_{0,1} = Re \left\{ \underline{P}_{1} - \underline{P}_{1} \right\}$  $d_{b,1} = In \left\{ \underline{P}_{1} - \underline{P}_{1} \right\}$ 

Równania (1) wymagają opracowania wg odpowiedniego algorytmu [1], [2]. W celu maksymalnego uproszczenia tego algorytmu interkomparacje powinny spełniać warunki:

- wynikiem pojedyńczej interkomparacji powinny być dwie różnice wartości bezwzględnych, dane równaniemi (1);
- wszystkie różnice danej składowej muszą się charakteryzować taką samą niepewnością;

1991

Ir kol. 1031

3) wagi przypisane elementom powinny być jednakowe.

Ponadto ze względu na dużą liczbę porównań przy utrzymeniu niezmiennego podstawowego układu warunków fizycznych czas interkomparacji powinien być minimalny, a obróbka wyników powinna być skomputeryzowana.

## 2. Wymagania stawiane strukturom układów interkomparacji

W celu spełnienia warunków uproszczenia algorytmu, struktura komparatora powinna mieć następujące właściwości:

- bezpośredni i niezależny odczyt różnic obu składowych komparowanych immitancji;
- niezależne równoważenie każdej składowej;
- niezeleżność od częstotliwości i napięcia zasilającego;
- możliwość współpracy z systemem mikroprocesorowym.

Przy interkomparacji etalonów o jednakowej wartości nominalnej nie jest potrzebna zmiana zakresów, co znacznie upraszcza konstrukcję. Ponieważ wartości wyznaczonych pomiarowo różnic d<sub>c.l</sub> i d<sub>b.l</sub> są relatywnie niewielkie w stosunku do wartości nominalnych komparowanych immitancji, więc nie jest potrzebna skrajnie duża dokładność ich wyznaczenia.

Do zbudowania komparatora immitancji spełniającego powyższe warunki nadają się struktury z indukcynymi dzielnikami napięcia i wspomagającymi układami elektronicznymi. Umożliwiają one realizację układów o dużej czułości i dokładności, mogą także być przystosowane do czteropunktowego dołączenia komparowanych elementów. Uwzględniając powyższe wymagania zaprojektowano cztery struktury komparatorów realizujących pomiar różnie obu składowych komparowanych immitancji.

## 3. Komparator immitancji z sumowaniem prądów w węźle

Układ składa się z precyzyjnego czterouzwojeniowego transformatora napięciowego (TN), źródła napięcia sinusoidalnego (G), detektora (D), dokładnych dzielników napięciowych (D1, D2) oraz dwóch jednomiarowych wzorców konduktancji ( $G_n$ ) i susceptancji ( $B_n$ ); (rys.1). Transformator TN jest zasilany z generatora przebiegu sinusoidalnego o dużej stałości amplitudy i częstotliwości oraz o minimalnej zawartości harmonicznych. Kapięcia U<sub>1</sub> oraz U<sub>2</sub> wymuszają przepływ prądów przez komparowane admitancje Y<sub>1</sub> = G<sub>1</sub> + jB<sub>1</sub> oraz Y<sub>2</sub> = G<sub>2</sub> + jB<sub>2</sub>. Różnica tych prądów w węźle W jest kompensowana prądami równoważącymi I<sub>c</sub> oraz I<sub>b</sub>. Prąd I<sub>c</sub> ma fazę zgodną lub przeciwną z fazą napięcia U<sub>1</sub>, a prąd I<sub>b</sub> ma fazę przesuniętą o +0,5% lub -0,5% w stosunku do fazy napięcia U<sub>1</sub>. W stanie równowagi układu potencjały punktów **H** oraz W są jednakowe, co wskazuje detektor zera D. W stanie równowagi suma prądów w węźle **H** wynosi:

$$\mathbf{I}_{1} - \underline{\mathbf{I}}_{2} + \underline{\mathbf{I}}_{0} + \underline{\mathbf{I}}_{b} = \Delta \underline{\mathbf{I}} = 0 \tag{2}$$

Stad otrzymuje się:

$$\underline{\underline{U}}_{2} (\underline{\underline{G}}_{2} + \underline{j}\underline{\underline{B}}_{2}) - \underline{\underline{U}}_{1} (\underline{\underline{G}}_{1} + \underline{j}\underline{\underline{B}}_{1}) = \underline{\underline{U}}_{c} \underline{\underline{G}}_{n} + \underline{j}\underline{\underline{U}}_{b}\underline{\underline{B}}_{n}$$
(3)

Zakładając U1 = U2 oraz wprowadzając oznaczenia przekładni:

$$k_{c} = U_{c} / U_{1} ; \qquad k_{b} = U_{b} / U_{1}$$
(4)

otrzymuje się z zależności (3) równania stanu równowagi układu:

$$\Delta \mathbf{G} = \mathbf{G}_2 - \mathbf{G}_1 = \mathbf{k}_c \mathbf{G}_n \tag{5}$$
$$\Delta \mathbf{B} = \mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1 = \mathbf{k}_b \mathbf{B}_n$$



Rys.1 Schemat komparatora immitancji z sumowaniem prądów w węźle Fig.1 Circuit diagram of the immittance comparator with zero current in summing point

77

T. Skubis

Wynikiem pomiaru są bezpośrednio różnice parametrów admitancyjnych komparowanych obiektów. Równoważnia układu dokonuje się przez zmianę przekładni k<sub>e</sub> i k<sub>h</sub> wielodekadowych dzielników indukcyjnych D1, D2.



Na rys.2 przedstawiono wykres wskazowy układu w stanie równowagi, według równania (2), dla przypadku komparacji impedancji indukcyjnych.

Istotną cechą tej struktury jest wykorzystanie prądów równoważących o fazach O (lub  $\pi$ ) i 0,5 $\pi$ (lub -0,5 $\pi$ ) względem napięć U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub>. Układ ten należy do grupy komparatorów immitancji z wymuszeniem napięciowym [4].

# 4. <u>Komparator immitancji z zastosowaniem</u> <u>MKP</u>

Rys.2 Wykres wskazowy komparatora z rys.1

Pig.2 Vector diagram of the comparator acc. to Fig.1

Układ ten różni się od opisanego w p. 3 zastosowaniem magnetycznego komparatora prądów przemiennych (MKP), w którym są sumowane przepływy prądowe (rys.3).

W stanie równowagi układu równanie przepływów MKP ma postać:

$$\underline{I}_{1} n_{1} - \underline{I}_{2} n_{2} + \underline{I}_{c} n_{c} + \underline{I}_{b} n_{b} = 0$$
 (6)

Stad otrzymuje się:

$$\underline{U}_{1} (\underline{G}_{1} + j\underline{B}_{1}) \underline{n}_{1} - \underline{U}_{2} (\underline{G}_{2} + j\underline{B}_{2}) \underline{n}_{2} + \underline{U}_{2} \underline{G}_{n} \underline{n}_{0} + j\underline{U}_{n} \underline{B}_{n} \underline{n}_{n} = 0 \quad (7)$$

Struktura ta umożliwia dokonanie komparacji etalonów o różnych wartościach nominalnych, przez odpowiedni dobór liczb zwojów  $n_c$ ,  $n_b$ ,  $n_1$  oraz  $n_2$ . Jeżeli ta właściwość nie jest potrzebna, to zakłada się  $n_c=n_b=n_1=n_2$  oraz  $\underline{U}_1=\underline{U}_2$ . Wprowadzając oznaczenia zdefiniowane równaniem (4), otrzymuje się dla tego układu równania stanu równowagi takie jak dla komparatora z sumowaniem prądów w węźle, tj. w postaci (5).

Na wykresie wskazowym (rys,4) przedstawiono przepływy składowe w rdzeniu EKP, w stanie równowagi układu. Składowe równoważące przepływu  $\Theta_{c}$  i  $\Theta_{b}$  mają kąty fazowe równe 0,5 Tk (k=0;1;2;3) względem napięcia  $\underline{U}_{1}$ . Jest to komparator immitancji z wymuszeniem napięciowym.

## 5. <u>Komparator immitancii z wislomiarowymi wzorcami równoważącymi</u>

Podstawowymi podzespołami układu są: generator G, detektor D, trójuzwojeniowy transformator napięciowy TN oraz dwa wielomiarowe wzorce  $R_n$  i  $X_n$  o małych wartościach i dużej rozdzielności (rys.5).



Rys.3 Schemat komparatora immitancji z wykorzystaniem MKP Fig.3 Circuit diagram of the immittance comparator based on magnetic current comparator

Wzorce rezystancji R<sub>n</sub> i reaktancji X<sub>n</sub> włączone w szereg z jedną z komparowanych impedancji umożliwiają zrównoważenie układu.

W stanie równowagi są spełnione równania:

$$\underline{I}_{1}(\underline{R}_{1} + j\underline{I}_{1}) = \underline{U}_{1}$$
<sup>(8)</sup>

$$I(R_{2} + jI_{2} + R_{n} + jI_{n}) = \underline{U}_{2}$$
<sup>(9)</sup>

Zakładając jednakowe wartości nominalne wzorców, można przyjąć warunek: U<sub>1</sub>= U<sub>2</sub>. Wtedy otrzymuje się równanie równowagi:

$$\Delta R = R_1 - R_2 = R_0$$

 $\Delta \mathbf{I} = \mathbf{I}_1 - \mathbf{I}_2 = \mathbf{I}_3$ 

(10)

Gdy różnica impedancji porównywanych wzorców jest niewielka, to wartości R<sub>n</sub> i X<sub>n</sub> są bardzo małe i niemożliwa jest ich realizacja w układzie biernych dekad impedancyjnych. Nawet zastosowanie układu opisanego w



Rys.4 Wykres wekazowy komparatore z rys.3. Komparowane immitancje mają charakter indukcyjny

Fig. 4 Vector diagram of the comparator acc. to Fig.3 Compared immittances are of inductive character pracy [3] nie daje zadawalających rezultatów. Wobec tego celowe jest zastosowanie regulacji stosunkowo dużych wartości R i X, które następnie są transformowane w znanym stosunku i dopiero przetransformowane wartości są włączone w gałąź komparatora.

Należy zauważyć, że napięcie równoważące  $\Delta U$  (rys.5) korzystnie jest rozłożyć na składową U równoległą do wektora I oraz składową U, prostopadłą do I. W takim przypadku składowe napięć U i U są proporcjonalne do składowych impedancji równoważącej R. I. Stan taki przedstawiono na rys.6 dla przypadku komparacji impedancji o charakterze indukcyjnym. Wynikiem porównania są różnice parametrów impedancyjnych komparowanych wzoroów. Układ należy do grupy komparatorów z wymuszeniem prądowym.

## 6. Komparator immitancji z kompensacja napiecia pierównowagi

Komparator ten (rys.7) jest zbudowany z precyzyjnego indukcyjnego dzielnika napięcia DN o bardzo dużej impedancji wejściowej, dwu przekładników prądowych TP1, TP2, realizujących wielodekadowe przełożenie prądu z dużą dokładnością, dwu jednomiarowych wzorców: rezystancji  $R_{\rm n}$  i reaktancji  $X_{\rm n}$  oraz generatora G i detektora D. Obwód prądu głównego I zamyka : się przez punkty A,W,B,C przy czym spadek napięcia między punktami B i C jest niewielki. Na skutek różnic rezystancji i reaktancji komparowanych wzorców występuje różnice potencjałów między punktami D i W, która jest kompensowana dodatkowym napięciem AU. Prądy I i I<sub>b</sub>, proporcjonalne do prądu płynącego przez komparowane wzorce, powodują wystąpienie na wzorcach  $R_{\rm n}$  i  $X_{\rm n}$  składowych dodatkowego napięcia AU. przy założeniu że TP1, TP2 oraz DN są idealne oraz że U = U<sub>2</sub>, równania stanu równowagi mają postać następującą:

$$\Delta R = R_1 - R_2 = 2k_0R_n$$

 $\Delta \mathbf{I} = \mathbf{I}_1 - \mathbf{I}_2 = 2\mathbf{k}_{\mathbf{b}}\mathbf{I}_{\mathbf{b}}$ 



Rys.5 Schemat komparatora immitancji z równoważeniam impedancyjnym Fig.5 Circuit diagram of the immittance comparator with impedance balancing



Rys.6 Wykres wekazowy komparatora z rys.5 Fig.6 Vector diagram of the comparator acc. to Fig.5

Na wykresie wskazowym (rys.8) napięcie kompensujące napięcie nierównowagi jest złożone ze składowej synfazowej i prostopadłej do prądu I płynącego przez komparowane wzorce. ] Wynikiem porównania są różnice parametrów impedancyjnych komparowanych wzorców. Układ należy do grupy komparatorów z wymuszeniem prądowym.

# 7. Wnioski

Przedstwione struktury układów mogą być wykorzystane do sprawdzania grupowych wzorców immitancji. Spełniają one warunki bezpośredniego i niezależnego odczytu różnic obu składowych komparowanych wzorców, niezależnego równoważenia każdej składowej oras niezależności od smian napięcia zasilającego.

81



Rys.7 Schemat komparators immitancji z kompensacją napięcia nierównowagi Pig.7 Circuit of the immittance comparator with compensation of unbalance voltage



Rya.8 Wykres wakazowy komparatora z rys.7. Komparowane immitancje mają charakter indukcyjny

Fig.8 Vector diagram of the comparator acc. to Fig.7. Compared immittances are of inductive character

#### Analiza wybranych struktur ....

Równania równowagi układu są niezależne od częstotliwości pod warunkiem użycia w torze równoważenia składowej biernej wzorca o takim samym charakterze, jak komparowane wzorce. Struktury o wymuszeniu napięciowym szczególnie nadają się do komparacji grupowych wzorców pojemności, a struktury o wymuszeniu prądowym są korzystniejsze przy porównaniach wzorców indukcyjności własnej.

### LITERATURA

- [1] Dudziewicz J.(red.): Etalony i precyzyjne pomiary wielkości elektrycznych. WKŁ, Warszawa 1982
- [2] Klarner-Sniadowska M.: Metoda pomiarów etalonów grupowych zastosowana do odtwarzania jednostki indukcyjności. Prace Nauk. IME Pol. Wr. nr 28, seria: Konf. nr 12, Wrocław 1986
- [3] Kuryłowicz J.: Wybrane działy elektrycznego miernictwa precyzyjnego. Wyd. Pol. Wr. Wrocław 1971
- [4] Miłek M.: Komparatory immitancji. Z.N. Pol. Śl. KLEKTRYKA, nr92, Gliwice 1984

Recenzents: doc. dr hab. inż. Jerzy Jaskulski

Wpłynęło do Redakcji dnia 21 listopada 1988 r.

#### АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ СТРУКТУР КОМПАРАТОРОВ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ГРУШЮВЫХ ЗТАЛОНОВ ИММИТАНСА

#### Pespxe

В статье определены основные требования для конотрукции компараторов предназначеных для проверки групповых втаконов имитанса. Описаны четыре структуры компараторов, производящих измерения разниц составляющих иммитанса. В системах используются индуктивные делители напряжения и тока, позваязощие получать измерения больной точности. Две анализируемые структуры принадлежат к илассу компараторов с иёстиям напряжением и особенно пригодны да сравнивания этаконов ёмкости. Две оотакьные структуры принадлежат и иласоу компараторов с токовым воздействием и могут быть использованы для сравнивания этаконов ёмкости. Две оотакьные структуры принадлежат и иласоу компараторов с токовым воздействием и могут быть использованы для сравнивания этаконов индуктивности. Снотемы обеспечивают непосредствеиное и независимое вооприятие разниц двух составлящих независимо уравновеленных, а также обеспечивают независимость от питающего напряжения. Уравнения биланся независимы от частоты, когда в цели уравновенивания безвозвратной составлящей используется стандаря такого не израктера, как и инмердение этаклоны.

### THE ANALYSIS OT SOME COMPARATOR CIRCUITS DESIGNED FOR CHECKING IMMITTANCE GROUP STANDARDS

### Summary

Basic requirements for comparators assigned to checking the immittance group standards have been defined in the paper.

Four different comparator circuits especially designed for the measurement of immittance components, both in-phase and quadrature, have been described. High measuring accuracy can be achieved, because the ciruits are based on inductive voltage and current dividers. The two circuits presented belong to comparators with forced voltage and are particulary suitable for checking the capacitance standards. The other two circuits belong to comparators with forced current and are suitable for comparison of the inductance standards.

The circuits provide direct and independent difference reading of both components, independent balance and independence of supply voltage variations. The balance equations are independent of the frequency, provided that the quadrature component of the standard used in the balance circuit is of the same character as the standards being compared.