

**Proceedings of I International Conference**

**MODERN PROBLEMS  
OF RADIOELECTRONICS,  
TELECOMMUNICATIONS AND INSTRUMENT  
MAKING (MPRTI-2005)**

**Vinnitsa,  
2—5 June 2005**

**Матеріали I Міжнародної конференції**

**СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ  
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ  
ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ (СПРТІІ-2005)**

**м. Вінниця,  
2—5 червня 2005 року**

УДК 621.38+621.39+681.2

С 91

Друкується за рішенням Вченої Ради Вінницького національного технічного університету Міністерства Освіти і науки України

*Відповідальний редактор* В. М. Кичак.

*Рецензенти:* В. О. Поджаренко, д. т. н.  
Р. Н. Кветний, д. т. н.

Матеріали статей опубліковані в авторській редакції

**С 91 Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2005).** Матеріали першої міжнародної науково-технічної конференції. м. Вінниця, 2–5 червня 2005 року. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. — 189 с.

**ISBN 966-641-130-X**

Збірка містить матеріали доповідей I Міжнародної конференції з сучасних проблем радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування за п'ятьма основними напрямками: математичне моделювання та обробка сигналів в радіоелектронних та телекомунікаційних системах; системи та засоби збору, передачі та обробки виміральної інформації; програмне забезпечення радіоелектронних телекомунікаційних та біотехнічних систем; радіоелектронні системи та пристрої негatronіки; сучасні проблеми підготовки фахівців у галузі радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування.

УДК 621.38+621.39+681.2

**ISBN 966-641-130-X**

© Автори статей, 2005

© Упорядкування, Вінницький національний технічний університет, 2005



А. Рудик (Україна, Вінниця)

## ВИМІРЮВАННЯ ШУМІВ ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ

Шуми реального операційного підсилювача (ОП) можна змоделювати за допомогою двох незалежних джерел, а саме джерелами шумової напруги та шумового струму, включеними безпосередньо на вході ідеального ОП. При оцінці обох цих складових, приведених до входу ОП, виникають дві основні проблеми [1]:

– на виході реального ОП формується змішаний сигнал, що приводить до необхідності розділення цих складових;

– спектральна густина потужності шуму обох джерел порівняно мала, тому вимірювання їх параметрів можливе лише при достатньо великому підсиленні підсумкового шумового сигналу.

Спектральні характеристики власного шуму ОП досліджені досить ретельно, тому тут виділяють три основних діапазони [2]:

– частотний діапазон, де спектральна густина практично стала (тепловий та дробовий шум);

– частотний діапазон (приблизно до 1 кГц), в якому спектральна густина збільшується при зменшенні частоти пропорційно  $1/f$  (фліккер-шуми);

– частотний діапазон вище 1 МГц, в якому спектральна густина шуму збільшується пропорційно частоті.

В роботі в основному розглянуто питання вимірювання теплового шуму ОП з постійною спектральною густиною, при цьому в процесі вимірювання обидва джерела шуму вважають незалежними та стаціонарними. В загальному випадку відомо [3], що вимірювання шумової напруги та шумового струму ОП можливо тільки при підключенні до входу ОП активних опорів з регульованими параметрами. Для розглянутого випадку справедливе таке співвідношення:

$$\frac{U_{\text{ш}}^2}{df} = \left( \frac{U_R^2}{df} + \frac{I_R^2}{df} R_{\Sigma}^2 + 4kTR_{\Sigma} \right) \cdot \frac{K^2 K_0^2}{(K_0 + K)^2} \cdot \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2 \left( \frac{K}{K_0 + K} \right)^2}, \quad (1)$$

де  $U_{\text{ш}}$  – вихідна шумова напруга;  $df$  – ширина смуги пропускання ОП;  $U_R$  та  $I_R$  – відповідні шумова напруга та шумовий струм;  $K_0$  – коефіцієнт підсилення розімкненого ОП;  $\tau = \frac{1}{\omega_{\text{пр}}}$  – стала часу ОП, яка визначається його граничною частотою;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – абсолютна температура;  $\omega$  – поточна частота;

$K = 1 + \frac{R_{33}}{R_1}$  – коефіцієнт підсилення ОП в неінвертувальному включенні;  $R_{33}$  – опір кола зворотного зв'язку ОП;  $R_1$  – опір джерела шуму;

$R_{\Sigma} = \frac{R_1 R_{33}}{R_1 + R_{33}}$

Обидва джерела шуму входять до співвідношення (1) з різними ваговими коефіцієнтами. В цьому випадку можна виділити вже три складові підсумкового шуму: шумова напруга, шумовий струм та резистивний шум схеми. Так, при великих значеннях  $R_{\Sigma}$  на вихідний сигнал в основному впливає шумовий струм, а при малих значеннях  $R_{\Sigma}$  – шумова напруга. Діапазон, в якому проводять вимірювання, в основному визначається АЧХ ОП у відповідності з виразом (1). Вимірювання шумової напруги на виході ОП проводиться вольтметром середньоквадратичних значень.

На практиці допустимий діапазон зміни величини  $R_{\Sigma}$  обмежений паразитними ємностями схеми, які можуть суттєво впливати на точність вимірювань. Найбільш помітним такий вплив буде при вимірюванні шумового струму. Наявність паразитної ємності може призвести до різкої зміни коефіцієнта підсилення ОП в різних діапазонах частот та до самозбудження схеми. При цьому корекція частотних характеристик вимірювальної схеми розрахунковим способом буде неефективною. Крім того, при великих  $R_{\Sigma}$  схема буде досить чутливою до паразитних завод та наводок.

Розглянуті причини в значній мірі обмежують максимально досяжний коефіцієнт підсилення досліджуваного ОП у вимірювальній схемі та можливості розділення обох джерел шуму. При цьому вимірювання шумового струму ОП з польовими транзисторами на вході таким способом практично неможливо. Тому розглянемо метод вимірювання шумів ОП, оснований на періодичному оцінюванні у вимірювальній схемі рівня миттєвого шуму ОП за допомогою

пристрою вибірки та зберігання (ПВЗ). Власне вимірювання проводяться на другому етапі перетворення отриманої дискретизованої послідовності в неперервний сигнал, який відображає шумовий сигнал. Основною вимогою до ПВЗ є виключення можливості накладання спектрів, що забезпечується при виконанні теореми Котельникова. Таким чином, досліджуваний шумовий сигнал за допомогою дискретних схем може перетворюватися тільки в обмеженому діапазоні частот, який визначається частотою вибірки. Якщо ж ПВЗ реалізовано за інтеграторною схемою, то основному підсиленню підлягають шуми в низькочастотній області. Обидва цих положення і обумовлюють можливість дослідження неперервного шуму ОП тільки за допомогою ПВЗ інтеграторного типу.

В такій схемі реальні ключі представлені ідеальними елементами комутації, послідовно з якими включені відповідні джерела шуму. Ключі працюють попарно та синхронно, а ключ ідеального ПВЗ відкривається лише протягом короткого інтервалу часу наприкінці фази зберігання. Підсумкове співвідношення для спектральної густини потужності шуму на виході:

$$\frac{U_{III}^2}{df} = \frac{1}{f_s} \left[ \frac{S_1^+ K_R^2}{4 \sin^2 \frac{\omega \tau_s}{2}} + S_2^+ \right] \times \left( \frac{\sin \frac{\omega \tau_s}{2}}{\frac{\omega \tau_s}{2}} \right)^2, \quad (2)$$

де:  $S_1^+ = \frac{1}{2RC_R} \left( 4kTRF_1 + \frac{U_R^2}{df} F_2 + \frac{I_R^2}{df} R^2 F_3 \right); \quad S_2^+ = \frac{U_R^2}{df} \cdot \frac{\omega_T}{2}; \quad K_R = -\frac{K_0 C_R}{(K_0 + 1)C + C_R} \approx -\frac{C_R}{C};$

$$F_1 = \frac{2C(1 + \omega_T R C_R) + C_R}{C(1 + \omega_T R C_R) + C_R}; \quad F_2 = \frac{\omega_T R C_R C}{C(1 + \omega_T R C_R) + C_R}; \quad F_3 = \frac{2}{f_s R C_R} - \frac{2 + F_1}{\omega_T R C};$$

$f_s = 1/\tau_s$  – частота вибірки;  $\omega_T$  – миттєва частота;  $R$  – опір двох послідовно включених ключів.

В даному випадку покладають, що всі ключі в першому наближенні мають однакові шумові характеристики та однаковий опір в замкненому стані. Фактично складова вихідної напруги, обумовлена дією цих джерел, є завадою по відношенню до корисного сигналу, викликаного дією власних шумів ОП. Для проведення вимірювань та одночасного розділення шумового струму та шумової напруги ОП мають виконуватися такі умови: при вимірюванні шумового струму  $C_R, f_s, C, \omega_T$  та  $\omega$  мають вибиратися порівняно малими, а  $R$  має бути порівняно великим; при вимірюванні шумової напруги  $R, C$  та  $\omega$  мають приймати малі значення, а  $C_R, f_s$  та  $\omega_T$  – великі.

З співвідношення (2) можна зробити висновки про величину вихідного сигналу в залежності від параметрів схеми. Так, при малих значеннях  $C$  та  $\omega$  рівень вимірювального сигналу достатньо великий. Розділення обох складових вихідного шуму ОП можливий при відповідному виборі значень  $C_R$  та  $f_s$ . Використання інтеграторного ПВЗ у вимірювальній схемі дозволяє в значній мірі зменшити вплив паразитних ємностей та зовнішніх наводок на результат вимірювання.

Запропонований метод гарантує достовірні результати тільки для білого шуму ОП. В той самий час шум реального ОП має рівномірну спектральну густину в досить широкому діапазоні частот, тому розглянуті обмеження будуть справедливими для області середніх частот.

Для розглянутої методики існують обмеження на можливість вимірювання малих значень шумових струму і напруги для схеми з конкретними параметрами, що визначаються таким чином:

$$\frac{I_R^2}{df} > 4kTC_R f_s; \quad \frac{U_R^2}{df} > \frac{4kT}{\omega_T C}. \quad (3)$$

Так, при  $f = 1 \text{ кГц}, f_T = 1 \text{ МГц}, R = 250 \text{ Ом}, T = 300 \text{ К}$  для вимірювання шумового струму ( $C_R = C = 10 \text{ пФ}, f_s = 100 \text{ кГц}$ ) отримаємо  $I_R / \sqrt{df} > 40 \text{ фА} / \sqrt{\text{Гц}}$ , а при вимірюванні шумової напруги ( $C_R = 10 \text{ пФ}, C_R = 1 \text{ нФ}$ ) отримаємо  $U_R / \sqrt{df} > 16 \text{ нВ} / \sqrt{\text{Гц}}$ . Вимірювання шумового струму такого рівня відомими методами практично неможливо, а вимірювання значення шумової напруги з достатньо високою точністю збігається з результатами вимірювань відомими методами.

#### Література

1. Достал И. Операционные усилители. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
2. Суходоев И.В. Шумы в электрических цепях. – М.: Связь, 1975. – 352 с.
3. Мэддок Р.Дж. Эквивалентные схемы в электронике. – М.: Энергия, 1972. – 328 с.

**СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ  
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ,  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ТА  
ПРИЛАДОБУДУВАННЯ  
(СПРТП-2005)**

**Матеріали доповідей першої міжнародної  
науково-технічної конференції  
м. Вінниця, 2-5 червня 2005 року**

Матеріали подаються в авторський редакції

Видавництво ВНТУ «УНІВЕРСУМ-Вінниця»  
Свідоцтво Держкомінформу України  
Серія ДК № 746 від 25.12.2001  
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, гол. корпус, к. 114.  
Тел. (0432) 44-05-32

Підписано до друку 23.05.2005  
Формат 29,7x42<sup>1</sup>/<sub>4</sub> Гарнітура Times New Roman  
Папір офсетний Друк різнографічний  
Ум. друк. арк. 21,94 Наклад 140 прим.  
Зам. №2005-085

Комп'ютерний інформаційно-видавничий центр ВНТУ  
Свідоцтво Держкомінформу України  
Серія ДК № 746 від 25.12.2001  
м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, гол. корпус, к. 114.  
Тел. (0432) 44-01-50