

Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана

В. Г. Алексеев, А. И. Ельников, Ю. И. Нестеров

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана
1995

Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана

В.Г.Алексеев, А.И.Ельников, Ю.И.Нестеров

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ
КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

Методические указания для проведения
практических занятий по курсу "Автоматизация конструкторско-технологического проектирования электронной аппаратуры"



Издательство МИТУ им.Н.Э.Баумана

1995

ББК 32.844

А47

Рецензент Г.Р.Сагатеян

А47

Алексеев В.Г., Ельников А.И., Нестеров Ю.И. Моделирование технических объектов конструкторско-технологического проектирования электронной аппаратуры: Методические указания. - М.: Изд-во МГТУ, 1995. - 32 с., ил.

Изложены вопросы моделирования конструкции электронной аппаратуры при автоматизированном конструировании. Приведены методики анализа точности, стабильности конструкции, расчет допусков для различных условий.
Для студентов 3-4-го курсов.

Ил. 9. Табл. 2. Библиогр. 5 назв.

ББК 32.844

Редакция заказной литературы

Виктор Григорьевич Алексеев

Александр Иванович Ельников

Юрий Иванович Нестеров

Моделирование технических объектов конструкторско-технологического проектирования электронной аппаратуры

Заведующая редакцией Н.И.Ковалевская

Редактор Л.М.Зелькин

Корректор О.В.Калашникова

© МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1995.

Подписано в печать 02.06.95. Формат 60x84/16. Бумага тип. № 2.
Печ. л. 2,0. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,72. Тираж 500 экз.
Изд. № 28. Заказ № 319.

Издательство МГТУ, типография МГТУ.
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

Раздел "Моделирование конструкций электронной аппаратуры" входит как составная часть в дисциплину "Автоматизация конструкторско-технологического проектирования ЭВС (РЭС)". Цель этого раздела - выработка теоретических и практических навыков построения математических моделей конструкций электронной аппаратуры (ЭА) и технологических процессов ее производства, а также приобретение знаний методов математического моделирования и их использование для анализа, синтеза, исследования и оптимизации конструкторско-технологических решений при проектировании ЭА.

Изучение материала раздела поможет студенту освоить:

а) методы математического описания технических объектов конструкторского проектирования ЭА, моделирования физических процессов и явлений, происходящих в конструкциях; б) принципы автоматизации конструкторских и технологических задач; в) методы оптимизации. Кроме того, студент научится разрабатывать математические модели технических объектов при конструировании и проектировании технологии, проводить оптимизацию и на основе анализа альтернативных вариантов принимать эффективное решение, оценивать полученные результаты на ЭВМ и осуществлять их коррекцию.

Часть практических занятий по данному разделу посвящена анализу точности и стабильности функционирования ЭА на основе использования ее математических моделей.

Общей базой для решения перечисленных задач являются методы преобразования случайных величин и процессов с учетом связей между входными параметрами, внешними воздействиями и выходными параметрами. При этом существенно то, что случайные отклонения параметров не столько вызываются несовершенством технологии, сколько определяются сложными физико-химическими процессами изготовления элементов аппаратуры, происходящими в условиях действия электрического и магнитного полей, температуры, радиации и т.п. [1,2]. Для каждой задачи характерны свой физический смысл случайных изменений входных параметров и способ представления результирующих количественных оценок, чем обуславливается специфика применения математических методов анализа при конструировании и разработке технологии ЭА.

1. АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ И РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭА

Под точностью ЭА будем понимать степень приближения истинного значения выходного параметра к его номинальному значению при отклонениях входных параметров, соответствующих производственным погрешностям. Производственные погрешности параметров ЭА являются следствием отклонения от номинальных значений, указанных в схемах, чертежах и другой технологической документации, которые возникают за счет нестабильности технологических процессов и неоднородности исходных материалов [3].

С учетом производственных погрешностей (входных) внутренние параметры ЭА \tilde{x}_j ($j = \overline{1, n}$) являются случайными \tilde{x}_j ($j = \overline{1, n}$), которые в общем случае описываются совместной плотностью распределения

$$\varphi(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n). \quad (1)$$

В настоящее время основными методами анализа точности являются вероятностный метод, метод наихудшего случая и метод статистических испытаний.

1.1. Вероятностный метод

Исходной информацией для анализа исследуемого технологического объекта являются математическая модель его функционирования

$$\tilde{y} = f(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n) \quad (2)$$

и статистические характеристики его внутренних параметров: математическое ожидание $M(\tilde{x}_j)$, дисперсия $D(\tilde{x}_j)$, коэффициенты парной корреляции R_{ij} ($j = \overline{1, n}, i = \overline{1, n}, j \neq i$). Необходимо математически описать статистические свойства выходного параметра функционирования исследуемого технического объекта (ИТО) \tilde{y} [2].

Принимая во внимание, что если некоторый параметр зависит от достаточно большого числа случайных величин (5...10), подчиненных любым законам распределения, то он приближенно подчиняется нормальному закону распределения, что следует из центральной предельной теоремы [4]. В этом случае для описания случайных величин, подчиняющихся нормальному закону распределения, достаточно определить математическое ожидание $M(\tilde{y})$ и дисперсию $D(\tilde{y})$.

Для этого разложим в ряд Тейлора функцию

$$\tilde{y} = f(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n),$$

связывающую выходную переменную \tilde{y} с внутренними параметрами \tilde{x}_j в окрестности $\Delta \tilde{x} = (\Delta \tilde{x}_1, \dots, \Delta \tilde{x}_n)$ номинальных (средних) значений внутренних параметров ИТО x_1^0, \dots, x_n^0 , где

$$x_j^0 = M(\tilde{x}_j), \quad \Delta x_j = x_j - M(\tilde{x}_j), \quad j = \overline{1, n}; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \tilde{y} = f(x_1^0, \dots, x_n^0) &+ \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_j} \bigg|_{x_j=x_j^0} \Delta x_j + \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i} \bigg|_{\substack{x_j=x_j^0 \\ x_i=x_i^0 \\ j=\overline{1, n}, i=\overline{1, n}, i \neq j}} \Delta x_j \Delta x_i + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 f}{\partial x_j^2} \bigg|_{x_j=x_j^0} \Delta x_j^2 + \dots \end{aligned}$$

На практике уровень производственных погрешностей внутренних параметров в ИТО позволит ограничиться числами разложения в ряд Тейлора второго порядка [2].

Коэффициенты разложения в ряд Тейлора при анализе погрешностей называют коэффициентами чувствительности и обозначают:

$$A_j = \frac{\partial f}{\partial x_j} \bigg|_{x_j=x_j^0}; \quad A_{ij} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} \bigg|_{\substack{x_j=x_j^0 \\ x_i=x_i^0 \\ j=\overline{1, n}, i=\overline{1, n}, i \neq j}}$$

$$A_{jj} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_j^2} \bigg|_{x_j=x_j^0}$$

Учитывая, что отклонения Δx_j являются случайными величинами из-за стохастического характера изменения внутренних переменных x_j ($j = \overline{1, n}$), можно записать:

$$\Delta \tilde{x}_j = \tilde{x}_j - M(\tilde{x}_j); \quad (4)$$

$$M(\Delta \tilde{x}_j) = 0; \quad D(\Delta \tilde{x}_j) = D(\tilde{x}_j);$$

$$M(\Delta \tilde{x}_j, \Delta \tilde{x}_i) = R_{ij} \sigma(\tilde{x}_j) \sigma(\tilde{x}_i)$$

Принимая в расчет зависимость (3) и свойства математического ожидания случайных величин [4], а также зависимости (4), получим выражение для математического ожидания $\Lambda[\tilde{y}]$ выходной переменной \tilde{y} [1]:

$$M(\tilde{y}) = f(x_1^0, \dots, x_n^0) + \quad (5)$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n A_{ji} R_{ji} \sigma(\tilde{x}_j) \sigma(\tilde{x}_i) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n A_{ij} D(\tilde{x}_j).$$

Первый член в выражении (5) представляет собой выходной параметр при средних (номинальных) значениях внутренних параметров; второй является поправкой, обусловленной корреляцией внутренних параметров, третий - поправкой, обусловленной нелинейностью функции (2).

Используя свойства дисперсии случайных величин [4] и учитывая только линейные члены разложения (3), запишем выражение для дисперсии $D(\tilde{y})$ выходной переменной \tilde{y} :

$$D(\tilde{y}) = \sum_{j=1}^n A_j^2 D(\tilde{x}_j) + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n A_j A_i R_{ji} \sigma(\tilde{x}_j) \sigma(\tilde{x}_i). \quad (6)$$

На основании характеристик $M(\tilde{y})$, $D(\tilde{y})$ можно рассчитать показатель серийнопригодности как вероятность того, что выходной параметр \tilde{y} укладывается в заданные пределы y^{\min} , y^{\max} [1]:

$$P(y^{\min} \leq \tilde{y} \leq y^{\max}) = \Phi\left(\frac{y^{\max} - M(\tilde{y})}{\sigma(\tilde{y})}\right) - \Phi\left(\frac{y^{\min} - M(\tilde{y})}{\sigma(\tilde{y})}\right), \quad (7)$$

где Φ - нормированная функция Лапласа, значения которой приведены в табл. I.

Таблица I
Нормированная функция Лапласа

t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$	t	$\Phi(t)$
I	2	3	4	5	6
0,0	0,0000	1,4	0,4192	2,8	0,4984
0,1	398	1,5	332	2,9	4981

1	2	3	4	5	6
0,2	793	1,6	452	3,0	49865
0,3	0,1179	1,7	554	3,2	49931
0,4	554	1,8	641	3,4	49966
0,5	915	1,9	713	3,6	499841
0,6	0,2257	2,0	772	3,8	499978
0,7	580	2,1	821	4,0	499968
0,8	881	2,2	860	4,5	499997
0,9	0,3159	2,3	892		
1,0	413	2,4	918		
1,1	643	2,5	937		
1,2	849	2,6	953		
1,3	0,4032	2,7	965		

1.2. Метод наилучшего случая

Этот метод применяется для приближенной оценки точности при разработке конструкции и технологии ЭА. Расчет производится для абсолютных $\Delta \tilde{x}_j = \tilde{x}_j - x_j^0$, $\Delta \tilde{y} = \tilde{y} - y^0$ или относительных $\delta x_j = \frac{(\tilde{x}_j - x_j^0)}{x_j^0}$; $\delta y = \frac{(\tilde{y} - y^0)}{y^0}$ отклонений внутренних и выходных параметров ЭА с использованием линейной аппроксимации для функции $\tilde{y} = f(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n)$:

$$\Delta \tilde{y} = \sum_{j=1}^n A_j \Delta \tilde{x}_j$$

В этом случае расхождение отклонения выходных параметров с учетом производственных погрешностей внутренних параметров можно вычислить по формулам

$$\Delta y^{\max} = \sum_{j=1}^{n_1} A_j \Delta x_j^{\max} + \sum_{j=n_1+1}^n A_j \Delta x_j^{\min}$$

$$\Delta y^{\min} = \sum_{j=1}^{n_1} A_j \Delta x_j^{\min} + \sum_{j=n_1+1}^n A_j \Delta x_j^{\max}$$

с учетом, что

$$A_j > 0, \quad j = \overline{1, n_1};$$

$$A_j < 0, \quad j = \overline{n_1 + 1, n}$$

Аналогичен расчет и для относительных отклонений. В случае симметричных отклонений внутренних параметров x_j

$$\Delta x_j^{\text{пред}} = \Delta x_j^{\text{max}} = |\Delta x_j^{\text{min}}|,$$

предельное отклонение выходной переменной $\Delta y^{\text{пред}}$ можно определить:

$$\Delta y^{\text{пред}} = \sum_{j=1}^n |A_j| \Delta x_j^{\text{пред}}$$

Пример I₁ [1]. Математическая зависимость коэффициента передачи электронного устройства по заданной частоте от его внутренних параметров (параметров пленочных резисторов) имеет вид

$$y = \frac{b_1 x_1 + b_2 x_2}{b_3 x_3 + b_4 x_4}$$

Внутренние параметры x_1, x_2, x_3, x_4 попарно зависимы. Требуется получить количественные оценки точности по коэффициенту передачи с использованием вероятностного метода и метода наилучшего случая и сравнить их.

Исходная информация: математические ожидания $M(\tilde{x}_j) = 1,0$ ($j = \overline{1,4}$), дисперсии $D(\tilde{x}_j) = 0,04$ ($j = \overline{1,4}$) внутренних параметров \tilde{x}_j и коэффициенты парной корреляции $R_{13} = 0,7$; $R_{24} = 0,8$; $R_{12} = R_{34} = 0$; коэффициенты b_j : $b_1 = 1$; $b_2 = 2$; $b_3 = 3$; $b_4 = 4$.

Интервал допустимого изменения выходной переменной \tilde{y}

$$y^{\text{min}} = M(\tilde{y}) - 2,36(\tilde{y}), \quad y^{\text{max}} = M(\tilde{y}) + 2,36(\tilde{y})$$

I. Вычислим коэффициенты чувствительности:

$$A_1 = \frac{1}{3x_3 + 4x_4} \Big|_{x_3 = x_4 = 1} = 0,143;$$

$$A_2 = \frac{1}{3x_3 + 4x_4} \Big|_{x_3 = x_4 = 1} = 0,286;$$

$$A_3 = - \frac{3(x_1 + 2x_2)}{(3x_3 + 4x_4)^2} \Big|_{x_1=x_2=x_3=x_4=1} = -0,184;$$

$$A_4 = - \frac{4(x_1 + 2x_2)}{(3x_3 + 4x_4)^2} \Big|_{x_1=x_2=x_3=x_4=1} = -0,245;$$

$$A_{11} = 0; \quad A_{22} = 0$$

$$A_{33} = \frac{18(x_1 + 2x_2)}{(3x_3 + 4x_4)^3} \Big|_{x_1=x_2=x_3=x_4=1} = 0,16;$$

$$A_{14} = \frac{32(x_1 + 2x_2)}{(3x_3 + 4x_4)^3} \Big|_{x_1=x_2=x_3=x_4=1} = 0,28;$$

$$A_{13} = - \frac{3}{(3x_3 + 4x_4)^2} \Big|_{x_3=x_4=1} = -0,061;$$

$$A_{24} = - \frac{8}{(3x_3 + 4x_4)^2} \Big|_{x_3=x_4=1} = -0,163.$$

2. Вычислим математическое ожидание выходной переменной $M(\tilde{y})$, используя выражение (5):

$$M(\tilde{y}) = \frac{x_1 + 2x_2}{3x_3 + 4x_4} \Big|_{x_1=x_2=x_3=x_4=1} + \frac{1}{2} [A_{13} R_{13} \delta(\tilde{x}_1) \delta(\tilde{x}_3) +$$

$$+ A_{24} R_{24} \delta(\tilde{x}_2) \delta(\tilde{x}_4)] + \frac{1}{2} [A_{33} D(\tilde{x}_3) + A_{44} D(\tilde{x}_4)] = 0,4304.$$

3. Вычислим дисперсию выходной переменной $D(\tilde{y})$, используя выражение (6):

$$D(\tilde{y}) = A_1^2 D(\tilde{x}_1) + A_2^2 D(\tilde{x}_2) + A_3^2 D(\tilde{x}_3) + A_4^2 D(\tilde{x}_4) +$$

$$+A_1 A_3 R_{13} \delta(\tilde{x}_1) \delta(\tilde{x}_3) + A_2 A_4 R_{24} \delta(\tilde{x}_2) \delta(\tilde{x}_4) = 0,0018;$$

$$\delta(\tilde{y}) = 0,0434 ; y^{\min} = M(\tilde{y}) - 2,56 \delta(\tilde{y}) = 0,33;$$

$$y^{\max} = M(\tilde{y}) + 2,86 \delta(\tilde{x}) = 0,55.$$

4. Вычислим вероятность нахождения выходного параметра \tilde{y} в интервале (y^{\min}, y^{\max}) с использованием выражения (7) и табл. I:

$$P(y^{\min} \leq y \leq y^{\max}) = \Phi\left(\frac{0,55 - 0,4304}{0,0434}\right) - \Phi\left(\frac{0,33 - 0,4304}{0,0434}\right) = 0,9866.$$

5. Вычислим предельное отклонение выходного параметра:
а) по методу наилучшего случая

$$\Delta y^{\text{пред}} = |A_1| \delta(\tilde{x}_1) + |A_2| \delta(\tilde{x}_2) + |A_3| \delta(\tilde{x}_3) + |A_4| \delta(\tilde{x}_4) = 0,454;$$

б) с использованием вероятностного метода

$$\Delta y^{\text{пред}} = \delta(\tilde{y}) = 0,13.$$

1.3. Метод статистических испытаний

Этот метод основан на возможности генерирования псевдослучайных последовательностей чисел с применением ЭВМ значений x_j , в частоте появления которых отражается плотность распределения случайной величины \tilde{x}_j (метод Монте-Карло) [5].

Оценка точности воспроизводится в соответствии со схемой, представленной на рис. I. Случайные числа x_j , распределенные по равномерному закону, преобразуются в соответствующие значения внутренних (входных) параметров \tilde{x}_j с плотностями распределения $\varphi(\tilde{x}_j)$. На основании этих значений вычисляется значение выходного параметра \tilde{y} :

$$\tilde{y} = f(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n).$$

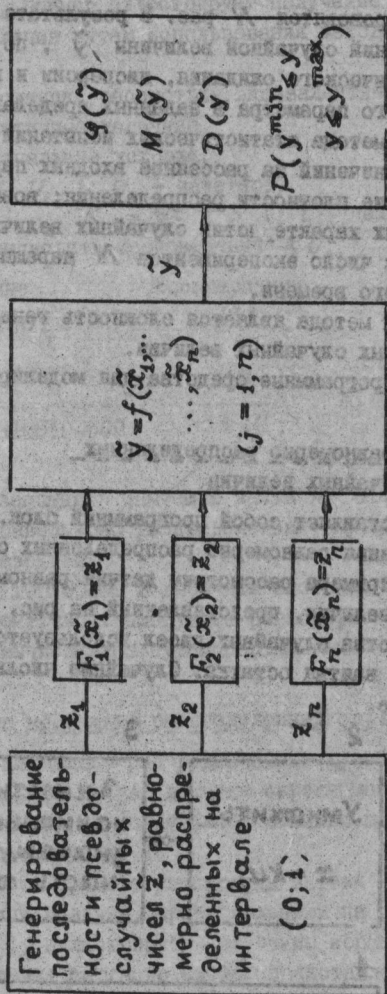


Рис. 1. Схема анализа точности выходных параметров ЭА с использованием метода статистического моделирования

Такие вычисления проводятся N раз. В результате получаем выборку из N значений случайной величины \tilde{y} , по которой находим оценки математического ожидания, дисперсии и вероятность нахождения выходного параметра в заданных пределах.

Достоинства метода статистических испытаний при оценке точности: нет ограничений на рассеяние входных параметров; возможно восстановление плотности распределения; возможно вычисление оценки числовых характеристик случайных величин с большой точностью, так как число экспериментов N наращивается за счет увеличения машинного времени.

Ограничением метода является сложность генерирования совокупности зависимых случайных величин.

Рассмотрим программные средства для моделирования случайных событий.

Датчик равномерно распределенных случайных величин

Датчик представляет собой программный блок, предназначенный для генерирования равномерно распределенных случайных величин.

В качестве примера рассмотрим датчик равномерно распределенных случайных величин, представленный на рис. 2. В этом датчике для производства случайных чисел используется метод возведения в степень и взятия остатка. Случайные числа вырабатываются в двоичной системе.

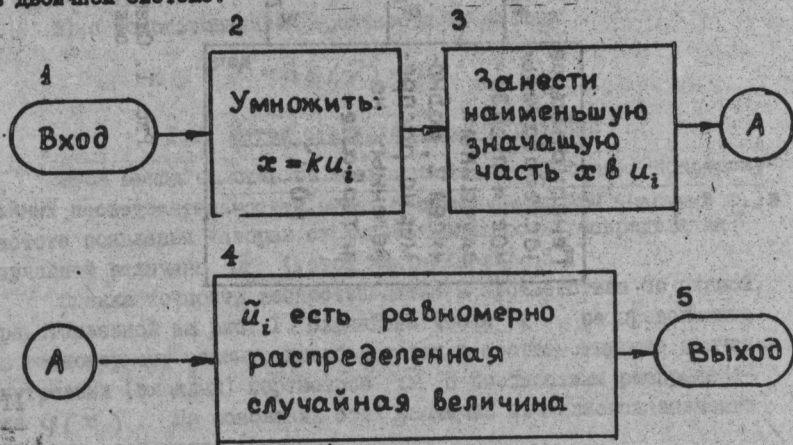


Рис. 2. Датчик равномерно распределенных случайных величин

Пример 2. Пример иллюстрирует получение равномерного распределенных величин путем использования метода, представленного на рис. 2.

При вычислениях рассмотрим эквивалентные двоичные, восьмеричные и десятичные величины.

Шаг I: начальные условия.

Занести U_0 в U_i (U_0 - нечетное).

Запомнить $K = 8t + 3$ (t - целое).

Шаг 2: вычислить произведение KU_0 .

	Двоичные	Восьмеричные	Десятичные
K	001011001	131	89
\times	\times	\times	\times
U_0	000100000	49	32
X	00000101100100000	5440	2848

Шаг 3: запомнить значащую часть X 100100000.

Шаг 4: равномерно распределенная случайная величина является новым значением.

U_0 100100000 в двоичной системе, 5440 в восьмеричной или 2848 в десятичной. Следующее равномерно распределенное случайное число вычисляется путем перемножения 001011001 на 100100000.

Датчик нормально распределенных случайных величин

Датчик нормально распределенных случайных величин представляет собой частный случай датчика неравномерно распределенных случайных величин. Он заслуживает особого внимания, так как используется чаще других.

В качестве примера рассмотрим датчик нормального распределения случайных величин, представленный на рис. 3.

Пример 3. Иллюстрирует получение нормально распределенных случайных величин согласно схеме, представленной на рис. 3.

Шаг I: начальное условие.

Расположение в таблице (128 значений) чисел в соответствии с интегральным нормальным законом распределения. Датчик равномерно распределенных случайных переменных.

Шаг 2: получение случайного числа с равномерным распределением: $U = 00101001100011$.

Шаг 3: выбор двоичных разрядов со 2-го по 8-й.

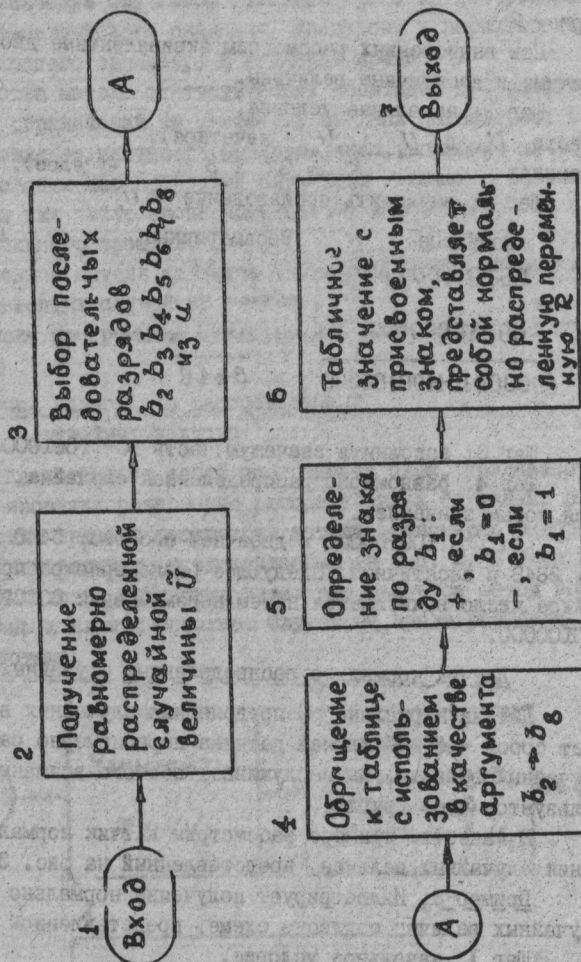


Рис. 3. Датчик случайных величин, распределенных по нормальному закону

Шаг 4: применение табличного метода с использованием в качестве аргумента величины, полученной на 2-м шаге; в восьмеричной системе счисления аргументом будет число 64.

Шаг 5: определение знака по величине первого двоичного разряда: если 0 - число положительное, 1 - отрицательное.

Шаг 6: нормально распределенным случайным числом будет табличное значение со значением +0,54.

2. АНАЛИЗ СТАБИЛЬНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ЭА И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ЕЕ СВОЙСТВ

В процессе производства и эксплуатации ЭА на нее оказывают влияние различные внешние воздействия. Наиболее характерные виды воздействий - тепловые, механические, радиация, влага. Под их влиянием в физических структурах элементов ЭА происходят процессы, приводящие к изменениям параметров x_j , которые в общем случае могут быть описаны детерминированными моделями

$$x_j = \varphi_j (z_1, \dots, z_l, \dots, z_k), \quad l = \overline{1, k},$$

где z_l - внешнее дестабилизирующее воздействие (ВДВ) [1].

ВДВ вызывает постепенные и внезапные обратимые, постепенные и внезапные необратимые изменения параметров [2].

Первые два класса изменений учитываются при оценке стабильности конструкции. Анализ постепенных и внезапных необратимых изменений позволяет оценить закономерности изменения свойств конструкции при длительном функционировании по показателям надежности.

2.1. Обратимые изменения параметров

Способность конструкции ЭА сохранять во времени свои параметры в пределах установленных значений при влиянии внешних воздействий называется стабильностью.

Обычно при анализе стабильности указывается конкретный вид воздействия, по отношению к которому определяется этот показатель. Тогда обратимые изменения параметров определяются зависимостью

$$x_j = \varphi (z_l).$$

Если рассматривать совокупность одноименных элементов конструкции ЭА, то будем иметь случайные реализации зависимости $\varphi (z_l)$. Для инженерных расчетов проводят линеаризацию функций

$\Psi(z_i)$ (рис. 4). При этом выделяют интервалы внешнего воздействия $z_M \leq z \leq z_B$, на которых зависимость $x_j = \Psi(z_i)$ аппроксимируется линейной $\Delta x_j = K_x \Delta z_i$, где линейный коэффициент K_x является случайной величиной с числовыми характеристиками $M(K_x)$ и $D(K_x)$, которые различны для каждого интервала:

$$\Delta z_i = z_i - z_{iM}$$

$$\Delta x_j = x_j - \Psi(z_{iM})$$

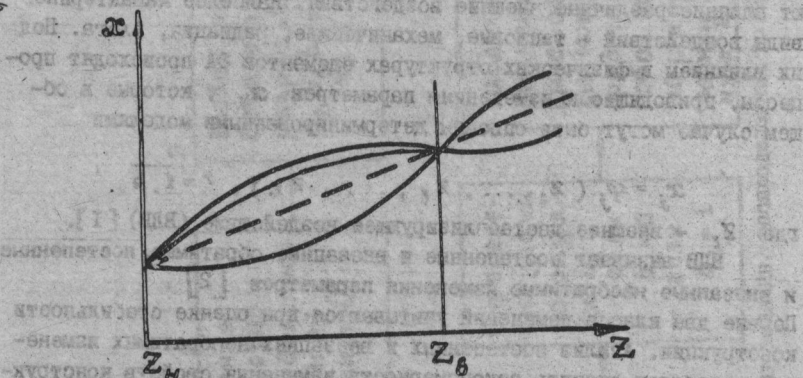


Рис. 4. Линеаризация обратимых изменений параметров конструкции ЭА

Используя числовые характеристики линейных коэффициентов, определяем математическое ожидание и дисперсию изменения первичных параметров под влиянием внешнего воздействия

$$M_z(\Delta \tilde{x}) = M(\tilde{K}_x) \Delta z;$$

$$D_z(\Delta \tilde{x}) = D(\tilde{K}_x) \Delta z^2.$$

Числовые характеристики изменения выходного параметра относительно начального значения y^0 при изменении внешнего воздействия на величину Δz $M_z(\Delta y)$ и $D_z(\Delta y)$ вычисляются по формулам

$$M_z(\Delta \tilde{y}) = \sum_{j=1}^n A_j M_z(\Delta \tilde{x}_j) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n A_{jk} R_{jk} \sigma_z(\Delta \tilde{x}_j) \times$$

$$\times \delta_z(\Delta \tilde{x}_k) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n A_{jj} D_z(\Delta \tilde{x}_j); \quad (8)$$

$$D_z(\Delta \tilde{y}) = \sum_{j=1}^n A_j^2 D_z(\Delta \tilde{x}_j) + \sum_{j=1}^n \sum_{\substack{k=1 \\ j \neq k}}^n R_{jk} \delta_z(\Delta \tilde{x}_j) \delta_z(\Delta \tilde{x}_k) A_j A_k. \quad (9)$$

На практике наиболее распространенным и значимым по интенсивности дестабилизирующим фактором является температура. Для большинства элементов конструкции принята аппроксимация зависимости параметра x от температуры двумя прямыми на интервалах $20^\circ\text{C} - T_H$ и $20^\circ\text{C} - T_B$ (рис. 5).

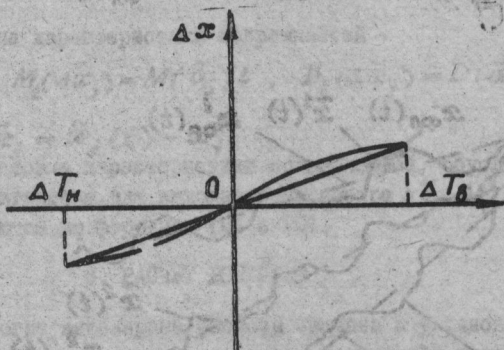


Рис. 5. Аппроксимация зависимости параметров конструкции ЭА от температуры

В этом случае используются статистические характеристики линейного температурного коэффициента $\tilde{\alpha} = \Delta \tilde{x} / (\Delta T_{x^0})$, где $\Delta \tilde{x}$ - изменение параметра \tilde{x} относительно номинального значения x^0 при изменении температуры на ΔT . Для нижнего $\tilde{\alpha}_H$ и верхнего $\tilde{\alpha}_B$ интервалов

$$M(\tilde{\alpha}_H), D(\tilde{\alpha}_H); M(\tilde{\alpha}_B), D(\tilde{\alpha}_B).$$

Для этих интервалов определяют

$$M(\tilde{k}_x)_H = M(\tilde{\alpha}_H) x^0, \quad D(\tilde{k}_x)_H = D(\tilde{\alpha}_H) (x^0)^2,$$

$$M(\tilde{K}_x)_B = M(\tilde{\alpha}_B) x^0, \quad D(\tilde{K}_x)_B = D(\tilde{\alpha}_B) (x^0)^2.$$

Им соответствуют характеристики выходного параметра

$$M_T(\Delta\tilde{y})_H; D_T(\Delta\tilde{y})_H; M_T(\Delta\tilde{y})_B; D(\Delta\tilde{y})_B.$$

2.2. Необратимые изменения параметров

Изменения параметров элементов А при длительном функционировании являются нестационарными (рис. 6). В таких процессах случайность протекания содержится как в сглаженных реализациях $x_{cr}^1(t), x_{cr}^2(t), x_{cr}^3(t)$, так и во флуктуациях $x_{fl}(t) = \tilde{x}(t) - x_{cr}(t)$.

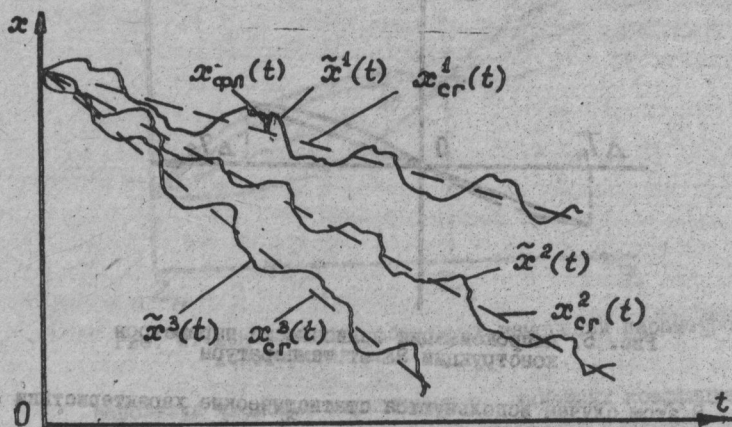


Рис. 6. Изменения параметров ЭА при длительном функционировании

Исследования реальных изменений параметров ЭА показали, что во многих случаях роль флуктуаций невелика. Основная случайность протекания процесса определяется не наличием флуктуаций, а тем, что сглаженные реализации не имеют флуктуаций, протекают случайно, и у каждого описание такого процесса представляется квазидетерминированной моделью. Простое накопление необратимых изменений приводит к линейной квазидетерминированной модели. На интервале времени функционирования

$$\tilde{x}(t) = \alpha_0 + \tilde{\alpha} t,$$

где $\tilde{\alpha} = \frac{\alpha_0 - \tilde{x}(t)}{t}$; $\alpha_0 = M(\tilde{x}(0))$.

В справочной литературе имеются сведения о линейных коэффициентах старения $\beta = \alpha / x_0$, где x_0 - номинальное значение параметра.

При заданных статистических характеристиках $M(\tilde{\beta}_j)$, $D(\tilde{\beta}_j)$ коэффициенты $\tilde{\beta}_j$ для каждого параметра \tilde{x}_j определяются

$$M(\tilde{\alpha}_j) = M(\tilde{\beta}_j) x_j^0, \quad D(\tilde{\beta}_j) (x_j^0)^2 = D(\tilde{\alpha}_j),$$

а числовые характеристики погрешностей -

$$M_t(\Delta \tilde{x}_j) = M(\tilde{\alpha}_j) t, \quad D_t(\Delta \tilde{x}_j) = D(\tilde{\alpha}_j) t^2,$$

где $\Delta \tilde{x}_j = \tilde{x}_j(t) - x_j^0$.

Числовые характеристики погрешностей, обусловленные старением материала, для выходного параметра $\Delta \tilde{y}$ $M_t(\Delta \tilde{y})$, $D_t(\Delta \tilde{y})$ определяются по формулам (8) и (9).

3. РАСЧЕТ ДОПУСКОВ

Многие инженерные расчеты связаны с установлением допуска на выходной параметр, под которым понимается интервал, где параметр находится с заданной вероятностью. При расчете допуска на выходной параметр необходимо учитывать погрешности производственные и возникающие за счет обратимых и необратимых изменений параметров под влиянием внешних воздействий.

Будем учитывать три вида погрешностей: производственные, температурные и обусловленные старением. Считая их независимыми величинами, имеем следующие числовые характеристики сумм этих погрешностей соответственно для нижнего и верхнего интервалов температуры:

$$M_{1\Sigma}(\tilde{y}) = M(\tilde{y}) + M_T(\Delta \tilde{y})_H + M_t(\Delta \tilde{y});$$

$$M_{2\Sigma}(\tilde{y}) = M(\tilde{y}) + M_T(\Delta \tilde{y})_B + M_t(\Delta \tilde{y});$$

$$D_{1\Sigma}(\tilde{y}) = D(\tilde{y}) + D_T(\Delta \tilde{y})_H + D_t(\Delta \tilde{y});$$

$$D_{2\Sigma}(\tilde{y}) = D(\tilde{y}) + D_T(\Delta\tilde{y})_B + D_t(\Delta\tilde{y}).$$

Плотности распределения выходной величины \tilde{y} для двух интервалов температур (гауссовское распределение с параметрами $M_{1\Sigma}, D_{1\Sigma}, M_{2\Sigma}, D_{2\Sigma}$) представлены на рис. 7.

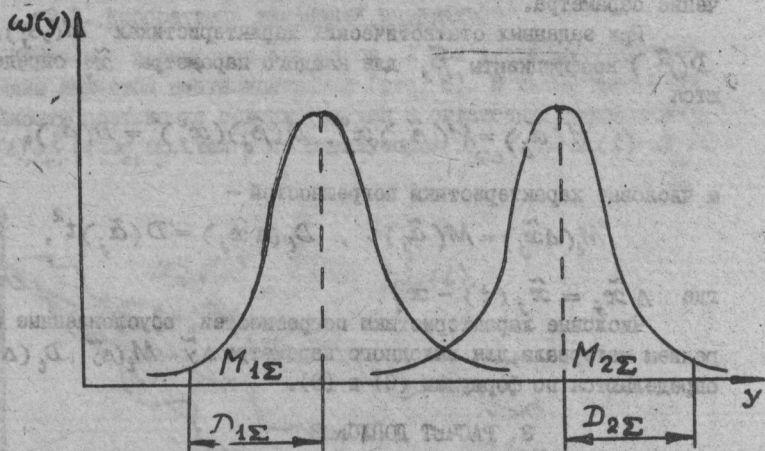


Рис. 7. Плотность распределения выходной величины ЗА для двух интервалов температур

Все возможные значения суммарной погрешности будут лежать в интервале $\Gamma_{\text{расч}}$.

$$\Gamma_{\text{расч}}(\tilde{y}) = |M_{1\Sigma}(\tilde{y}) - M_{2\Sigma}(\tilde{y})| + \gamma [\sigma_{1\Sigma}(\tilde{y}) + \sigma_{2\Sigma}(\tilde{y})],$$

где γ - число среднеквадратичных отклонений, укладывающихся с заданной вероятностью в интервале допуска.

Интервал допуска $\theta(\tilde{y})$ на выходной параметр устанавливается из следующего условия: $\theta(\tilde{y}) \geq \Gamma_{\text{расч}}$.

3.1. Классификация допусков на ЗА

Допуск - это такие установленные опытом или расчетом границы значений параметров изделия, при которых изделие способно выполнять заданные функции, сохраняя эксплуатационные показатели

ли в течение требуемого времени при определенных условиях. Классификация допусков представлена в табл. 2.

Таблица 2
Классификация допусков

Тип допуска	Документация, устанавливающая допуск
Арбитражный	ТУ, стандарты
Производственный	Производственно-техническая документация
Эксплуатационный	Инструкция по эксплуатации
Ремонтный	ТУ на ремонт

Соотношения между величинами полей допусков различных типов представлены на рис. 8.

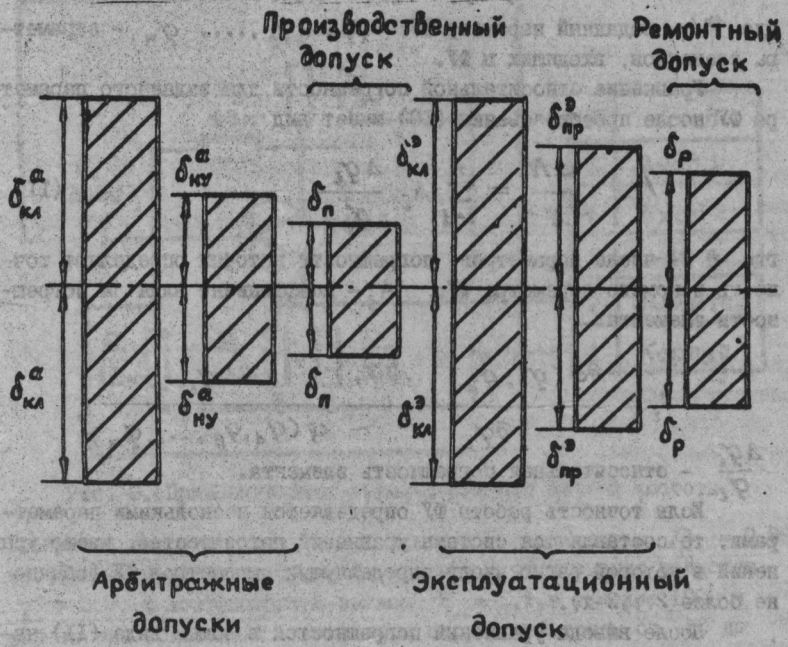


Рис. 8. Поля допусков различных типов

Для расчета допусков необходимо.

выбрать электрическую схему устройств и провести ее расчет, определить номинальные значения параметров радиодеталей, выбрать электрический режим работы полупроводниковых приборов и интегральных микросхем (МС), определить число блоков и функциональных узлов (ФУ);

указать условия эксплуатации и требуемую точность параметров.

По этим данным можно произвести анализ или синтез допусков ФУ и ее узлов: 1) по заданным допускам на параметр элементов определить возможный разброс параметров устройства; 2) по заданным допускам на параметры устройства найти допуски на параметры элементов.

Каждый параметр функционального узла представляет собой функцию параметров элементов, входящих в узел,

$$N = \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n), \quad (10)$$

где N - заданный параметр ФУ; q_1, q_2, \dots, q_n - параметры элементов, входящих в ФУ.

Уравнение относительной погрешности для заданного параметра ФУ после преобразования (10) имеет вид

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^n A_i \frac{\Delta q_i}{q_i}, \quad (11)$$

где n - число параметров, погрешности которых определяют точность искомого параметра ФУ; A_i - коэффициент влияния погрешности элемента:

$$A_i = \frac{\partial \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \frac{q_i}{\varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)},$$

$\frac{\Delta q_i}{q_i}$ - относительная погрешность элемента.

Если точность работы ФУ определяется несколькими параметрами, то составляется система уравнений погрешностей, число уравнений в которой равно числу определяющих параметров ФУ (обычно не более 2...3-х).

После вывода уравнений погрешностей в общем виде (11) находят численные значения коэффициентов влияния A_i . В зависи-

мости от параметров узла коэффициенты A_i могут быть функциями частоты или времени.

Для упрощения расчетов обычно пользуются методом точечной оценки, определяя численные значения коэффициентов влияния подстановкой в аналитические выражения номинальных значений параметров элементов и фиксированных значений частоты и времени.

По численным значениям A_i оценивается влияние погрешностей параметров элементов на погрешности заданных параметров ФУ. Погрешностями, не оказывающими существенного влияния на точность работы ФУ, пренебрегают. Затем выбирают или уточняют тип элементов ФУ.

Пример 4: Расчет допусков на элементы усилителя низкой частоты (УНЧ), принципиальная схема которого имеет вид, показанный на рис. 9.

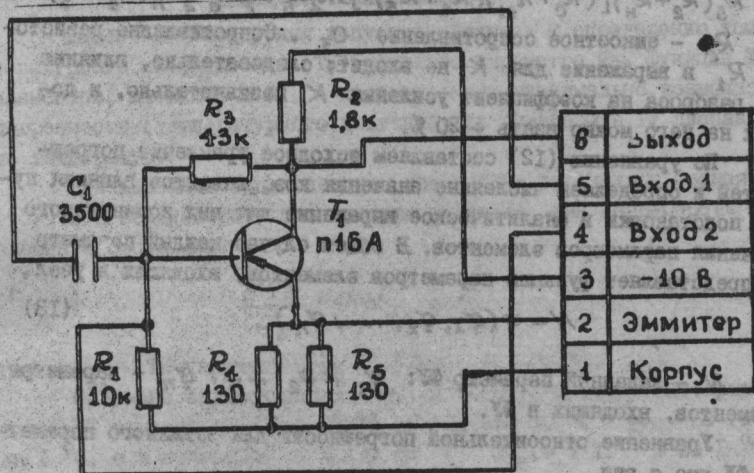


Рис. 9. Принципиальная схема усилителя низкой частоты

Требуется выбрать допуски, при которых с надежностью $P_r = 0,99$, коэффициентом гарантированной надежности обеспечения допусков $\gamma = 0,86$ и коэффициентом запаса $\xi = 1,1$, в течение 1000 ч работы при колебаниях температуры окружающей среды от -60 до $+60$ °С. И изменении относительной влажности до 98 % должен обеспечиваться эксплуатационный допуск Δ_3 на коэффициент усиления по напряжению на средней частоте, равный ± 25 %. УНЧ соб-

ран на транзисторе МП16А; в состав схемы входят резисторы МПТ-0,25 ($R_1 = 10$, $R_2 = 1,8$ и $R_3 = 43$ кОм, $R_4 = R_5 = 130$ Ом) и конденсатор C_1 типа МБМ емкостью 0,5 мкФ.

Режимы работы усилителя: $U_{Вх} = 10$ мВ, $E_k = -10В$ 5%.
 Параметры транзистора в рабочей точке $h_{11} = 1,4$ кОм; $\beta = 40$;
 нагрузочное сопротивление усилителя $R_H = 1$ кОм $\pm 20\%$, ТК
 (температурный коэффициент) сопротивления в области положительных температур $\alpha_{R_H}^+ = (0,6 \pm 0,2)\%$ на $1^\circ C$, а в области отрицательных температур $\alpha_{R_H}^- = (0,3 \pm 0,15)\%$ на $1^\circ C$; коэффициенты старения и увлажнения $C_{R_H} = h_{R_H} = 0$.

Выражение для коэффициента усиления по напряжению такого усилителя имеет вид

$$K = \frac{\beta R_2 R_3 R_4 (R_4 + R_5)}{R_3 (R_2 + R_H) [(R_C + h_{11})(R_4 + R_5) + \beta R_4 R_5] + \beta R_2 R_2 R_H (R_4 + R_5)}, \quad (12)$$

где R_C — емкостное сопротивление C_1 . Сопротивление резистора R_1 в выражение для K не входит; следовательно, влияние его разброса на коэффициент усиления K незначительно, и допуск на него можно взять $\pm 20\%$.

По уравнению (12) составляем исходное уравнение погрешностей и определяем численные значения коэффициентов влияния путем подстановки в аналитическое выражение для них номинального значения параметров элементов. В общем случае каждый параметр ФУ представляет функцию параметров элементов, входящих в узел,

$$N = \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n), \quad (13)$$

где N — заданный параметр ФУ; q_1, q_2, \dots, q_n — параметры элементов, входящих в ФУ.

Уравнение относительной погрешности для заданного параметра ФУ имеет вид

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^n A_i \frac{\Delta q_i}{q_i}, \quad (14)$$

где n — число элементов, погрешности которых определяют точность искомого параметра ФУ; A_i — коэффициент влияния погрешности элемента:

$$A_i = \frac{\partial \varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}{\partial q_i} \cdot \frac{q_i}{\varphi(q_1, q_2, \dots, q_n)}; \quad (15)$$

$\frac{\Delta q_i}{q_i}$ - относительная погрешность элемента.

Уравнение (15) получено с методической погрешностью, равной второму числу разложения в ряд Тейлора.

В результате проведённых расчетов исходное уравнение погрешностей принимает вид

$$\frac{\Delta K}{K} = +0,35 \frac{\Delta \beta}{\beta} - 0,28 \frac{\Delta h_{11}}{h_{11}} + 0,58 \frac{\Delta R_2}{R_2} + 0,2 \frac{\Delta R_3}{R_3} - 0,23 \frac{\Delta R_4}{R_4} - 0,23 \frac{\Delta R_5}{R_5} + 0,21 \frac{\Delta R_H}{R_H} + 0,36 \frac{\Delta C_1}{C_1} + 0,9 \frac{\Delta E_k}{E_k} \quad (16)$$

Влияние нестабильности напряжения питания на коэффициент усиления обычно определяют экспериментально. В нашем случае коэффициент влияния оказался равным 0,9.

3.2. Температурные допуски

Расчет температурных допусков сводится к определению температурного коэффициента (ТК) искомого параметра как функции ТК элементов, входящих в ФУ, и к определению максимально возможной погрешности (температурного допуска) при заданном в ТУ диапазоне температур.

При линейных и циклических изменениях параметров элементов схемы под воздействием температуры относительная погрешность элемента составляет

$$\frac{\Delta q_i}{q_i} = \alpha_{q_i} \Delta t,$$

где α_{q_i} - ТК параметра q_i ; $\Delta t = t - 20^\circ \text{C}$.

Согласно справочным данным, ТК сопротивления резисторов типа МЛТ в диапазоне температур от $+20$ до -60°C $\alpha_{R-} = 12 \cdot 10^{-2} \%$ на 1°C , а в интервале от 20 до 80°C $\alpha_{R+} = 7 \cdot 10^{-2} \%$ на 1°C .

Допустимые пределы изменения емкости конденсаторов типа МЕМ в диапазоне температур от -60 до $+70^\circ \text{C}$ составляют $\pm 10 \%$. Отсюда определяем температурные коэффициенты в диапазоне от 20 до $+60^\circ \text{C}$ на 1°C :

$$\alpha_{q_i} = \frac{[\Delta q_i / q_i]_{\max}}{\Delta t_H} = \frac{\pm 10}{40} = \pm 0,25 \%,$$

а в диапазоне от +20 до -60 °C

$$\alpha_c = \frac{\pm 10}{80} = \pm 0,125 \%$$

По справочным данным на транзисторе повышение температуры до +60 °C приводит к увеличению β на $50 \pm 20 \%$; h_{11} - на $-80 \pm 20 \%$. Тогда на 1 °C

$$\alpha_{\beta^+} = \frac{(+50 \pm 20)}{40} = (1,25 \pm 0,5) \%,$$

$$\alpha_{h_{11}} = \frac{(-80 \pm 20)}{-40} = (2 \pm 0,625) \%$$

Повышение температуры до -60 °C ведет к уменьшению коэффициента β на $50 \pm 20 \%$ и h_{11} - на $80 \pm 25 \%$; следовательно, на 1 °C

$$\alpha_{\beta^+} = \frac{(+50 \pm 20)}{40} = (1,25 \pm 0,5) \%,$$

$$\alpha_{h_{11}} = \frac{(-60 \pm 30)}{-80} = (0,75 \pm 0,375) \%$$

Напряжение источников питания, имеющих самостоятельное конструктивное оформление в виде узлов или блоков, обычно даются эксплуатационные допуски. Поэтому при расчете температурных допусков, допусков на влажность и старение можно принять погрешность $\Delta E_k / E_k = 0$.

Зная ТК параметров схемных элементов, определяем среднее значение и половину поля допуска на ТК коэффициента усиления.

Уравнение погрешности узла, вызванной воздействием температуры, имеет вид

$$\left[\frac{\Delta N}{N} \right] = \Delta t \sum_{i=1}^n A_i \alpha_{q_i}$$

среднее значение ТК

$$M(\alpha_{\Sigma}) = \sum_{i=1}^n A_i M(\alpha_{q_i});$$

половина поля допуска

$$\delta(\alpha_{\Sigma}) = \sqrt{A^2 \delta^2(\alpha_{q_i})},$$

где α_{Σ} - ТК параметра узла; $M(\alpha_{q_i})$ - среднее значение ТК i -го элемента; $\delta(\alpha_{q_i})$ - половина поля допуска i -го элемента.

Последняя формула справедлива для случая, когда $\delta_i = 3\delta_{i, \text{доп}}$, т.е. в пределах поля допуска содержится 99,7% всех отклонений ТК. Если это не так и некоторые параметры взаимосвязаны, то

$$\delta(\alpha_{\Sigma}) = \gamma \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i \delta^2(\alpha_{q_i}) + \sum_{j, j+1} 2r_{j, j+1} \cdot A_j \delta(\alpha_{q_j}) A_{j+1} \delta(\alpha_{q_{j+1}})}$$

При этом необходимо учесть, что коэффициент корреляции между входным сопротивлением и коэффициентом усиления транзистора $r_{\beta, h_{11}} = 0,9$ на 1°C

$$\begin{aligned} M(\alpha_{R_2})_+ &= 0,35 M(\alpha_{\beta}) - 0,28 M(\alpha_{h_{11}}) + 0,21 M(\alpha_{R_H}) = \\ &= 0,35 \cdot 1,25 - 0,28 \cdot 2 + 0,21 \cdot 0,6 = 0,004 \% ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta(\alpha_{R_2})_+ &= \gamma \sqrt{0,35^2 \delta^2(\alpha_{\beta}) + 0,28^2 \delta^2(\alpha_{h_{11}}) + \\ &+ 0,58^2 \delta^2(\alpha_{R_2}) + 0,2^2 \delta^2(\alpha_{R_3}) + 0,23^2 \delta^2(\alpha_{R_4}) + 0,23^2 \delta^2(\alpha_{R_5}) + \\ &+ 0,21^2 \delta^2(\alpha_{R_H}) + 0,36^2 \delta^2(\alpha_{C_1}) + 2r_{\beta, h_{11}} \cdot 0,35 \delta(\alpha_{\beta}) \cdot 0,28 \delta(\alpha_{h_{11}})} = \\ &= 0,86 \sqrt{0,35^2 \cdot 0,5^2 + 0,28^2 \cdot 0,625^2 + (0,58^2 + 0,2^2 + 0,23^2 + 0,23^2) (7 \cdot 10^{-2})^2 + \\ &+ 0,21^2 \cdot 0,2^2 + 0,36^2 \cdot 0,25^2 - 2 \cdot 0,9 \cdot 0,35 \cdot 0,5 \cdot 0,28 \cdot 0,625} = 0,117 \% . \end{aligned}$$

В интервале температур от $+20$ до -60°C на 1°C

$$M(\alpha_{R_2})_- = 0,35 \cdot 0,625 - 0,28 \cdot 0,75 + 0,21 \cdot 0,3 = -0,072 \% ;$$

$$\delta(\alpha_{R_2})_- = 0,86 \sqrt{0,35^2 \cdot 0,25^2 + 0,28^2 \cdot 0,375^2 +}$$

$$+(0,58^2 + 0,2^2 + 0,23^2 + 0,23^2) \cdot (12 \cdot 10^{-2}) + 0,21^2 \cdot 0,15^2 +$$

$$+ 0,36 \cdot 0,125^2 - 2 \cdot 0,9 \cdot 0,35 \cdot 0,25 \cdot 0,28 \cdot 0,375) = 0,0946\%$$

Теперь найдем поле рассеивания температурных погрешностей при крайних температурах рабочего диапазона:

а) при $t = 60^\circ\text{C}$

$$\Delta_{T+} = [M(\alpha_k)_+ \pm \delta(\alpha_k)] \Delta t = \\ = [0,004 \pm 0,117](60-20) = (0,16 \pm 4,68)\%$$

б) при $t = -60^\circ\text{C}$

$$\Delta_{T-} = [0,072 \pm 0,0946](60-20) = (-5,76 \pm 7,57)\%$$

3.3. Допуски на старение

По ТУ для резисторов типа МПТ за 2000 ч работы возможно изменение сопротивления на $\pm 4\%$.

Коэффициент сдвига на I ч равен

$$C_R = \frac{\pm 4\%}{2000} = \pm 2 \cdot 10^{-3}\%$$

Для конденсаторов МБМ гарантийный срок службы по справочным данным равен 1000 ч, а изменение емкости за это же время составляет не более $\pm 10\%$; следовательно, на I ч

$$C_{C1} = \frac{\pm 10\%}{1000} = \pm 10 \cdot 10^{-3}\%$$

Параметры транзисторов при старении изменяются незначительно; поэтому считаем $C_A = C_{R_{11}} = 0$. Величина R_N , в основном, определяется входным сопротивлением транзистора следующего каскада и, следовательно, можно принять $C_{R_N} = 0$. При расчете допусков на старение можно считать $\Delta E_R / E_R = 0$.

Среднее значение $M(C_k) = 0$.

Половина поля допуска на I ч

$$\delta(C_k) = \gamma \sqrt{(0,58^2 + 0,2^2 + 0,23^2 + 0,23^2) \delta^2(C_R) + 0,36^2 \delta^2(C_{C1}) =}$$

$$= 0,86 \sqrt{(0,58^2 + 0,2^2 + 0,23^2 + 0,23^2)(2 \cdot 10^{-3})^2 + 0,36^2 (10 \cdot 10^{-3})^2} = 3,32 \cdot 10^{-3} \%,$$

$$\Delta C_T = [M(C_R) \pm \delta(C_R)] \Delta \tau = \pm 3,32 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = \pm 3,32 \%$$

3.4. Допуски на влажность

Как мы уже отмечали, под влиянием влаги параметры транзисторов и конденсаторов практически не изменяются, поэтому их погрешность можно принять равной нулю. Это относится и к R_n , так как его величина в основном определяется параметрами транзистора.

Погрешности увлажнения будут определяться изменением сопротивления резисторов МПТ. Для резисторов МПТ по паспортным данным для сопротивления до 1 МОм коэффициент увлажнения (КУ) составляет от -3 до +6%. Полагая его распределение нормальным и симметричным, имеем $h_R = (1,5 \dots 4,5) \%$;

$$M(h_R) = (0,58 + 0,2 - 0,23 - 0,23) \cdot 1,5 = 0,48 \%;$$

$$\delta(h_R) = 0,86 \sqrt{(0,58^2 + 0,2^2 + 0,23 + 0,23^2) \cdot 4,5^2} = 2,69 \%;$$

$$\Delta_{вл} = (0,48 \pm 2,69) \%$$

3.5. Производственные допуски

После расчета допусков, учитывающих воздействие влажности, старения и температуры, следует рассчитать, какая часть эксплуатационного допуска осталась на разброс производственных допусков.

Для обеспечения заданного эксплуатационного допуска на коэффициент усиления УНЧ можно изменять только допуски на сопротивление резисторов и емкость конденсатора, поскольку допуск на напряжение питания задан, а подбор транзисторов обычно не допускается.

Согласно ТУ на транзисторы МП6А, коэффициент усиления может находиться в пределах 30...50. Среднее значение $\beta = 40$, при этом половина поля рассеивания β составляет 25%; а координаты середины поля допуска $\Delta(\Delta\beta/\beta) = 0$.

Коэффициенты относительной асимметрии распределения отклонений в поле допуска (α_{β}) и относительного рассеивания (k_{β}) параметра β оплавных германиевых транзисторов соответственно равны 0,85 и 2,02 [3].

Между параметрами β и h_{11} низкочастотных германиевых транзисторов имеет место тесная корреляционная связь ($R_{\beta h_{11}} = 0,9$), поэтому допуск на параметр $\alpha_{h_{11}}$ и значения коэффициентов $k_{h_{11}}$ берем такие же, как и для параметров α_{β} и k_{β} .

Величина систематической составляющей производственных погрешностей коэффициента усиления УНЧ обусловлена лишь асимметрией распределения β и h_{11} :

$$M\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\text{пр}} = 0,35(-0,85)25 - 0,28(-0,85)25 = -1,49\%$$

Пределы смещения систематической составляющей суммарного поля рассеивания коэффициента усиления УНЧ

$$M\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\Sigma^+} = M\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\text{пр}} + M\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\Gamma^+} + M\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\text{вл}} =$$

$$= -1,49 + 0,16 + 0,48 = -0,85\%$$

$$M\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\Sigma^-} = M\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\text{пр}} - M\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\Gamma^-} = 1,49 - 5,76 = -7,25\%$$

Расчетная величина эксплуатационного допуска

$$\Delta_{\text{ЭР}} = \frac{\pm 25}{\xi \cdot 1,1} = \pm 22,6\%$$

Величина случайной составляющей суммарного поля рассеивания

$$\delta\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\Sigma} = 2 \left| \frac{1}{2} \Delta_{\text{ЭР}} - M\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\Sigma} \right|_{\text{max}} = 22,6 - 7,25 = 15,35\%$$

Допустимая величина случайной составляющей поля рассеивания производственных погрешностей

$$\delta\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\text{пр. доп}} = \sqrt{\delta^2\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\Sigma} - [\delta^2\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\Gamma^+} + \delta^2\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\text{вл}} + \delta^2\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\Gamma^-}]}$$

$$= \sqrt{15,35^2 - [3,32^2 + 2,69^2 + 7,57^2]} = 12,67\%$$

3.6. Допуски на параметры элементов схемы

Выбираем допуски на параметры элементов схемы с учетом допустимой величины случайной составляющей поля рассеивания производственных погрешностей и коэффициентов влияния.

Выбираем допуски на сопротивления ($R_2 \pm 10\%$, R_3 , R_4 , $R_5 \pm 20\%$) и на емкость конденсатора ($C_1 \pm 10\%$). При выбранных допусках на элементы схемы произведем расчет величины случайной составляющей производственных погрешностей коэффициентов УНЧ:

$$\begin{aligned} \delta\left(\frac{\Delta K}{K}\right)_{\text{пр}} &= \sqrt{0,35^2 \delta^2\left(\frac{\Delta \beta}{\beta}\right) + 0,28^2 \delta^2\left(\frac{\Delta h_{11}}{h_{11}}\right) + 0,58^2 \delta^2\left(\frac{\Delta R_2}{R_2}\right) +} \\ &+ 0,2^2 \delta^2\left(\frac{\Delta R_3}{R_3}\right) + 0,23^2 \delta^2\left(\frac{\Delta R_4}{R_4}\right) + 0,23^2 \delta^2\left(\frac{\Delta R_5}{R_5}\right) + 0,21^2 \delta^2\left(\frac{\Delta R_N}{R_N}\right) +} \\ &+ 0,36^2 \delta^2\left(\frac{\Delta C_1}{C_1}\right) + 0,9^2 \delta^2\left(\frac{\Delta E_\alpha}{E_\alpha}\right) - 2 R_\beta h_{11} 0,35 \delta\left(\frac{\Delta \beta}{\beta}\right) 0,28 \delta\left(\frac{\Delta h_{11}}{h_{11}}\right) =} \\ &= 0,86 \sqrt{0,35^2 \cdot 25^2 + 0,28^2 \cdot 25^2 + 0,58^2 \cdot 10^2 + (0,2^2 + 0,23^2 + 0,23^2 + 0,23^2) \cdot} \\ &\times 20^2 + 0,21^2 \cdot 20 + 0,36^2 \cdot 10^2 + 0,9^2 \cdot 5^2 - 2 \cdot 0,9 \cdot 0,35 \cdot 25 \cdot 0,28 \cdot 25} = 10,82\% \end{aligned}$$

Полученная величина случайной составляющей поля рассеивания производственных погрешностей меньше допустимой, т.е. выполняется условие $10,82\% < 12,67\%$.

Следовательно, при выбранных допусках на параметры элементов эксплуатационный допуск на коэффициент усиления УНЧ в заданных условиях будет обеспечен с гарантированной надежностью $P_r = 0,99$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Львович Я.Е., Фролов В.Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности РЭА: Учеб. пособие для вузов. - М.: Радио и связь, 1986. 192 с.

2. Тетраков В.Б. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры. - М.: Сов. радио, 1969. 208 с.

3. Фомин А.В., Борисов В.Ф., Чермошенский В.В. Допуски в радиоэлектронной аппаратуре. - М.: Сов. радио, 1973. 108 с.

4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: Наука, 1973. 366 с.

5. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. - М.: Наука, 1973. 312 с.

$$\begin{aligned} & + \frac{(3\Delta)^3}{3!} \cdot 0.22 + \frac{(3\Delta)^4}{4!} \cdot 0.22 + \frac{(3\Delta)^5}{5!} \cdot 0.22 + \dots \\ & + \frac{(3\Delta)^2}{2!} \cdot 0.22 + \frac{(3\Delta)^3}{3!} \cdot 0.22 + \frac{(3\Delta)^4}{4!} \cdot 0.22 + \dots \\ & + \frac{(3\Delta)^4}{4!} \cdot 0.22 + \frac{(3\Delta)^5}{5!} \cdot 0.22 + \frac{(3\Delta)^6}{6!} \cdot 0.22 + \dots \\ & + \frac{(3\Delta)^5}{5!} \cdot 0.22 + \frac{(3\Delta)^6}{6!} \cdot 0.22 + \frac{(3\Delta)^7}{7!} \cdot 0.22 + \dots \\ & + \frac{(3\Delta)^6}{6!} \cdot 0.22 + \frac{(3\Delta)^7}{7!} \cdot 0.22 + \frac{(3\Delta)^8}{8!} \cdot 0.22 + \dots \\ & + \frac{(3\Delta)^7}{7!} \cdot 0.22 + \frac{(3\Delta)^8}{8!} \cdot 0.22 + \frac{(3\Delta)^9}{9!} \cdot 0.22 + \dots \\ & + \frac{(3\Delta)^8}{8!} \cdot 0.22 + \frac{(3\Delta)^9}{9!} \cdot 0.22 + \frac{(3\Delta)^{10}}{10!} \cdot 0.22 + \dots \end{aligned}$$

Оценки вероятности появления дефектов в радиоэлектронной аппаратуре. В данной работе рассмотрены методы оценки вероятности появления дефектов в радиоэлектронной аппаратуре. В работе рассмотрены методы оценки вероятности появления дефектов в радиоэлектронной аппаратуре. В работе рассмотрены методы оценки вероятности появления дефектов в радиоэлектронной аппаратуре.

В.Б. Тетраков, А.В. Фомин, В.Ф. Борисов, В.В. Чермошенский, Е.С. Вентцель, И.М. Соболев. Москва, 1973.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Анализ точности при конструировании и разработке технологии ЭА	4
1.1. Вероятностный метод	4
1.2. Метод наихудшего случая	7
1.3. Метод статистических испытаний	10
2. Анализ стабильности конструкции ЭА и закономерностей изменения ее свойств	15
2.1. Обратимые изменения параметров	15
2.2. Необратимые изменения параметров	18
3. Расчет допусков	19
3.1. Классификация допусков на ЭА	20
3.2. Температурные допуски	25
3.3. Допуски на старение	28
3.4. Допуски на влажность	29
3.5. Производственные допуски	29
3.6. Допуски на параметры элементов схемы	31
Список литературы	31

