

УДК 004.942

DOI: 10.22213/2413-1172-2025-2-103-114

Анализ разброса параметров двухступенчатого комплексного делителя напряжения по допускам на пассивные компоненты

А. К. Черных, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В. А. Сидорина, кандидат педагогических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Е. Г. Булатова, кандидат физико-математических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В. А. Глушков, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В статье представлены результаты моделирования схемы двухступенчатого комплексного делителя напряжения с последующим анализом его амплитудно-частотной характеристики в условиях исходного отсутствия допусков на номиналы и с учетом установленных допусков на номиналы пассивных компонентов цепи с целью определения разброса значений коэффициента усиления и ширины полосы пропускания по методу Монте-Карло, наихудшего случая и максимума-минимума. Основное назначение моделирования такой схемы – практическая демонстрация методов оценки разброса электрических параметров в среде автоматизированного проектирования OrCAD для дальнейшего аналогичного моделирования данными методами более сложных схем электрических принципиальных и их составных частей, находящих практическое применение в радиотехнической аппаратуре и радиосистемах с целью сокращения материальных и временных затрат при их разработке и предварительной оценки потенциального разброса коэффициента усиления и полосы пропускания таких схем еще на этапе математического моделирования до непосредственной физической реализации данных схем. Потребность в подобном предварительном анализе разброса электрических параметров с каждым годом только увеличивается. Актуальность данной темы проявляется при анализе цепей, когда установлены жесткие требования к разбросу параметров данных элементов. В ходе практической реализации продемонстрированы основные методы анализа разброса параметров схем электрических принципиальных, среди которых присутствуют как методы, предусмотренные к автоматическому моделированию схем программой OrCAD, такие как метод Монте-Карло и метод наихудшего случая, так и метод, не предусматриваемый программой к автоматизации и требующий более контролируемого управления и расчета со стороны разработчика, решающего вышеобозначенную задачу анализа схемы методом максимума-минимума. Последний метод также представляет особый интерес в силу значительно меньшей изученности со стороны более ранних научно-технических исследований и публикаций, в том числе в рамках описания его реализации в различных средах автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: схема электрическая принципиальная, допуски на номиналы, передаточная функция, коэффициент усиления, полоса пропускания, моделирование схемы, метод Монте-Карло, метод наихудшего случая, метод максимума-минимума, система автоматизированного проектирования OrCAD.

Введение

Проблема определения допусков на номиналы элементов схем электрических принципиальных возникает при жестких требованиях к разбросу параметров данных элементов. Эта задача актуальна и при анализе параметров цепей [1–3]. Среди множества причин разброса параметров схем электрических принципиальных одна из наиболее существенных заключается в том, что при производстве цепей используются компоненты, значения параметров которых отличаются от номинальных, в том числе из-за производственных факторов. Данные факторы можно проанализировать, в частности, с помощью различных средств автоматизированного проектирования, в том числе с использованием численно-аналитических методов [4–6].

Цель статьи – реализация методов Монте-Карло, наихудшего случая и максимума-минимума для оценки разброса заданного параметра электронной схемы в зависимости от допусков на пассивные компоненты в среде автоматизированного проектирования OrCAD.

Задачи и методы исследования

Для достижения цели исследования были решены следующие задачи.

1. Разработана электрическая принципиальная схема двухступенчатого комплексного делителя напряжения, произведен расчет ее передаточной функции, установлены номиналы пассивных компонентов (резисторов и конденсаторов) для проведения амплитудно-частотного анализа цепи в условиях исходного отсутствия допусков на номиналы.

2. Установлены допуски на номиналы пассивных компонентов для исследования разброса значений коэффициента усиления и ширины полосы пропускания по методу Монте-Карло, наихудшего случая и максимума-минимума.

3. Проведено сравнение значений коэффициента усиления и ширины полосы пропускания по каждому из методов на предмет сопоставимости друг с другом.

В работе использованы общенаучные методы теоретического исследования (анализ, синтез, численные методы), информационные технологии систем автоматизированного проектирования, методы компьютерного моделирования и экспериментального исследования зависимостей параметров.

Моделирование и анализ двухступенчатого комплексного делителя напряжения в среде программы OrCAD

Для реализации вышеобозначенных алгоритмов необходимо произвести анализ исходных данных (на примере исходной схемы электрической принципиальной, номиналов и допусков на номиналы ее компонентов, рис. 1), произвести расчет передаточной функции данной схемы и затем осуществить моделирование цепи (как без учета допусков на номиналы, так и с их учетом) в программной среде OrCAD аналогично методикам, представленным в ряде работ [7–9]. Также сравнить конечные результаты измерений на предмет сопоставимости друг с другом и, как следствие, правильности произведенных расчетов и мо-

делирования исходной схемы электрической принципиальной.

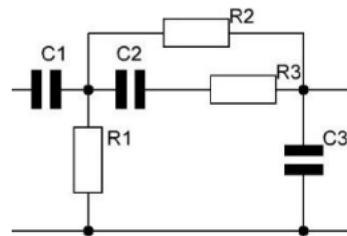


Рис. 1. Исходная схема электрическая принципиальная

Fig. 1. Initial electrical schematic diagram

Номиналы элементов цепи:

$R1 = 1 \text{ МОм}$; $R2 = 0,2 \text{ МОм}$; $R3 = 0,8 \text{ МОм}$;
 $C1 = 0,3 \text{ мкФ}$; $C2 = 5 \text{ мкФ}$; $C3 = 1,2 \text{ мкФ}$.

Допуски на номиналы резисторов 5 %.

Допуски на номиналы конденсаторов 10 %.

Расчет передаточной функции производится по методике, представленной в ряде работ [10–13]:

$$W(p) = \frac{1,5p^2 + 0,3p}{0,288p^3 + 8,532p^2 + 6,74p + 1}.$$

На основании полученных расчетов производится проектирование модели исходной схемы электрической принципиальной в среде автоматизированного проектирования OrCAD, вводятся данные в окно общих параметров анализа схемы, строится график ее амплитудно-частотной характеристики и производится ее анализ (рис. 2, 3).

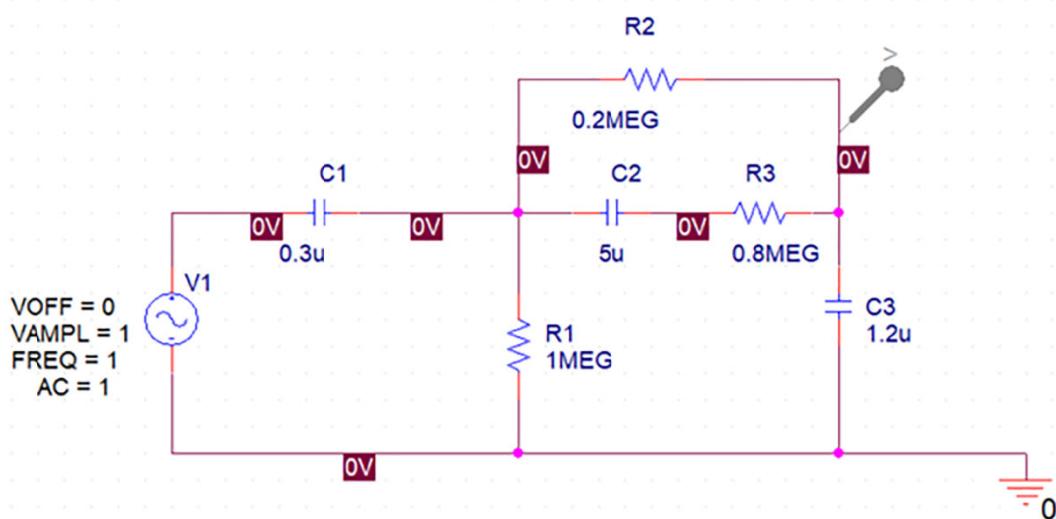


Рис. 2. Исходная схема электрическая принципиальная (без учета допусков на номиналы резисторов и конденсаторов)

Fig. 2. The initial electrical schematic diagram (without taking into account the tolerances for the nominal values of resistors and capacitors)

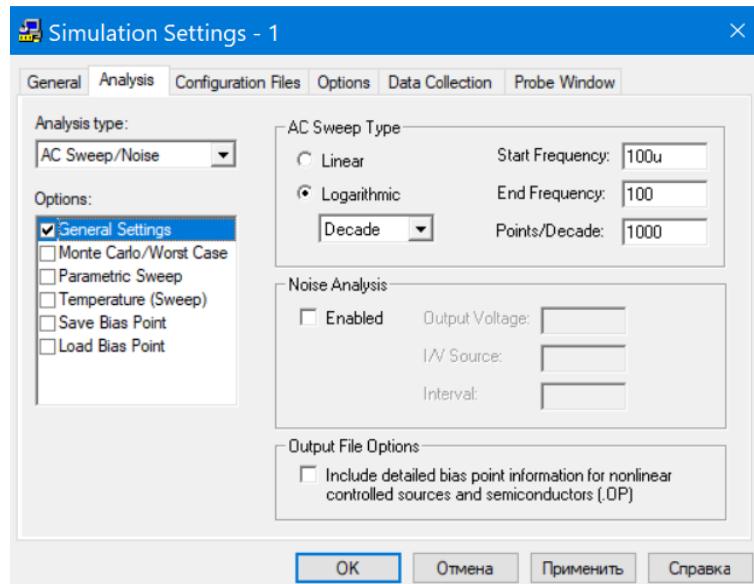


Рис. 3. Окно общих параметров анализа схемы

Fig. 3. The window of general parameters of the circuit analysis

Как видно из рисунка 4 (здесь и далее на графиках в скобках указываются два числа: первое определяет значение частоты, при котором достигается определенный уровень коэффициента усиления, второе определяет само значение данного коэффициента усиления (для центральной комбинации – максимум коэффи-

циента усиления, для боковых – уровень, равный 0,707 от данного максимума коэффициента усиления), индекс m возле числа определяет его тысячную долю 10^{-3} , таким образом, $176,993m = 0,177$):

$$K_{\max\text{-ном}} = 0,177; BW_{\text{ном}} = 4,696 \text{ Гц.}$$

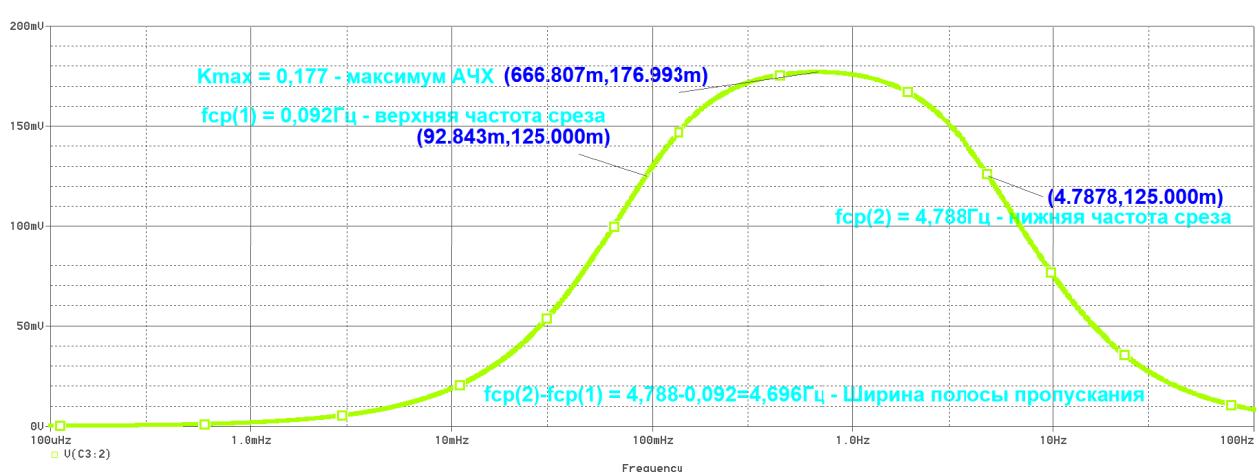


Рис. 4. Исходная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

Fig. 4. Initial amplitude-frequency response

Алгоритм оценки разброса параметров электронной схемы методом Монте-Карло

Устанавливаются допуски на номиналы резисторов (5 %) и на номиналы конденсаторов (10 %), вводятся данные в окно параметров анализа схемы по методу Монте-Карло [14, 15], после чего заново строится график амплитудно-частотной характеристики спроектированной схемы и производится ее анализ (рис. 5–9).

Исследуется разброс значений коэффициента усиления и ширины полосы пропускания. Для этого строится гистограмма по полученной АЧХ после выбора в качестве функции:

- для коэффициента усиления – $\text{Max}()$, а в качестве аргумента данной функции – $\text{V}(\text{C3}:2)$.
- для полосы пропускания – $\text{Bandwidth}_{\text{Bandpass}_3\text{dB}}()$, а в качестве аргумента данной функции – $\text{V}(\text{C3}:2)$.

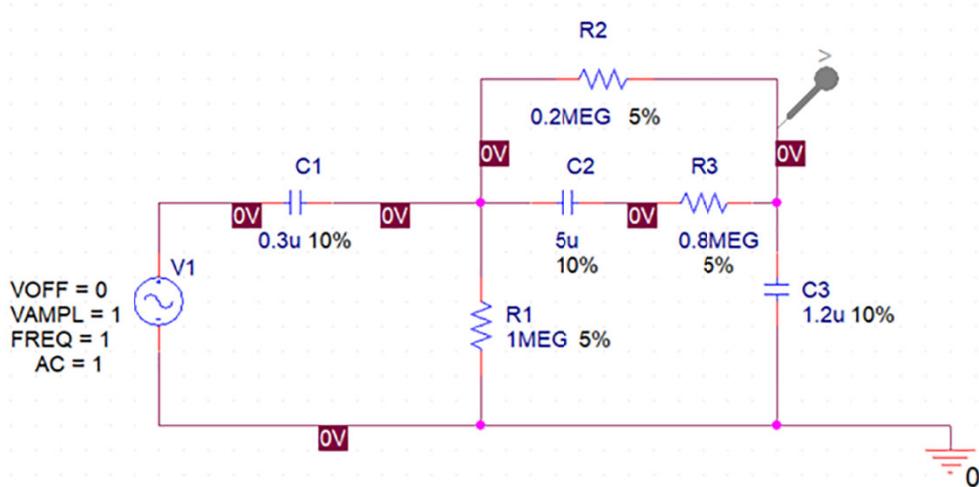


Рис. 5. Схема электрическая принципиальная с учетом допусков на номиналы резисторов и конденсаторов
Fig. 5. Electrical schematic diagram, taking into account the tolerances for the nominal values of resistors and capacitors

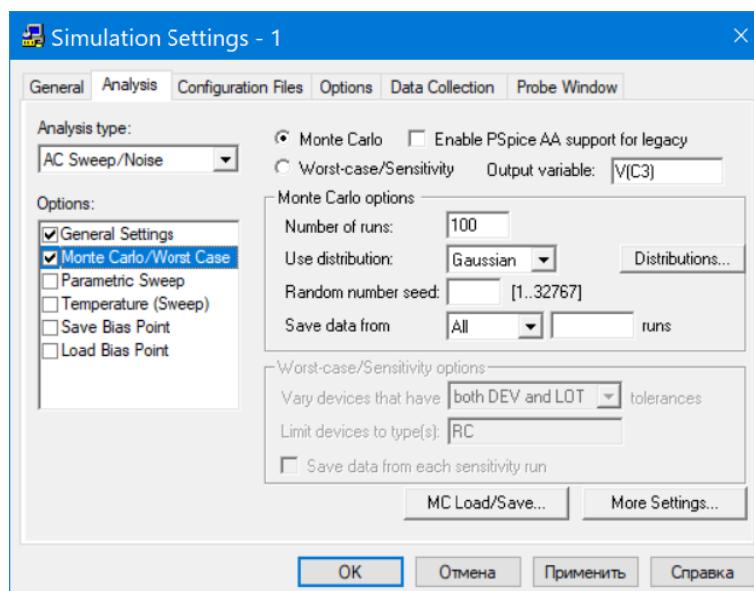


Рис. 6. Окно параметров анализа схемы по методу Монте-Карло
Fig. 6. Monte-Carlo scheme analysis parameters window

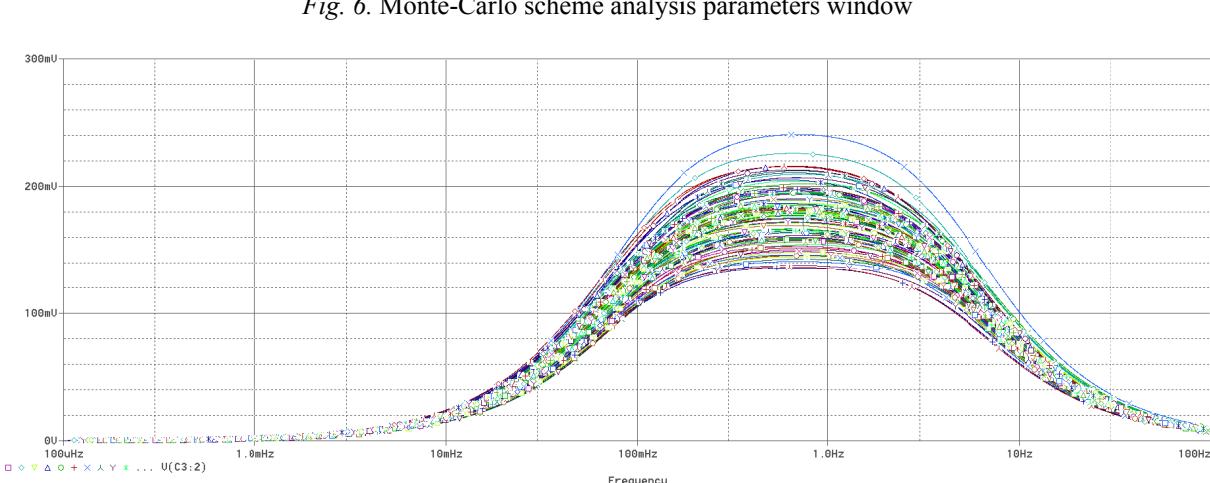


Рис. 7. АЧХ по методу Монте-Карло
Fig. 7. Frequency response using the Monte-Carlo method

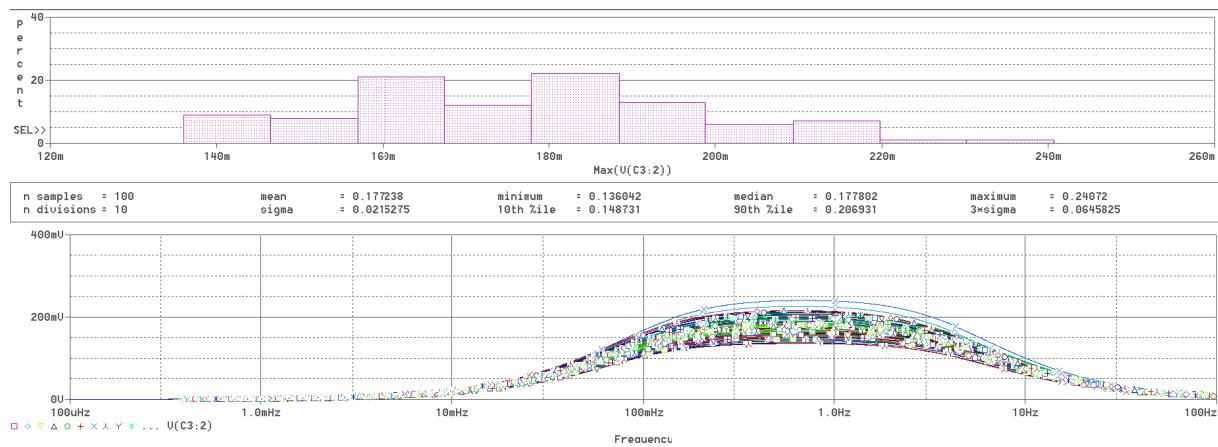


Рис. 8. Гистограмма АЧХ для коэффициента усиления по методу Монте-Карло

Fig. 8. Frequency response histogram for the Monte-Carlo gain

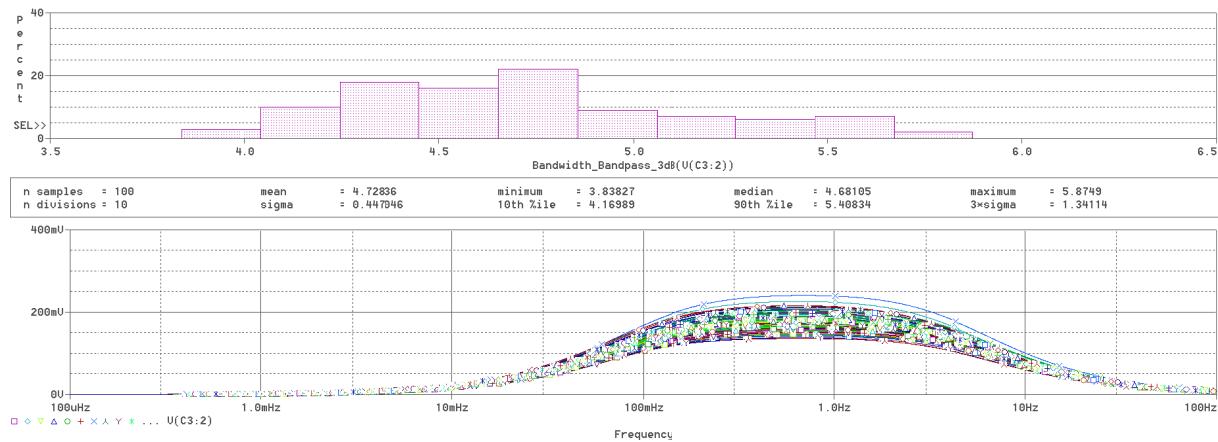


Рис. 9. Гистограмма АЧХ для полосы пропускания по методу Монте-Карло

Fig. 9. Frequency response histogram for Monte-Carlo band width

Исходя из гистограммы распределения ширины полосы пропускания АЧХ закон имеет нормальный (гауссов) характер распределения. Следовательно, применимо правило трех сигм [16]:

$$K_U = \overline{K_U} \pm 3\sigma(K_U) = \text{mean} \pm 3\text{sigma} = \\ = 0,177 \pm 0,064 = 0,113 \dots 0,269;$$

$$BW = \overline{BW} \pm 3\sigma(BW) = \text{mean} \pm 3\text{sigma} = \\ = 4,728 \pm 1,341 \text{ Гц} = 3,387 \dots 6,069 \text{ Гц.}$$

Алгоритм оценки разброса параметров электронной схемы методом наихудшего случая

*Worst Case Direction-High
(верхнее отклонение от номинала)*

Вводятся данные в окно параметров анализа схемы по методу наихудшего случая вверх [17, 18], после чего заново строится график амплитудно-частотной характеристики спроектированной схемы и производится ее анализ (рис. 10, 11):

$$K_{\text{макс.ном}} = 0,177; K_{\text{макс.НС+}} = 0,21;$$

$$BW_{\text{ном}} = 4,696 \text{ Гц}; BW_{\text{НС+}} = 4,654 \text{ Гц.}$$

Worst Case Direction-Low

(нижнее отклонение от номинала)

Вводятся данные в окно параметров анализа схемы по методу наихудшего случая вниз [19, 20], после чего заново строится график амплитудно-частотной характеристики спроектированной схемы и производится ее анализ (рис. 12, 13):

$$K_{\text{макс.ном}} = 0,177; K_{\text{макс.НС-}} = 0,148;$$

$$BW_{\text{ном}} = 4,696 \text{ Гц}; BW_{\text{НС-}} = 4,811 \text{ Гц}$$

Рассчитываются значения полей рассеяния:

$$K_{\text{макс}} = K_{\text{макс.НС-}} \dots K_{\text{макс.НС+}} = 0,148 \dots 0,21;$$

$$\Delta K_{\text{макс+}} = K_{\text{макс.НС+}} - K_{\text{макс.ном}} = 0,21 - 0,177 = 0,033;$$

$$\Delta K_{\text{макс-}} = K_{\text{макс.ном}} - K_{\text{макс.НС-}} = 0,177 - 0,148 = 0,029;$$

$$K_{\text{макс}} = K_{\text{макс.ном}} + \Delta K_{\text{макс.НС+}} = 0,177^{+0,033}_{-0,029},$$

$$BW = BW_{HC+} \dots BW_{HC-} = 4,654 \dots 4,811 \text{ Гц}; \quad \Delta BW_- = BW_{HC-} - BW_{\text{ном}} = 4,811 - 4,696 = 0,115 \text{ Гц};$$

$$\Delta BW_+ = BW_{\text{ном}} - BW_{HC+} = 4,696 - 4,654 = 0,042 \text{ Гц};$$

$$BW = BW_{\text{ном}} + \frac{\Delta BW_{HC-}}{\Delta BW_{HC+}} = 4,696^{+0,115}_{-0,042} \text{ Гц}.$$

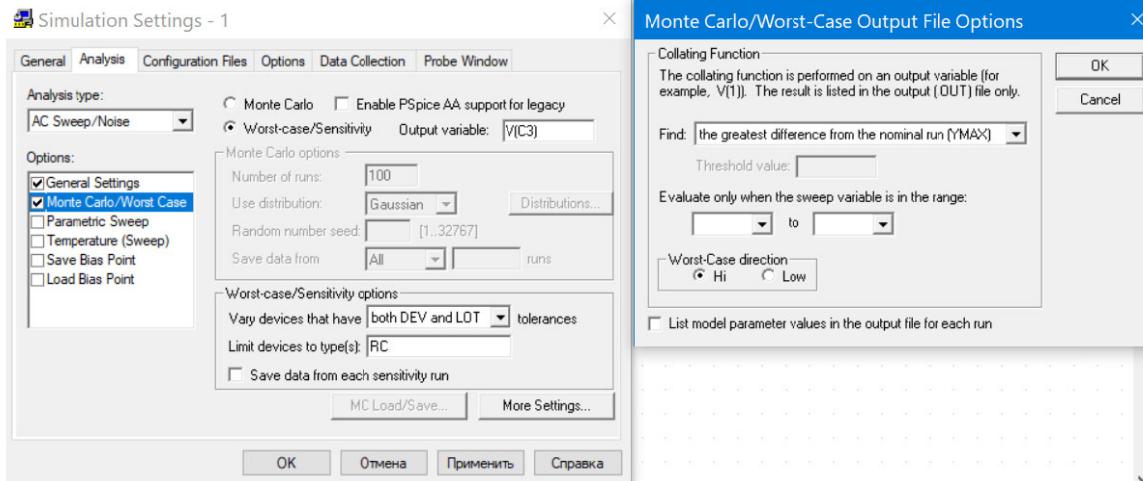


Рис. 10. Окно параметров анализа схемы по методу наихудшего случая вверх

Fig. 10. The window of scheme analysis parameters using the worst case high method

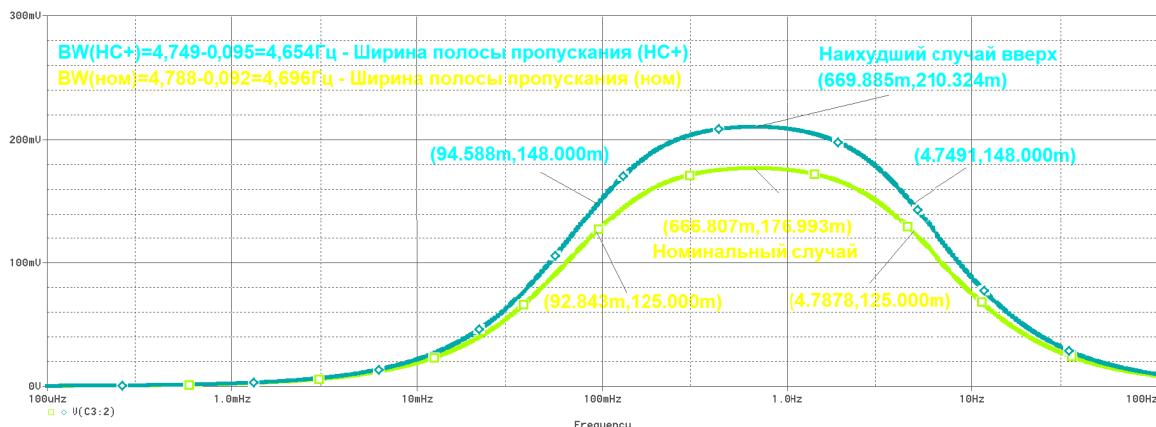


Рис. 11. АЧХ по методу наихудшего случая вверх

Fig. 11. Frequency response using the worst-case high method

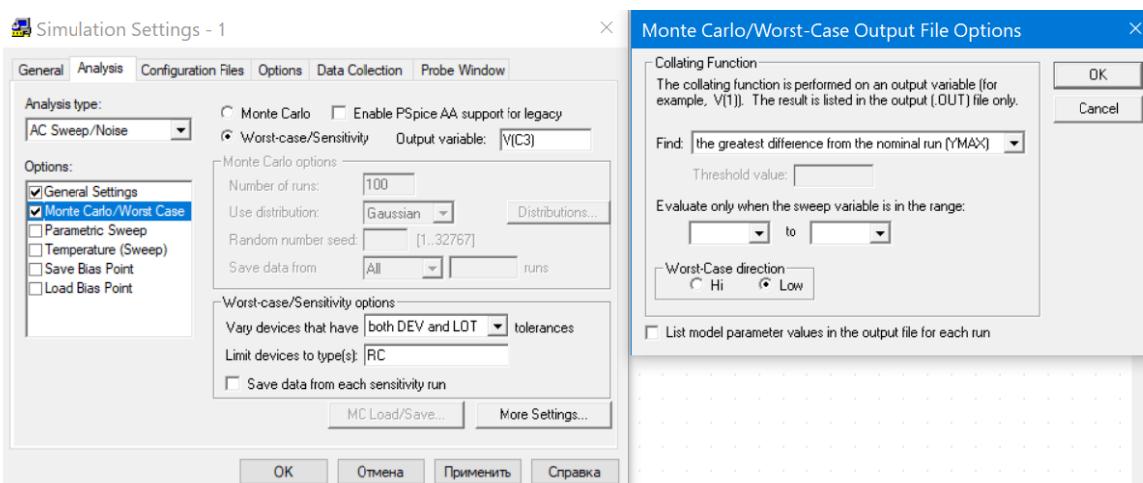


Рис. 12. Окно параметров анализа схемы по методу наихудшего случая вниз

Fig. 12. The window of scheme analysis parameters using the worst-case low method

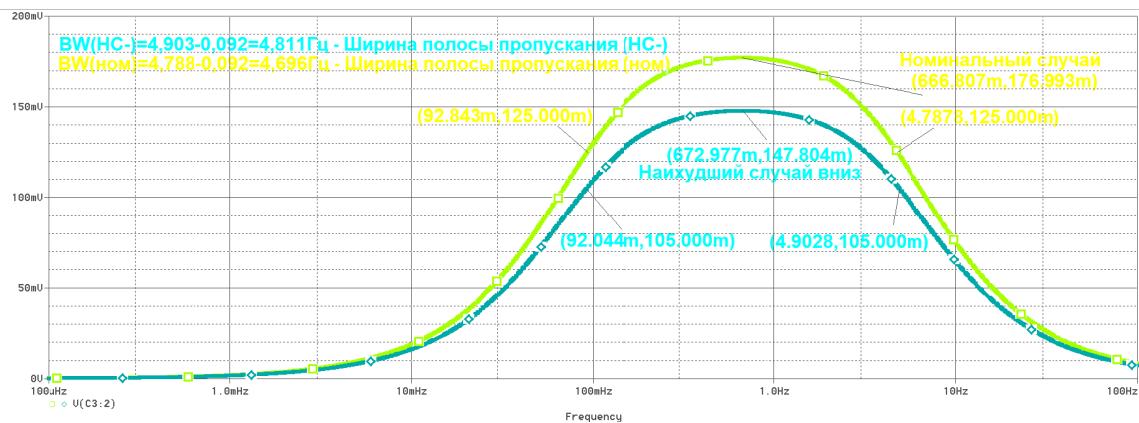


Рис. 13. АЧХ по методу наихудшего случая вниз

Fig. 13. Frequency response using the worst-case low method

Алгоритм оценки разброса параметров электронной схемы методом максимума-минимума

Составляется сводная таблица на общее количество неповторяющихся комбинаций номиналов (так как всего количество элементов в схеме равно 6, а количество вариантов номиналов для каждого элемента равно 2, то общее количество комбинаций в таблице $2^6 = 64$), затем попеременно устанавливаются допуски на номиналы резисторов (5 %) и на номиналы конденсаторов (10 %), после чего заново строится график амплитудно-частотной характеристики спроектированной схемы и производится ее анализ (рис. 14–19):

$$K_{\text{макс.ном}} = 0,177; K_{\text{макс.минимакс+}} = 0,21; \\ K_{\text{макс.минимакс-}} = 0,148;$$

$$BW_{\text{ном}} = 4,696 \text{ Гц}; BW_{\text{макс.минимакс+}} = 4,063 \text{ Гц}; \\ BW_{\text{макс.минимакс-}} = 5,493 \text{ Гц}.$$

Рассчитываются значения полей рассеяния:

$$K_{\text{макс}} = K_{\text{макс.минимакс-}} \dots K_{\text{макс.минимакс+}} = 0,148 \dots 0,21;$$

$$\Delta K_{\text{макс+}} = K_{\text{макс.минимакс+}} - K_{\text{макс.ном}} = \\ = 0,21 - 0,177 = 0,033;$$

$$\Delta K_{\text{макс-}} = K_{\text{макс.ном}} - K_{\text{макс.минимакс-}} = \\ = 0,177 - 0,148 = 0,029;$$

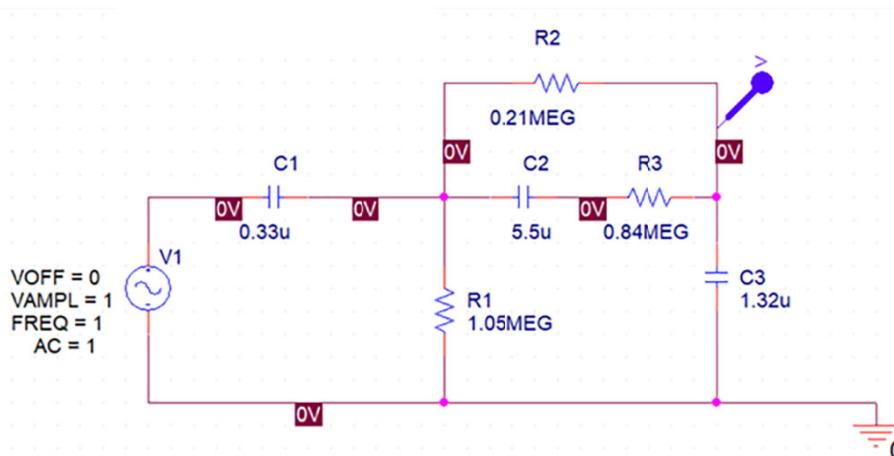
$$K_{\text{макс}} = K_{\text{макс.ном}} \frac{+\Delta K_{\text{максHC+}}}{-\Delta K_{\text{максHC-}}} = 0,177^{+0,033}_{-0,029};$$

$$BW = BW_{\text{минимакс+}} \dots BW_{\text{минимакс-}} = 4,063 \dots 5,493 \text{ Гц};$$

$$\Delta BW_+ = BW_{\text{ном-}} BW_{\text{минимакс+}} = 4,696 - 4,063 = \\ = 0,633 \text{ Гц};$$

$$\Delta BW_- = BW_{\text{минимакс-}} - BW_{\text{ном}} = 5,493 - 4,696 = \\ = 0,797 \text{ Гц};$$

$$BW = BW_{\text{ном-}} \frac{+\Delta BW_{\text{минимакс-}}}{-\Delta BW_{\text{минимакс+}}} = 4,696^{+0,797}_{-0,633} \text{ Гц.}$$

Рис. 14. Схема электрическая принципиальная (случай для комбинации максимальных номиналов резисторов и конденсаторов): $C1 = 0,33 \mu\text{F}$; $C2 = 5,5 \mu\text{F}$; $C3 = 1,32 \mu\text{F}$; $R1 = 1,05 \text{ M}\Omega$; $R2 = 0,21 \text{ M}\Omega$; $R3 = 0,84 \text{ M}\Omega$ Fig. 14. Electrical schematic diagram (case for a combination of maximum values of resistors and capacitors): $C1 = 0.33 \mu\text{F}$; $C2 = 5.5 \mu\text{F}$; $C3 = 1.32 \mu\text{F}$; $R1 = 1.05 \text{ M}\Omega$; $R2 = 0.21 \text{ M}\Omega$; $R3 = 0.84 \text{ M}\Omega$

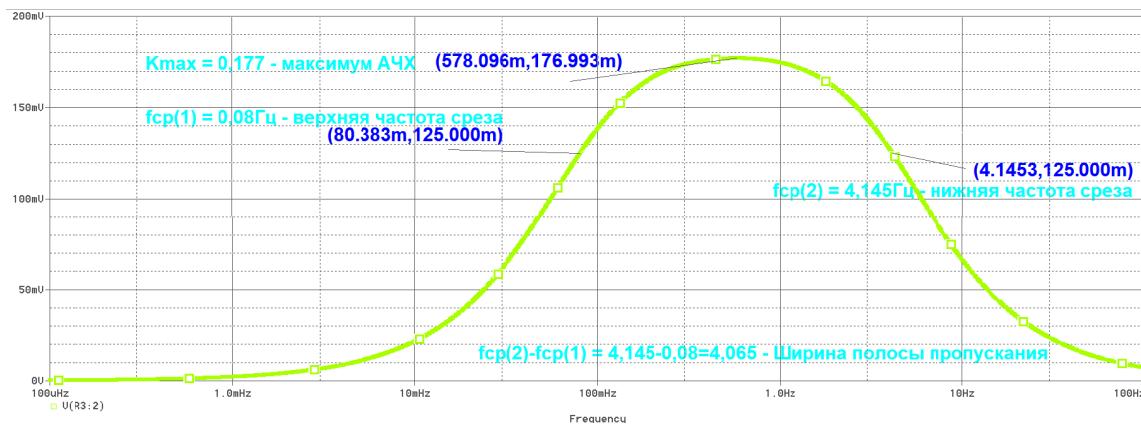


Рис. 15. АЧХ по методу максимума-минимума (случай для комбинации максимальных номиналов резисторов и конденсаторов): $C_1 = 0,33 \text{ мкФ}$; $C_2 = 5,5 \text{ мкФ}$; $C_3 = 1,32 \text{ мкФ}$; $R_1 = 1,05 \text{ МОм}$; $R_2 = 0,21 \text{ МОм}$; $R_3 = 0,84 \text{ МОм}$

Fig. 15. Frequency response using the maximum-minimum method (case for a combination of maximum values of resistors and capacitors): $C_1 = 0.33 \text{ uF}$; $C_2 = 5.5 \text{ uF}$; $C_3 = 1.32 \text{ uF}$; $R_1 = 1.05 \text{ MOhm}$; $R_2 = 0.21 \text{ MOhm}$; $R_3 = 0.84 \text{ MOhm}$

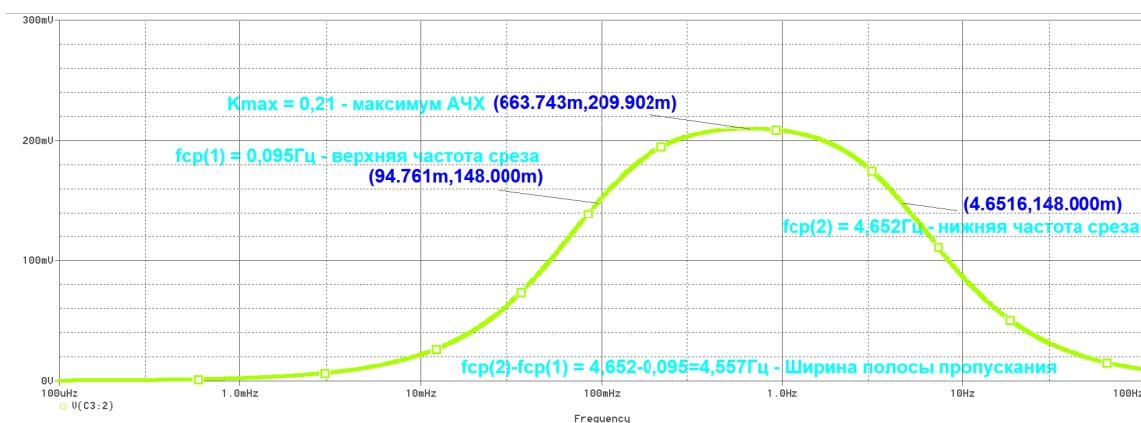


Рис. 16. АЧХ по методу максимума-минимума (случай для верхней границы максимального коэффициента передачи $K_{\text{макс.минимакс+}} = 0,21$): $C_1 = 0,33 \text{ мкФ}$; $C_2 = 4,5 \text{ мкФ}$; $C_3 = 1,08 \text{ мкФ}$; $R_1 = 1,05 \text{ МОм}$; $R_2 = 0,19 \text{ МОм}$; $R_3 = 0,84 \text{ МОм}$

Fig. 16. Frequency response using the maximum-minimum method (the case for the upper limit of the maximum transmission coefficient $K_{\text{max.minimax+}} = 0,21$): $C_1 = 0.33 \text{ uF}$; $C_2 = 4.5 \text{ uF}$; $C_3 = 1.08 \text{ uF}$; $R_1 = 1.05 \text{ MOhm}$; $R_2 = 0.19 \text{ MOhm}$; $R_3 = 0.84 \text{ MOhm}$

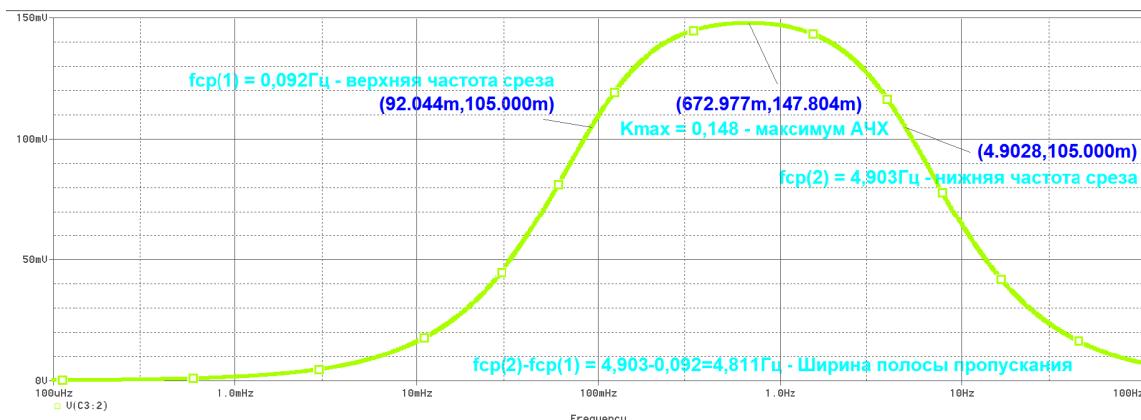


Рис. 17. АЧХ по методу максимума-минимума (случай для нижней границы максимального коэффициента передачи $K_{\text{макс.минимакс-}} = 0,148$): $C_1 = 0,27 \text{ мкФ}$; $C_2 = 4,5 \text{ мкФ}$; $C_3 = 1,32 \text{ мкФ}$; $R_1 = 0,95 \text{ МОм}$; $R_2 = 0,21 \text{ МОм}$; $R_3 = 0,84 \text{ МОм}$

Fig. 17. Frequency response using the maximum-minimum method (the case for the lower limit of the maximum transmission coefficient $K_{\text{max.minimax-}} = 0,148$): $C_1 = 0.27 \text{ uF}$; $C_2 = 4.5 \text{ uF}$; $C_3 = 1.32 \text{ uF}$; $R_1 = 0.95 \text{ MOhm}$; $R_2 = 0.21 \text{ MOhm}$; $R_3 = 0.84 \text{ MOhm}$

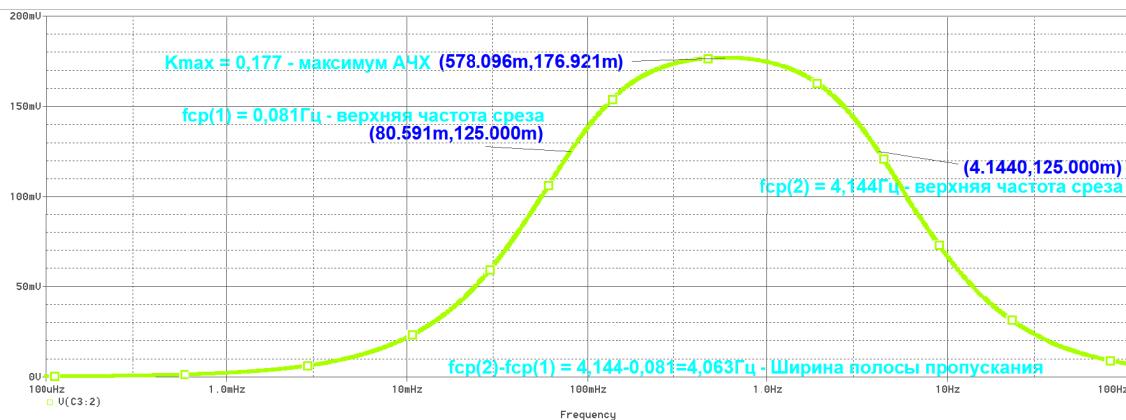


Рис. 18. АЧХ по методу максимума-минимума (случай для нижней границы полосы пропускания $BW_{\minimax+} = 4,063$ Гц): $C1 = 0,33$ мкФ; $C2 = 4,5$ мкФ; $C3 = 1,32$ мкФ; $R1 = 1,05$ МОм; $R2 = 0,21$ МОм; $R3 = 0,84$ МОм

Fig. 18. Frequency response using the maximum-minimum method (the case for the lower limit of the band width $BW_{\minimax+} = 4,063$ Hz): $C1 = 0,33\mu F$; $C2 = 4,5\mu F$; $C3 = 1,32 \mu F$; $R1 = 1,05$ MOhm; $R2 = 0,21$ MOhm; $R3 = 0,84$ MOhm

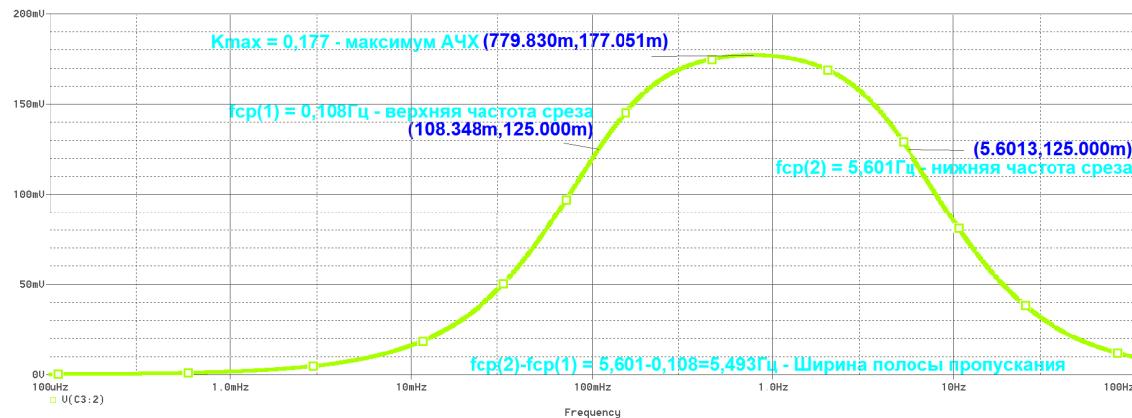


Рис. 19. АЧХ по методу максимума-минимума (случай для верхней границы полосы пропускания $BW_{\minimax-} = 5,493$ Гц): $C1 = 0,27$ мкФ; $C2 = 5,5$ мкФ; $C3 = 1,08$ мкФ; $R1 = 0,95$ МОм; $R2 = 0,19$ МОм; $R3 = 0,76$ МОм

Fig. 19. Frequency response using the maximum-minimum method (the case for the upper limit of the bandwidth $BW_{\minimax-} = 5,493$ Hz): $C1 = 0.27$ uF; $C2 = 5.5$ uF; $C3 = 1.08$ uF; $R1 = 0.95$ MOhm; $R2 = 0.19$ MOhm; $R3 = 0.76$ MOhm

Итоговые результаты вычислений

Final calculation results

Метод	K_U	$BW, \text{Гц}$
Метод Монте-Карло	$K_U = 0,177 \pm 0,064 = 0,113 \dots 0,241$	$BW = 4,728 \pm 1,341 = 3,387 \dots 6,069$ Гц
Метод наихудшего случая	$K_{\max} = 0,177^{+0,033}_{-0,029} = 0,148 \dots 0,21$	$BW = 4,696^{+0,115}_{-0,042} = 4,654 \dots 4,811$ Гц
Метод максимума-минимума	$K_{\max} = 0,177^{+0,033}_{-0,029} = 0,148 \dots 0,21$	$BW = 4,696^{+0,797}_{-0,633} = 4,063 \dots 5,493$ Гц

Выводы

На основе сопоставления итоговых результатов вычислений можно сделать вывод, что коэффициенты усиления и полосы пропускания для каждого из трех методов анализа обладают соизмеримыми значениями, в достаточной степени сходными относительно друг друга при реализации данных методов в программе OrCAD, что подтверждает правильность произведенных расчетов и моделирования исходной схемы электрической принципиальной.

Установлено, что из всех методов анализа разброса допусков определить влияние изменения номинала одного отдельно взятого пассивного компонента на изменение выходных параметров цепи позволяет лишь метод максимума-минимума, так как при его реализации разработчик вправе сам изменить выбранный номинал. Однако по сравнению с другими методами данный метод является менее точным, так как он основан на принципе анализа крайних значений номиналов без учета их промежуточных значений, в пределах которых могут находиться

реальные значения максимума и минимума коэффициента усиления и полосы пропускания. Следовательно, для решения задачи определения вышеобозначенного влияния можно исходно воспользоваться методом максимума-минимума, а затем более точно определить максимальные и минимальные значения электрических параметров с помощью автоматизированных методов Монте-Карло и наихудшего случая. Установление этого влияния будет рассмотрено в следующей статье.

Библиографические ссылки

1. Колотов А. С., Копысов А. Н., Хворенков В. В. Разработка входной защитной цепи радиочастотного тракта приемника КВ-диапазона // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 4. С. 120–129. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-120-129. EDN DZXOSU.
2. Разработка программно-аппаратных средств для имитации работы радиосредств связи / А. А. Зыкин, В. В. Хворенков, А. Н. Копысов [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 4. С. 60–68. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-60-68. EDN IGBHDP.
3. Аввакумов В. Д. Точность инженерных расчетов, выполняемых с учетом допусков // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 7. С. 22–28. EDN UBKDVT.
4. Серов А. Н., Макарычев П. К., Логинов В. А. Применение полиномов Чебышева для оценки погрешности измерения СКЗ, вызванной нелинейностью АЦП // Южно-Сибирский научный вестник. 2022. № 6 (46). С. 181–189. DOI: 10.25699/SSSB.2022.46.6.023. EDN MNIKIQ.
5. Канунникова Е. А., Мещихин И. А. Параметрическая модель нагружения конструкций и алгоритм ее применения при оценке максимальных напряжений // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2013. – Т. 137, № 6. – С. 15–22. – EDN SGMRWT.
6. Анализ возможности реализации устройств синхронизации, работающих по технологии OFDM, на КМОП-транзисторах с субмикронными стандартами проектирования в высокоскоростных системах передачи данных / А. Л. Макаревич, С. М. Соковнич, Р. С. Гонцов, Ю. В. Смелянец // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2020. Т. 11, № 5. С. 4–7. EDN YUOZQA.
7. Fernandez-Serantes, Luis-Alfonso, Casteleiro-Roca, José-Luis (2024) Data dimensionality reduction for an optimal switching mode classification applied to a step-down power converter. *Logic Journal of the IGPL*. DOI: <https://doi.org/10.1093/jigpal/jzae036>.
8. Гильванова Г. А. Анализ риска инновационного проекта методом имитационного моделирования (метод Монте-Карло) // ScienceTime. 2015. № 12 (24). С. 157–161. EDN VIMLNJ.
9. Конкина М. С. Компенсация погрешностей частотных интегрирующих развертывающих преобразователей на основе полупроводниковых мостовых тензосхем // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 1 (39). С. 31–37. DOI: 10.21685/2307-5538-2022-1-4. EDN BHDDVI.
10. Мизрах Е. А. Сравнительный анализ способов регулирования частотных характеристик имитаторов электрических характеристик систем электропитания космических аппаратов / Е. А. Мизрах, Д. К. Лобанов, С. В. Харлашина // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 3. С. 337–350. DOI: 10.31772/2712-8970-2024-25-3-337-350. EDN WGQWFY.
11. Jeong Ja., Lee K., Ryu J. (2021) High-Q Switched Oscillator With Capacitive Voltage Divider for Generating Mesoband High-Power Microwave Pulses. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 82325–82334. DOI: 10.1109/access.2021.3086963. EDN KWNLXC.
12. Huang Zh., He Yu., Mao Ju. (2024) Electromagnetic interference feature analysis of electronic current transformer. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2835, no. 1, p. 012057. DOI: 10.1088/1742-6596/2835/1/012057. EDN KTQOYT.
13. Luo Yi., Guo B., Qian B. (2021) Method to Evaluate the Resistance-Capacitance Voltage Divider and Uncertainty Analysis. *Energies*, vol. 14, no. 22, p. 7744. DOI: 10.3390/en14227744. EDN XDZRXY.
14. Метод вибродиагностики технического состояния конструкций электронных средств / С. М. Лышов, С. У. Увайсов, В. В. Черноверская, Ф. Л. К. Хань // Российский технологический журнал. 2021. Т. 9, № 2 (40). С. 44–56. DOI: 10.3236/2500-316X-2021-9-2-44-56. EDN MRMBXL.
15. Златин И. В Монте-Карло с OrCAD 9.2 // Компоненты и технологии. 2003. № 5 (31). С. 138–142. EDN MTJYCN.
16. Журиков Р. Н., Душкин Ю. В., Невмывака А. Н. Дополнительные аспекты оценки соответствия требованиям надежности высоковольтных кабельных изделий // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. 2023. № 9. С. 29–34. EDN QDRVVE.
17. Болотовский Ю., Таназлы Г. Опыт моделирования систем силовой электроники в среде OrCAD 9.2. Ч. III // Силовая электроника. 2005. № 4. С. 90–98. EDN MVRQIP.
18. Хлуденев А. В. Синтез допусков на основе анализа чувствительности // Известия ЮФУ. Технические науки. 2023. № 3 (233). С. 64–74. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-3-64-74. EDN UWJNAQ.
19. Акулин А., Супонин А. Моделирование и расширенный анализ схем в PSpice 2017 // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2017. № 10 (171). С. 82–91. DOI: 10.22184/1992-4178.2017.171.10.82.91. EDN ZXQYKL.
20. Акулин А. Моделирование и расширенный анализ схем в PSpice 2017. Ч. II // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2018. № 1 (172). С. 126–131. DOI: 10.22184/1992-4178.2018.172.1.126.131. EDN YRPIFS.

References

1. Kolotov. A.S., Kopysov. A.N., Khvorenkov. V.V. (2024) [Development of a successor to the happily input path of the KV-band protective circuit]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 4, pp. 120-129. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-120-129. DZXOSU EDN (in Russ.).
2. Zykin A.A., Khvorenkov V.V., Kopysov A.N. (2020) [Development of software and hardware of emita communications for the operation of a radio network]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 23, no. 4, pp. 60-68. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-60-68. IGBHDP EDN (in Russ.).
3. Avvakumov V.D. (2015) [Accuracy of engineering calculations performed taking into account tolerances]. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*, no. 7, pp. 22-28. UBKDVT EDN (in Russ.).
4. Serov A.N., Makarychev P.K., Loginov V.A. (2022) [The error for applying the measurement of the Polenov SKZ of the Chebyshev estimate caused by the oiliness of the ADC]. *Yuzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik*, no. 6 (46), pp. 181-189. DOI: 10.25699/SSSB.2022.46.6.023. MNIKIQ EDN (in Russ.).
5. Kanunnikova E.A., Meshchikhin I.A. (2013) [Parametric model of loading of structures and the algorithm of its application in assessing maximum stresses]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM*, vol. 137, no. 6, pp. 15-22. SGMRWT EDN (in Russ.).
6. Makarevich A.L., Sokovnich S.M., Gontsov R.S., Smelyanets Yu.V. (2020) [Analysis of the possibility of implementing synchronization devices operating on OFDM technology on CMOS transistors with submicron design standards in high-speed data transmission systems]. *Sistemy sinhronizacii, formirovaniya i obrabotki signalov*, vol. 11, no. 5, pp. 4-7. YUOZQA EDN (in Russ.).
7. Fernandez-Serantes, Luis-Alfonso, Casteleiro-Roca, José-Luis (2024) Data dimensionality reduction for an optimal switching mode classification applied to a step-down power converter. *Logic Journal of the IGPL*. DOI: <https://doi.org/10.1093/jigpal/jzae036>.
8. Gilvanov G.A. (2015) [Design methods of risk analysis for innovative and simulation modeling (this method is called Carlo)]. *ScienceTime*, no. 12 (24), pp. 157-161. VIMLNJ EDN (in Russ.).
9. Konkin M.S. (2022) [Bases the deployment of tanks on semiconductor bridge integrators of frequency converters of compensation error]. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'*, no. 1 (39), pp. 31-37. DOI: 10.21685/2307-5538-2022-1-4. BHDDVI EDN (in Russ.).
10. Mizrakh E.A., Lobanov D.K., Kharlashina S.V. (2024) [Comparative analysis of methods for regulating frequency characteristics of simulators of electrical characteristics of spacecraft power supply systems]. *Sibirskij aerokosmicheskij zhurnal*, vol. 25, no. 3, pp. 337-350. DOI: 10.31772/2712-8970-2024-25-3-337-350. EDN WGQWFY (in Russ.).
11. Jeong Ja., Lee K., Ryu J. (2021) High-Q Switched Oscillator With Capacitive Voltage Divider for Generating Mesoband High-Power Microwave Pulses. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 82325-82334. DOI: 10.1109/access.2021.3086963. EDN KWNLXC.
12. Huang Zh., He Yu., Mao Ju. (2024) Electromagnetic interference feature analysis of electronic current transformer. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2835, no. 1, p. 012057. DOI: 10.1088/1742-6596/2835/1/012057. EDN KTQOYT.
13. Luo Yi., Guo B., Qian B. (2021) Method to Evaluate the Resistance-Capacitance Voltage Divider and Uncertainty Analysis. *Energies*, vol. 14, no. 22, p. 7744. DOI: 10.3390/en14227744. EDN XDZRXY.
14. Lyshov S.M., Uvaisov S.U., Chernoverskaya V.V., Khan F.L.K. (2021) [Method of vibration diagnostics of the technical condition of electronic equipment structures]. *Rossijskij tekhnologicheskij zhurnal*, vol. 9, no. 2 (40), pp. 44-56. DOI: 10.32362/2500-316X-2021-9-2-44-56. MRMBXL EDN (in Russ.).
15. Zlatin I.V (2003) [Monte Carlo with OrCAD 9.2]. *Komponenty i tekhnologii*, no. 5 (31), pp. 138-142. MTJYCN EDN (in Russ.).
16. Zhurikov R.N., Dushkin Yu.V., Nevmyvaka A.N. (2023) [Additional aspects of assessing compliance with reliability requirements of high-voltage cable products]. *Radioelektronnaya otrasl': problemy i ih resheniya*, no. 9, pp. 29-34. QDRVVE EDN (in Russ.).
17. Bolotovsky Yu., Tanazly G. (2005) [Experience of modeling power electronics systems in the OrCAD 9.2 environment. Part III]. *Silovaya elektronika*, no. 4, pp. 90-98. MVRQIP EDN (in Russ.).
18. Khludenev A.V. (2023) [Synthesis of tolerances based on sensitivity analysis]. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki*, no. 3(233), pp. 64-74. DOI: 10.18522/2311-3103-2023-3-64-74. UWJNAQ EDN (in Russ.).
19. Akulin A., Suponin A. (2017) [Modeling and advanced analysis of circuits in PSpice 2017]. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes*, no. 10(171), pp. 82-91. DOI: 10.22184/1992-4178.2017.171.10.82.91. EDN ZXQYKL (in Russ.).
20. Akulin A. (2018) [Modeling and advanced analysis of circuits in PSpice 2017. Part II]. *Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes*, no. 1 (172), pp. 126-131. DOI: 10.22184/1992-4178.2018.172.1.126.131. EDN YRPIFS (in Russ.).

Parameter Variation Analysis of a Two-Stage Complex Voltage Divider into Passive Components According to the Tolerances

A.K. Chernyh, Master Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V.A. Sidorina, PhD in Education, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

E.G. Bulatova, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V.A. Glushkov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The article presents the circuit modeling results of a two-stage complex voltage divider with subsequent analysis of its amplitude-frequency response both in the initial absence of nominal tolerances and taking into account the established nominal tolerances of the circuit passive components in order to determine the spread of gain and bandwidth values by means of the Monte Carlo, the worst case and the maximum-minimum methods. The main purpose of such a scheme modeling is practical demonstration of evaluation methods of the electrical parameter spread within the OrCAD computer-aided design environment for further similar more complex electrical circuit and component (parts / nodes /cascades) modeling using these methods, finding (real) practical application in radio engineering equipment and radio systems in order to reduce material and time costs during their development and preliminary assessment of the potential circuit gain and bandwidth spread at the modeling stage (mathematical / circuit engineering / simulation) before these circuits being directly implemented. The need for such a preliminary analysis of the electrical parameter spread is only increasing every year. The relevance of this topic is evident in the analysis of circuits, when strict requirements are set on the variation of the parameters of these elements. In the course of practical implementation, the main methods for analyzing the spread of electrical circuit parameters are demonstrated, among which there are both methods provided for automatic circuit modeling by the OrCAD program, such as the Monte Carlo method and the worst-case method, as well as the method not provided by the automation program and requiring more profound control and calculation by the developer involved in the above-mentioned problem of circuit analysis, represented by the maximum-minimum method. The latter one is also of particular interest being less examined by earlier scientific and technical studies and publications, including in the framework of the description of its implementation in various computer-aided design environments.

Keywords: electrical schematic diagram, nominal tolerances, transfer function, gain factor, bandwidth, circuit modeling, Monte-Carlo method, worst case method, maximum-minimum method, computer-aided design system OrCAD.

Получено 14.05.2025

Образец цитирования

Анализ разброса параметров двухступенчатого комплексного делителя напряжения по допускам на пассивные компоненты / А. К. Черных, В. А. Сидорина, Е. Г. Булатова, В. А. Глушкин // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2025. Т. 28, № 2. С. 103–114. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-2-103-114

For Citation

Chernyh A.K., Sidorina V.A., Bulatova E.G., Glushkov V.A. (2025) [Parameter Variation Analysis of a Two-Stage Complex Voltage Divider into Passive Components According to the Tolerances]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 28, no. 2, pp. 103-114. DOI: 10.22213/2413-1172-2025-2-103-114 (in Russ.)