

УДК 621.315.592

В. М. Кичак, д. т. н., проф.;

Д. В. Михалевський, асп.

МАТЕМАТИЧНА ШУМОВА МОДЕЛЬ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ЗА РІВНЕМ НИЗЬКОЧАСТОТНОГО ШУМУ

Запропоновано математичну шумову модель операційних підсилювачів, для прогнозування їх надійності за рівнем низькочастотного шуму на етапі виготовлення та вхідного контролю.

Вступ

Технологічний процес виготовлення операційних підсилювачів (ОП) постійно вдосконалюється, але для нього характерні недоліки, пов'язані з дефектами внутрішньої структури напівпровідникових підкладок, дефектами епітаксимальної плівки та контактів, які є одними з основних відмов радіоелектронної апаратури. Все це приводить до того, що значна частина виробів електронної техніки (ВЕТ) є потенційно ненадійними. Тому актуальним є розробка методів та засобів контролю надійності ВЕТ на етапі виробництва та вхідного контролю.

На даний час існують різні методи прогнозування надійності за рівнем НЧ шумів. Проведений аналіз показав, що відомі методи мають значну похибку оцінки надійності виробів. У роботах [1—4] розроблено нові методи прогнозування надійності інтегральних схем. Недоліками цих методів є відсутність математичного апарату і виконання додаткових процесів, що збільшують час отримання результату. Тому необхідно розробити оптимальний метод для прогнозування надійності інтегральних ОП, який буде відповідати сучасним вимогам і характеризуватися високою достовірністю контролю.

Метою даної праці є розробка оптимальної математичної шумової моделі ОП, яка дасть змогу визначити межу рівня шумової напруги низькочастотних шумів, вище якої операційний підсилювач буде вважатись потенційно ненадійним. Для цього необхідно розрахувати повну шумову модель, визначити оптимальні умови і режими вимірювання параметрів низькочастотного шуму, які забезпечують найвищу достовірність виявлення потенційно ненадійних структур.

Математична шумова модель інтегрального ОП

Прогнозування надійності внутрішньої структури ОП здійснюється за рівнем низькочастотних шумів типу $1/f$ і контактного. Ці шуми є функцією частоти і проявляють себе в дефектах різного роду. За наявності дефектів структури і на місцях з'єднання виводів виникають шуми, такі як контактні $\overline{e_{\text{конт}}^2}$ і шум типу $1/f$, які визначаються за виразами [5]

$$\overline{i_{\Phi}^2} = K \frac{I_6^n}{f^a} \Delta f, \quad \overline{e_{\text{конт}}^2} = K_{\text{конт}} \frac{I_{\text{конт}}^n}{f^a} \Delta f, \quad (1)$$

де K — коефіцієнт залежний від роду дефектів і матеріалу контакту; n — коефіцієнт, величина якого не перевищує 2 і залежить від об'ємної і поверхневої складових струму контакту.

Всі сучасні ОП є багатокаскадними підсилювачами, в яких умовно можна виділити вхідний або диференціальний, проміжний або підсилювач напруги і кінцевий каскади. Сучасний ОП є інтегральною схемою в якій може використовуватись один із методів ізоляції: діелектричний або ізоляція р-п переходом. Спрощена еквівалентна схема операційного підсилювача на біполярних транзисторах для діапазону низьких частот представлена на рис. 1 [6].

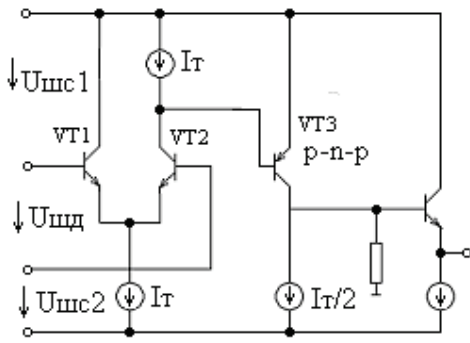


Рис. 1. Спрощена еквівалентна схема ОП

Диференціальний підсилювач має найбільший коефіцієнт підсилення, створює найбільший рівень шумів і будується на інтегральних p-n-p транзисторах. В проміжному каскаді використовуються горизонтальні p-n-p структури транзисторів. Вихідний каскад є узгоджувальним і його коефіцієнт підсилення біля одиниці, тому його шумовою напругою можна знехтувати.

Для повної оцінки шумових характеристик наведеної вище схеми будемо вважати, що кожен каскад є незалежним еквівалентним джерелом шумів. З урахуванням цього шумова модель вхідного каскаду ОП показана на рис. 2.

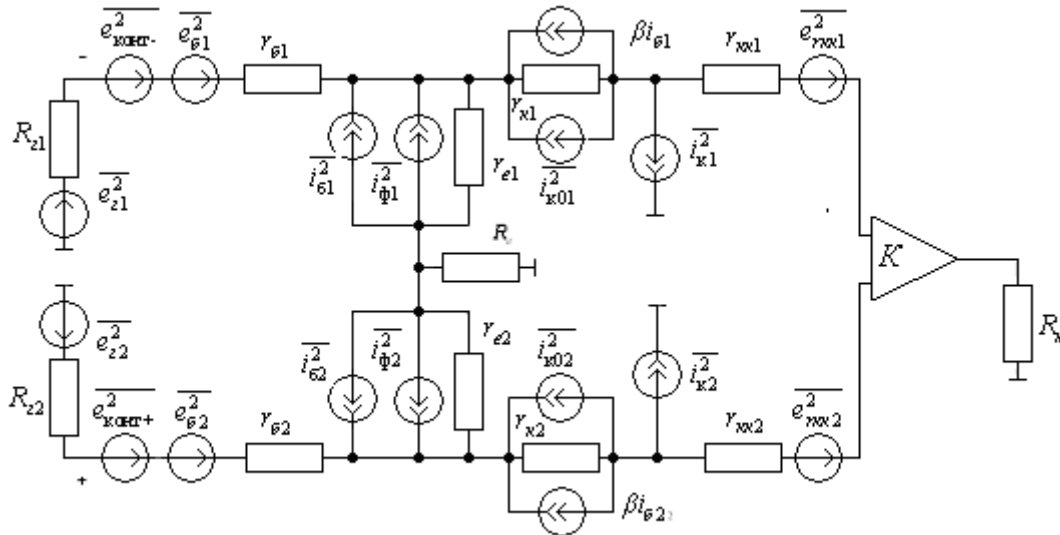


Рис. 2. Спрощена шумова модель ОП

Шуми, які залежать від частоти, враховують джерела $\overline{i_{\phi 1}^2}$, $\overline{i_{\phi 2}^2}$ і $\overline{e_{\text{конт}+}^2}$, $\overline{e_{\text{конт}-}^2}$, і визначаються формулою (1). Джерела $\overline{i_{\text{к}01}^2}$ і $\overline{i_{\text{к}02}^2}$ є шумами типу $1/f$, природа виникнення яких близька до шумів зворотного струму колекторного переходу, що є дробовими. Паралельно цьому відкритий еквівалентний генератор струму колекторного кола βi_{ϕ} , що є коефіцієнтом передачі шуму з входу на вихід. Паразитний зв'язок утворюють опори $r_{\text{кк}1}$ і $r_{\text{кк}2}$, із джерелами шуму $\overline{e_{\text{ркк}1}^2}$, $\overline{e_{\text{ркк}2}^2}$, в яких переважають теплові шуми. Джерела теплових шумів, які виділяються на внутрішніх опорах генераторів сигналу R_{T1} , R_{T2} і об'ємних опорів бази $r_{\phi 1}$, $r_{\phi 2}$, є $\overline{e_{r1}^2}$, $\overline{e_{r2}^2}$, $\overline{e_{\phi 1}^2}$, $\overline{e_{\phi 2}^2}$ і визначаються за формулою Найквіста

$$\overline{e^2} = 4kTR\Delta f.$$

Генератор стабільного струму на транзисторі, як правило має високий внутрішній опір і його можна замінити опором R_e . Опори r_{e1} , r_{e2} і r_{k1} , r_{k2} є диференціальними опорами емітерного і колекторного переходів.

Джерела $\overline{i_{\phi 1}^2}$, $\overline{i_{\phi 2}^2}$, $\overline{i_{k1}^2}$, $\overline{i_{k2}^2}$ є джерелами дробового шуму струмів бази і емітера [5]

$$\overline{i_{\phi}^2} = 4qI_e(1-\beta)\Delta f;$$

$$\overline{i_k^2} = 4qI_e\beta\Delta f.$$

З використанням ізоляції p-n переходом елементів ОП між колектором і підкладкою виникає паразитний зв'язок, який на низьких частотах характеризується додатковим опором. Саме рівень

шумової напруги джерела $\overline{e_{rkk}^2}$ надає інформацію про якість даного виду ізоляції. З діелектричною ізоляцією паразитні зв'язки суттєво зменшуються.

Оскільки плечі диференціального підсилювача є симетричними, то шум на виході буде складатися із суми шумів двох транзисторів. Диференційний каскад має підсилення по диференційному і синфазному входах, тому шумова напруга буде присутня в обох випадках. Визначимо її окремо для кожного з них.

Еквівалентну шумову напругу по диференційному входу можна визначити за виразом

$$\overline{e_d^2} = \frac{8\overline{e_6^2}R_{\text{вх}}^2}{(R_{\text{вх}} + R_e)^2} + \frac{8(\overline{i_6^2} + \overline{i_\Phi^2})R_{\text{вх}}^2r_6^2}{(R_{\text{вх}} + R_e)^2} + 8\overline{i_k^2} \frac{R_{\text{вх}}^2}{\beta^2(R_{\text{вх}} + R_e)^2} + \frac{\overline{e_{\text{кк}}^2}(R_{\text{вх}} + R_e + \beta r_6)}{\beta^2r_k^2} + \frac{4(\overline{e_{\text{конт-}}^2} + \overline{e_{\text{конт+}}^2})R_{\text{вх}}^2}{(R_{\text{вх}} + R_e)^2}.$$

Виконавши заміну $A = \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}} + R_e}$, отримаємо:

$$\overline{e_d^2} = 4 \left(2\overline{e_6^2} + 2(\overline{i_6^2} + \overline{i_\Phi^2})r_6^2 + \frac{2\overline{i_k^2}}{\beta^2} + \frac{\overline{e_{\text{кк}}^2}(\beta + 1)^2}{\beta^2r_k^2}(r_6 + r_e)^2 + \overline{e_{\text{конт-}}^2} + \overline{e_{\text{конт+}}^2} \right) A^2. \quad (2)$$

Еквівалентну шумову напругу за синфазним входом можна розрахувати з використанням виразу

$$\overline{e_c^2} = 8\overline{e_6^2} + 8(\overline{i_6^2} + \overline{i_\Phi^2})r_6^2 + \frac{8\overline{i_k^2}}{\beta^2} + \frac{\overline{e_{\text{кк}}^2}(\beta + 1)^2}{\beta^2r_k^2}(r_6 + r_e)^2 + 4(\overline{e_{\text{конт-}}^2} + \overline{e_{\text{конт+}}^2}). \quad (3)$$

Рівень шумової напруги диференційного входу є вищим, але форма вихідної частотно-залежної характеристики шумів залишається незмінною.

Еквівалентний шумовий струм визначається за умови високого опору генератора, і його величина може бути розрахована за виразом

$$\overline{i^2} = 2 \left(\overline{i_6^2} + \overline{i_\Phi^2} + \frac{\overline{i_k^2}}{\beta^2} \right).$$

Оскільки вхідні шумові струми є малими і ОП є підсилювачем напруги, тому для оцінки якості тепловим і дробовим шумом можна знехтувати [5]. Таким чином

$$\overline{i^2} \approx 2\overline{i_\Phi^2}.$$

Проміжний каскад зазвичай є підсилювачем напруги і виконується на інтегральних транзисторах р-п-р типу. Їхні характеристики є гіршими ніж у п-р-п транзисторів, але паразитні зв'язки залишаються такими ж. Тому можна припустити, що математична шумова модель р-п-р транзистора є подібною до моделі [6] із відповідними характеристиками. Таким чином

$$\overline{e_p^2} = \overline{e_6^2} + \overline{i_{\Phi p}^2}r_6^2 + \frac{\overline{i_k^2}}{\beta_p^2} + \frac{\overline{e_{\text{кк}}^2}(\beta_p + 1)^2}{\beta_p^2r_k^2}(r_6 + r_e)^2, \quad (4)$$

$$\overline{i_p^2} \approx \overline{i_{\Phi p}^2}.$$

На даний час в інтегральних структурах в якості р-п-р транзистора використовується горизонтальна і вертикальна структура, тому коефіцієнт підсилення не буде перевищувати 50.

Врахування елементів схеми вмикання

Для прогнозування надійності за рівнем низькочастотного шуму, ОП вмикають за відповідними схемами. Елементи цих схем вносять свій рівень шуму. Визначивши цей вплив можна отримати достовірнішу шумову характеристику, а отже меншу похибку прогнозування надійності.

З урахуванням того, що \bar{e}^2 і \bar{i}^2 є джерела, які відображають внутрішні шуми ОП, що описуються формулами (2) і (3), еквівалентну шумову модель можна подати у вигляді, показаному на рис. 3а.

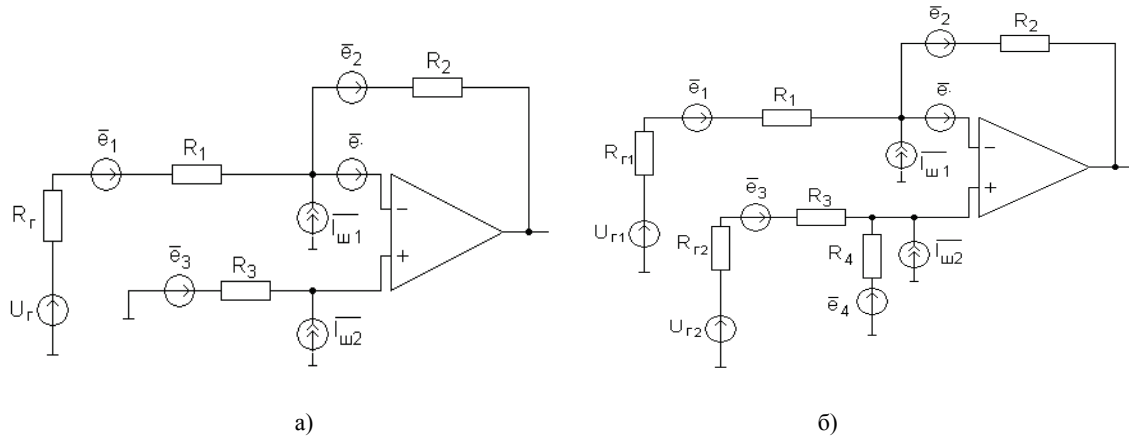


Рис. 3. Еквівалентна шумова модель за синфазним (а) і диференційним (б) вмиканням ОП

Проведемо розрахунок шумової моделі ОП при інвертувальному вмиканні із використанням генератора шуму і правилом додавання шумових джерел. При цьому кожне джерело шуму, яке діє у схемі, є незалежним і джерела шумів \bar{e}_1 , \bar{e}_2 , \bar{e}_3 , \bar{e}_4 є джерелами теплового шуму.

Використовуючи правило додавання шумових джерел, повна шумова напруга на виході інвертувального вмикання визначається як:

$$\bar{U}^2 = \bar{e}_1^2 \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 + \bar{e}_2^2 + \bar{e}_3^2 \left(\frac{R_1 + R_2 + R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 + \bar{e}_4^2 + \bar{i}_{ш1}^2 R_2^2 + \bar{i}_{ш2}^2 R_3^2 \left(\frac{R_1 + R_2 + R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 + \bar{e}_2^2 \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)^2.$$

Вважаючи, що транзистори диференціального каскаду однакові, при короткому замиканні на вході, отримаємо

$$\bar{U}^2 = \bar{e}_1^2 \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 + \bar{e}_2^2 + \bar{e}_3^2 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2 + \bar{e}_4^2 + \bar{i}_{ш}^2 \left[R_2^2 + R_3^2 \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

Таким чином, підставляючи формули (3) і (4) у (5) і виконавши заміну $B = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$, отримаємо повну шумову напругу на виході ОП для інвертувальної схеми вмикання

$$\bar{U}_{ш.с} = 4kT\Delta f \left[R_1 (B-1)^2 + R_2 + R_3 B^2 + 8r_6 + \frac{r_{кк} (r_6 + r)^2}{\beta^2 r_k^2} \left(\frac{5\beta^2}{4} + 3\beta + 1 \right) \right] + 4qI_e \left(4r_6^2 + \frac{5}{\beta^2} \right) \Delta f + \left(3K_\phi I_6 (3r_6^2 + R_2^2 + R_3^2 B^2) + 8K_{конт} I_{конт} \right) \frac{\Delta f}{f}. \quad (6)$$

Для диференційного вмикання, шумові джерела показані на рис. 3б. Розрахунок проведемо аналогічно попередньому випадку.

Загальна шумова напруга складе

$$\bar{U}^2 = \bar{e}_1^2 \left(\frac{R_2}{R_1 + R_{21}} \right)^2 + \bar{e}_2^2 + \bar{e}_3^2 \left(\frac{R_1 + R_{21} + R_2}{R_1 + R_{21}} \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_3 + R_{22}} \right)^2 + \bar{e}_4^2 +$$

$$+e_4^2 \left(\frac{R_1 + R_{r1} + R_2}{R_1 + R_{r1}} \cdot \frac{R_3 + R_{r2}}{R_4 + R_3 + R_{r2}} \right)^2 + i_{ш2}^2 \left(\frac{R_1 + R_{r1} + R_2}{R_1 + R_{r1}} \cdot \frac{(R_3 + R_{r2})R_4}{R_4 + R_3 + R_{r2}} \right)^2 + i_{ш1}^2 R_2^2.$$

Для спрощення наведеного виразу припустимо, що

$$i_{ш1}^2 = i_{ш2}^2 = i_{ш}^2; \quad R_{r1} = R_{r2} = R_r; \quad R_1 = R_3; \quad R_2 = R_4.$$

При короткому замиканні на вході, виконавши заміну $C = \frac{R_2}{R_1}$, вираз для обчислення загальної шумової напруги можна переписати так:

$$\overline{U_d^2} = 2e_1^2 C^2 + 2e_2^2 + 2i_{ш}^2 R_2^2 + e_d^2. \tag{7}$$

Підставимо (2) і (4) в (7) і після спрощення отримаємо:

$$\begin{aligned} \overline{U_d^2} = & 8KT\Delta f \left(R_1 C^2 + R_2 + r_6^2 A^2 + \frac{8r_{кк}(r_6 + r_e)}{\beta^2 r_k^2} \left((\beta + 1)^2 A^2 + \left(\frac{\beta}{2} + 1 \right)^2 \right) \right) + \\ & + 8qI_e \left(2r_6^2 A^2 + \frac{2A^2}{\beta^2} + \frac{1}{\beta^2} \right) \Delta f + \left(KI_6 (R_2^2 + 8r_6^2 A^2 + r_6^2) + 4K_{конт} I_{конт} \right) \frac{\Delta f}{f}. \end{aligned} \tag{8}$$

Отже повну шумову напругу, яка буде на виході інвертувального вмикання ОП і диференційного вмикання можна визначити за виразами (6) і (8) відповідно. Ці вирази враховують ізоляцію p-n переходом. Для діелектричної ізоляції складові, які враховують вплив паразитних зв'язків відсутні.

Результати досліджень

Як впливає із отриманих виразів, повна шумова напруга ОП має різні значення для синфазного і диференційного входів. Отже для повного аналізу необхідно дослідити даний вид шумів для різних режимів роботи. Для перевірки теоретичних результатів була обрана інтегральна схема ТНАТ 2181В, яка є ОП на біполярній структурі із діелектричною ізоляцією. Вимірювання проводилося на селективному вольтметрі В6-14 із попереднім підсиленням напруги шумів. На рис. 4 зображена теоретична і експериментальна частотна залежності еквівалентної шумової напруги по диференційному і синфазному входах ОП з урахуванням відповідної схеми вмикання.

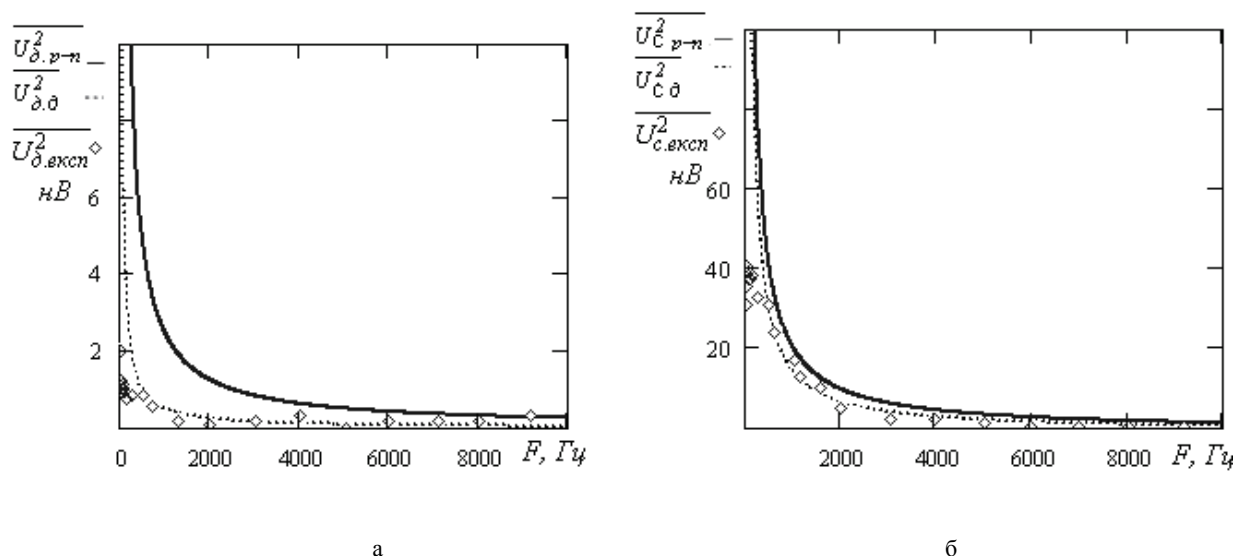


Рис. 4. Залежність еквівалентної шумової напруги від частоти за диференційним (а) і інвертувальним (б) вмиканням

Повний рівень шумів за синфазним входом має на порядок більше значення, що підтверджу-

ється експериментальними даними. Це обумовлюється наявністю додаткових теплових шумів першого каскаду ОП. Невеликі відхилення обумовлені випадковою похибкою вимірювача. На частотах нижче 20 Гц помітне різке відхилення рівня шуму через недостатню селективність. З ізоляцією р-п переходом рівень шуму є вищим ніж з ізоляцією діелектриком, що спричинено тепловими і частотозалежними шумами за рахунок паразитних зв'язків. Для інтегральних схем із супер- β транзисторами дослідження показали аналогічну залежність шумової напруги (рис. 4). Отже, в цілому вимірювання показали близьку відповідність математичній моделі.

Для визначення оптимальних умов широкого спектру інтегральних схем для прогнозування надійності, проведемо аналіз впливу режимів роботи ОП.

Вхідний струм для ОП може змінюватись, в залежності від моделі, в межах від 10 пА до 2 мА. Тоді, з урахуванням даного діапазону, рівень повної шумової напруги буде такий, як показано на рис. 5.

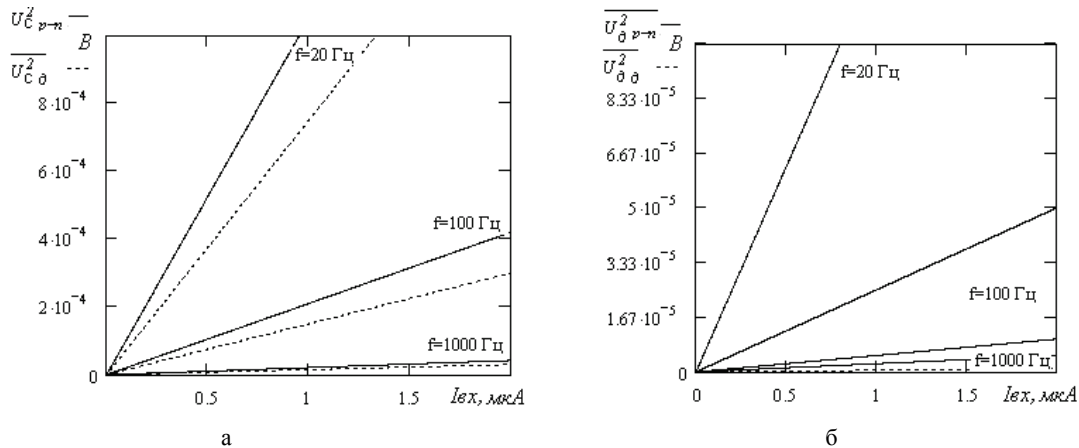


Рис. 5. Залежність еквівалентної шумової напруги від рівня вхідного струму за:
а — синфазним входом і б — диференційним входом ОП

Як видно із графіків за синфазним входом рівень шумової напруги більший на порядок. Для диференційного входу, на низьких частотах, вплив виду ізоляції незначний, але спостерігається більша крутість характеристики.

Вплив струму емітера транзисторів диференційного каскаду на еквівалентну шумову напругу показано на рис. 6.

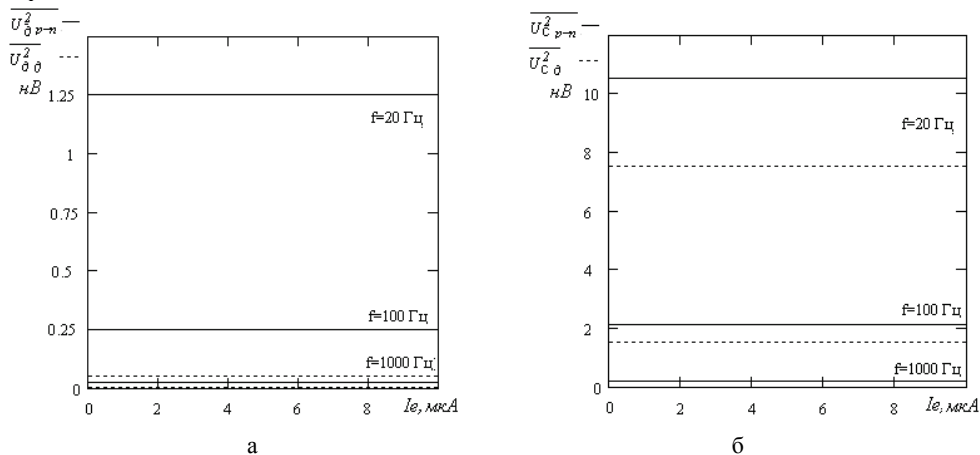


Рис. 6. Залежність еквівалентної шумової напруги від струму емітера у разі:
а — диференційного і б — синфазного вмикавання

Як показано вище, величина струму емітера на рівень шумової напруги не впливає. Прогнозуючи надійність, впливом струму емітера можна знехтувати.

Таким чином, шумові характеристики мають значний прояв на низьких частотах менше 100 Гц. Виходячи з проведених досліджень, використання частоти 1 кГц, як у класичних методах, для достовірного прогнозування надійності сучасних ОП є неможливим. Достатньою смугою частот мож-

на вважати смугу від 20 до 100 Гц.

Вимірювання шумової напруги достатньо проводити при синфазному вмиканні ОП, яке характеризується вищим рівнем шумів, але оптимальним варіантом є вимірювання за двома входами, що легко реалізується на практиці. Для вибірки деякої кількості ОП із одної партії виробів коефіцієнти якості $A1$ і $A2$ можна визначити за виразами

$$A1 = \frac{\overline{U_D^2} \overline{U_{D\text{сєр}}^2}}{U_{D\text{сєр}}^2}; \quad A2 = \frac{\overline{U_C^2} \overline{U_{C\text{сєр}}^2}}{U_{C\text{сєр}}^2},$$

де $\overline{U_{D\text{сєр}}^2}$, $\overline{U_{C\text{сєр}}^2}$ — середнє значення шумової напруги одної партії ОП за диференціальним і синфазним входами.

За відповідності коефіцієнтів $A1$ і $A2$ заданим межам можна вважати, що ОП є високонадійним, а за невідповідності одного із коефіцієнтів — ОП є менш надійним. Невідповідність коефіцієнтів надає інформацію про ненадійний виріб.

Висновки

Розроблена нова математична шумова модель операційного підсилювача, побудованого на біполярних транзисторах із урахуванням всіх шумових джерел для достовірного прогнозування надійності.

Проведено розрахунки і дослідження за диференціальним і синфазним входами, а також оцінено вплив елементів схеми на загальну шумову картину.

Проведенні дослідження показали, що для підвищення достовірності прогнозування надійності ОП потрібно вимірювати рівень шумової напруги на частотах до 100 Гц при синфазному і диференційному вмиканні. Суттєво впливає на рівень шумової напруги вхідний струм, що особливо проявляє себе на частотах 20 Гц і нижче. З ізоляцією р-п переходом рівень власних шумів вищий ніж з діелектричною ізоляцією, і він більше проявляється при синфазному вмиканні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Горлов М. И. Возможность отбраковки полупроводниковых приборов по уровню низкочастотного шума / М. И. Горлов, В. А. Емельянов, Д. Ю. Смирнов // Компоненты и технологии. — 2005. — № 8. — С. 198—201.
2. Смирнов Д. Ю. Разделение интегральных схем по надежности с использованием низкочастотного шума / Д. Ю. Смирнов // Микроэлектроника и информатика — 2006: докл. науч.-техн. конф. — М, 2006. — С. 110.
3. Методы диагностики полупроводниковых изделий с использованием электростатических разрядов / М. И. Горлов, В. А. Емельянов, И. И. Рубцевич [та ін.] // Микроэлектроника. — 2005. — Т. 34. № 3. — С. 27—36.
4. Использование уровня шумов для контроля полупроводниковых изделий при термоциклировании / Горлов М. И., Смирнов Д. Ю., Сегал Ю. [та ін.] // Известия вузов. Электроника. — 2005. — № 6. — С. 89—92.
5. Придорогин В. М. Шумовые свойства транзисторов на низких частотах / В. М. Придорогин. — М.: Энергия, 1976. — 160 с.
6. Авербух В. Операционные усилители: архитектура и динамические характеристики / В. Авербух // Основы схемотехники — 2001. — № 9—10

Рекомендована кафедрою телекомунікаційних систем та телебачення

Надійшла до редакції 23.04.08
Рекомендована до друку 11.06.08

Кичак Василь Мартинович — завідувач кафедри, **Михалевський Дмитро Валерійович** — аспірант.
Кафедра телекомунікаційних систем та телебачення, Вінницький національний технічний університет