

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.317.445

В.О. Нічога^{1,2}, О.П. Остап¹, П.Б. Дуб¹

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України,

²Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронних пристроїв і систем

ВПЛИВ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ НА ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ ШУМОВИХ ПАРАМЕТРІВ КАНОНІЧНОЇ МОДЕЛІ ПІДСИЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

© Нічога В.О., Остап О.П., Дуб П.Б., 2005

Наведено результати дослідження точності визначення параметрів канонічної шумової моделі підсилювального пристрою методом апроксимації експериментальної залежності потужності шумів на виході підсилювального пристрою від імпедансу джерела сигналу теоретичною залежністю.

The results of investigations of the amplifier device canonical model noise parameters determination accuracy by the method of theoretical approximation of amplifier output noise power dependence on the signal source impedance are presented in the article.

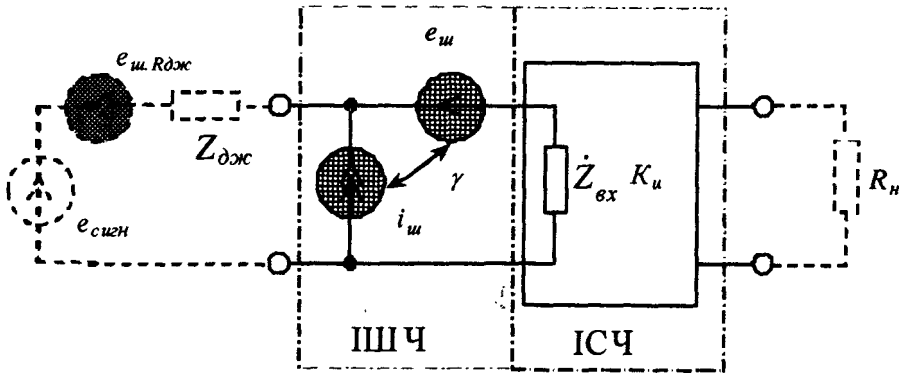
1. Постановка задачі

Як відомо з [1–3], визначення шумових параметрів підсилювального пристрою, особливо кореляційних залежностей еквівалентних шумових джерел, викликає труднощі. Це пов'язано з високою похибкою визначення цих параметрів існуючими методами, що відзначається, наприклад, в [2]. Були спроби понизити ці похибки, ускладнюючи умови проведення експериментальних вимірювань [3], що, своєю чергою, вносило додаткові похибки та призводило до неможливості автоматизувати процес вимірювання. Висока похибка методів, наведених у [2; 3], насамперед пов'язана з безпосереднім визначенням шумових параметрів за вимірними величинами.

Протягом останніх років авторами було розроблено новий метод визначення шумових параметрів канонічної моделі підсилювального пристрою, який вирізняється рядом переваг [1], а саме: нижчою похибкою визначених параметрів; можливістю визначення параметрів без застосування режимів короткого замикання та неробочого ходу на вході підсилювального пристрою. Метод відкриває також шлях до повної автоматизації та комп'ютеризації процесу вимірювання шумових параметрів.

2. Шумові параметри підсилювального пристрою

У канонічній еквівалентній шумовій схемі заміщення [1; 2] (рисунок) реальний підсилювальний пристрій для зручності розрахунків та зручності визначення параметрів схеми розбивається на два ідеальні чотириполосники, ввімкнені послідовно: ідеальний шумовий чотириполосник (ШЧ), який враховує лише шумові характеристики підсилювача, та ідеальний сигнальний чотириполосник (СЧ), що, своєю чергою, забезпечує врахування сигнальних характеристик (підсилення K_u , вхідний опір $Z_{\text{вх}}$ тощо).



Канонічна еквівалентна шумова схема
заміщення реального підсилювального пристрою

За шумові параметри цієї схеми заміщення прийнято значення спектральних густин джерел шумової напруги $e_{ш}$ і шумового струму $i_{ш}$, а також коефіцієнт кореляції між ними $\dot{\gamma}$, який забезпечує врахування статистичних зв'язків між $e_{ш}$ і $i_{ш}$. У загальному випадку $\dot{\gamma}$ виражається комплексною величиною і записується як [3]

$$\dot{\gamma} = \frac{\overline{e_{ш} i_{ш}^*}}{\sqrt{\overline{e_{ш}^2} \overline{i_{ш}^2}}} = \alpha + j\beta, \quad (1)$$

де $i_{ш}^*$ – величина, комплексно спряжена до $i_{ш}$; α і β – відповідно дійсна та уявна складові коефіцієнта кореляції $\dot{\gamma}$; знак “ $\overline{}$ ” – означає усереднення.

Відповідно до зображеної еквівалентної схеми значення потужності шуму на вході підсилювача (вважаємо, що виміряна на виході напруга шуму приведена до входу) записується [1]:

$$\overline{u_{ш}^2} = \left(\overline{e_{ш}^2} + 2\sqrt{\overline{e_{ш}^2} \overline{i_{ш}^2}} (\alpha R_{дж} + \beta X_{дж}) + \overline{i_{ш}^2} |\dot{Z}_{дж}|^2 + 4kTR_{дж} \right) \Delta f_{ш} \left| \frac{\dot{Z}_{вх}}{\dot{Z}_{вх} + \dot{Z}_{дж}} \right|^2, \quad (2)$$

де $\dot{Z}_{дж}$ – внутрішній опір джерела сигналу, який здебільшого є комплексною величиною $\dot{Z}_{дж} = R_{дж} + jX_{дж}$; $\dot{Z}_{вх}$ – вхідний опір підсилювача; $k=1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана; T – температура джерела сигналу, К; $\Delta f_{ш}$ – еквівалентна шумова смуга пропускання підсилювача.

3. Визначення шумових параметрів експериментальним методом

Пропонований метод визначення шумових параметрів, детально розглянутий в [1], ґрунтується на апроксимації залежності потужності шуму на виході (або вході, як у цій роботі) підсилювального пристрою в одиничній частотній смузі від імпедансу джерела сигналу. Під час вимірювань опір джерела вибирається або чисто активним $\dot{Z}_{дж} = R_{дж}$, або чисто реактивним $\dot{Z}_{дж} = jX_{дж}$. Це відрізняє цей метод від раніше застосовуваних, у яких обов'язково застосовувалися режими короткого замикання $\dot{Z}_{дж} \rightarrow 0$ і неробочого ходу $\dot{Z}_{дж} \rightarrow \infty$. Реалізація таких режимів пов'язана зі значними труднощами і часто призводить до значних систематичних похибок, особливо при визначенні α , яку досі практично не вдавалося виміряти з більш-менш задовільною точністю.

Для підвищення точності та пришвидшення процесу апроксимації запишемо апроксимуючу залежність для (2) як

$$f_a(x) = \left(a + bx + cx^2 \right) \left| \frac{\dot{Z}_{вх}}{\dot{Z}_{вх} + \dot{Z}_{дж}} \right|^2, \quad (3)$$

де $x = R_{дж}$ за активного опору джерела та $x = X_{дж}$ за реактивного опору джерела.

Параметри a, b, c визначаються в такий спосіб:

$$a = \bar{e}_{ш}^2 \Delta f_{ш}; \quad (4)$$

$$b = \left(2\sqrt{\bar{e}_{ш}^2 i_{ш}^2} \alpha + 4kT \right) \Delta f_{ш} \text{ або } b = \left(2\sqrt{\bar{e}_{ш}^2 i_{ш}^2} \beta + 4kT \right) \Delta f_{ш} \text{ для } x = R_{дж} \text{ і } X_{дж}, \text{ відповідно} \quad (5)$$

$$c = \bar{i}_{ш}^2 \Delta f_{ш}. \quad (6)$$

Шумові параметри підсилювального пристрою знаходяться з параметрів a, b, c (як бачимо з порівняння (2) і (3)) так:

$$e_{ш} = \sqrt{\frac{a}{\Delta f_{ш}}} \text{ при } \dot{Z}_{дж} = R_{дж} \text{ або } \dot{Z}_{дж} = jX_{дж}; \quad (7)$$

$$i_{ш} = \sqrt{\frac{c}{\Delta f_{ш}}} \text{ при } \dot{Z}_{дж} = R_{дж} \text{ або } \dot{Z}_{дж} = jX_{дж}; \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{b - 4kT}{2e_{ш} i_{ш} \Delta f_{ш}} \text{ при } \dot{Z}_{дж} = R_{дж}; \quad (9)$$

$$\beta = \frac{b}{2e_{ш} i_{ш} \Delta f_{ш}} \text{ при } \dot{Z}_{дж} = jX_{дж}. \quad (10)$$

Маючи експериментальні дані та аналітичну залежність, функціонал, який необхідно мінімізувати, можна записати відповідно до методу найменших квадратів так:

$$\mathfrak{J}(\theta) = \sum_{i=1}^N w_i (f_a(x_i) - f(x_i))^2, \quad (11)$$

де θ – вектор вимірюваних параметрів a, b, c ; N – кількість експериментально знятих точок залежності $f(x)$; x_i – значення імпедансу джерела сигналу для i -ї точки; w_i – коефіцієнт довіри до кожної експериментальної точки, що розраховується, виходячи із похибок вимірювань різного роду величин [1].

Для мінімізації функціоналу (5) застосовується ітераційний метод Левенберга–Маквардта, який включає два потужні методи мінімізації: метод найшвидшого спуску та метод Ньютонна [4].

Ітераційний процес записується як $\theta_k = \theta_{k-1} - B_{k-1}^{-1} q_{k-1}$, де θ_k, θ_{k-1} – вектор шумових параметрів на k -ій та $k-1$ -ій ітерації відповідно; q_{k-1} – вектор градієнтів функціоналу (5); B_{k-1} – матриця, розрахована на основі других похідних функціоналу (5) [4].

Функціонал (5) вказує, що значення шумових параметрів підбирається не за окремо взятими експериментальними точками, як це було у методах, поданих у [2; 3], а їх значення розраховується в такий спосіб, щоб отримати якнайкращий збіг експериментальної та теоретичної залежностей.

4. Вплив окремих складових похибок на визначення шумових параметрів підсилювального пристрою

Для підтвердження вищенаведених положень було проведено моделювання впливу похибок вимірювання деяких величин на похибку визначення шумових параметрів для наведеного методу (табл. 1) [1] та методу, описаного в [2] (табл. 2). Загальний підхід до аналізу впливу окремих похибок вимірюваних величин на похибки визначення шумових параметрів детально описаний в [1].

Формули для визначення значень коефіцієнтів довіри до кожної експериментальної точки w_i , які знаходяться на основі відомих правил знаходження похибок непрямих вимірювань, надто громіздкі і ми їх не наводимо. Було досліджено вплив похибок вимірювань таких величин: шумового сигналу на виході підсилювача (відносна похибка $\delta u_{ш}$); активної δR та реактивної δX складових імпедансу джерела сигналу; вхідного опору підсилювача $\delta R_{вх}$ та температури джерела сигналу δT .

Похибки визначення шумових параметрів описаним методом [1]

Похибки вимірювання	Похибки шумових параметрів	$\delta e_u, \%$	$\delta i_u, \%$	$\delta \alpha, \%$	$\delta \beta, \%$
$\delta u_u = 1\%$ (випадкова)		0.05	0.04	0.38	0.16
$\delta u_u = 1\%$ (систематична)		1.68	1.68	1.54	0
$\delta R(X) = 0.01\%$ (випадкова)		$2 \cdot 10^{-6}$	10^{-4}	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
$\delta R(X) = 0.001\%$ (систематична)		$2.5 \cdot 10^{-6}$	$3.6 \cdot 10^{-6}$	$1.18 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}
$\delta R_{\alpha} = 1\%$		0.046	0.92	1.7	1.84
$\delta T = 1\%$		0	0	0.45	0

Таблиця 2

Похибки визначення шумових параметрів методом, описаним в [2]

Похибки вимірювання	Похибки шумових параметрів	$\delta e_u, \%$	$\delta i_u, \%$	$\delta \alpha, \%$	$\delta \beta, \%$
$\delta u_u = 1\%$ (випадкова)		1	1	11.3	11.3
$\delta u_u = 1\%$ (систематична)		1	1	11.3	11.3
$\delta R(X) = 0.01\%$ (випадкова)		0	0	0.67	0.6
$\delta R(X) = 0.001\%$ (систематична)		0	0	0.067	0.06
$\delta R_{\alpha} = 1\%$		0	1	2.9	2.6
$\delta T = 1\%$		0	0	0.45	0

Порівнявши результати табл. 1 і 2, бачимо, що наведений метод загалом, дає змогу визначити шумові параметри підсилювального пристрою з меншою похибкою, особливо добре це видно під час визначення кореляційних параметрів α і β .

Висновки

Застосування теорії апроксимації експериментальних залежностей аналітичною кривою дало змогу побудувати новий метод визначення шумових параметрів канонічної шумової моделі підсилювального пристрою, який істотно знижує похибки визначення шумових параметрів, що підтверджується результатами розрахунків впливу окремих складових похибок, поданими в таблицях. Крім того, усунуто деякі притаманні існуючим методам недоліки, пов'язані з необхідністю застосовувати в них режими неробочого ходу і короткого замикання.

1. Нічога В.О., Остап О.П., Дуб П.Б. Новий підхід до вимірювання шумових параметрів підсилювальних пристроїв // *Електроніка і зв'язь*. – 2000. – № 9. – С. 34–38. 2. Громов В.И., Мошинский А.Е. Измерение первичных шумовых параметров усилителей различных типов // *Отбор и передача информации*. – 1985. – № 71. – С. 93–99. 3. Мизюк Л.Я. Методы повышения точности измерения коэффициента корреляции эквивалентных генераторов шума усилителей // *Радиотехника*. – 1992. – № 5–6. – С. 24–28. 4. *Справочник по вычислительным методам статистики* / Пер. с англ.; Под ред. Дж. Поллара. – М., 1982.