

Seweryn MAZURKIEWICZ*
Janusz WALCZAK*

ZMODYFIKOWANA METODA ANALIZY SZUMÓW WE WZMACNIACZACH OPERACYJNYCH

Artykuł dotyczy pewnej metody analizy szumów we wzmacniaczach operacyjnych. Omówiono podstawowe źródła szumów w układach elektronicznych. Przedstawiono rozszerzony model szumowy wzmacniacza operacyjnego. Podano zmodyfikowaną metodę analizy szumów we wzmacniaczach operacyjnych z wykorzystaniem funkcji korelacji oraz widmowej gęstości mocy szumów. Wyznaczono i porównano wyjściowe napięcie szumów dwóch popularnych wzmacniaczy operacyjnych pracujących w układzie filtru dolnoprzepustowego.

SŁOWA KLUCZOWE: szumowa, szumy wzmacniaczy operacyjnych

1. WPROWADZENIE

Szumy powstają między innymi w elementach przewodzących prąd elektryczny [4]. Nośnikami prądu elektrycznego są zazwyczaj elektrony swobodne lub dziury (w półprzewodnikach). Nośniki prądu podlegają prawom mechaniki kwantowej. Dlatego stosowne jest modelowanie ruchu nośników (prądu elektrycznego) za pomocą różnych rodzajów szumów z wykorzystaniem opisu probabilistycznego.

W wzmacniaczach operacyjnych wyróżnia się [4] kilka rodzajów szumów:

- szum śrutowy – występuje przy przepływie ładunków. Ma charakter szumu białego. Wariancja prądu szumów $\sigma_{I_{sh}}^2$ po raz pierwszy obliczył Schottky [2]:

$$\sigma_{I_{ab}}^2 = 2q \int_{f_L}^{f_H} i_D(f) df \quad (1)$$

gdzie q – ładunek elektronu równy $1,59E-19$ C, $i_D(f)$ – widmowa gęstość prądu, A^2/Hz .

* Politechnika Śląska

- szum termiczny – w temperaturze powyżej zera absolutnego występują losowe ruchy nośników. Przyczyną tych ruchów jest energia cieplna elektronów. Im wyższa temperatura tym większa energia. Napięcie szumów termicznych ma charakter szumu białego i wariancję tego napięcia σ_{UT}^2 wyraża wzór [2]:

$$\sigma_{UT}^2 = 4kTR \int_{f_L}^{f_H} df \quad (2)$$

gdzie k – stała Boltzmanna równa $1,38E-23$ J/K, T – temperatura absolutna w stopniach Kelvina, natomiast R – rezystancja w Ω . Istotne jest to, że napięcie szumów na elemencie istnieje nawet bez podłączonego żadnego innego zewnętrznego źródła napięcia czy prądu. Wariancja napięcia szumów termicznych jest niezależna od ilości połączonych (szeregowo lub równoległe) rezystorów – jest zależna tylko od wypadkowej wartości rezystancji [4].

- szum migotania – ma charakter szumu różowego zwanego szumem $1/f$. Występuje w wszystkich układach aktywnych. Jest on najprawdopodobniej spowodowany niedoskonałością struktury krystalicznej półprzewodników. Intensywność tego szumu jest proporcjonalna do przepływającego prądu. Wariancję σ_{Uf}^2 napięcia tego szumu określa wzór [2]:

$$\sigma_{Uf}^2 = K_e^2 \int_{f_L}^{f_H} \frac{1}{f} df \quad (3)$$

gdzie K_e jest stałą układu.

- szum wybuchowy – spowodowany jest poprzez niedokładny proces wytwarzania półprzewodników. Szum ten ma postać krótkich impulsów w przypadkowych momentach czasu. Szumy te minimalizuje się poprzez odpowiednią czystość procesu wytwarzania.
- szum lawinowy – powstaje na złączu p-n spolaryzowanym zaporowo. Szumy te minimalizuje się poprzez unikanie stosowania złącz Zenera w syntezie struktur półprzewodnikowych.

Na szumy wzmacniacza operacyjnego składa się wiele zależnych od siebie przyczyn. Dlatego w dokumentacji technicznej najczęściej podaje się wykres zależności napięcia (lub/i prądu) skutecznego szumu (odniesionego do wejścia) w funkcji częstotliwości. Na takim wykresie można wyróżnić dwa zakresy częstotliwości [4]:

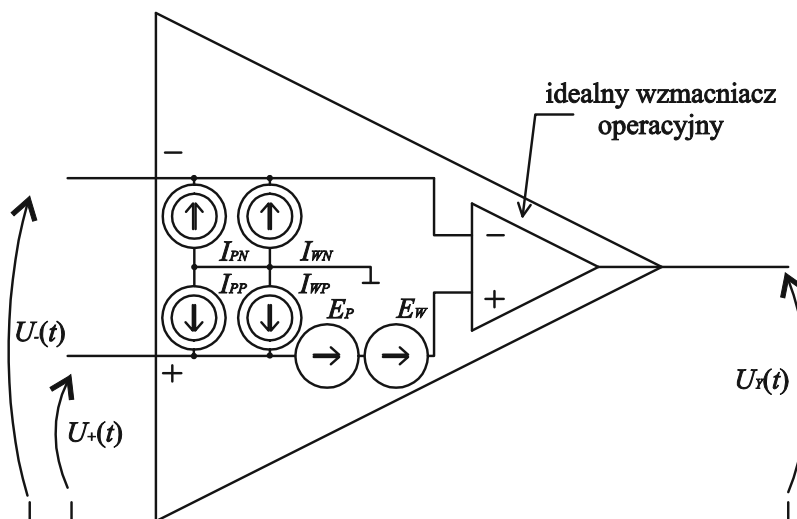
- zakres małych częstotliwości, gdzie dominują szumy o charakterze szumu różowego,
- zakres większych częstotliwości, gdzie dominują szumy o charakterze szumu białego.

Częstotliwość dla której wartość skuteczna szumu białego równa się wartości skutecznej szumu różowego nazywa się częstotliwością naroża f_{NC} [5].

Z powyższego wynika, że szum całkowity wzmacniacza operacyjnego można modelować, za pomocą sumy dwóch źródeł szumu: źródła szumu białego i źródła szumu różowego.

2. MODEL SZUMOWY WZMACNIACZA OPERACYJNEGO

W dokumentacjach podawane są wartości skuteczne napięć i prądów szumów odniesione do wejścia wzmacniacza operacyjnego [8, 9]. Szumy prądowe są modelowane przez źródła prądu włączane pomiędzy masę a każde z wejść wzmacniacza. Szumy napięciowe modelowane są przez źródło napięcia włączone szeregowo do wejścia nieodwracającego [2]. Analizowany w pracy model szumowy wzmacniacza operacyjnego pokazano na rysunku 1. Źródła prądu I_{PN} oraz I_{PP} modelują szum prądowy o charakterze szumu różowego. Źródła prądu I_{WN} oraz I_{WP} modelują szum prądowy o charakterze szumu białego. Źródło napięcia E_P modeluje szum napięciowy o charakterze szumu różowego. Źródło napięcia E_W modeluje szum napięciowy o charakterze szumu białego. Zakłada się, że wewnętrzny wzmacniacz operacyjny jest idealny, niegenerujący szumów i ma nieskończone wzmocnienie.



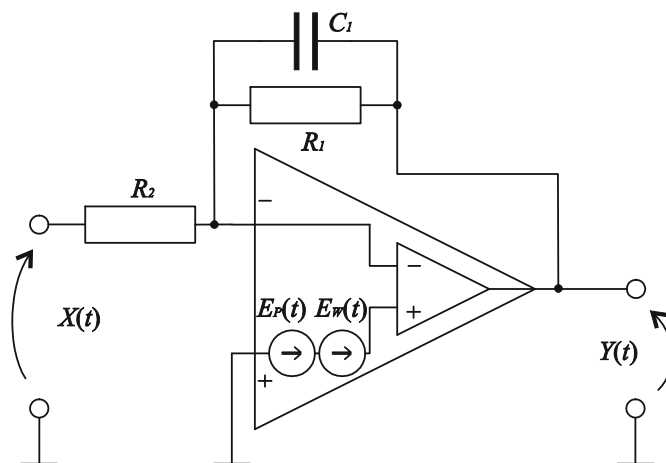
Rys. 1. Model szumowy wzmacniacza operacyjnego

Jeżeli impedancja podłączona do wejść wzmacniacza jest niewielka oraz wzmacniacz na wejściach ma tranzystory polowe to prądowe źródła szumów można pominąć [4].

3. METODA ANALIZY SZUMÓW WE WZMACNIACZU OPERACYJNYM

Proponowaną metodę analizy szumów pokazano na przykładzie filtra dolnoprzepustowego. Dla uproszczenia pominięto prądowe źródła szumów oraz szумы elementów biernych. Skupiono się na analizie szumów samego wzmacniacza operacyjnego. W podobny sposób można rozszerzyć analizę o szумы elementów biernych dodając kolejne szumowe źródła napięcia lub prądu.

Analizowany układ pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Analizowany układ

Analizę szumową przeprowadza się dla wymuszenia $X(t)=0$. Dla $X(t)=0$ równanie opisujące układ z rysunku 2 wyraża poniższy wzór:

$$\frac{dY(t)}{dt} = -\frac{1}{R_1 C_1} Y(t) + \frac{dE(t)}{dt} + \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C_1} E(t) \quad (4)$$

$$E(t) = E_p(t) + E_w(t) \quad (5)$$

Zakładając, że

- szумы biały i różowy są statystycznie niezależne,
- szумы te są stacjonarne,

transformuje się równanie (4) na równanie momentów. Transformacja ta [3] polega na zastosowaniu operatora wartości oczekiwanej do równania (4). Ostatecznie uzyskuje się deterministyczne równanie różniczkowe:

$$\frac{d\Re_Y(\tau)}{d\tau} = -\frac{I}{R_1 C_1} \Re_Y(\tau) + \frac{d\Re_E(\tau)}{d\tau} + \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C_1} \Re_E(\tau) \quad (6)$$

względem niewiadomej funkcji autokorelacji $\Re_Y(\tau)$ procesu wyjściowego $Y(t)$, przy czym:

$$\Re_E(\tau) = \Re_{E_p}(\tau) + \delta(\tau) \quad (7)$$

Istotną zaletą proponowanej metody jest zastąpienie stochastycznego równania różniczkowego (5), którego analiza jest trudna, znacznie prostszym deterministycznym równaniem różniczkowym. Ponadto funkcja autokorelacji szumu różowego nie jest dana wzorem analitycznym [1] dlatego równanie (6) nie może być rozwiązane w sposób jawny.

Stosując transformację Fouriera [10] do równania (6) otrzymuje się wzór na widmową gęstość mocy $S_Y(\omega)$ procesu wyjściowego:

$$S_Y(\omega) = \frac{\sqrt{(\omega^2 + ab)^2 + (\omega(a+b))^2}}{\omega^2 + a^2} S_E(\omega) \quad (8)$$

gdzie:

$$a = \frac{I}{R_1 C_1} \quad b = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C_1} \quad (9)$$

$S_E(\omega)$ – widmowa gęstość mocy szumów, dana wzorem:

$$S_E(\omega) = C_p \frac{2\pi}{\omega} + C_w \quad (10)$$

Stała C_p związana jest z gęstością widmową szumu różowego, natomiast stała C_w z gęstością widmową szumu białego.

Można wykazać, że dla małych częstotliwości $\omega \ll a$ równanie (8) przyjmuje postać:

$$S_Y(\omega) \approx \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) S_E(\omega) \quad (11)$$

Na podstawie schematu (2) można zauważyć, że:

- dla małych częstotliwości szumów kondensator C_1 może być pominięty i układ zachowuje się jak klasyczny wzmacniacz nieodwracający o wzmocnieniu R_1/R_2 .
- dla dużych częstotliwości szumów kondensator C_1 stanowi zwarcie i układ zachowuje się jak klasyczny wtórnik napięcia.

Wariancję szumu wyjściowego (w zadanym zakresie pulsacji od ω_L do ω_H) można obliczyć za pomocą wzoru:

$$\sigma_Y^2(\omega_L, \omega_H) = \int_{\omega_L}^{\omega_H} S_Y(\omega) d\omega \quad (12)$$

Wartość skuteczną napięcia szumów na wyjściu wzmacniacza w zakresie pulsacji od ω_L do ω_H określa wzór [2]:

$$E_Y(\omega_L, \omega_H) = \sqrt{\sigma_Y^2(\omega_L, \omega_H)} \quad (13)$$

4. PRZYKŁAD

Do porównania wyników badań wybrano dwa wzmacniacze operacyjne firmy Texas Instruments: OPA2134 oraz OPA2350. Wzmacniacze te są w podobnej klasie cenowej. W tabeli 1 zebrano podstawowe informacje o badanych wzmacniaczach [8, 9].

Tabela 1. Podstawowe dane katalogowe wzmacniaczy OPA2134 i OPA2350

	OPA2134	OPA2350
Gęstość szumów, nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	8	5
Pasma, MHz	8	38
Prędkość narastania napięcia, V/ μs	20	22
Typ wejścia	FET	FET

Na rysunku 3 zamieszczono katalogowe wykresy gęstości szumu napięciowego i prądowego odniesionego do wejścia wzmacniacza operacyjnego. Korzystając z tych wykresów odczytano stałe C_P i C_W oraz umieszczono je w tabeli 2.

Tabela 2. Stałe C_P i C_W wzmacniaczy OPA2134 i OPA2350

	C_P	C_W
OPA2134	8.1E-16 V ² /Hz	64E-18 V ² /Hz
OPA2350	9E-13 V ² /Hz	25E-18 V ² /Hz

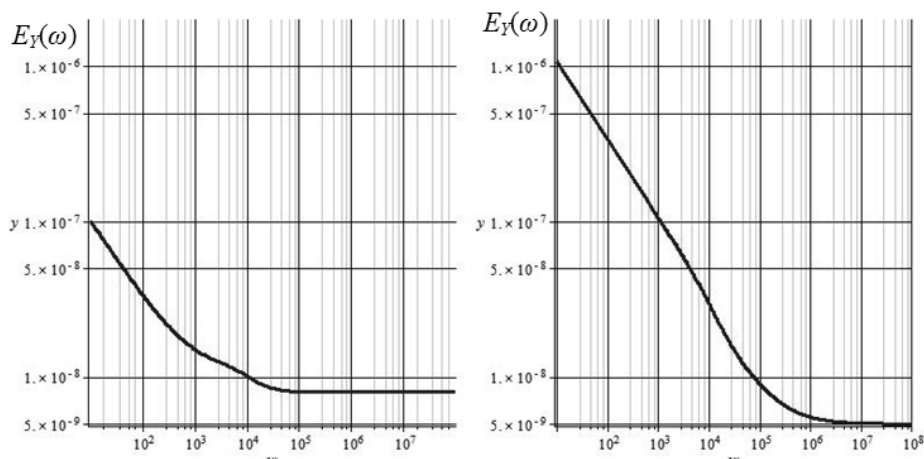
Założono następujące parametry układu z rysunku 2: $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 100 \text{ nF}$. Pulsacja graniczna równa jest $\omega_g = 1/(R_1 C_1) = 10^4 \text{ rad/s}$. Uwzględniając równoważne pasmo szumów (eng. ENB) [4] obliczono gęstości widmowe mocy $S_E(\omega)$, $S_Y(\omega)$ oraz wartości skuteczne napięć szumów na wyjściu wzmacniaczy operacyjnych OPA2134 i OPA2350 w zakresie $\omega \in (10; 15700) \text{ rad/s}$:

1. OPA2134

$$E_Y(10, 15700) = 1.5 \mu\text{V}.$$

2. OPA2350

$$E_Y(10, 15700) = 9 \mu\text{V}.$$



Rys. 3. Widmowa gęstość szumu napięciowego na wyjściu filtra przy zastosowaniu OPA2134 (lewy wykres) oraz OPA2350 (prawy wykres)

5. PODSUMOWANIE

W artykule rozważono problem analizy szumów we wzmacniaczach operacyjnych. Opisano metodę analizy szumów wykorzystującą funkcje korelacji oraz widmowe gęstości mocy w przykładowym układzie aktywnym – filtrze dolnoprzepustowym. Pomimo, że nie istnieje jawny wzór na funkcje korelacji szumu różowego, możliwe jest obliczenie widmowej gęstości mocy szumu i wartości skutecznej napięcia szumu na wyjściu układu.

Porównano właściwości układu pod względem szumowym stosując dwa popularne wzmacniacze operacyjne. Pomimo, że odczytane parametry z tabeli danych katalogowych wzmacniacza OPA2350 są lepsze od wzmacniacza OPA2134 to wzmacniacz ten ma większe napięcie szumów na wyjściu w badanym układzie. Spowodowane jest to wysoką składową szumu różowego, która to nie jest podawana w tabeli danych katalogowych.

LITERATURA

- [1] Kaulakys B.: S 1/f noise from nonlinear stochastic differential equations. *Physical Review E*, vol. 81, Issue 3, 2010, pp. 1 - 10.
- [2] Mancini R. (ed.): *Op Amps for Everyone*. Design Reference: SLOD006B, Texas Instruments, 2002.
- [3] Mazurkiewicz S., Walczak J.: *Random Dynamical Systems of the First Order*. *Lecture Notes in Electrical Engineering - Springer*, Vol. 324, 2015, pp. 329 - 335.

- [4] Noise Analysis in Operational Amplifier Circuits. Application Report: SLVA043B, Texas Instruments, 2007.
- [5] Op Amp Noise. Tutorial: MT-047, ANALOG DEVICES, 2008.
- [6] Op Amp Total Output Noise Calculations for Single-Pole System. Tutorial: MT-049, ANALOG DEVICES, 2008.
- [7] Op Amp Total Output Noise Calculations for Second-Order System. Tutorial: MT-050, ANALOG DEVICES, 2008.
- [8] OPA2134 High Performance AUDIO OPERATIONAL AMPLIFIERS. Technical Documentation: SBOS058, BURR-BROWN, 1996.
- [9] OPA2350 High-Speed, Single-Supply, Rail-to-Rail OPERATIONAL AMPLIFIERS. Technical Documentation: SBOS099C, BURR-BROWN, 2000.
- [10] Soong T. T.: Random Differential Equations in Science and Engineering. Math. in Science and Eng., Vol. 103, Academic Press, New York, 1973.
- [11] Xu J., Dai Y., Abbot D.: A Complete Operational Amplifier Noise Model: Analysis and Measurement of Correlation Coefficient. IEEE Trans. On CAS. Part I, Vol. 47, Issue 3, 2002, pp. 420-424.

MODIFIED METHOD FOR NOISE ANALYSIS OF THE OPERATIONAL AMPLIFIERS

In the article the modified method of the noise analysis of the operational amplifiers is concerned. In the first chapter the main noise sources of the electronic circuits is discusses. In the second chapter the extended operational amplifier noise model is presented. In the third chapter the modified method for the noise analysis of the operational amplifiers using the correlation function and the noise power spectral density is shown. The results are illustrated by examples.