

Кизин Дмитрий Владиславович,

студент гр. ЭН-22-1, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

Мазур Владимир Геннадьевич,

к.т.н., доцент кафедры «Промышленная электроника и информационно-измерительная техника», ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

e-mail: systems-ntfs@mail.ru

Маматназаров Жавохир Гурдович,

студент гр. ЭН-24-1, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

Пудалов Алексей Дмитриевич,

к.т.н., доцент кафедры «Промышленная электроника и информационно-измерительная техника», ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

e-mail: puddim@yandex.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА MATHCAD В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВТОРИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Kizin D.V., Mazur V.G., Mamatnazarov J.G., Poudalov A.D.

USING THE MATHCAD SOFTWARE PACKAGE IN THE PROBLEMS OF SENSITIVITY ANALYSIS OF SECONDARY PARAMETERS OF ELECTRONIC CIRCUITS

Аннотация. Для анализа чувствительности вторичных параметров схемы предложено использовать программный пакет MathCAD. Для примера предложена схема транзисторного усилителя. Предложено определить допуски на первичные параметры схемы на основе анализа чувствительности вторичных параметров. В качестве вторичных параметров предложено использовать потенциалы узлов схемы при проведении анализа по постоянному току. Построенные матрицы относительной чувствительности позволяют определять допуски на номиналы элементов схемы.

Ключевые слова: проектирование, моделирование, электроника, схемотехника, матричные методы, первичные параметры, вторичные параметры.

Abstract. It is proposed to use the MathCAD software package to analyze the sensitivity of the secondary circuit parameters. For example, a transistor amplifier circuit is proposed. It is proposed to determine the tolerances for the primary parameters of the circuit based on the sensitivity analysis of the secondary parameters. It is proposed to use the potentials of the circuit nodes as secondary parameters when conducting direct current analysis. The constructed relative sensitivity matrices make it possible to determine the tolerances for the nominal values of the circuit elements.

Keywords: design, modeling, electronics, circuit engineering, matrix methods, primary parameters, secondary parameters.

В задачах анализа электронных схем проектировщики часто сталкиваются с проблемой выбора оптимальных допусков на элементы схемы. В связи с тем, что для сложных устройств таких элементов может быть очень много, неправильный выбор допусков на них часто приводит к тому, что целевые функции, называемые вторичными параметрами схемы (передаточные характеристики,

потенциалы узлов и т. п.), получают значительные отклонения от расчётных и устройство в целом выходит за пределы рабочих режимов.

Применение современных программных средств даёт возможность проектировщикам избегать значительных затрат времени и ресурсов при определении оптимальных параметров элементов схем. Такие параметры называют первичными.

В процессе обучения студенты сталкиваются с задачами анализа чувствительности вторичных параметров схем к первичным. В этом случае большую помощь им может оказать использование возможностей программного пакета MathCAD, позволяющего взять на себя существенные затраты на математические расчёты.

В [1, 2] показано применение матричных методов для анализа и синтеза электронных схем. Для примера рассмотрим определение чувствительности потенциалов узлов схемы, показанной на рисунке 1, от изменения номиналов элементов. Это позволит определить допуски на эти номиналы, чтобы обеспечить работоспособность усилителя в заданных условиях.

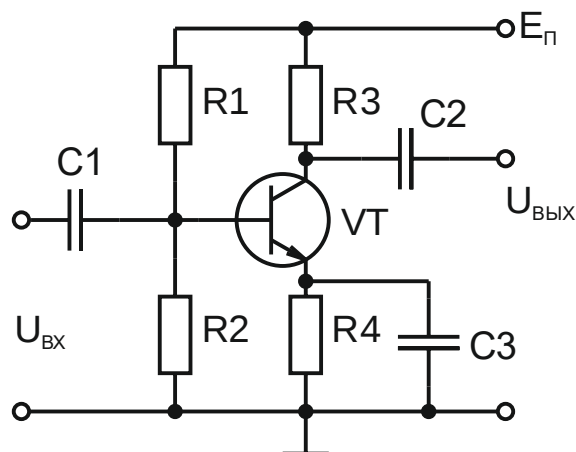


Рисунок 1 – Схема транзисторного усилителя.

Для упрощения задачи проведём анализ по постоянному току. Для этого исключим все частотно-зависимые элементы, к которым относятся конденсаторы C1, C2 и C3.

Для составления системы уравнений используем схему замещения транзистора его упрощённой моделью Эберса-Молла (рисунок 2). Упрощённой она становится после исключения из неё всех инерционных элементов.

На рисунке 2 обозначены: I_{ε} – генератор тока эмиттерного перехода; I_K – генератор тока коллекторного перехода; α_N – коэффициент передачи тока эмиттера в нормальном режиме работы; α_I – коэффициент передачи тока коллектора в инверсном режиме работы; r_b – омическое сопротивление базы транзистора.

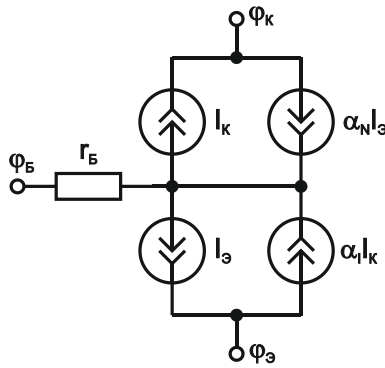


Рисунок 2 – Упрощённая модель транзистора.

Генераторы токов эмиттерного и коллекторного переходов описываются нелинейными уравнениями следующего вида:

$$I_\Delta = I_{\Delta 0} \left[\exp \left(\frac{U_\Delta}{m_\Delta \cdot \varphi_T} \right) - 1 \right],$$

$$I_K = I_{K0} \left[\exp \left(\frac{U_K}{m_K \cdot \varphi_T} \right) - 1 \right],$$

где m_Δ – коэффициент неидеальности эмиттерного перехода, показывающий, насколько идеальная вольтамперная характеристика р-п-перехода отличается от реальной; m_K – коэффициент неидеальности коллекторного перехода (имеет тот же смысл, что и для m_Δ); $I_{\Delta 0}$ – тепловой ток эмиттерного перехода, очень часто называемый обратным током или током насыщения; I_{K0} – тепловой ток коллекторного перехода, часто имеет такое же название, как и для $I_{\Delta 0}$; φ_T – температурный потенциал; U_Δ – напряжение на эмиттерном переходе; U_K – напряжение на коллекторном переходе.

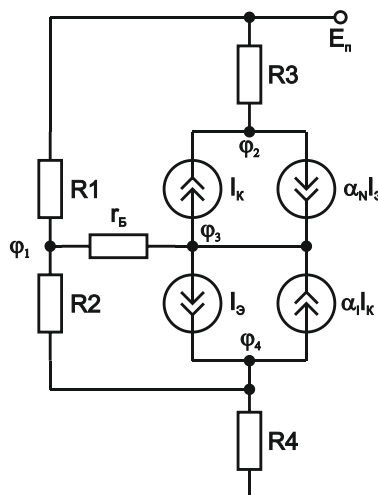


Рисунок 3 – Схема для анализа по постоянному току.

Заменяв транзистор в схеме, показанной на рисунке 1, его упрощённой нелинейной моделью (рисунок 2), получается схема, представленная на рисунке 3.

Составим систему уравнений схемы (рисунок 3) методом узловых потенциалов:

$$\begin{aligned}
 (E_{II} - \varphi_1) \frac{1}{R1} - \varphi_1 \frac{1}{R2} - (\varphi_1 - \varphi_3) \frac{1}{r_b} &= 0, \\
 (E_{II} - \varphi_2) \frac{1}{R3} - \alpha_N I_{\varepsilon 0} \left[\exp \left(\frac{\varphi_3 - \varphi_4}{m_{\varepsilon} \cdot \varphi_T} \right) - 1 \right] + I_{K0} \left[\exp \left(\frac{\varphi_3 - \varphi_2}{m_K \cdot \varphi_T} \right) - 1 \right] &= 0, \\
 (\varphi_1 - \varphi_3) \frac{1}{r_b} - I_{\varepsilon 0} \left[\exp \left(\frac{\varphi_3 - \varphi_4}{m_{\varepsilon} \cdot \varphi_T} \right) - 1 \right] - I_{K0} \left[\exp \left(\frac{\varphi_3 - \varphi_2}{m_K \cdot \varphi_T} \right) - 1 \right] + \\
 + \alpha_N I_{\varepsilon 0} \left[\exp \left(\frac{\varphi_3 - \varphi_4}{m_{\varepsilon} \cdot \varphi_T} \right) - 1 \right] + \alpha_I I_{K0} \left[\exp \left(\frac{\varphi_3 - \varphi_2}{m_K \cdot \varphi_T} \right) - 1 \right] &= 0, \\
 -\varphi_4 \frac{1}{R4} + I_{\varepsilon 0} \left[\exp \left(\frac{\varphi_3 - \varphi_4}{m_{\varepsilon} \cdot \varphi_T} \right) - 1 \right] - \alpha_I I_{K0} \left[\exp \left(\frac{\varphi_3 - \varphi_2}{m_K \cdot \varphi_T} \right) - 1 \right] &= 0.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Приняв параметры схемы: R1 = 10 кОм; R2 = 2 кОм; R3 = 300 Ом; R4 = 68 Ом; Eп = 15 В и, решая систему уравнений (1), получено:

$$\begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,1 \\ 6,4 \\ 2,1 \\ 1,5 \end{bmatrix} \text{ В.}$$

Чувствительность вторичных параметров определяется следующим образом:

$$S_{X_i} = \frac{d\varphi_i}{dX_i} \cdot \frac{X_i}{\varphi_i}, \tag{2}$$

где i – порядковый номер первичного параметра, X_i – номинал i -ого первичного параметра.

В выражении (2) правый сомножитель требуется для нормирования функции чувствительности. Решив уравнение (2) относительно системы уравнений (1), получена матрица относительной чувствительности потенциалов узлов относительно элементов схемы. Чувствительность потенциалов $\varphi_1 \dots \varphi_4$ к номиналам резисторов R1...R4 соответственно:

$$S_{R1} = \begin{bmatrix} 0,8 \\ 4,1 \\ 5,4 \times 10^{-13} \\ 2,8 \end{bmatrix}, S_{R2} = \begin{bmatrix} 1,4 \\ 6,8 \\ 44,5 \\ 189 \end{bmatrix}, S_{R3} = \begin{bmatrix} 0,8 \\ 4,1 \\ 4,7 \times 10^{-13} \\ 2,8 \end{bmatrix}, S_{R4} = \begin{bmatrix} 1 \\ 5,1 \\ 6,3 \times 10^{-13} \\ 5,4 \end{bmatrix}.$$

Как видно из анализа матриц относительных чувствительностей, наибольшее влияние изменение номиналов резисторов оказывает на потенциалы коллектора и эмиттера.

После анализа чувствительности можно определить допуски на элементы схемы при заданных вторичных параметрах по следующему выражению:

$$\Delta_{x_i} = \frac{\Delta_{\varphi}}{S_{x_i}}, \quad (3)$$

где Δ_{φ} – допуск на разброс потенциалов.

Задав допуск на потенциалы схемы, например на уровне $\pm 5\%$, можно определить допуски на номиналы резисторов. Например, выбирая потенциал с самой высокой чувствительностью (φ_2), получены следующие допуски: $\Delta R1 = \pm 5\%$; $\Delta R2 = \pm 0,5\%$; $\Delta R3 = \pm 0,1\%$; $\Delta R4 = \pm 0,02\%$.

Проведённый анализ чувствительности показал, что полученные допуски номинальных сопротивлений резисторов R3 и R4 выходят за стандартные ряды, что приводит к существенному удорожанию усилителя, но зато обеспечивает устойчивую работу устройства в заданных пределах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пудалов, А. Д.** Использование математического моделирования для многопараметрического анализа электронных схем с линейным активным устройством / Ануфриев, Е. А., Мазур В. Г., Пудалов А. Д. Сборник научных трудов АнГТУ. – Ангарск : Издательство АнГТУ, 2024. – С. 11–19.

2. **Пудалов, А. Д.** Применение матричных методов для анализа и синтеза электронных схем / Ануфриев Е. А., Мазур В. Г., Пудалов А. Д. // Вестник Ангарского государственного технического университета. – 2023. – № 17. – С. 205–209.