

Mariusz KRAJEWSKI

UNIwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii Elektrycznej

## Wpływ przełącznika kontaktronowego na dokładność pomiaru zespolonego stosunku napięć

Mgr inż. Mariusz KRAJEWSKI

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Zielonogórskiej (2001). Od października 2001 asystent w Instytucie Metrologii Elektrycznej Uniwersytetu Zielonogórskiego. Zainteresowania: komputerowe systemy pomiarowe, przetwarzanie sygnałów i doświadczalna weryfikacja wyników symulacji.



e-mail: M.Krajewski@ime.uz.zgora.pl

### Streszczenie

W pracy przedstawiono analizę właściwości skonstruowanego przełącznika kontaktronowego zastosowanego w układzie do dokładnego pomiaru zespolonego stosunku napięć. Dla rzeczywistego przełącznika kontaktronowego opracowano schemat zastępczy do badań symulacyjnych. Analizowano wpływ parametrów przełącznika na dokładność pomiaru stosunku napięć przemiennych. Na podstawie przeprowadzonych symulacji komputerowych oszacowano między innymi wartości maksymalnych błędów przetwarzania amplitud sygnałów sinusoidalnych oraz przesunięcia fazowego między nimi przez przełącznik.

**Słowa kluczowe:** przełącznik kontaktronowy, zespolony stosunek napięć.

### The influence of reed switch to accuracy of complex voltage ratio measurement

#### Abstract

In the paper the analysis of constructed reed switch applied in circuit to precision measurement of complex voltage ratio was presented. A substitute diagram of the switch for simulation was elaborated. In simulation tests an analysis of the switch influence to accuracy of complex voltage ratio measurement was made. Maximum processing errors of sinusoidal signals amplitudes and phase shift between signals was evaluated.

**Keywords:** reed switch, complex voltage ratio.

### 1. Wstęp

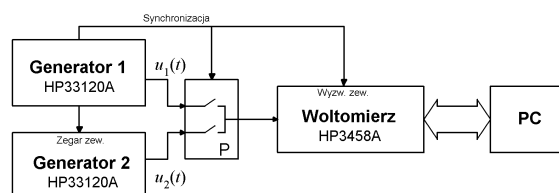
Coraz bardziej popularne stają się metody pomiarowe oparte na próbkowaniu, przy użyciu których na podstawie próbek sygnałów, z zastosowaniem odpowiedniego algorytmu cyfrowego przetwarzania sygnału, można wyznaczyć na przykład wartość skuteczną napięcia czy zespolony stosunek napięć. Wyniki prowadzonych w tym obszarze prac wskazują na możliwość pomiaru napięć z niepewnością na poziomie od pojedynczych do dziesiątych części ppm [1, 2, 3, 4]. Są to pomiary o bardzo dużych dokładnościach, które wykonywane są między innymi w laboratoriach kalibracyjnych. Z punktu widzenia rozwoju takich metod pomiarowych istotna jest zatem analiza metrologiczna zarówno możliwych do zastosowania układów pomiarowych, jak i algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów.

Przedstawiany artykuł dotyczy problematyki dokładnego wyznaczenia zespolonego stosunku napięć sinusoidalnych w zakresie częstotliwości do 1 kHz, które jest wymagane między innymi w pomiarach impedancji, mocy czy przekładni dzielników indukcyjnych. Na rysunku 1 przedstawiono uproszczony schemat analizowanego układu do pomiaru stosunku dwóch napięć przemiennych z wykorzystaniem generatorów HP33120A, przełącznika kontaktronowego P i woltomierza HP3458A. Woltomierz HP3458A zastosowano ze względu na bardzo dużą dokładność próbkowania integracyjnego i kwantowania sygnałów z rozdziel-

nością nawet do 28 bitów. Cyfrowe reprezentacje sygnałów wysyłane są z woltomierza do komputera, w którym z zastosowaniem na przykład dyskretnego przekształcenia Fouriera można wyznaczyć zespolony stosunek napięć [5], określony zależnością:

$$\underline{K}_U = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{m1}}{U_{m2}} \cdot e^{j(\psi_1 - \psi_2)} = K_U \cdot e^{j\varphi}, \quad (1)$$

gdzie:  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  – fazy początkowe napięć sinusoidalnych o amplitudach  $U_{m1}$  i  $U_{m2}$ ,  $K_U$  – moduł zespolonego stosunku napięć,  $\varphi$  – argument zespolonego stosunku napięć.



Rys. 1. Uproszczony schemat układu pomiarowego  
Fig. 1. Simplified diagram of the measuring circuit

Źródłami błędów pomiaru stosunku napięć są między innymi generatory, przełącznik kontaktronowy P, woltomierz czy algorytm cyfrowego przetwarzania sygnałów. Wszystkie te elementy wymagają analizy istotności wpływu na wynik pomiaru. Wyniki takich badań mogą określić, które z tych elementów wnoszą największe błędy do pomiaru stosunku napięć. Wiadomo wówczas, dążąc do zwiększenia dokładności pomiaru, co w pierwszej kolejności należy zmienić lub poprawić w układzie pomiarowym.

W pracy skupiono się na przełączniku kontaktronowym P, który służy do komutacji napięć z dwóch generatorów. Element ten ma wpływ na dokładność pomiaru zespolonego stosunku napięć, dlatego zdecydowano się zbudować go z dwóch kontaktronów między innymi ze względu na ich małą rezystancję w stanie włączenia, czy brak prądu upływu w porównaniu z przełącznikami półprzewodnikowymi. Jednak, aby ostatecznie określić przydatność skonstruowanego przełącznika kontaktronowego, wymagane są analizy jego właściwości.

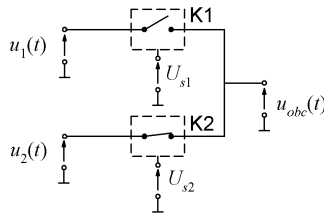
W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych wpływu właściwości przełącznika kontaktronowego na dokładność pomiaru zespolonego stosunku napięć. Oszacowano między innymi wartości maksymalnych błędów przetwarzania przełącznika, które w dalszym etapie pracy zostaną wykorzystane do sporządzenia budżetu niepewności pomiaru stosunku dwóch napięć.

### 2. Przełącznik kontaktronowy

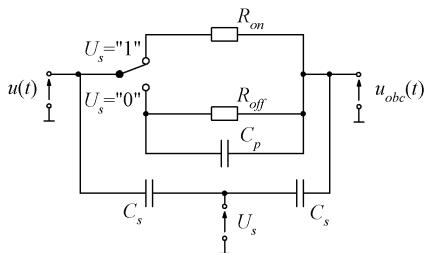
Na rysunku 2 przedstawiono uproszczony schemat skonstruowanego przełącznika, w którym występują dwa kontaktrony K1 i K2 (przełączniki kontaktronowe DSS41A05B), sterowane odpowiednio z pomocą napięć  $U_{s1}$  i  $U_{s2}$ . Sterowanie odbywa się w taki sposób, aby na wyjście przełącznika przekazywane było na przemian napięcie wejściowe  $u_1(t)$  i  $u_2(t)$ . Poza tym w badaniach przyjęto, że czas trwania stanu włączenia i wyłączenia dla obu kontaktronów jest równy okresowi sygnałów z generatorów.

W celu przeprowadzenia analizy właściwości skonstruowanego przełącznika kontaktronowego opracowano jego schemat zastępczy. Dla każdego z dwóch zastosowanych kontaktronów przyjęto schemat zastępczy przedstawiony na rysunku 3 [6]. Wartości parametrów schematu zostały zaczerpnięte z danych katalogowych przełącznika kontaktronowego DSS41A05B. Zgodnie z tymi

danymi rezystancja w stanie włączenia kontaktronu ( $U_s="1"$ ) wynosi  $R_{om} \leq 150 \text{ m}\Omega$ . Natomiast w stanie wyłączenia ( $U_s="0"$ ) rezystancja między stykami  $R_{off}$  ma wartość nie mniejszą niż  $10 \text{ G}\Omega$ , typowo  $1000 \text{ G}\Omega$ . Poza tym, między stykami kontaktronu występuje pojemność  $C_p \leq 1 \text{ pF}$  i między cewką a stykami pojemność  $C_s \leq 2 \text{ pF}$ . Ze względu na brak danych o napięciu termoelektrycznym w schemacie nie uwzględniono siły elektromotorycznej między stykami kontaktronu.



Rys. 2. Uproszczony schemat przełącznika kontaktronowego  
Fig. 2. Simplified diagram of reed switch



Rys. 3. Schemat zastępczy przekaźnika kontaktronowego  
Fig. 3. Substitute diagram of reed relay

### 3. Badania symulacyjne przełącznika kontaktronowego w układzie do pomiaru zespolonego stosunku napięć

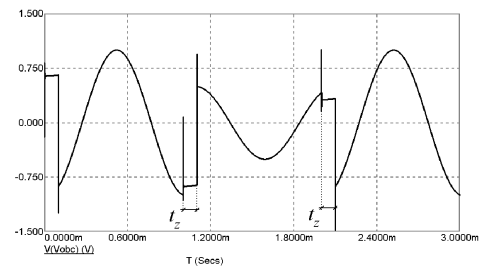
Badania symulacyjne przełącznika kontaktronowego przeprowadzono w pakiecie symulacyjnym Micro-Cap. Dokładność otrzymanych wyników badań została zweryfikowana w programie MathCad, w którym wykonano obliczenia obwodu pomiarowego na liczbach zespolonych. Program Mathcad umożliwił dokładniejsze obliczenie błędów przetwarzania przesunięcia fazowego przez przełącznik kontaktronowy. W związku z tym w pracy przedstawiono wyniki błędów fazowych otrzymane tylko w tym programie.

Analizę właściwości przełącznika kontaktronowego przeprowadzono w oparciu o układ pomiarowy, którego uproszczony schemat przedstawiono na rysunku 1. W analizie tej, poza wymienionymi już parametrami przełącznika, uwzględniono także wartości parametrów generatorów, woltomierza i przewodów koncentrycznych.

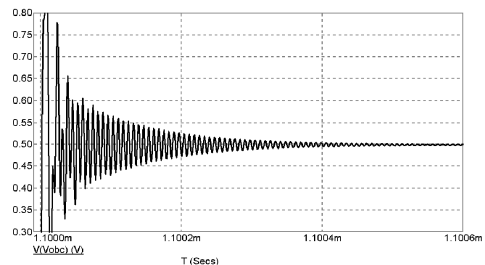
Przeprowadzone badania właściwości przełącznika można ogólnie podzielić na dwie części. W pierwszej części przeprowadzono badania symulacyjne mające na celu określenie stanów przejściowych występujących w napięciu wyjściowym przełącznika i czasu ich trwania. Na tej podstawie można stwierdzić po jakim czasie od momentu zmiany stanów kontaktronów należy próbować napięcie. Przyczyną pojawiania się stanów przejściowych są przełączenia kontaktronów, zmieniające się napięcia sterujące i komutowane. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy oscylogram napięcia wyjściowego przełącznika. W przebiegu tym widoczne są komutowane napięcia generatorów o częstotliwości  $1 \text{ kHz}$  i amplitudach  $1 \text{ V}$  oraz  $0,5 \text{ V}$ . Natomiast stany przejściowe występują między przebiegami sinusoidalnymi, w których dostrzec impulsy szpilkowe powstające przy zmianie napięć sterujących  $U_{s1}$  i  $U_{s2}$ . Widoczne na wykresie czasy trwania stanów przejściowych odpowiadają przyjętemu w symulacjach czasowi załączania kontaktronów ( $t_z=0,1 \text{ ms}$ ). Stany przejściowe trwają jednak dłużej, ponieważ po czasie  $t_z$  występują jeszcze oscylacje

(rysunek 5). Czas tych oscylacji wynosi około  $2 \mu\text{s}$  dla błędów ustalania napięcia równego  $1 \mu\text{V}$ , więc jest praktycznie pomijalnie mały, w stosunku do przyjętej wartości  $t_z$ .

W przypadku kontaktronów występuje także zjawisko drgania styków, które nie zostało uwzględnione w badaniach symulacyjnych. Stąd należy przyjąć, że czas trwania stanu przejściowego napięcia może trwać tak długo ile wynosi całkowity czas załączania kontaktronów podany przez producenta (typ.  $0,25 \text{ ms}$ , max.  $0,5 \text{ ms}$ ). Według zapewnień producenta w tym czasie ustają także drgania styków kontaktronu. Wobec powyższego próbkowanie napięcia woltomierzem należy wykonywać w stanie ustalonym przełącznika, po zaniku drgań styków kontaktronu.



Rys. 4. Przykładowy oscylogram napięcia na wyjściu przełącznika w symulowanym układzie pomiarowym z woltomierzem  
Fig. 4. Voltage oscillogram at the switch output in simulated measurement circuit with voltmeter

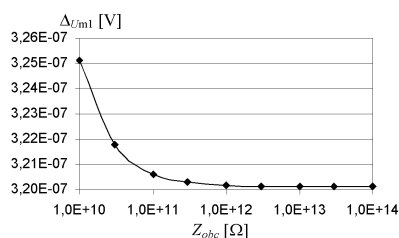


Rys. 5. Oscylacje napięcia na wyjściu przełącznika  
Fig. 5. Voltage oscillations at the output of switch

Druga część przeprowadzonych badań symulacyjnych miała na celu określenie jakie wartości błędów przetwarzania przełącznika wystąpią w sytuacji, gdy napięcie wyjściowe będzie próbkowane w stanie ustalonym. W stanie ustalonym występuje przebieg zmienny (sinusoidalny), więc elementy pasywne układu pomiarowego, mają wpływ na dokładność przetwarzania określonego napięcia wyjściowego. W kolejnych badaniach wyznaczono maksymalne błędy przetwarzania amplitud sygnałów  $U_{m1}$  i  $U_{m2}$  oraz maksymalne błędy przetwarzania przesunięcia fazowego  $\varphi$  między tymi sygnałami. Jako błąd amplitudy napięcia ( $\Delta U_{m1}$  lub  $\Delta U_{m2}$ ) przyjęto różnicę między amplitudą sygnału na wyjściu przełącznika i odpowiadającą mu amplitudą napięcia źródła. Jako błąd przesunięcia fazowego  $\Delta\varphi$  przyjęto różnicę przesunięć fazowych między sygnałami na wyjściu i wejściu przełącznika kontaktronowego.

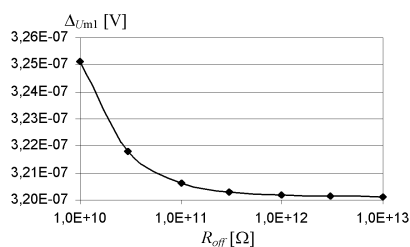
Wymienione wyżej wartości elementów schematu zastępczego przełącznika kontaktronowego nie są precyzyjnie określone. Nie jest więc możliwe dokładne odwzorowanie jego rzeczywistych parametrów. Można jednak, na podstawie badań symulacyjnych, określić największe błędy przetwarzania przełącznika dla zakresu wartości parametrów podanych przez producenta przekaźników kontaktronowych. Stąd na podstawie wyników szeregu symulacji określono między innymi, że największe błędy przetwarzania przełącznika kontaktronowego występują dla  $C_p=1 \text{ pF}$ ,  $C_s=2 \text{ pF}$ ,  $R_{om}=150 \text{ m}\Omega$ . Liczba parametrów wpływających na dokładność przetwarzania napięć jest jednak większa. Przeanalizowano więc dodatkowo wpływ częstotliwości napięć generatorów, impedancji wejściowej woltomierza  $Z_{obs}$ , rezystancji kontaktronów w stanie

wyłączenia  $R_{off}$  oraz wartości mierzonych amplitud sygnału  $U_{m1}$  i  $U_{m2}$  w zakresie do 1V na dokładność przetwarzania przełącznika kontaktronowego. Badania symulacyjne wykonano w przyjętym zakresie od 10Hz do 1 kHz. Największe błędy przetwarzania przełącznika kontaktronowego otrzymano dla 1 kHz, co wynika z występujących pojemności pasożytniczych w jego schemacie zastępczym. Dla tej częstotliwości wykonano kolejne analizy uwzględniając otrzymane wcześniej wartości pojemności oraz rezystancji kontaktronów w stanie włączenia. Na rysunku 6 i 7 przedstawiono przykładowe wykresy błędów przetwarzania amplitudy sygnału  $U_{m1}$  w funkcji odpowiednio impedancji wejściowej woltomierza i rezystancji między stykami kontaktronów dla  $U_{m1}=1V$ ,  $U_{m2}=1V$ . Przedstawione wykresy wskazują, że im większa jest rezystancja kontaktronu w stanie wyłączenia i impedancja wejściowa woltomierza, tym mniejsze są błędy. Ponieważ badania wykonano w zakresie danych katalogowych woltomierza i przekładników można więc ogólnie stwierdzić, że największe błędy przetwarzania amplitud sygnałów  $U_{m1}$  i  $U_{m2}$  przez przełącznik kontaktronowy otrzymuje się dla  $Z_{obc}=10\text{ G}\Omega$  oraz  $R_{off}=10\text{ G}\Omega$ .



Rys. 6. Błąd przetwarzania amplitudy  $U_{m1}$  w funkcji impedancji  $Z_{obc}$  dla  $R_{off}=10\text{ G}\Omega$

Fig. 6. Amplitude  $U_{m1}$  processing error as a function of impedance  $Z_{obc}$  for  $R_{off}=10\text{ G}\Omega$

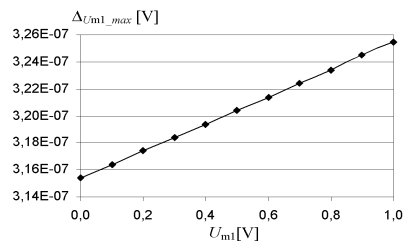


Rys. 7. Błąd przetwarzania amplitudy  $U_{m1}$  w funkcji rezystancji  $R_{off}$  dla  $Z_{obc}=10\text{ G}\Omega$

Fig. 7. Amplitude  $U_{m1}$  processing error as a function of resistance  $R_{off}$  for  $Z_{obc}=10\text{ G}\Omega$

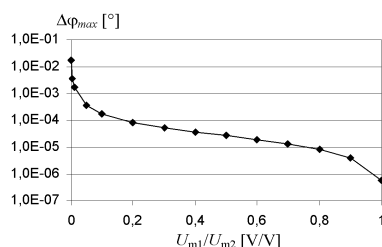
Błędy przetwarzania zależą także od wartości amplitud przetwarzanych sygnałów. Dla przyjętych warunków  $Z_{obc}=10\text{ G}\Omega$ ,  $R_{off}=10\text{ G}\Omega$  na rysunku 8 przedstawiono wykres maksymalnego błędu  $\Delta U_{m1\_max}$  w funkcji amplitudy  $U_{m1}$  dla  $U_{m2}=1\text{ V}$ . Pokazany wykres to wynik szeregu analiz parametrów układu przełącznika, który został wyodrębniony w celu wyznaczenia maksymalnego błędu przetwarzania amplitud komutowanych napięć. Z przedstawionego wykresu można odczytać jego wartość  $\Delta U_{m1,2\_max} \approx 0,33\text{ }\mu\text{V}$  dla amplitud  $U_{m1}$  i  $U_{m2}$  równych 1 V.

W celu wyznaczenia maksymalnego błędu przetwarzania przesunięcia fazowego między sygnałami z generatorów, powodowanego przez przełącznik, wykonano podobne badania jak przy wyznaczaniu błędów amplitud sygnałów. Maksymalny błąd przesunięcia fazowego otrzymano także dla  $Z_{obc}=10\text{ G}\Omega$  oraz  $R_{off}=10\text{ G}\Omega$ . Na rysunku 9 przedstawiono wykres tego błędu w funkcji stosunku amplitud przetwarzanych sygnałów. Przedstawione wyniki wskazują, że przy dużym stosunku napięć powstaną bardzo znaczące błędy przetwarzania przesunięcia fazowego. W pomiarze zespolonego stosunku napięć, w układzie przedstawionym na rysunku 1, błędy powyżej 0,1 mdeg są bardzo istotne.



Rys. 8. Maksymalny błąd przetwarzania amplitudy sygnału sinusoidalnego  $U_{m1}$  dla  $U_{m2}=1\text{ V}$

Fig. 8. Maximum error of sinusoidal signal amplitude processing  $U_{m1}$  for  $U_{m2}=1\text{ V}$



Rys. 9. Maksymalny błąd przetwarzania przesunięcia fazowego  $\varphi$  w funkcji stosunku amplitud sygnałów sinusoidalnych

Fig. 9. Maximum error of  $\varphi$  phase shift processing as a function of sinusoidal signal amplitude ratio

## 4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono analizę właściwości przełącznika kontaktronowego w układzie do pomiaru zespolonego stosunku napięć. Na podstawie wyników badań symulacyjnych stwierdzono, że czas trwania dodatkowych oscylacji w napięciu wyjściowym przełącznika, po zmianie jego stanu, jest pomijalnie krótki w stosunku do całkowitego czasu załączania kontaktronów. Wobec tego próbkowanie sygnału należy wykonywać w stanie ustalonym, po czasie podanym przez producenta przekładników kontaktronowych, w którym drgania styków kontaktronu ustają.

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych wyznaczono maksymalne błędy przetwarzania amplitud sygnałów i przesunięcia fazowego między nimi, powodowane przez przełącznik. Błędy te wpływają odpowiednio na całkowitą niepewność pomiaru modułu i argumentu zespolonego stosunku napięć. Wyznaczone wyniki maksymalnych błędów są wartościami przybliżonymi, ale mogą zostać wykorzystane do sporządzenia budżetu niepewności pomiaru zespolonego stosunku napięć, który dopiero umożliwi określenie na ile przydatny jest skonstruowany przełącznik kontaktronowy.

## 5. Literatura

- [1] U. Pogliano: Precision Measurement of AC Voltage Below 20Hz at IEN. IEEE Trans. On Instr. And Meas., vol. 46, nr 2, 1997.
- [2] U. Pogliano: Use of Integrative Analog-to-Digital Converters for High-Precision Measurement of Electrical Power IEEE Trans. On Instr. And Meas., vol. 50, nr 5, 2001.
- [3] G. Ramm, H. Moser, A. Braun: A New Scheme for Generating and Measuring Active, Reactive, and Apparent Power at Power Frequencies with Uncertainties of  $2.5 \times 10^{-6}$ . IEEE Trans. On Instr. And Meas., vol. 48, nr 2, 1999.
- [4] G. Ramm, H. Moser: From the Calculable AC Resistor to Capacitor Dissipation Factor Determination on the Basis of Time Constants. IEEE Trans. On Instr. And Meas.; vol. 50, nr 2, 2001.
- [5] Krajewski M.: Porównanie właściwości DFT i MNK w pomiarze zespolonego stosunku napięć. Kongres Metrologii. Wrocław 2004.
- [6] J. Jakubiec, J. Roj: Pomiarowe przetwarzanie próbkujące. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.