

## ДОСЛІДЖЕННЯ ШУМОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ІНТЕГРАЛЬНИХ ДІОДІВ

В даній роботі запропоновано методика оцінки шумових характеристик для діодного вмикання інтегрального транзистора для проведення технологічного вихідного їх контролю за рівнем низькочастотних шумів.

Methodology of estimation of noise descriptions is offered in this work. These descriptions are used for the diode including of integral transistors. It gives an opportunity to conduct technological control after the level of low-frequency noise.

### Вступ

При проектуванні та виготовленні інтегральних схем, а також пристроїв на їх базі потрібно враховувати різні фактори: шумові характеристики, електричні характеристики, вплив паразитних зв'язків, температурні характеристики, режими роботи і т. ін. В роботі [1] проводилось дослідження шумових характеристик інтегральних транзисторів, як основного елемента інтегральних схем, із метою встановлення оптимальних умов проведення вхідного та вихідного технологічного контролю за рівнем низькочастотного шуму. Але на основі таких структур у інтегральній схемотехніці будуються і інші елементи електричних схем. Одним із таких елементів є інтегральний діод. Оскільки він будується на p-p-n структурах то для нього також характерні процеси деградації напівпровідникової структури з часом. Тому для забезпечення більш стабільної роботи готової інтегральної структурах схеми, на протязі заданого часу, є необхідним додатково проводити контроль якості структури інтегральних діодів на етапі вихідного контролю.

### Еквівалентні шумові схеми

На першому етапі вихідного технологічного контролю необхідно встановити межі контролюючого параметра на основі шумової моделі виробу електронної техніки, яка б враховувала всі відомі джерела шумів у вузькій смузі частот. Для цього використаємо еквівалентні схеми діодного вмикання інтегральних транзисторів p-p-n типу. Інтегральний діод використовує один із p-n-переходів, який є ізольованим від підкладки [2].

Існує декілька видів інтегральних діодів, які характеризуються діодним вмиканням інтегральних транзисторів (рис.1).

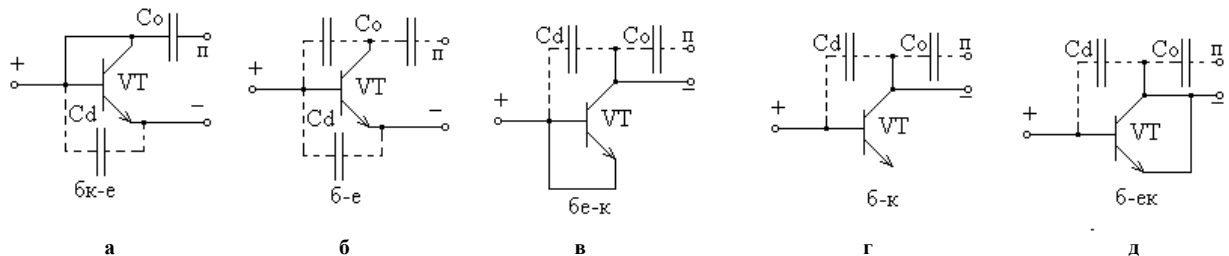


Рис.1 – Схеми діодного вмикання інтегрального транзистора

Як видно із наведених схем, їхні характеристики мають відрізнятись суттєво, що залежить від типу використовуваного напівпровідникового переходу. Можна припустити, що кожне діодне вмикання буде мати різну сумарну дію шумових джерел на виході, що впливатиме на загальне значення інформативного параметру контролю [1]. Проведемо перевірку даної гіпотези шляхом оцінки шумових характеристик для кожного діодного вмикання інтегрального транзистора. До речі, як і у випадку інтегрального транзистора, для даного випадку мають місце ті ж самі паразитні зв'язки, які необхідно враховувати.

Як відомо, основним контролюючим параметром, при вихідному контролі за рівнем НЧ шуму, є середньоквадратичне значення шумової напруги. Тому враховуючи шумову модель інтегрального транзистора [1] проведемо дослідження середньоквадратичного значення шумової напруги для всіх діодних вмикань, при цьому враховуючи коефіцієнт передачі рівним одиниці.

Розглянемо схему на рис.1 а. Для такої схеми еквівалентну шумову модель діодного вмикання інтегрального транзистора можна представити як на рис. 2.

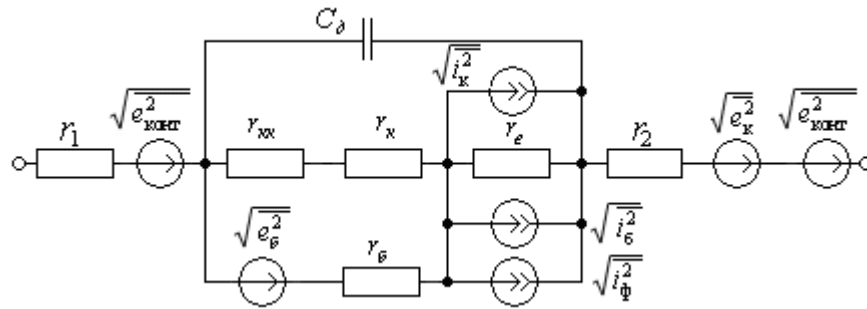


Рис. 2 – Шумова модель для діодного вмикання бк-е.

При такому вмиканні колекторний перехід з'єднаний із базовим. Паразитна ємність  $C_0$  шунтує колекторний перехід на підкладку і залежить від технології виготовлення. Як і у випадку інтегрального транзистора, її врахування є недоцільним, оскільки вважається що підкладка є заземленою. Діод характеризується ємністю переходу  $C_d$ , яка залежить від площі робочої ділянки, джерело шуму якої можна записати так:

$$\overline{e_c^2} = \frac{4kT}{fC_d} \sin \delta \cos \delta,$$

де  $\delta$  – кут діелектричних втрат;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – температура виробу, який досліджується (в даному випадку температура підкладки), К;

Джерела  $\overline{e_b^2}$ ,  $\overline{e_k^2}$  являють собою теплові шуми бази і колектора відповідно і мають однакову природу виникнення:

$$\overline{e_b^2} = 4kTr_b \Delta f.$$

де  $r$  – активна складова електричного опору досліджуваного елемента;  $\Delta f$  – ширина смуги частот в якій досліджуються флуктуації шуму.

Середньоквадратичне значення дробового шуму  $\overline{i_b^2}$ ,  $\overline{i_k^2}$  відображають флуктуації струмів бази і емітера:

$$\overline{i_b^2} = \overline{i_k^2} = 4qI_{p-n} \Delta f,$$

де  $q$  – заряд електрона;  $I$  – постійний струм через  $p-n$  перехід.

Частотозалежні складові визначаються джерелом фліккер шуму  $\overline{i_\phi^2}$  та джерелами контактних шумів  $\overline{e_{kont}^2}$ , які можна записати так:

$$\overline{i_\phi^2} = K \frac{I_b^n}{f} \Delta f,$$

$$\overline{e_{kont}^2} = \frac{KI_c^2}{f} r \Delta f,$$

де  $I_b^n$  – середнє значення постійного струму, який протікає через базову область;  $I_c^2$  – середнє значення постійного струму, який протікає через контакт;  $f$  – частота;  $K$  – постійна, яка залежить від виду матеріалу, виду контакту і його конфігурації;  $r$  – опір контактів (позначення визначає опір вхідного контакту  $r_1$  та вихідного –  $r_2$ ).

Враховуючи еквівалентну шумову схему на рис. 2 та правило додавання шумових джерел, оскільки джерела шумів є некорельованими, середньоквадратичне значення шумової напруги на виході діодного вмикання інтегрального транзистора бк-е можна записати наступним чином:

$$\overline{e_1^2} = \overline{e_{\text{конт}1}^2} + \frac{(r_{\text{кк}} + r_{\text{к}} + r_e)^2 \overline{e_{\text{б}}^2}}{4\pi^2 f^2 C^2 \left( r_{\text{б}} + \frac{r_{\text{кк}} + r_{\text{к}} + r_e}{2\pi f C (r_{\text{кк}} + r_{\text{к}} + r_e + \frac{1}{2\pi f C})} \right)^2 \left( (r_{\text{кк}} + r_{\text{к}} + r_e + \frac{1}{2\pi f C})^2 + (\overline{i_{\text{к}}^2} + \overline{i_{\text{ф}}^2} + \overline{i_{\text{б}}^2}) r_{\text{б}}^2 + \overline{e_{\text{к}}^2} + \overline{e_{\text{конт}2}^2} \right)}$$

Розглянемо вмикання б-е, яке зображено на рис. 1 б. В даному випадку колекторний перехід не використовується, і врахування шумів даної області можна нехтувати. Активні джерела шуму переходу б-е можна зобразити еквівалентною схемою як на рис. 3.

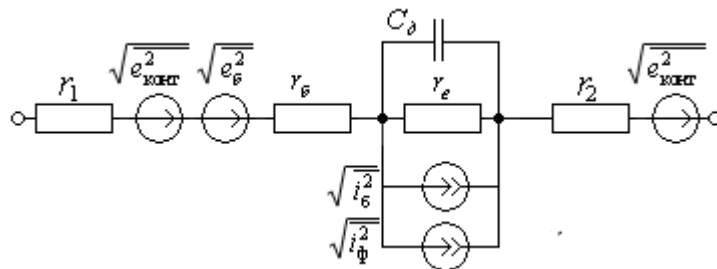


Рис. 3 – Шумова модель діодного вмикання б-е.

Таке вмикання характеризується відсутністю паразитного зв'язку колектора із підкладкою як у інтегрального транзистора. В такому випадку, середньоквадратичне значення шумової напруги на виході можна записати як:

$$\overline{e_2^2} = \overline{e_{\text{вход}1}^2} + \overline{e_{\text{б}}^2} + (\overline{z_{\text{б}}^2} + \overline{z_{\text{д}}^2}) \frac{r_{\text{д}}^2}{1 + 4\pi^2 f^2 r_{\text{д}}^2 \tilde{N}_{\text{д}}^2} + \overline{e_{\text{к}}^2} + \overline{e_{\text{вход}2}^2}$$

Еквівалентна шумова модель для вмикання б-к, для схеми на рис. 1 в, має вигляд як на рис. 4.

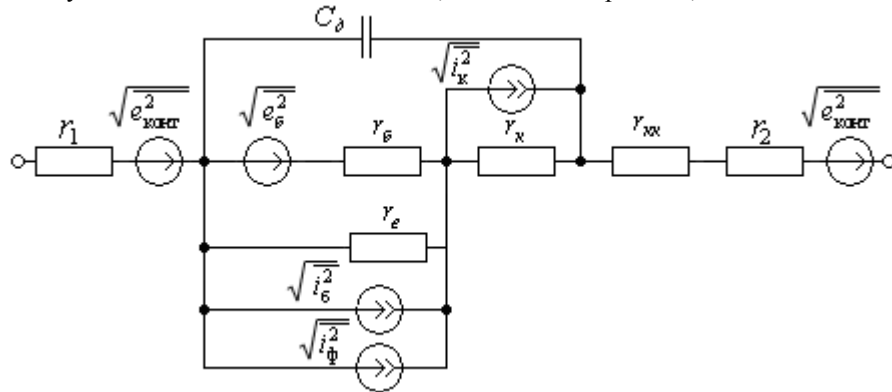


Рис. 4 – Шумова модель діодного вмикання б-к.

Наведена вище схема є з'єднанням емітерного та базового переходів між собою, що є вхідним електродом діода. В такому випадку середньоквадратичне значення шумової напруги можна записати наступним чином:

$$\overline{e_3^2} = \overline{e_{\text{конт}1}^2} + \frac{\left( \frac{r_{\text{б}} r_e}{r_{\text{б}} + r_e} + r_{\text{к}} \right)^2}{4\pi^2 f^2 C^2 \left( \frac{r_{\text{б}} r_e}{r_{\text{б}} + r_e} + r_{\text{к}} + \frac{1}{2\pi f C} \right)^2} \left( \frac{\overline{e_{\text{б}}^2}}{r_{\text{б}}^2} + \overline{i_{\text{б}}^2} + \overline{i_{\text{ф}}^2} \right) +$$

$$+ \frac{\overline{i_k^2} \left( \frac{r_{\delta} r_e}{r_{\delta} + r_e} + r_k \right)^2}{1 + 4\pi^2 f^2 C_d^2 \left( \frac{r_{\delta} r_e}{r_{\delta} + r_e} + r_k + \frac{1}{2\pi f C} \right)^2} + \overline{e_{кк}^2} + \overline{e_{конт2}^2}.$$

Діодне вмикання б-к для схеми на рис. 1 г, можна замінити еквівалентною шумовою схемою яка наведена на рис.5.

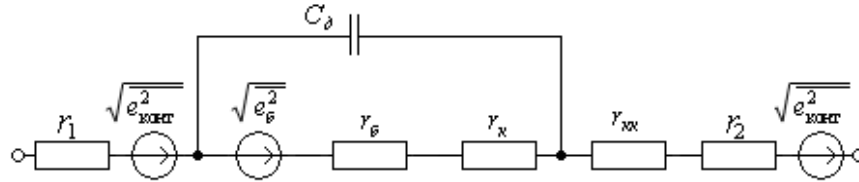


Рис. 5 – Шумова модель діодного вмикання б-к.

Для наведеної вище схеми значення середньоквадратичної шумової напруги запишеться так:

$$\overline{e_4^2} = \overline{e_{конт1}^2} + \overline{e_{\delta}^2} + (\overline{i_{\delta}^2} + \overline{i_{\phi}^2}) \frac{(r_{\delta} + r_k)^2}{1 + 4\pi^2 f^2 (r_{\delta} + r_k)^2 C_d^2} + \overline{e_{кк}^2} + \overline{e_{конт2}^2}.$$

І на кінець для останнього способу, використовуючи схему на рис. 1 г, діодне вмикання б-к замінимо еквівалентною схемою яка наведена на рис.6.

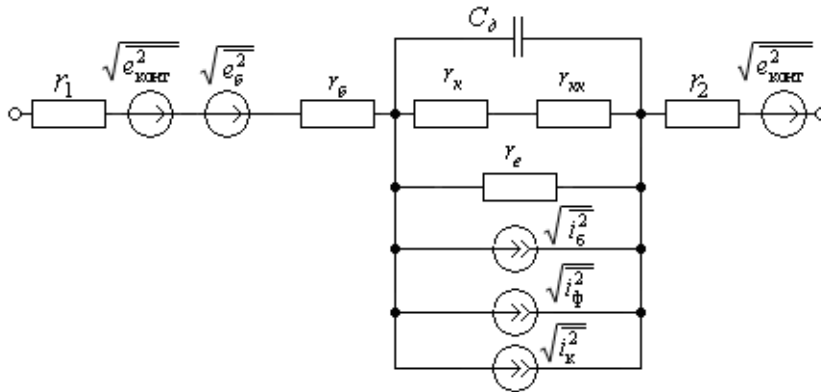


Рис. 6 – Шумова модель діодного вмикання б-к.

Середньоквадратичне значення шумової напруги для такого випадку можна записати так:

$$\overline{e_5^2} = \overline{e_{конт1}^2} + \overline{e_{\delta}^2} + (\overline{i_{\delta}^2} + \overline{i_{\phi}^2} + \overline{i_k^2}) \frac{r_e^2 (r_k + r_{кк})^2}{4\pi^2 f^2 C_d^2 \left( \frac{1}{2\pi f C} + \frac{r_e (r_k + r_{кк})}{r_e + r_k + r_{кк}} \right)^2 (r_e + r_k + r_{кк})^2} + \overline{e_{конт2}^2}.$$

### Результати досліджень

На основі отриманих математичних виразів проведемо дослідження середньоквадратичного значення шумової напруги від частоти, для всіх видів діодного вмикання інтегрального транзистора. Результати досліджень наведено на рис.7 а.

Як показують графіки на рис. 7 а, найнижчим рівнем шумів характеризуються діодне вмикання бк-е, (e<sub>1</sub>) та е-б (e<sub>2</sub>). Таким чином дані ввімкнення є оптимальними для використання в мал шумлячих інтегральних схемах, що працюють в мікрорежимах.

Для визначення оптимальних умов для проведення операцій контролю широкого спектру інтегральних діодів, проведемо аналіз впливу режимів роботи та зміни характеристик діодного переходу, у заданій смузі із центральною частотою 30 Гц, де є найбільший прояв низькочастотного шуму [3].

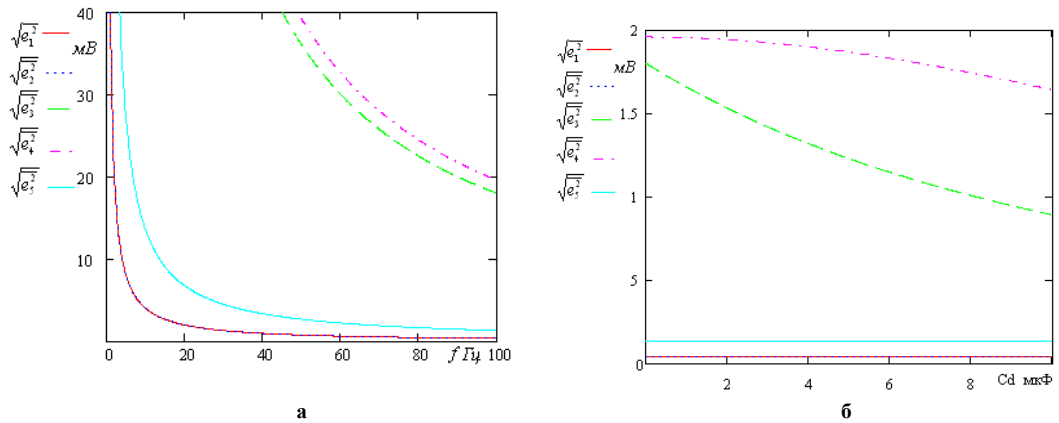


Рис. 7 – Залежність середньоквадратичного значення шумової напруги: а – від частоти; б – від ємності діодного переходу

Таким чином, результати проведених досліджень впливу ємності діодного переходу на значення середньоквадратичної шумової напруги на виході показано на рис. 7 б. Вплив паразитного опору на рівень шуму та вплив струму діодного переходу на рівень шумів наведено на рис. 8 а та рис. 8 б відповідно.

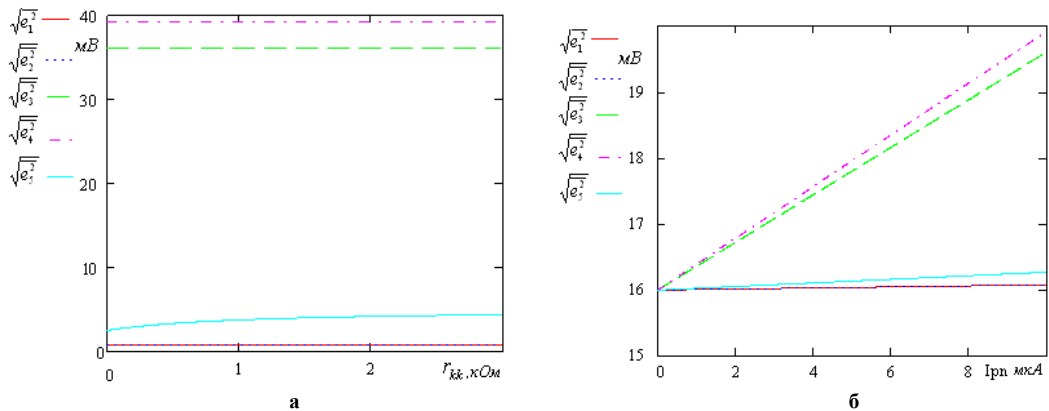


Рис.8 – Залежність середньоквадратичного значення шумової напруги: а – від паразитного опору; б – від струму на діодному переході

Із отриманих графіків можна зробити висновок, що діодне ввімкнення інтегрального транзистора бк-к і б-к є недоцільним і небажаним, так як їх шумові характеристики є значно високими по відношенню до інших, а також мають високу залежність від режиму роботи та паразитних зв'язків. Найбільш оптимальним, з точки зору шумових характеристик, є використання вмикання бк-е, для якого вплив паразитних характеристик є незначним і ним можна нехтувати.

### Висновок

Отже в даній роботі було запропоновано та досліджено шумову математичну модель всіх видів діодного вмикання інтегрального транзистора та проаналізовано їх шумові характеристики для операцій вихідного контролю інтегральних схем за рівнем власних низькочастотних шумів, на основі яких можна визначати границі допуску. Дослідження показали, що найкращі шумові характеристики має вмикання бк-е. Контроль таких діодів доцільно проводити в діапазоні до 100 Гц, так як і для інтегральних транзисторів. Також є доцільним використання режиму роботи із підвищеним струмом переходу, для виявлення прихованих дефектів.

### Література

1. Михалевський Д.В. Оцінка якості інтегральних транзисторів за допомогою низькочастотних шумів / Д.В.Михалевський, В.М. Кичак, В.В. Стронський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2005. – №2. – С. 177-181.
2. Степаненко І.П. Основи мікроелектроніки. – М.: ЛБЗ, 2004. – 488 с.
3. Михалевський Д.В. Математична шумова модель інтегральних операційних підсилювачів для прогнозування надійності за рівнем низькочастотного шуму / В.М. Кичак, Д.В. Михалевський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – №3. – С. 102-108.