ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1994
Seria: ELEKTRYKA z.134 Nr kol.1225

Janusz GUZIK
Brunon SZADKOWSKI

OCENA SKUTECZNOŚCI METOD KOMPENSACJI NAPIĘCIA NIEZRÓWNOWAŻENIA W KONWERTERACH PRĄD-NAPIĘCIE DO BADAŃ DIELEKTRYKÓW W ZAKRESIE INFRANISKICH CZĘSTOTLIWOŚCI (10^{-3} - 10) Hz

Streszczenie. W pracy porównano skuteczność stosowania dwóch metod kompensacji napięcia niezrównoważenia konwertera prąd-napięcie, co jest szczególnie istotne przy przetwarzaniu skrajnie małych prądów płynących przez dielektryk w zakresie infraniskich częstotliwości. Zamieszczono wyniki badań zbudowanego układu modelowego.

EFFICIENCY EVALUATION OF AN UNBALANCE VOLTAGE COMPENSATION METHODS IN CURRENT-TO-VOLTAGE CONVERTERS FOR DIELECTRIC INVESTIGATIONS AT INFRA-LOW FREQUENCY RANGE (10^{-3} - 10) Hz

Summary. In the paper the efficiencies of two applied unbalance compensation methods of a current-to-voltage converter are compared. This is especially important when converting extreme weak currents flowing through a dielectric at infra-frequency range. The results of constructed model system have been included.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ КОМПЕНСАЦИИ РАЗБАЛАНСА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТОК-НАПРЯЖЕНИЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ В ОБЛАСТИ ИНФРАНИЗКИХ ЧАСТОТ (10^{-3} - 10) Гц

Резюме. В работе сравнена эффективность применения методов компенсации разбаланса преобразователя ток-напряжение что является основной задачэй при преобразовании экстремально малых токов протекаюших через диэлектрик в области инфранизких частот. Помешено результаты исследований построенной модельной схемы.

1. WPROWADZENIE

Zastosowanie aktywnych konwerterów prąd-napięcie, zbudowanych na wzmacniaczach, jest w literaturze dość powszechnie znane [4], [6], [1], [2], [3]. Jedną z przyczyn powstawania błędów takiego konwertera jest występowanie tzw. napięcia niezrównoważenia na wyjściu, przy zerowej wartości prądu wejściowego (por. p.2). W celu zmniejszenia napięcia niezrównoważenia stosuje się opisane w literaturze metody kompensacji, które w skrócie przypomniano w p.3. Okazuje się jednak, że kompensacja napięcia niezrównoważenia może być nieskuteczna w przypadku przetwarzania skrajnie małych prądów o infraniskiej częstotliwości (10^{-3} - 10) Hz. Przypadek taki ma miejsce w specjalistycznych badaniach izolacji elektrycznej (ogólnie dielektryków), mających na celu ocenę stanu i jakości tych materiałów [5].

Przy przetwarzaniu skrajnie małych prądów należy liczyć się między innymi z tym, że użyteczny sygnał napięciowy na wyjściu może mieć wartości porównywalne z napięciem niezrównoważenia. Ponadto, gdy przetwarzany jest prąd o infraniskiej czestotliwości, to odpowiednie szybkości zmian napięcia wyjściowego, użytecznego są porównywalne z powolnymi fluktuacjami napięcia niezrównoważenia. W takiej sytuacji może być bardzo trudne rozróżnienie sygnału użytecznego od zakłócającego i tym samym utrudnione może być skompensowanie zakłócenia.

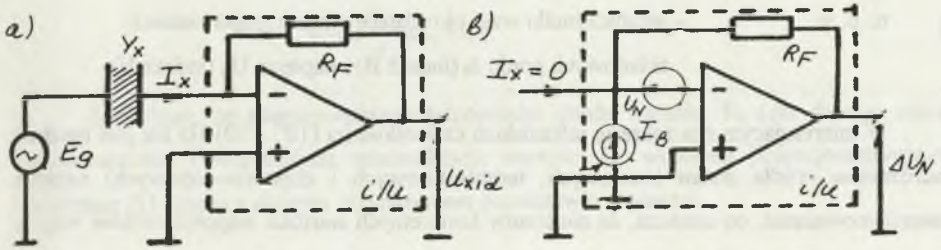
Celem pracy jest porównanie dwóch najczęściej stosowanych metod kompensacji napięcia niezrównoważenia konwertera prąd-napięcie oraz określenie ich skuteczności poprzez podanie wartości modułu współczynnika k zdefiniowanego zależnością:

$$|\kappa| = \frac{|\Delta U_N|}{|\Delta U'_N|}, \tag{1}$$

gdzie ΔU_N i $\Delta U'_N$ oznaczają odpowiednio wartości napięcia niezrównoważenia konwertera dla układu bez i z zastosowaniem kompensacji Poieważ zwykle $\Delta U_N > \Delta U'_N$, to moduł współczynnika κ jest większy od jedności i rośnie w miarę wzrostu skuteczności zastosowanej metody kompensacji niezrównoważenia. Współczynnik κ może zatem być miarą skuteczności rozpatrywanych metod kompensacji.

2. SCHEMAT ZASTĘPCZY NIEZRÓWNOWAŻONEGO KONWERTERA PRĄD-NAPIĘCIE

Podstawowy układ do pomiaru prądu płynącego przez dielektryk za pomocą konwertera prąd-napięcie z wykorzystaniem wejścia odwracającego wzmacniacza przedstawiono na rys. 1a.



Rys.1. a) Podstawowy układ do pomiaru prądu w dielektryku za pomocą konwertera prąd-napięcie; b) Schemat zastępczy niezrównoważonego konwertera

Fig.1. a) Basic system for current measurement in the dielectric by means of current-to-voltage converter; b) Equivalent scheme of unbalanced converter

Równanie przetwarzania idealanego konwetera prąd-napięcie można przedstawić za pomocą zależności (por. rys. 1a).

$$U_{xid} = - I_d R_F, \tag{2}$$

gdzie: U_{xid} - napięcie wyjściowe idealanego konwertera,

I_x - prąd płynący przez dielektryk o admitancji Y,

R_F - rezystancjapętli sprzężenia zwrotnego.

W przypadku rzeczywistego konwertera prąd-napięcie, napięcie niezrównoważenia ΔU_N występujące przy $I_x = 0$, opisane jest równaniem (por. rys.1b):

$$\Delta U_N = - I_B R_F + U_N, \tag{3}$$

przy czym I_B i U_N są odpowiednio wejściowym, wypadkowym prądem i napięciem niezrównoważenia samego wzmacniacza operacyjnego. Wielkości I_B oraz U_N można z dobrym przybliżeniem określić zależnościami:

$$\left.\begin{aligned} I_B &= \alpha_B I_{Bo}(t) + \beta_B \Delta I_B(v) + \gamma_B \Delta I_B\left(\frac{1}{f}\right) \\ U_N &= \alpha_N U_{No}(t) + \beta_N \Delta U_N(v) + \gamma_N \Delta U_N\left(\frac{1}{f}\right) \end{aligned}\right\} , \tag{4}$$

gdzie: $I_{Bo}(t)$, $U_{No}(t)$ - składowe reprezentujące dryfty czasowe,

$\Delta I_B(v)$, $\Delta U_N(v)$ - składowe reprezentujące dryfty temperaturowe,

$\Delta I_B(1/f)$, $\Delta U_N(1/f)$ - składowe reprezentujące szumy typu 1/f, które są dominującymi szumami w zakresie infraniskich częstotliwości,

α, β, γ - współczynniki wagi określające udziały odpowiednich składowych prądu I_B (indeks B) i napięcia U_N (indeks N).

W interesującym nas zakresie infraniskich częstotliwości (10^{-3} - 10) Hz nie jest możliwe odróżnienie źródła zmian (czasowych, temperaturowych i częstotliwościowych) napięcia niezrównoważenia, co oznacza, że nie znamy konkretnych wartości współczynników wagi a, b, g (por. równ. (4)) i dlatego kompensacji może podlegać tylko wypadkowe napięcie niezrównoważenia ΔU_N.

3. OCENA SKUTECZNOŚCI METOD KOMPENSACJI NAPIĘCIA NIEZRÓWNOWAŻENIA

Do kompensacji napięcia niezrównoważenia ΔU_N konwertera (por. rys. 1b) stosuje się na ogół jedną z następujących metod:

a) poprzez zastosowanie dodatkowego rezystora kompensującego R_k, załączonego na wejście nie-odwracające wzmacniacza operacyjnego (por. p.3.1) [4], [6], [1], [2];

b) poprzez zastosowanie dodatkowych układów aktywnych, kompensujących wyjściowe napięcie nie- zrównoważenia konwertera (por. p. 3.2) [4], [2].

W praktyce, niezależnie od wymienionych metod, wykorzystuje się możliwość częściowego zmniejszenia napięcia niezrównoważenia U_B samego wzmacniacza operacyjnego (por. rys. 1b) poprzez stosowanie układów potencjometrycznych [4], [6], przez co działanie odpowiedniego układu kompensacji sprowadza się do eliminacji składowej $I_B R_F$ napięcia niezrównoważenia ΔU_N określanego równaniem (3). W dalszym ciągu wyznaczone zostaną współczynniki κ charakteryzujące skuteczność wymienionych metod kompensacji.

3.1. Kompensacja niezrównoważenia w obwodzie wejściowym konwertera

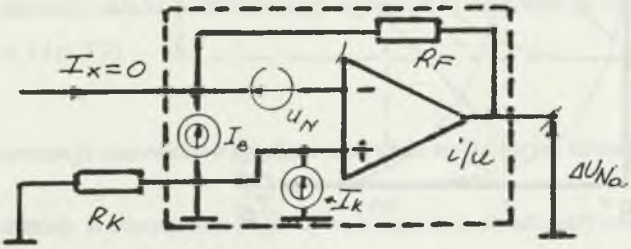
Istota tej metody kompensacji polega na włączeniu rezystora kompensacyjnego R_K na wejście nieodwracające wzmacniacza operacyjnego o własnym prądzie polaryzacji I_K (rys. 2).

Wyjściowe napięcie niezrównoważenia ΔU_{Na} konwertera można wówczas opisać za pomocą zależności (por. równ. (3)):

$$\Delta U_{Na} = -(I_K \frac{R_K}{R_F})R_F + U_N. \tag{5}$$

Zakładając, że przeprowadzono odpowiedni dobór wartości R_F (dla danego zakresu przetwarzania) i wcześniejszą minimalizację wartości U_N układami potencjometrycznymi, równanie (5) można z dobrym przybliżeniem przedstawić w postaci:

$$\Delta U_{Na} = -(I_K \frac{R_K}{R_F})R_F + U_N \tag{6}$$



Rys. 2. Kompensacja niezrównoważenia w obwodzie wejściowym konwertera (zastosowanie rezystora R_K)
Fig. 2. Unbalance compensation at input circuit of the converter (the application of resistor R_K

Wartość rezystora kompensującego R_K dobiera się tak, aby $\Delta U_{Na} = 0$, czyli:

$$R_K = \frac{I_B}{I_K} R_F \tag{7}$$

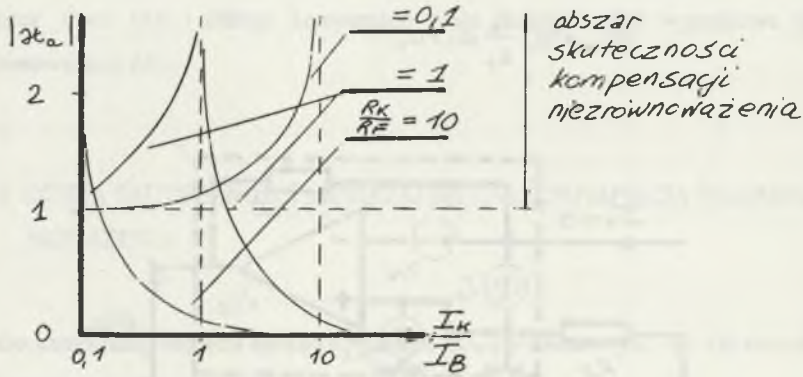
Współczynnik κ_a charakteryzujący skuteczność rozważanej metody kompensacyjnej (por. równ.(1)) można określić za pomocą następującego równania:

$$|\kappa_a| = \frac{|\Delta U_N|}{|\Delta U_{Na}|} = \frac{|-I_B R_F + U_N|}{\left|-\left(I_B - I_K \frac{R_K}{R_F}\right) R_F + U_N\right|} \tag{8}$$

lub przy $U_N = 0$:

$$|\kappa_a| = \frac{1}{\left|1 - \frac{I_K}{I_B} \cdot \frac{R_K}{R_F}\right|} \tag{8a}$$

Na rys. 3 przedstawiono wykres ilustrujący zmiany modułu współczynnika κ_a w funkcji zmian stosunku prądów I_K/I_B przy różnych, lecz stałych wartościach stosunku rezystancji R_K/R_F.



Rys. 3. Zależność współczynnika κ_a od wartości stosunku prądów I_K/I_B w układzie kompensacji z rys. 2

Fig. 3. Coefficient κ_a dependance of ratio current I_K/I_B in the compensation scheme by Fig 2

Zakładając, że dla większości typowych wzmacniaczy operacyjnych zachodzi $I_K/I_B \sim 1$ [4], [6] i dobierając wartość rezystora kompensacyjnego $R_K \sim R_F$, uzyskuje się $|\kappa_a| > .8$ (kompensacja idealna). Jednak w przypadku wzmacniaczy do przetwarzania skrajnie małych prądów stosunek I_K/I_B różni się od jedności i określony jest zależnością (por. równ. (4)):

$$\frac{I_K}{I_B} = \frac{\alpha_K I_{Ko}(t) + \beta_K \Delta I_K(v) + \gamma_K \Delta I_K(1/f)}{\alpha_B I_{Bo}(t) + \beta_B \Delta I_B(v) + \gamma_B \Delta I_B(1/f)}, \tag{9}$$

gdzie przez $I_{Ko}(t)$, $\Delta I_K(v)$, $\Delta I_K(1/f)$, α_K, β_K, γ_K oznaczono odpowiednie składowe i współczynniki wagi określające udziały tych składowych w całkowitym prądzie I_K (por. rys. 2). W tym przypadku dobór $R_K \sim R_F$ nie jest właściwy i należy dobrać R_K według wzoru (7), przy znanym stosunku prądów I_K/I_B (równ. (9)). Należy jednak zauważyć, że stosunek prądów I_K/I_B nie może być traktowany jako stały, gdyż jego składowe podlegają pewnym fluktuacjom, których nie można pominąć przy infraniskich częstotliwościach przetwarzanych prądów.

Z przedstawionych rozważań wynika, że w konwerterach do przetwarzania bardzo małych prądów (płynących przez badany dielektryk) o bardzo małych częstotliwościach omawiana metoda kompensacji napięcia niezrównoważenia nie jest metodą skuteczną. Zmieniający się stosunek prądów I_K/I_B, przy stałych rezystancjach R_K i R_F, powoduje odpowiednie zmiany współczynnika κ_a (por. równ. (8) i (8a)) i możliwe jest znaczące obniżenie jego wartości. Potwierdziły to przedstawione w p. 4 (rys. 5) wyniki badań doświadczalnych, gdzie κ_a ma wartość zbliżoną do jedności, co oznacza, że praktycznie nie ma efektu kompensacji.

Pewną poprawę skuteczności omawianej metody kompensacyjnej można by uzyskać korygując odpowiednio wartość rezystancji rezystora R_K na bieżąco. Jednak wymagałoby to pewnego rozbudowania układu podstawowego wg rys. 2 i zbliżyłoby tę metodę do metod grupy (b) (por. p. 3 i p. 3.2).

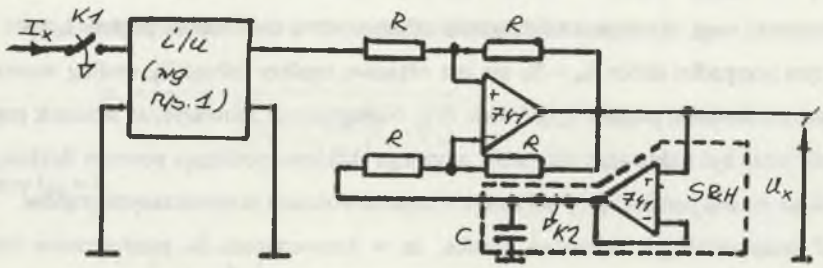
3.2. Kompensacja niezrównoważenia w obwodzie wyjściowym konwertera

Istota tej metody kompensacji polega na wykorzystaniu układu aktywnego z pamięcią, ralizowaną za pomocą układu próbkująco-pamiętającego S & H (por. rys. 4).

Zadaniem układu S & H jest zapamiętanie wartości napięcia niezrównoważenia $\Delta U_N(t_o)$ konwertera w wybranej chwili czasowej t_o (klucz K1-otwarty, K2-zamknięty). Podczas normalnej pracy układu (klucz K-zamknięty, K2-otwarty) napięcie wyjściowe konwertera określone jest zależnością:

$$U_x(t_o+\Delta t) = -I_x R_F + \Delta U_N(t_o), \tag{10}$$

gdzie Δt jest czasem przełączania kluczy K1 i K2.



Rys. 4. Kompensacja niezrównoważenia w obwodzie wyjściowym konwertera (zastosowanie układu S & H)
Fig. 4. Unbalance compensation at output circuit of the converter (the application of S & H circuit)

Dla zakresu infraniskich częstotliwości (10^{-3} - 10) Hz czasy przełączania kluczy można uznać jako pomijalnie małe. Sumaryczne napięcie wyjściowe U_x układu konwertera wraz z obwodem próbkująco-pamiętającym S & H jest różnicą pomiędzy napięciem $U_x(t_o+\Delta t)$ na wyjściu konwertera oraz napięciem niezrównoważenia $\Delta U_N(t_o)$ zapamiętanym w obwodzie S & H:

$$U_x = U_x(t_o+\Delta t) - \Delta U_N(t_o) = -I_x R_F = U_{xid} \tag{11}$$

Wyrażenie (11) jest równaniem konwertera skompensowanego idealnie. W rzeczywistości należy liczyć się z pewną niedokładnością kompensacji. Głównym źródłem błędów równoważonego układu kompensacyjnego jest układ S & H, którego niedokładność względna $|\varepsilon^o|$ (rzędu 10^{-4} - 10^{-2} [6]) powoduje stanie błędu przetwarzania $|\delta^o|$, zdefiniowanego zależnością:

$$|\delta^o| = \left|\frac{U_x - U_{xid}}{U_{xid}}\right| = \left|\frac{U_{xid} + \varepsilon^o \Delta U_N(t_o) - U_{xid}}{U_{xid}}\right| = \left|\frac{\varepsilon^o \Delta U_N(t_o)}{R_F I_x}\right| = \frac{|\Delta U_{Nb}|}{|U_{xid}|}. \tag{12}$$

Skuteczność κ_b tej metody kompensacji może być zatem przedstawiona b równaniem (por. równ. (1)):

$$|\kappa_b| = \frac{|\Delta U_N|}{|\Delta U_{Nb}|} = \frac{|\Delta U_N(t_o)|}{|\varepsilon^o \Delta U_N(t_o)|} = \frac{1}{|\varepsilon^o|} \tag{13}$$

Wartość $|\kappa_b|$ jest praktycznie stała, tzn. zależeć może tylko od zmian niedokłdności układu S & H. W praktyce niedokładność $|\varepsilon^o|$ może osiągać wartości większe od wcześniej przytoczonych [6], co może mieć wpływ na odpowiedni spadek wartości współczynnika κ_b. Omawiana metoda kompensacji, w odróżnieniu od metody przedstawionej w p. 3.1, dobrze nadaje się do stosowania, w konwerterach do przetwarzania bardzo małych prądów o infraniskiej częstotliwości. Jedynym ograniczeniem stosowalności jest tutaj warunek odpowiedniego doboru czasów przełączania kluczy K1 i K2, określający ilość próbek sygnału prądowego I_x na okres, zgodnie z wymaganiami twierdzenia Shannona-Kotielnikowa.

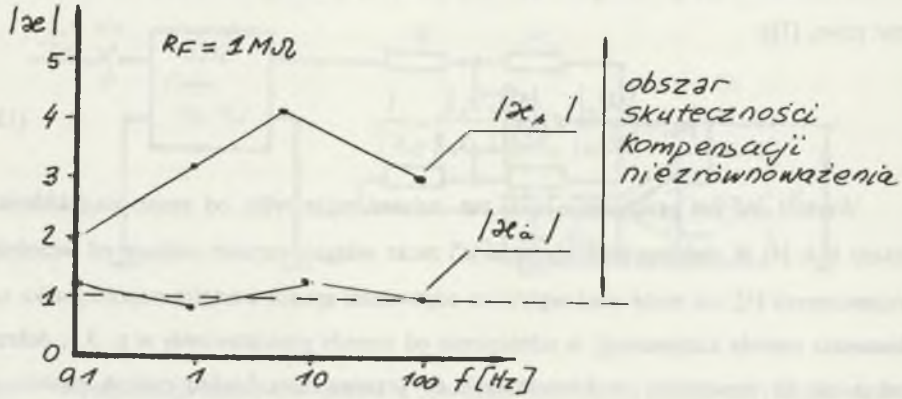
4. WYNIKI BADAŃ

Do badań wykorzystano układ konwertera prąd-napięcie wg rys. 1a, zbudowany na wzmacniaczu operacyjnym typu KP544YD1A o prądach polaryzacji I_B, I_K równych 14,1pA i 13,0 pA. Wartość rezystancji rezystora R_F obwodu sprzężenia zwrotnego konwertera ustalono na 1 M Ω.

Dla układu kompensacji napięcia niezrównoważenia wg rys. 2 dobrano rezystancję rezystora kompensującego R_K = 1,1 M Ω, natomiast w układzie wg rys. 4 przyjęto następujące wartości parametrów: R = 10 k Ω, C = 1 μF. Klucze K1 i K2 stanowiły kontaktrony.

Wyznaczone doświadczalnie charakterystyki zmian współczynników skuteczności kompensacji $|\kappa_a|$ i $|\kappa_b|$ w funkcji częstotliwości f, dla f = (0,1 - 100) Hz przedstawiono na rys. 5.

Współczynnik $|\kappa_a|$ i $|\kappa_b|$ obliczono zgodnie z przyjętą definicją (por. równ. (1)), dokonując pomiarów napięcia na wyjściu konwertera bez i z zastosowaniem odpowiednich układów kompensujących. Na rys. 5 przedstawiono tylko wyniki pomiarów przy częstotliwościach 0,1 Hz, 1 Hz, 10 Hz oraz 100 Hz, ponieważ zaobserwowano stabilizację współczynników $|\kappa_a|$ i $|\kappa_b|$ dla f < 0,1 Hz.



Rys. 5. Zależność współczynnika skuteczności kompensacji niezrównoważenia |κ| konwertera w funkcji częstotliwości f (|κ$_a$| - układ kompensacji wg rys.2, |κ$_b$| - układ wg rys. 4)

Fig. 5. Converter efficiency compensation coefficient |κ| dependence on frequency f(|κ$_a$| - compensation scheme by Fig.2, |κ$_b$| - scheme by Fig. 4).

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Zastosowanie pasywnego układu kompensacji napięcia niezrównoważenia wg rys. 2 jest mało skuteczne, a odpowiedni współczynnik skuteczności kompensacji zawiera się w granicach |κ$_a$| = 1,1 - 1,3 (por. rys. 5). Wartości a współczynnika |κ| osiągane przy zastosowaniu układu aktywnego wg rys. 4 są w przybliżeniu 2 - 4 razy większe, tzn. |κ$_b$| = 2,0 - 4,1.

Osiągnięcie większych wartości |κ$_b$| byłoby możliwe przy innym rozwiązaniu b układu S & H. Jednak celem przeprowadzonych badań było nie tyle osiągnięcie możliwie dużej wartości współczynnika k, ile wykazanie, że w konwerterach przeznaczonych do badań dielektryków, zwłaszcza w zakresie infraniskich częstotliwości, należy stosować metody kompensacji opisane w p.3.2. Wniosek taki został sformułowany w wyniku rozważań teoretycznych, a przedstawione wyniki badań doświadczalnych w wystarczającym stopniu potwierdziły jego słuszność.

LITERATURA

[1] Franiel S.: Wpływ prądów polaryzacji wzmacniacza operacyjnego w przetworniku fotoelektrycznym na dokładność pomiaru ekstynkcji. Z.N. Pol.Śl. seria Automatyka, z. 81, Gliwice 1987, ss. 7-17.

[2] Guzik J., Sadkowski B.: Analiza błędów konwertera prąd-napięcie przy przetwarzaniu skrajnie małych prądów o infraniskiej częstotliwości (10^{-3} - 10) Hz, Z.N. Pol.Śl. seria Elektryka, z. 108, Gliwce 1989, ss. 101-109.

[3] Guzik J.: Ocena granicznej zdolności rozdzielczej konwertera prąd-napięcie przy przetwarzaniu skrajnie małych prądów o infraniskiej czestotliwości (10^{-3} - 10) Hz. Z.N. Pol.Śl. seria Elektryka, z. 128, Gliwice 1992, ss. 59-67.

[4] Kulka Z., Nadachowski M.: Analogowe układy scalone. WKiT, Warszawa 1983.

[5] Szadkowski B.: Metody badania izolacji elektrycznej napięciem o częstotliwości (10^{-5}- 10) Hz. Materiały konferencyjne "Urządzenia Elektroenergetyczne" Bielsko-Biała, wrzesień 1983.

[6] Tietze U., Schenk Ch.: Układy półprzewodnikowe. WNT, Warszawa 1987.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Leszek Kiełtyka

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 maja 1993 r.

Abstract

In the paper the efficiencies of two applied unbalance compensation methods of a current-to-voltage converter are compared. The evaluation of the efficiency is defined by the coefficient $|\kappa|$:

$$|\kappa| = \left|\frac{\Delta U_N}{\Delta U_N^{'}}\right|,$$

where $|\Delta U_N|$ and $\left|\Delta U_N^{'}\right|$ are the values of output converter's unbalance voltages without and with use of compensation, respectively. This is especially important when converting extreme weak currents (typically for dielectrics) at the rather untypical frequency range. In method I

(see chapter 3.1) the input bias current has been passively compensated by the use of a resistor, while in method II (see chapter 3.2) there has been used the sample-and-hold S & H circuit which holds the output unbalance voltage of the converter, undergoing substraction from real converter's output voltage. The efficiency of a compensation is on level: $|\kappa^{(a)}|= 1,1 : 1,3$ (for method I), while for method II: $|\kappa^{(b)}|= 2 : 4,1$. The ways of further maximization of this coefficient are indicated.