

Автономные параметры транзисторов базового матричного кристалла АБМК_1_3 в условиях радиационных и температурных воздействий

Н.Н. Прокопенко, П.С. Будяков, А.И. Серебряков

Проблемная лаборатория перспективных технологий и процессов ЦИПБ РАН и ЮРГУЭС

prokopenko@sssu.ru, budyakovp@gmail.com, sashaag@mail.ru

Аннотация — Исследуются режимная, радиационная и температурная зависимость автономных параметров транзисторов базового матричного кристалла АБМК_1_3. Приводятся аппроксимирующие функции, позволяющие количественно оценить влияние внешних воздействий на нулевой уровень и его дрейф в аналоговых микросхемах. Показаны направления практического использования моделей транзисторов при синтезе прецизионных дифференциальных каскадов.

Ключевые слова — аналоговые микросхемы, теория автономного многополюсника, радиационное и температурное воздействия, модели транзисторов, прецизионные дифференциальные усилители.

I. ВВЕДЕНИЕ

Для расчета влияния температуры и радиации на схемные функции аналоговых устройств, содержащих активные многополюсные элементы (транзисторы), необходимо определить их автономные и неавтономные параметры [1]. Данный теоретический подход, развитый в работах Анисимова В.И. [1], может быть использован для анализа статического режима, в том числе нулевого уровня аналоговых микросхем на биполярных транзисторах, работающих в условиях температурных и радиационных воздействий.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНЗИСТОРОВ С УЧЕТОМ ВНЕШНИХ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

Автономные параметры E_{wr} и J_{ws} многополюсника [1] определяются следующей обобщенной системой уравнений:

$$E_{wr} = E_{wr}^0 + \Delta E_{wr}; J_{ws} = J_{ws}^0 + \Delta J_{ws}, \quad (1)$$

где $E_{wr}^0 = U_r^0 - (\sum z_{ri} I_i^0 + \sum \mu_{rj} U_j^0)$;

$$J_{ws}^0 = I_s^0 - (\sum B_{si} I_i^0 + \sum y_{sj} U_j^0);$$

$$y_{ri} = \frac{\partial I_s}{\partial U_j}, \Delta E_{wr} = \sum_k \frac{\partial U_r}{\partial \varepsilon_k} \Big|_{X_0, \varepsilon_k} (\varepsilon_k - \varepsilon_k^0),$$

$$B_{si} = \frac{\partial I_s}{\partial I_i}, \mu_{ri} = \frac{\partial U_r}{\partial I_j}, \Delta J_{ws} = \sum_k \frac{\partial I_r}{\partial \varepsilon_k} \Big|_{X_0, \varepsilon_k} (\varepsilon_k - \varepsilon_k^0),$$

$$z_{ri} = \frac{\partial U_r}{\partial I_i},$$

где E_{wr}^0, J_{ws}^0 – постоянные составляющие автономных параметров E_{wr}, J_{ws} ; $\varepsilon_k^0, \varepsilon_k$ – внешние возмущающие факторы; $\Delta E_{wr}, \Delta J_{ws}$ – отклонение автономных параметров; U_i, I_i – переменные, характеризующие каждый вывод многополюсного элемента.

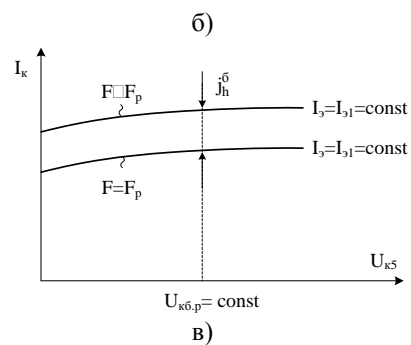
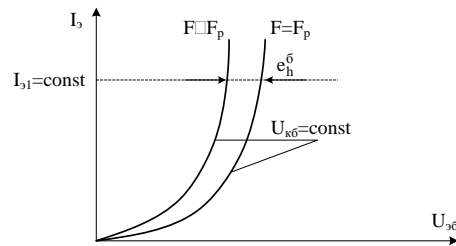
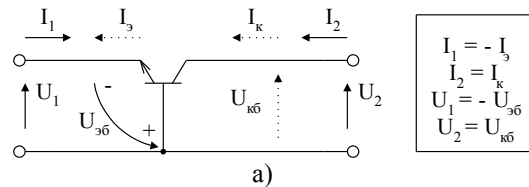


Рис. 1. Транзистор как автономный четырёхполюсник (а) и радиационное смещение его статических характеристик (б, в)

Уравнения транзистора как автономного четырех-полосника (рис. 1) для системы h-параметров в схеме с общей базой имеют вид:

$$\begin{aligned} u_1 &= h_{11}i_1 + h_{12}u_2 + e_h^{*6} + e_h^6 \\ i_2 &= h_{21}i_1 + h_{22}u_2 + j_h^{*6} + j_h^6, \end{aligned} \quad (2)$$

где e_h^{*6} , j_h^{*6} – автономные параметры транзистора, учитывающие влияние температуры (Т);

e_h^6 , j_h^6 – автономные параметры транзистора, характеризующие влияние потока нейтронов (F).

Причём:

$$e_h^{*6} = \frac{\partial U_1}{\partial T} \left| \begin{array}{l} dT \\ I_1 = I_{1p} = \text{const} \\ F = F_p = \text{const} \\ T = T_p = \text{const} \end{array} \right.; j_h^{*6} = \frac{\partial I_2}{\partial T} \left| \begin{array}{l} dT \\ I_1 = I_{1p} = \text{const} \\ F = F_p = \text{const} \\ T = T_p = \text{const} \end{array} \right. \quad (3)$$

Для схемы включения n-p-n транзистора с общей базой численные значения автономных параметров e_h^{*6} и j_h^{*6} можно с достаточно высокой точностью найти по формулам [2]:

$$e_h^{*6} = \frac{U_{go} - U_{эб}}{T_p} \Delta T, \quad (4)$$

$$j_h^{*6} = \Delta\alpha I_{эп} + \Delta I_{кб.о} \approx \frac{I_{эп}}{\beta T_p} \Delta T + I_{кб.о} e^{c\Delta T}, \quad (5)$$

где U_{go} – ширина запрещенной зоны (для кремния $U_{go}=1,2$ В); T_p , ΔT – начальная температура окружающей среды и её изменение; $I_{эп}$ – статический ток эмиттера; $I_{кб.о}$ – обратный ток коллекторного перехода; $\beta(\alpha)$ – коэффициент усиления по току базы (эмиттера); $\Delta\alpha = \frac{K_\alpha}{\beta T_p} \cdot \Delta T \approx K_\alpha(1 - \alpha)\Delta T$; c – температурный коэффициент изменения тока $I_{кб.о}$; $K_\alpha \approx 1 \div 1,2$ – постоянная, зависящая от величины β ($K_\alpha \approx 1$ при $\beta \rightarrow \infty$) [1].

Аналогично для радиационно-зависимых автономных параметров e_h^6 и j_h^6 можно найти:

$$e_h^6 = \frac{dU_1}{dF} \left| \begin{array}{l} \Delta F \\ I_1 = I_{1p} = I_{э1} = \text{const} \\ F = F_p = \text{const} \\ T = T_p = \text{const} \end{array} \right. = \frac{dU_{эб}}{dF} \left| \begin{array}{l} \Delta F \approx \Delta U_{эб} \\ I_э = I_{э1} = I_{1p} = \text{const} \\ F = F_p = \text{const} \\ T = T_p = \text{const} \end{array} \right.; \quad (6)$$

$$j_h^6 = \frac{dI_2}{dF} \left| \begin{array}{l} \Delta F \\ I_1 = I_{1p} = I_{э1} = \text{const} \\ F = F_p = \text{const} \\ T = T_p = \text{const} \end{array} \right. = \frac{dI_k}{dF} \left| \begin{array}{l} \Delta F \approx \Delta I_k \\ I_э = I_{э1} = I_{1p} = \text{const} \\ F = F_p = \text{const} \\ T = T_p = \text{const} \end{array} \right., \quad (7)$$

где ΔF – изменение потока нейтронов относительно начального уровня F_p .

С учетом (2) эквивалентная схема транзистора для расчета статического режима, на который воздействует температура и радиация, может быть представлена в виде рис. 2.

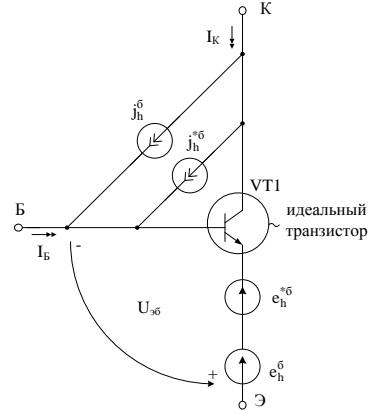


Рис. 2. Модель транзистора с учетом автономных параметров e_h^6 и j_h^6

Полученные выше формулы характеризуют автономные параметры, которые позволяют определить нулевой уровень сложных электронных схем и его дрейф с учетом изменений статических характеристик транзисторов при внешних воздействиях [1, 2, 3, 5, 6, 7].

III. РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЖИМНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ АВТОНОМНЫХ ПАРАМЕТРОВ e_h^6 И j_h^6

При синтезе конкретных электронных схем необходимо располагать достаточно точной информацией об изменении напряжения эмиттер-база и коллекторного тока транзистора под действием радиации (ΔF). По существу e_h^6 и j_h^6 характеризуют именно эти изменения в схеме с общей базой при $I_э=\text{const}$, $U_{кб}=\text{const}$, $F=\text{var}$:

$$e_h^6 = \Delta U_{эб} \left| \begin{array}{l} I_э = \text{const} \\ U_{кб} = \text{const} \end{array} \right.; \quad (8)$$

$$j_h^6 = \Delta I_k \left| \begin{array}{l} I_э = \text{const} \\ U_{кб} = \text{const} \end{array} \right. \quad (9)$$

Используя радиационно-зависимые модели транзисторов АБМК_1_3 [4], а также математическое опеределение e_h^{δ} и j_h^{δ} , можно построить графики $j_h^{\delta} = f_1(F)$, $e_h^{\delta} = f_2(F)$ при разных статических токах эмиттера I_3 и разных уровнях потока нейтронов F [н/см²] (рис. 3, рис. 4).

Таким образом, компьютерное моделирование режимной и радиационной зависимости j_h^{δ} (рис. 3) и e_h^{δ} (рис. 4) позволяет при известных значениях статического эмиттерного тока (I_3) и заданном потоке нейтронов (F) определить величины смещения входной (e_h^{δ}) и выходной (j_h^{δ}) характеристик n-p-n транзисторов базового матричного кристалла АБМК 1 3.

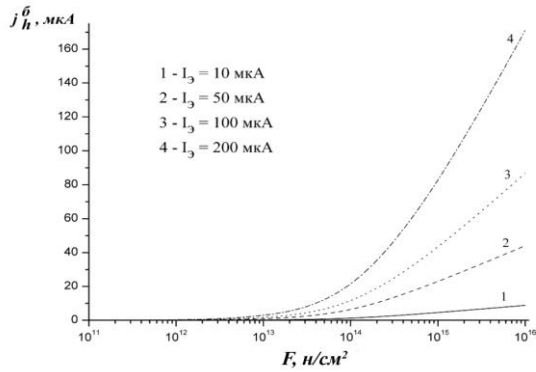


Рис. 3. Радиационная зависимость j_h^{δ} в широком диапазоне изменения F ($10^{11} \div 10^{16}$ н/см²)

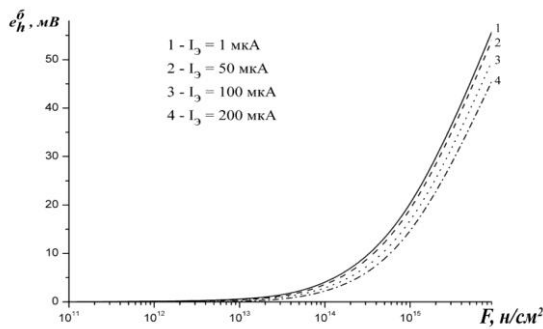


Рис. 4. Радиационная зависимость автономного параметра e_h^{δ} в широком диапазоне изменения потока нейтронов

IV. АППРОКСИМАЦИЯ АНАЛИТИЧЕСКИМИ ФУНКЦИЯМИ РЕЖИМНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ АВТОНОМНОГО ПАРАМЕТРА j_h^{δ}

Для практических расчетов величин j_h^{δ} можно аппроксимировать полученные выше графики

$$j_h^{\delta} = f_1(F) \Big|_{I_3 = \text{var}} \text{ аппроксимирующей функцией вида:}$$

$$j_h^{\delta} = \frac{aF}{b+F}, \quad (10)$$

где F – переменная величина (поток нейтронов), [н/см²]; a, b – постоянные коэффициенты аппроксимирующей функции $f_1(F)$ для выбранного тока эмиттера.

В таблице 1 приведены численные значения коэффициентов «а» и «b» при разных токах эмиттера.

Таблица 1

Взаимосвязь параметров аппроксимирующей функции (10) с током эмиттера

I_3 , мкА	10	50	100	200
a, мкА	9,83476	49,27228	98,54615	196,81672
b, н/см ²	1,20009E15	1,18871E15	1,35748E15	1,50898E15

При этом среднеквадратичное отклонение для всех кривых аппроксимации не превышает 0,999.

Пунктирной кривой на графике рис. 5 показана аппроксимация.

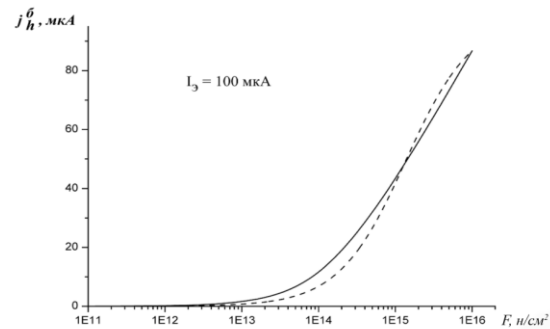


Рис. 5. Аппроксимация радиационной зависимости j_h^{δ} в диапазоне токов эмиттера $10 \div 200$ мкА

Таким образом, уравнение для j_h^{δ} (10) и таблица 1 позволяют аналитически оценить величину радиационного смещения выходных характеристик n-p-n транзисторов АБМК_1_3.

V. АППРОКСИМАЦИЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ФУНКЦИЕЙ РЕЖИМНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ АВТОНОМНОГО ПАРАМЕТРА e_h^{δ}

По аналогии с (10) можно аппроксимировать радиационную и режимную зависимость автономного параметра e_h^{δ} , характеризующего смещение входной характеристики транзистора следующей функцией:

$$e_h^{\delta} = \frac{cF}{d+F}, \quad (11)$$

где c, d – постоянные величины для заданного значения тока эмиттера (табл. 2).

Взаимосвязь параметров аппроксимирующей функции (11) с током эмиттера

I_3 , мкА	1	50	100	200
c , мВ	81,84418	81,75657	80,28488	79,77401
d , н/см ²	4,23437E15	4,678E15	5,64967E15	6,93644E15

Пунктирной кривой на рис. 6 показана аппроксимация.

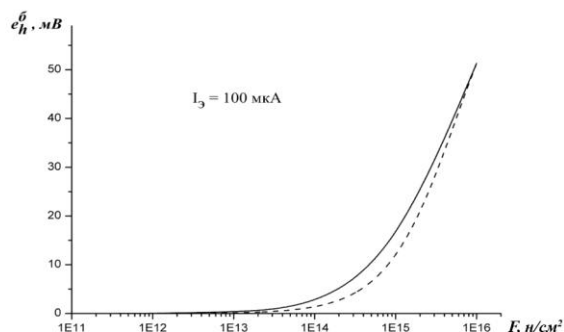


Рис. 6. Аппроксимация радиационной зависимости e_h^6 в диапазоне токов эмиттера $I_3=10\div 200$ мкА

Таким образом, уравнение для e_h^6 (11) и таблица 2 позволяют аналитически оценить величину радиационного смещения входных характеристик p-n транзисторов АБМК_1_3.

VI. СИНТЕЗ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ КАСКАДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОНОМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРОВ

Рассмотренные выше модели транзисторов позволяют осуществить синтез архитектур различных дифференциальных каскадов (ДК) с повышенной стабильностью нулевого уровня (U_{cm}) в условиях воздействия температуры и радиации [3, 5, 6, 7].

Основным условием синтеза является обеспечение взаимной компенсации приведенных ко входу ДК потенциальной и токовой составляющей э.д.с. смещения нуля (U_{cm}), зависящих от постоянных составляющих автономных параметров всех транзисторов E_{wr}^0 , J_{ws}^0 и их отклонений $\Delta E_{wr}^0 = e_{hi}$, $\Delta J_{ws}^0 = j_{hi}$ под влиянием дестабилизирующих факторов [3]. При этом постоянные составляющие автономных параметров транзисторов определяют систематическую составляющую нулевого уровня (U_{cm}), а их отклонения – его дрейф.

Многочисленные примеры синтеза практических схем прецизионных операционных усилителей и дифференциальных каскадов, использующие данную методику, приведены в [3, 5].

1. Разработана математическая модель транзисторов матричного кристалла АБМК_1_3 в условиях радиационных и температурных воздействий, основанная на теории автономного многополюсника.

2. Компьютерное моделирование режимной и радиационной зависимости j_h^6 и e_h^6 позволяет при известных значениях статического эмиттерного тока (I_3) и заданном потоке нейтронов (F) определить величину смещения входной (e_h^6) и выходной (j_h^6) характеристик транзистора АБМК_1_3.

3. Приведены аппроксимации аналитическими выражениями режимной и радиационной зависимости автономных параметров j_h^6 и e_h^6 .

4. Рассмотренные модели транзисторов могут быть положены в основу синтеза прецизионных дифференциальных каскадов [3, 5, 6, 7], имеющих малые значения U_{cm} и его дрейфа в условиях температурных и радиационных воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Анисимов В.И. Топологический расчет электронных схем / Анисимов В.И. Л.: 1977. 240 с.
- [2] Операционные усилители с непосредственной связью каскадов / Анисимов В.И., Капитонов М.В., Прокопенко Н.Н., Соколов Ю.М. Л.: 1979. 148 с.
- [3] Элементная база радиационно-стойких информационно-измерительных систем: монография / Прокопенко Н.Н., Дворников О.В., Крутинский С.Г. и др. Шахты: ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС», 2011. 209 с.
- [4] Комплексный подход к проектированию радиационно-стойких аналоговых микросхем / Дворников О.В., Гришков В.Н. // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем- 2010. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л.Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2010. С. 301-306.
- [5] Компенсация напряжения смещения нуля операционных усилителей с несимметричным включением активной нагрузки / Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И., Манжула В.Г. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика, Телекоммуникации. Управление. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2010. № 3. С. 196-200
- [6] Синтез структур аналоговых микросхем с повышенной стабильностью нулевого уровня в условиях радиации/ Прокопенко Н.Н., Конев Д.Н., Серебряков А.И. // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск «Актуальные проблемы производства и потребления электроэнергии». Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. № 5 (94). С.81-85.
- [7] Методы взаимной компенсации влияния токовых автономных параметров транзисторов на нулевой уровень аналоговых микросхем / Прокопенко Н.Н., Серебряков А.И., Будяков П.С. // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск «Методы и средства адаптивного управления в электроэнергетике». Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ. 2011. № 2 (115). С. 92-98.