

4. АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ И СТАБИЛЬНОСТИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

4.1. Расчетные соотношения и формулы

Таблица 4.1

Выражение	Номер	Выражение	Номер
$B_i = \left[\frac{\partial \varphi \cdot x_i}{\partial x_i \cdot \varphi} \right]_0$	4.1	$\frac{\Delta y}{y} = \sum_{i=1}^n B_i \frac{\Delta x_i}{x_i}$	4.2
$\Delta_{\text{пр}} = M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}} \pm \delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}}$	4.3	$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n B_i M\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right)_{\text{пр}}$	4.4
$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2 \sigma^2\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right)_{\text{пр}} + 2 \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j \\ i < j}}^n r_{ij} B_i B_j \sigma\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right)_{\text{пр}} \sigma\left(\frac{\Delta x_j}{x_j}\right)_{\text{пр}}}$			4.5
$\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}} = \rho \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right)_{\text{пр}} K_i^2 + 2 \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j \\ i < j}}^n r_{ij} B_i B_j \delta\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right)_{\text{пр}} \delta\left(\frac{\Delta x_j}{x_j}\right)_{\text{пр}} K_i K_j}$			4.6
$\Delta_t = \Delta \tau \left[M(\alpha_{\Sigma})_{\pm} \pm \delta(\alpha_{\Sigma})_{\pm} \right]$	4.7	$\Delta_{\text{сг}} = \Delta \tau \left[M(c_{\Sigma}) \pm \delta(c_{\Sigma}) \right]$	4.8
$M(\alpha_{\Sigma}) = \sum_{i=1}^n B_i M(\alpha_i)$	4.9	$M(c_{\Sigma}) = \sum_{i=1}^n B_i M(c_i)$	4.10
$\delta(\alpha_{\Sigma}) = \rho \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2 \delta^2(\alpha_i) K_i^2 + 2 \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j \\ i < j}}^n r_{ij} B_i B_j \delta(\alpha_i) \delta(\alpha_j) K_i K_j}$			4.11
$\delta(c_{\Sigma}) = \rho \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2 \delta^2(c_i) K_i^2 + 2 \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j \\ i < j}}^n r_{ij} B_i B_j \delta(c_i) \delta(c_j) K_i K_j}$			4.12

$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma+} = M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{np}} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{cr}+} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{t}+}$	4.13		
$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma-} = M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{np}} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{cr}-} + M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{t}-}$	4.14		
$\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma} = \sqrt{\delta^2\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{np}} + \delta^2\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{cr}} + \delta^2\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{t}\pm}}$	4.15		
$\Delta_{\vartheta} = \xi \left\{ \left[M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma-} - \delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma} \right] \dots \left[M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma+} + \delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma} \right] \right\}$	4.16		
$y = \text{const} \prod_{i = 1}^n x_i^{\alpha_i}$	4.17	$B_i = \alpha_i, \quad i = 1, \dots, n$	4.18
$y = \frac{Q\left(x_1, \dots, x_n\right)}{H\left(x_1, \dots, x_n\right)} = \frac{Q}{H}$	4.19	$B_i = m \frac{Q\left(x_i\right)}{Q} - l \frac{H\left(x_i\right)}{H},$	4.20
$B_i \approx \frac{\Delta y}{\Delta x_i} \cdot \frac{x_{i\text{HOM}}}{y_{\text{HOM}}} = \frac{\varphi\left(x_1, \dots, x_i + \Delta x_i, \dots, x_n\right) - y_{\text{HOM}}}{\Delta x_i} \cdot \frac{x_{i\text{HOM}}}{y_{\text{HOM}}}$			4.21

Примечание. Нижний индекс “ноль” в выражении (3.1) указывает, что после дифференцирования и доумножения на x_i / φ в полученное выражение необходимо подставить средние (номинальные) значения x_1, \dots, x_n , если в выражении они еще останутся.

4.2. Пояснение параметров

B_i, B_j –	коэффициенты влияния i -го и j -го первичных параметров;
$y = \varphi(x_1, \dots, x_n)$ –	выходной параметр, рассматриваемый как функция первичных параметров x_1, \dots, x_n ;
$\Delta x_i, \frac{\Delta x_i}{x_i}$ –	абсолютное и относительное производственное (технологическое) отклонение i -го первичного параметра;
$\Delta y, \frac{\Delta y}{y}$ –	абсолютное и относительное производственное (технологическое) отклонение выходного параметра;
n —	количество учитываемых первичных параметров;
$\Delta_{\text{пр}}$ –	производственный (технологический) допуск выходного параметра;

$M\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right)_{\text{пр}}$	–	математическое ожидание относительной производственной погрешности i -го первичного параметра;
$\sigma\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}}$	–	среднее квадратическое отклонение относительной производственной погрешности i -го первичного параметра;
r_{ij}	–	коэффициент парной корреляции между i -м и j -м первичным параметром; в формуле (4.10) – коэффициент парной корреляции между температурными коэффициентами i -го и j -го первичных параметров;
$\delta\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right)_{\text{пр}}$	–	половина поля рассеивания относительной производственной погрешности i -го первичного параметра;
ρ	–	коэффициент гарантированного обеспечения допуска;
K_i, K_j	–	коэффициенты относительного рассеивания i -го и j -го первичных параметров; в формуле (4.10) – коэффициенты относительного рассеивания температурных коэффициентов i -го и j -го первичных параметров;
Δ_t	–	температурный допуск выходного параметра;
$\Delta_{\text{ст}}$	–	допуск старения выходного параметра;
$M(\alpha_\Sigma)$	–	математическое ожидание (среднее значение) суммарного температурного коэффициента;
$\delta(\alpha_\Sigma)$	–	половина поля рассеивания суммарного температурного коэффициента;
$M(\alpha_i)$	–	математическое ожидание температурного коэффициента i -го первичного параметра;
$\delta(\alpha_i), \delta(\alpha_j)$	–	половина поля рассеивания температурного коэффициента i -го и j -го первичных параметров;
$\delta(c_i), \delta(c_j)$	–	половина поля рассеивания коэффициента старения i -го и j -го первичных параметров;
$M(c_\Sigma)$	–	математическое ожидание (среднее значение) суммарного коэффициента старения;
$\delta(c_\Sigma)$	–	половина поля рассеивания суммарного коэффициента старения;
Δ_Θ	–	эксплуатационный допуск выходного параметра;
$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma+}$	–	сумма положительных средних значений температурного допуска и допуска старения относительно среднего значения производственного допуска;
$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma-}$	–	сумма отрицательных средних значений температурного допуска и допуска старения относительно среднего значения производственного допуска;

$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}}$	–	среднее значение относительной погрешности выходного параметра, обусловленной действием старения (знаки плюс или минус означают положительное и отрицательное значение этой величины);
$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_t$	–	среднее значение относительной температурной погрешности выходного параметра (знаки плюс или минус означают положительное и отрицательное значение этой величины);
$\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}}$	–	половина поля рассеивания относительной погрешности выходного параметра, обусловленной действием старения;
$\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{t\pm}$	–	половина поля рассеивания относительной температурной погрешности выходного параметра (знаки \pm означают, что из значений, найденных для области положительных и отрицательных температур, берется большее);
ξ	–	коэффициент запаса, учитывающий влияние неучтенных факторов;
Q, H	–	многочлены, содержащие не обязательно все x_i , причем их степень может быть любой;
$Q(x_i)$ и $H(x_i)$	–	части многочленов Q и H , содержащие только x_i ;
m, l	–	максимальные степени x_i соответственно в многочленах $Q(x_i)$ и $H(x_i)$.

4.3. Типовые примеры

Пример 4.1. В качестве выходного параметра делителя напряжения (рис.4.1) будем рассматривать коэффициент деления K_d .

Нетрудно убедиться, что для этого параметра справедливо

$$y \rightarrow K_d = \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{R_1}{R_2} + 1.$$

Пусть информация о первичных параметрах (резисторах R_1, R_2) задана в виде:

$$R_1 = 3 \text{ кОм} \pm 10\%; \quad R_2 = 2 \text{ кОм} \pm 10\%.$$

Установим, используя метод «min-max», допуск на коэффициент деления рассматриваемого делителя.

Решение. 1. Получаем уравнение относительной производственной погрешности для коэффициента деления. Для этого вначале определим коэффициенты влияния параметров R_1 и R_2 , воспользовавшись выражением (4.1).

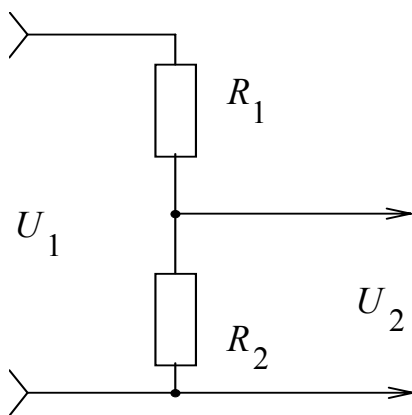


Рис. 4.1. Электрическая схема делителя напряжения

Получим

$$B_{R_1} = \frac{1}{R_2} \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{(R_1 + R_2)} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{3}{3 + 2} = 0,6.$$

Аналогично

$$B_{R_2} = -\frac{R_1}{(R_2)^2} \cdot \frac{R_2 \cdot R_2}{(R_1 + R_2)} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} = -\frac{3}{3 + 2} = -0,6.$$

2. Пользуясь выражением (4.2), записываем уравнение относительной производственной погрешности выходного параметра (коэффициента деления K_d).

$$\frac{\Delta K_d}{K_d} = 0,6 \frac{\Delta R_1}{R_1} - 0,6 \frac{\Delta R_2}{R_2}.$$

3. С учетом предельных отклонений относительных производственных погрешностей сопротивлений резисторов, т.е. величин $\frac{\Delta R_1}{R_1}$ и $\frac{\Delta R_2}{R_2}$, находим максимальное

значение относительной погрешности коэффициента деления в левой стороне (или, как говорят иначе, «в минимуме»). Получим

$$\left(\frac{\Delta K_d}{K_d} \right)_{\max-\min} = \left| \begin{array}{l} \Delta R_1 / R_1 = -10\% \\ \Delta R_2 / R_2 = +10\% \end{array} \right| = 0,6(-10) - 0,6(+10) = -12\%.$$

Обратим внимание, что максимальному отклонению выходного параметра «в минимуме» соответствуют относительное отклонение « -10% » для сопротивления резистора R_1 и значение « $+10\%$ » – для сопротивления резистора R_2 .

4. Аналогично находим максимальное значение величины $\Delta K_d / K_d$ в правой стороне (иначе «в максимуме»). Получим

$$\left(\frac{\Delta K_d}{K_d} \right)_{\max-\max} = 0,6(+10) - 0,6(-10) = +12\%.$$

Здесь использованы значения относительных отклонений « $+10\%$ » для параметра R_1 и значение « -10% » для параметра R_2 .

5. Производственный допуск на коэффициент деления может быть установлен в виде $\Delta_{\text{пр}} = (-12 \dots +12)\% = \pm 12\%$.

Пример 4.2. Требуется выполнить анализ точности постоянной RC-цепи как выходного параметра при следующих исходных данных:

$$R = 1 \text{ кОм} \pm 10\%; \quad C = 10 \text{ мкФ} \begin{array}{l} +30\% \\ -10\% \end{array}.$$

Кроме того, для постоянной RC-цепи необходимо определить производственный допуск, гарантируемый с вероятностью $P_{\Gamma} = 0,9973$. Используемые для RC-цепи элементы дискретные.

Решение . В качестве выходного параметра y в данном случае выступает постоянная цепи τ . Известно, что

$$\tau = R \cdot C.$$

1. Определим коэффициенты влияния параметров R и C . Воспользуемся формулой (4.1). В нашем случае $\varphi \rightarrow \tau$. Получим

$$B_R = C \cdot \frac{R}{CR} = 1; \quad B_C = R \cdot \frac{C}{CR} = 1.$$

2. Запишем исходные данные, необходимые для подсчета характеристик $M(\Delta\tau/\tau)_{\text{пр}}$, $\delta(\Delta\tau/\tau)_{\text{пр}}$. Воспользуемся рис. 4.2.

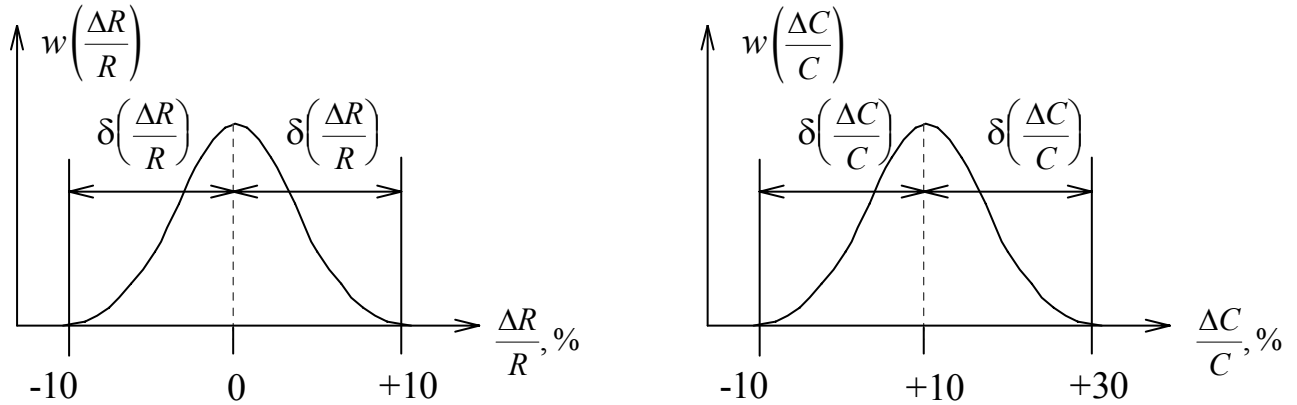


Рис. 4.2. Кривые распределения параметров

Из условий примера и рис. 4.2 определяем

$$M\left(\frac{\Delta R}{R}\right) = 0; \quad \delta\left(\frac{\Delta R}{R}\right) = 10\%; \quad M\left(\frac{\Delta C}{C}\right) = \frac{\left(\frac{\Delta C}{C}\right)_H + \left(\frac{\Delta C}{C}\right)_B}{2} = \frac{-10 + (+30)}{2} = 10\%;$$

$$\delta\left(\frac{\Delta C}{C}\right) = \left(\frac{\Delta C}{C}\right)_B - M\left(\frac{\Delta C}{C}\right) = 30 - 10 = 20\%,$$

где $\left(\frac{\Delta C}{C}\right)_H$, $\left(\frac{\Delta C}{C}\right)_B$ – нижнее и верхнее предельные отклонения параметра $\Delta C/C$.

$K_R = 1$, так как можно воспользоваться гипотезой о нормальном распределении параметра R . Аналогично $K_C = 1$.

Коэффициент $\rho = 1$, так как $P_r = 0,9973$. Коэффициент парной корреляции $r_{RC} = 0$, так как элементы дискретные.

4. Используя выражение (4.4), рассчитываем значение $M(\Delta\tau/\tau)_{\text{пр}}$. Получим

$$M\left(\frac{\Delta\tau}{\tau}\right)_{\text{пр}} = 1 \cdot 0 + 1 \cdot 10 = 10\%.$$

5. С использованием формулы (4.6) рассчитываем значение $\delta(\Delta\tau/\tau)_{\text{пр}}$. Получим

$$\delta\left(\frac{\Delta\tau}{\tau}\right)_{\text{пр}} = 1 \cdot \sqrt{1^2 \cdot 10^2 \cdot 1^2 + 1^2 \cdot 20^2 \cdot 1^2} = \sqrt{500} \approx 22,4\%.$$

6. Записываем производственный допуск на постоянную RC-цепи τ .

$$\Delta_{\text{пр}} = (10 \pm 22,4\%) = (-12,4 \dots +32,4)\%.$$

При этом допуск $\Delta_{\text{пр}}$ гарантируется с вероятностью $P_{\Gamma} = 0,9973$.

Пример 4.3. Требуется определить производственный допуск на коэффициент деления делителя напряжения, выполненного на дискретных элементах и в интегральном исполнении. Допуск должен гарантироваться с вероятностью $P_{\Gamma} = 0,9973$. Электрическая схема, значения параметров элементов R_1 и R_2 соответствуют исходным данным примера 4.1.

Решение. 1. Выполним анализ для делителя, построенного на дискретных элементах.

Определим коэффициенты влияния параметров R_1 и R_2 .

Ранее было найдено (см. пример 4.1), что $B_{R_1} = 0,6$, а $B_{R_2} = -0,6$.

Исходные данные для определения производственного допуска таковы:

$$M\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)_{\text{пр}} = M\left(\frac{\Delta R_2}{R_2}\right)_{\text{пр}} = 0; \quad \delta\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)_{\text{пр}} = \delta\left(\frac{\Delta R_2}{R_2}\right)_{\text{пр}} = 10\%.$$

Для вероятности $P_{\Gamma} = 0,9973$ $\rho = 1$ (табл. П.1.9 прил. 1).

Допуски на сопротивления резисторов относительно велики, поэтому можно воспользоваться гипотезой о нормальном распределении параметров [1, с.51]. Следовательно, коэффициенты относительного рассеивания $K_{R_1} = K_{R_2} = 1$ (табл. П.1.10 прил. 1).

Коэффициент корреляции r_{R_1, R_2} принимаем равным нулю, так как резисторы дискретные.

Применяя формулы (4.4) и (4.6), находим

$$M\left(\frac{\Delta K_{\text{д}}}{K_{\text{д}}}\right)_{\text{пр}} = 0 \text{ т. к. } M\left(\frac{\Delta R_i}{R_i}\right) = 0, i = 1, 2;$$

$$\delta\left(\frac{\Delta K_{\text{д}}}{K_{\text{д}}}\right)_{\text{пр}} = 1 \cdot \sqrt{0,6^2 \cdot 10^2 \cdot 1^2 + (-0,6)^2 \cdot 10^2 \cdot 1^2} = \sqrt{72} \approx 8,5\%.$$

Тогда $\Delta_{\text{пр}} = (0 \pm 8,5\%) = \pm 8,5\%.$

2. Анализ точности для случая интегрального исполнения делителя.

Известно, что при интегральной технологии резисторы получают в одном технологическом цикле, поэтому между параметрами резисторов существует тесная, близкая к функциональной зависимости, корреляционная связь [1].

Экспериментально установлено, что для интегральных резисторов коэффициент корреляции $r \rightarrow 0,85 \dots 0,95$. Примем в расчетах $r_{R_1, R_2} = 0,9$.

Остальные исходные данные такие же, как и для случая исполнения делителя на дискретных элементах:

$$M\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)_{\text{пр}} = M\left(\frac{\Delta R_2}{R_2}\right)_{\text{пр}} = 0; \quad \delta\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)_{\text{пр}} = \delta\left(\frac{\Delta R_2}{R_2}\right)_{\text{пр}} = 10\%.$$

$K_{R_1} = K_{R_2} = 1$, ибо распределение параметров интегральных резисторов, как правило, близко к нормальному закону. Как и ранее, $\rho = 1$.

Как и в п.1, $M\left(\frac{\Delta K_{\text{д}}}{K_{\text{д}}}\right)_{\text{пр}} = 0$, так как допуски на параметры резисторов R_1 и R_2 симметричны.

По формуле (4.6) подсчитаем значение величины $\delta\left(\frac{\Delta K_{\text{д}}}{K_{\text{д}}}\right)_{\text{пр}}$:

$$\begin{aligned} \delta\left(\frac{\Delta K_{\text{д}}}{K_{\text{д}}}\right)_{\text{пр}} &= 1 \cdot \sqrt{0,6^2 \cdot 10^2 \cdot 1^2 + (-0,6)^2 \cdot 10^2 \cdot 1^2 + 2 \cdot 0,9 \cdot 0,6 \cdot (-0,6) \cdot 10^2 \cdot 1^2 \cdot 10^2 \cdot 1^2} = \\ &= \sqrt{7,2} \approx 2,7\%. \end{aligned}$$

Допуск на коэффициент деления делителя в этом случае:

$$\Delta_{\text{пр}} = (0 \pm 2,7\%) = \pm 2,7\%.$$

Напомним, что в случае исполнения делителя на дискретных элементах

$$\Delta_{\text{пр}} = (0 \pm 8,5\%) = \pm 8,5\%.$$

Пример 4.4. Используя формулы (4.9) и (4.11), для выходного параметра ФУ РЭУ получены значения характеристик $M(\alpha_{\Sigma})$ и $\delta(\alpha_{\Sigma})$ для области положительных температур:

$$M(\alpha_{\Sigma})_{+} = -5 \cdot 10^{-2} \% \text{ } 1/^{\circ}\text{C}; \quad \delta(\alpha_{\Sigma})_{+} = 9 \cdot 10^{-2} \% \text{ } 1/^{\circ}\text{C},$$

и для области отрицательных температур:

$$M(\alpha_{\Sigma})_{-} = -4 \cdot 10^{-2} \% \text{ } 1/^{\circ}\text{C}; \quad \delta(\alpha_{\Sigma})_{-} = 12 \cdot 10^{-2} \% \text{ } 1/^{\circ}\text{C}.$$

Требуется определить значение температурного допуска на выходной параметр узла при его работе в диапазоне температур от -10 до $+40^{\circ}\text{C}$.

Решение. Определяем пределы температурных отклонений выходного параметра, пользуясь формулой (4.7).

Получим для области положительных температур при $t = +40^\circ\text{C}$:

$$\begin{aligned}\Delta_{t_+} &= \Delta t \cdot \alpha_{\Sigma+} = \Delta t \left[M(\alpha_{\Sigma})_+ \pm \delta(\alpha_{\Sigma})_+ \right] = (+40 - 20) \cdot (-5 \pm 9) \cdot 10^{-2} = \\ &= (-1,0 \pm 1,8)\% = (-2,8 \dots + 0,8\%);\end{aligned}$$

для области отрицательных температур при $t = -10^\circ\text{C}$:

$$\begin{aligned}\Delta_{t_-} &= \Delta t \cdot \alpha_{\Sigma-} = \Delta t \left[M(\alpha_{\Sigma})_- \pm \delta(\alpha_{\Sigma})_- \right] = (-10 - 20) \cdot (-4 \pm 12) \cdot 10^{-2} = \\ &= (1,2 \pm 3,6)\% = (-2,4 \dots + 4,8\%).\end{aligned}$$

Тогда значение общего температурного допуска определится как

$$\Delta_t = (-2,8 \dots + 4,8\%).$$

Нетрудно установить, что $\Delta_t = (-2,8 \dots + 4,8\%) = (1 \pm 3,8)\%$.

Следовательно, среднее значение $M(\Delta y/y)_t$ и половина поля рассеивания $\delta(\Delta y/y)_t$ относительной температурной погрешности выходного параметра будут иметь значения

$$M(\Delta y/y)_t = +1\%; \quad \delta(\Delta y/y)_t = 3,8\%.$$

Пример 4.5. Требуется определить эксплуатационный допуск на выходной параметр RC-цепи (постоянную τ) при следующих исходных данных:

$$R = 1 \text{ кОм} \pm 5\%; \quad C = 10 \text{ мкФ} \begin{matrix} +20\% \\ -10\% \end{matrix}.$$

В RC-цепи будут использованы дискретные элементы. Диапазон рабочих температур $t = -10 \dots +40^\circ\text{C}$. Интервал времени работы $\Delta T = 10000$ ч. Вероятность гарантированного обеспечения допуска $P_\Gamma = 0,9973$.

Решение. 1. Определяем производственный допуск.

Математическая модель RC-цепи имеет вид

$$y \rightarrow \tau = RC.$$

По формуле (4.1) находим коэффициенты влияния параметров R и C. Нетрудно убедиться (см. пример 4.2), что

$$B_R = B_C = 1.$$

На основании исходных данных получаем сведения, необходимые для определения производственного допуска:

$$M\left(\frac{\Delta R}{R}\right) = 0; \quad \delta\left(\frac{\Delta R}{R}\right) = 5\%; \quad M\left(\frac{\Delta C}{C}\right) = \frac{\left(\frac{\Delta C}{C}\right)_H + \left(\frac{\Delta C}{C}\right)_B}{2} = \frac{-10 + (+20)}{2} = 5\%;$$

$$\delta\left(\frac{\Delta C}{C}\right) = \left(\frac{\Delta C}{C}\right)_B - M\left(\frac{\Delta C}{C}\right) = 20 - 5 = 15\%,$$

где $(\Delta C/C)_H$ – нижнее предельное отклонение относительной погрешности $\Delta C/C$;
 $(\Delta C/C)_B$ – верхнее предельное отклонение $\Delta C/C$.

Для параметра R или, что то же самое, для параметра $\Delta R/R$, логичнее воспользоваться гипотезой о равномерной модели (равномерном законе распределения)[1], так как его предельные отклонения относительно малы. Следовательно, коэффициент относительного рассеивания $K_R = \sqrt{3}$ (см. табл. П.1.10 прил. 1).

Для параметра C пользуемся гипотезой о нормальной модели, ибо поле допуска достаточно широкое. Следовательно, $K_C = 1$ (см. табл. П.1.10 прил. 1).

Так как элементы R и C дискретные, то считаем, что корреляционная зависимость между ними отсутствует. Поэтому принимаем $r_{R,C} = 0$.

Коэффициент гарантированного обеспечения допуска ρ принимаем равным единице, ибо по условию примера $P_\Gamma = 0,9973$ (см. табл. П.1.9 прил. 1).

3. Пользуясь формулами (4.4) и (4.6), определяем значение характеристик $M(\Delta y/y)_{\text{пр}}$ и $\delta(\Delta y/y)_{\text{пр}}$. Получим

$$M(\Delta y/y)_{\text{пр}} = 1 \cdot 0 + 1 \cdot 5 = 5\% ;$$

$$\delta \left(\frac{\Delta y}{y} \right)_{\text{пр}} = 1 \cdot \sqrt{1^2 \cdot 5^2 \cdot (\sqrt{3})^2 + 1^2 \cdot 15^2 \cdot 1^2} = \sqrt{300} \approx 17,3\% .$$

Следовательно, производственный допуск $\Delta_{\text{пр}}$ может быть установлен в виде

$$\Delta_{\text{пр}} = (5 \pm 17,3)\% .$$

3. Определяем температурный допуск.

Из справочной информации на элементы R и C находим их температурные коэффициенты. Предположим, что коэффициенты имеют следующие значения:

$$\alpha_{R+} = \pm 7 \cdot 10^{-2} \% \text{ } 1/^\circ\text{C при } t = +20 \dots +100^\circ\text{C} ;$$

$$\alpha_{R-} = \pm 12 \cdot 10^{-2} \% \text{ } 1/^\circ\text{C при } t = -60 \dots +20^\circ\text{C} ;$$

$$\alpha_C = (-8 \dots -2) \cdot 10^{-2} \% \text{ } 1/^\circ\text{C во всем диапазоне температур.}$$

Анализируя эту информацию, выделяем характеристики, $M(\alpha_i)$ и $\delta(\alpha_i)$, необходимые для определения температурного допуска. Для простоты записи размерность ”% $1/^\circ\text{C}$ ” опустим.

$$\text{Получим } M(\alpha_{R+})=0; \delta(\alpha_{R+})=7 \cdot 10^{-2}; M(\alpha_{R-})=0; \delta(\alpha_{R-})=12 \cdot 10^{-2};$$

$$M(\alpha_C)=-5 \cdot 10^{-2}; \quad \delta(\alpha_C)=3 \cdot 10^{-2}.$$

Так как элементы RC-цепи дискретные, будем считать, что корреляционная зависимость между температурными коэффициентами параметров R и C отсутствует. Следовательно, коэффициент корреляции между температурными коэффициентами α_R и α_C можно принять равными нулю, т.е. $r_{R,C}^{(\alpha)} = 0$.

На основе экспериментальных исследований установлено [1,6], что распределение температурных коэффициентов α_i и коэффициентов старения C_i для параметров элементов РЭУ близко к нормальному закону. Поэтому воспользуемся гипотезой о

нормальном распределении этих коэффициентов. Пользуясь табл. П.1.10 прил. 1, выбираем значения коэффициентов относительного рассеивания величин α_R и α_C . Получаем

$$K_R^{(\alpha)} = 1; \quad K_C^{(\alpha)} = 1.$$

Пользуясь формулами (4.9) и (4.11), определяем значения $M(\alpha_{\Sigma})$ и $\delta(\alpha_{\Sigma})$ для положительной области температур. Используем значение $\rho=1$, так как $P_{\Gamma}=0,9973$ (см. табл. П.1.9 прил. 1). Получим

$$M(\alpha_{\Sigma+}) = 1 \cdot 0 + 1 \cdot (-5) \cdot 10^{-2} = -5 \cdot 10^{-2} \% \text{ } 1/^{\circ}\text{C};$$

$$\delta(\alpha_{\Sigma+}) = 1 \cdot \sqrt{1^2 \cdot (7 \cdot 10)^2 \cdot 1^2 + 1^2 \cdot (3 \cdot 10)^2 \cdot 1^2} \approx 7,6 \cdot 10^{-2} \% \text{ } 1/^{\circ}\text{C}.$$

Используя выражение (4.7), находим температурный допуск для этой области температур:

$$\Delta_{t+} = (40 - 20) \cdot (-5 \cdot 10^{-2} \pm 7,6 \cdot 10^{-2}) \approx (-1,0 \pm 1,5) \%.$$

Выполняя аналогичные операции для области отрицательных температур, получаем

$$M(\alpha_{\Sigma-}) = 1 \cdot 0 + 1 \cdot (-5) \cdot 10^{-2} = -5 \cdot 10^{-2} \% \text{ } 1/^{\circ}\text{C};$$

$$\delta(\alpha_{\Sigma-}) = 1 \cdot \sqrt{1^2 \cdot (12 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 1^2 + 1^2 \cdot (3 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 1^2} \approx 12,4 \cdot 10^{-2} \% \text{ } 1/^{\circ}\text{C};$$

$$\Delta_{t-} = (-10 - 20) \cdot (-5 \cdot 10^{-2} \pm 12,4 \cdot 10^{-2}) \approx (1,5 \pm 3,7) \%.$$

4. Анализируя температурные допуски, соответствующие областям положительных и отрицательных температур, определяем общий температурный допуск на выходной параметр (постоянную τ RC-цепи). Имеем

$$\Delta_{t+} = (-1,0 \pm 1,5) \% = (-2,5 \dots +0,5) \% ; \quad \Delta_{t-} = (1,5 \pm 3,7) \% = (-2,2 \dots +5,2) \% .$$

Следовательно, в качестве общего температурного допуска необходимо принять

$$\Delta_{t-} = (-2,5 \dots +5,2) \% = (1,35 \pm 3,85) \% .$$

При определении эксплуатационного допуска необходимо знать характеристики

$$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma+}, \quad M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma-} \quad \text{и} \quad \delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma}.$$

Для подсчета $M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma+}$ необходимо взять положительное среднее значение, а

для подсчета $M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma-}$ – отрицательное среднее значение температурного допуска

из допусков, полученных для областей положительных и отрицательных температур.

При определении значения $\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma}$ необходимо взять большее значение из

$\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_t$, полученных для областей положительной и отрицательной температур. В

данном примере необходимо выбрать $\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{t\pm} = 3,7\%$. Это значение соответствует области отрицательных температур.

5. Определяем допуск старения. Для этого по документации на элементы находим коэффициенты старения. Предположим, что найдено

$$c_R = (1 \dots 5) \cdot 10^{-4} \% \text{ 1/ч.; } c_C = (-0,5 \dots 5,5) \cdot 10^{-4} \% \text{ 1/ч.}$$

Анализируя информацию о коэффициентах старения, выделяем характеристики $M(c_R)$, $\delta(c_R)$, $M(c_C)$, $\delta(c_C)$, используемые в расчетах при определении допуска старения. Получим

$$M(c_R) = 3 \cdot 10^{-4} \% \text{ 1/ч.; } \delta(c_R) = 2 \cdot 10^{-4} \% \text{ 1/ч.};$$

$$M(c_C) = 2,5 \cdot 10^{-4} \% \text{ 1/ч.; } \delta(c_C) = 3 \cdot 10^{-4} \% \text{ 1/ч.}$$

Так как по условию примера элементы R и C дискретные, то будем считать, что корреляционная зависимость между коэффициентами старения параметров R и C отсутствует. Поэтому для коэффициента корреляции между коэффициентами старения этих параметров справедливо равенство $r_{R,C}^{(c)} = 0$.

Для коэффициентов относительного рассеивания коэффициентов старения параметров R и C примем

$$K_R^{(c)} = 1; \quad K_C^{(c)} = 1,$$

ибо, как отмечалось в п.3 решения данного примера, можно воспользоваться гипотезой о нормальном распределении коэффициентов c_R и c_C .

Подсчитываем, пользуясь выражением (4.10), значение характеристики $M(c_{\Sigma})$. Получим

$$M(c_{\Sigma}) = 1 \cdot 3 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} = 5,5 \cdot 10^{-4} \% \text{ 1/ч.}$$

Определяем половину поля рассеивания величины c_{Σ} , обусловленную действием процессов старения (времени). Пользуемся выражением (4.12). Здесь, как и выше, используем значение $\rho = 1$, т.к. $P_r = 0,9973$. Получим

$$\delta(c_{\Sigma-}) = 1 \cdot \sqrt{1^2 \cdot (2 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 1^2 + 1^2 \cdot (3 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 1^2} \approx 3,6 \cdot 10^{-4} \% \text{ 1/ч.}$$

Тогда, используя выражение (4.8), допуск старения можно определить как

$$\Delta_{\text{ст}} = 10000 \cdot (5,5 \cdot 10^{-4} \pm 3,6 \cdot 10^{-4}) = (5,5 \pm 3,6) \%.$$

Следовательно, можно записать

$$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}} = 5,5\%; \quad \delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}}^{13} = 3,6\%.$$

6. По формулам (4.13), и (4.14) подсчитываем значения характеристик $M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma+}$ и $M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma-}$. Получим

$$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma+} = 5 + 1,5 + 5,5 = 12\%; \quad M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma-} = 5 - 1 + 0 = 4\%.$$

7. Для определения значения $\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma}$ пользуемся формулой (4.15), ибо составляющие $\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}}$, $\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{т}\pm}$, $\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}}$ подсчитывались с одной и той же вероятностью $P_{\Gamma} = 0,9973$.

Выше (см. п.2-5) было получено

$$\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{пр}} = 17,3\%, \quad \delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{т}\pm} = 3,7\%, \quad \delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\text{ст}} = 3,6\%.$$

Поэтому

$$\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma} = \sqrt{17,3^2 + 3,7^2 + 3,6^2} \approx 18,1\%.$$

8. Определяем эксплуатационный допуск на выходной параметр, пользуясь выражением (4.16).

Значение коэффициента запаса ξ примем равным 1,1 [1].

Тогда эксплуатационный допуск

$$\Delta_{\text{э}} = 1,1 \cdot \left[(4-18,1) \dots (12+18,1) \right] \approx (-15,5 \dots +33,1) \%.$$

При этом эксплуатационный допуск $\Delta_{\text{э}}$ гарантируется с вероятностью $P_{\Gamma} = 0,9973$.

Последнюю запись можно представить в виде

$$\Delta_{\text{э}} = (-15,5 \dots +33,1) \% = (8,8 \pm 24,3) \%.$$

Пример 4.6. Требуется определить коэффициенты влияния резисторов R_1 и R_2 делителя напряжения (рис.4.3), рассматривая в качестве выходного параметра y коэффициент деления $K_{\text{д}}$.

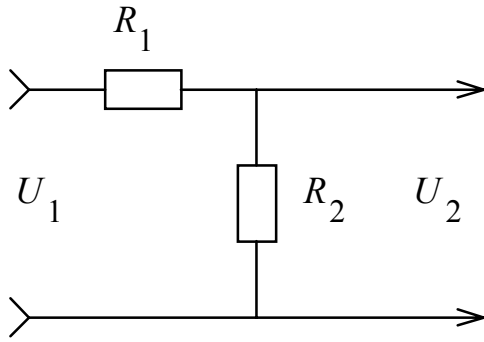


Рис. 4.3. Делитель напряжения

$$y \rightarrow K_{\text{д}} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}.$$

Параметры элементов: $R_1 = 2 \text{ кОм} \pm 5\%$;
 $R_2 = 3 \text{ кОм} \pm 5\%$.

Решение. Воспользуемся формулой (4.1). Принимая во внимание, что в нашем случае $\varphi \rightarrow K_{\text{д}}$, $x_i \rightarrow R_i$ ($i=1; 2$), получим

$$B_{R_1} = \frac{1}{R_2} \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{(R_1 + R_2)} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{2}{2+3} = 0.4;$$

$$B_{R_2} = -\frac{R_1}{(R_2)^2} \cdot \frac{R_2 \cdot R_2}{(R_1 + R_2)} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} = -0.4.$$

Пример 4.7. Для RC-цепи, выходным параметром которой является постоянная времени $\tau = RC$, определить коэффициенты влияния параметров R и C .

Решение. В данном примере $\varphi \rightarrow \tau = RC$. С учетом этого по формуле (4.1) определяем $B_R = C \frac{R}{RC} = 1$; $B_C = R \frac{C}{RC} = 1$.

Нетрудно показать, что если выходной параметр y может быть представлен в виде произведения (4.17), то коэффициенты влияния могут быть определены равенствами (4.18).

Пример 4.8. Определить коэффициенты влияния параметров L и C колебательного контура, рассматривая в качестве выходного параметра y резонансную частоту контура $f_{\text{рез}}$. Значения параметров L и C :

$$L = 10 \text{ мкГн} \pm 10\%; \quad C = 100 \text{ пФ} \pm 5\%.$$

Решение. В данном случае $y \rightarrow f_{\text{рез}}$. Известно, что

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Это выражение можно представить в виде произведения (4.17):

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi} L^{-0,5} C^{-0,5}.$$

Из последней записи видно, что $B_L = -0,5$; $B_C = -0,5$.

Пример 4.9. Если выходной параметр y может быть представлен в виде отношения (4.19), то коэффициент влияния i -го первичного параметра может быть подсчитан по формуле (4.20). Определим с помощью этой формулы коэффициенты влияния резисторов R_1 и R_2 делителя напряжения, рассмотренного в примере 4.6.

Решение. Ранее было принято, что $\varphi \rightarrow K_{\text{д}}$.

Принимая во внимание отношение (4.19), можно записать

$$K_{\text{д}} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{Q}{H}.$$

В данном случае $Q = R_1 + R_2$, $H = R_2$.

Применим формулу (4.20), выбрав, например, в качестве x_i параметр R_1 .

Тогда $Q(R_1) = R_1$; $H(R_1) = 0$; $m = 1$; $l = 0$.

$$\text{Следовательно, } B_{R_1} = 1 \frac{R_1}{R_1 + R_2} - 0 \frac{0}{R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{2}{2+3} = 0,4.$$

Этот результат, как видим, совпадает с результатом примера 4.6.

Пример 4.10. Методом малых приращений определить коэффициент влияния резистора R_2 делителя напряжения (см. рис. 4.3), рассмотренного в примере 4.6, считая выходным параметром коэффициент деления $K_{\text{д}}$.

Решение. Напомним, что в условии этого примера 4.6

$$y = K_{\text{д}} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}; \quad R_1 = 2 \text{ кОм} \pm 5\%; \quad R_2 = 3 \text{ кОм} \pm 5\%.$$

Для определения коэффициента влияния B_{R_2} первичному параметру R_2 дадим малое приращение $\Delta R_2 = 0,1 \text{ кОм}$ и воспользуемся формулой (4.21). Получим

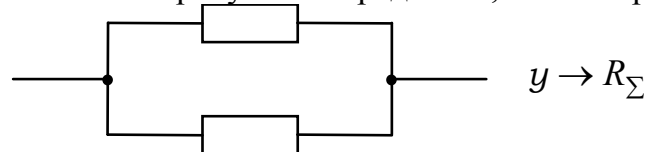
$$B_{R_2} \approx \frac{(2+3,1)/3,1 - (2+3)/3}{0,1} \cdot \frac{3}{(2+3)/3} \approx -0,387.$$

Как видим, этот результат немного отличается от результата, полученного в примере 4.6 ($B_{R_2} = -0,4$).

Отметим, что точность определения коэффициента B_i тем меньшая, чем сильнее выражено нелинейное влияние первичного параметра x_i на выходной параметр y и чем больше задаваемое приращение Δx_i .

4.4. Задачи для самостоятельного решения

4.1. В качестве функционального узла РЭУ рассматривается цепочка параллельно соединенных резисторов с $R = 2 \text{ кОм} \pm 10\%$. Требуется определить, какой процент подобных функциональных узлов будет иметь сопротивление $1 \text{ кОм} \pm 5\%$.



4.2. Между точками А и В электрической схемы РЭУ крупносерийного производства должно быть сопротивление $R = 5 \text{ Ом} \pm 5\%$. В распоряжении имеются резисторы со значением сопротивления $R_1 = 10 \text{ Ом} \pm 10\%$ и $R_2 = 20 \text{ Ом} \pm 10\%$. Требуется определить, какое количество резисторов и какого сопротивления необходимо взять и как их соединить, чтобы обес-

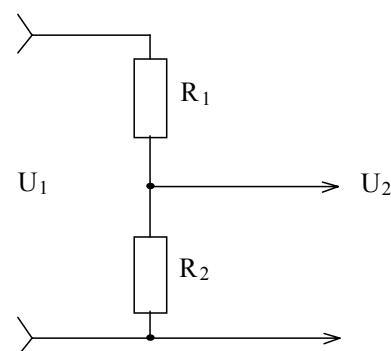
печить требование к заданному сопротивлению. При этом последовательное соединение считать предпочтительнее.

4.3. Требуется определить, как в абсолютном и относительном выражении может изменяться коэффициент деления делителя напряжения из-за чисто технологических причин – производственного разброса R_1 и R_2 .

$$R_1 = 3 \text{ кОм} \pm 10\%; \quad R_2 = 2 \text{ кОм} \pm 10\%.$$

Расчет сделать для двух вариантов:

- а) R_1 и R_2 — дискретные (тип МЛТ – 0,5);
- б) R_1 и R_2 — интегральные, выполненные по тонкопленочной технологии.



4.4. Для условий задачи 4.3 определить, как в абсолютном и относительном (в процентах) выражении может измениться коэффициент деления делителя напряжения из-за старения в течение времени работы $\tau = 10\,000$ ч.

4.5. Для условий задачи 4.3 определить, как в абсолютном и относительном (в процентах) выражении может измениться коэффициент деления делителя напряжения из-за изменения температуры в диапазоне от -10 до $+35$ °С.

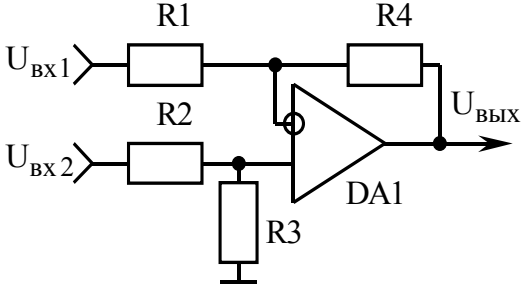
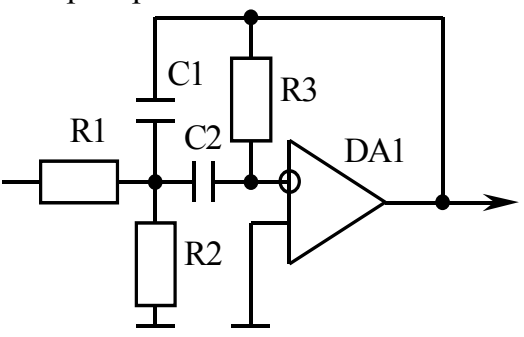
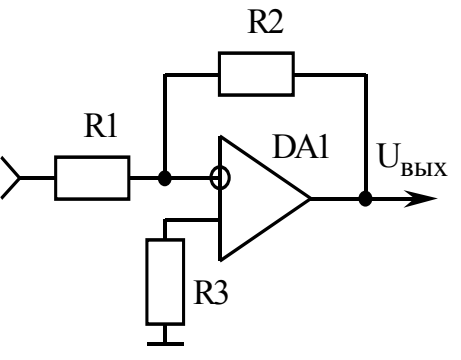
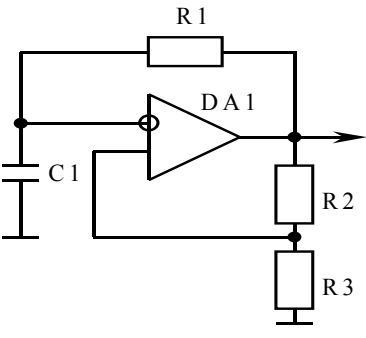
4.6. Для условий задачи 4.3 определить, как в абсолютном и относительном (в процентах) выражении может измениться выходной параметр (коэффициент деления), если принять во внимание производственный разброс R_1 и R_2 , а также работу в течение времени $\tau = 10\,000$ ч, воздействие температуры в диапазоне от $-10 \dots +35$ °С и другие (неуказанные здесь) факторы.

4.7. Требуется определить, какой производственный (технологический) разброс выходного параметра y будут иметь 95 % каскадов (ФУ) рассматриваемого вида в предположении, что в ФУ использованы: а) дискретные пассивные элементы; б) интегральные тонкопленочные пассивные элементы.

Электрические схемы и математические модели для выходного параметра y указаны в табл. 4.2. Параметры пассивных элементов и типы активных элементов выбрать согласно номеру функционального узла (табл. 4.3).

Таблица 4.2

Вариант	Схема	Модель (выражение для выходного параметра y)
1	<p>Пропорционально–интегрирующий фильтр</p>	<p>Частота среза</p> $y \rightarrow f_c = \frac{1}{2 \cdot (R_1 + R_2) \cdot C_1}$

Вариант	Схема	Модель (выражение для выходного параметра y)
2	<p>Сумматор</p> 	$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_3}} \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_1} \right) \cdot U_{\text{ВХ}2} - \frac{R_4}{R_1} \cdot U_{\text{ВХ}}$
3	<p>Генератор</p> 	<p>Частота</p> $f_0 = \frac{\frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}}{2 \cdot C_1}$
4	<p>Усилитель</p> 	$K = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_{\text{ВХ}}} + \frac{R_3}{R_{\text{ВХ}}} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)}$ <p>K_{oy} и $R_{\text{ВХ}}$ — коэффициент усиления и входное сопротивление DA1</p>
5	<p>Генератор</p> 	<p>Частота</p> $f = \frac{0,23}{C_1 \cdot R_1 \cdot \ln(1 + \frac{2R_3}{R_2})}$

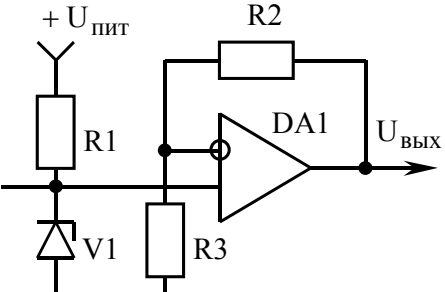
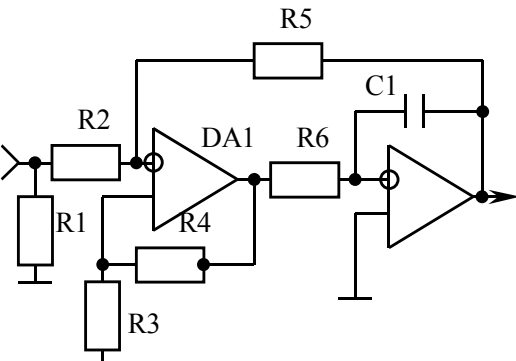
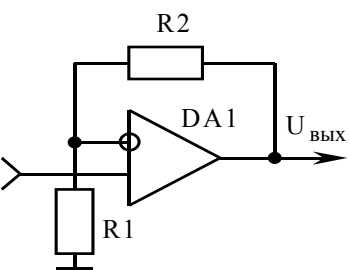
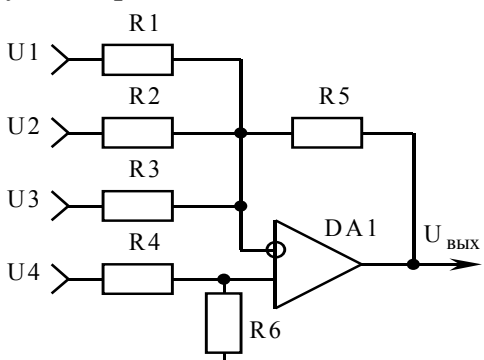
Вариант	Схема	Модель (выражение для выходного параметра y)
6	<p>Источник опорного напряжения</p> 	$U_{\text{вых}} = U_{\text{ст. V1}} \cdot \left(\frac{R_2}{R_3} + 1 \right)$ <p>$U_{\text{ст. V1}}$ — напряжение стабилизации элемента V1</p>
7	<p>Фильтр</p> 	<p>Добротность</p> $Q = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_5 \cdot (R_2 + R_1)}{R_1 \cdot R_2} \right)$
8	<p>Усилитель</p> 	<p>Коэффициент передачи</p> $K = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$
9	<p>Сумматор-вычитатель</p> 	$U_{\text{вых}} = \frac{R_5}{R_1} \cdot U_1 + \frac{R_5}{R_2} \cdot U_2 + \frac{R_5}{R_3} \cdot U_3 - \frac{R_5}{R_4} \cdot U_4$ <p>$U_1 \dots U_4 = 0,2 \text{ В}$</p>

Таблица 4.3

Вариант	Элемент схемы								
	R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R_4 , кОм	R_5 , кОм	C_1 , мкФ	$U_{пит.}$, В	Тип стабил.	Тип микр.
1	7,5 $\pm 10\%$	7,5 $\pm 5\%$	3,0 $\pm 10\%$	20 $\pm 2\%$	4,7 $\pm 5\%$	0,68 $\pm 10\%$	15 $\pm 10\%$	КС133 А	К140УД7
2	8,2 $\pm 5\%$	6,8 $\pm 10\%$	2,7 $\pm 5\%$	18 $\pm 10\%$	4,7 $\pm 20\%$	0,68 $\pm 2\%$	18 $\pm 5\%$	КС168 А	К140УД1
3	8,2 $\pm 20\%$	5,6 $\pm 5\%$	1,8 $\pm 20\%$	20 $\pm 10\%$	3,6 $\pm 5\%$	0,47 $\pm 10\%$	15 $\pm 10\%$	КС156 А	К140УД8
4	6,8 $\pm 20\%$	6,8 $\pm 20\%$	3,3 $\pm 10\%$	24 $\pm 1\%$	4,3 $\pm 10\%$	1,0 $\pm 5\%$	16 $\pm 5\%$	КС147 А	К140УД2
5	6,8 $\pm 5\%$	9,1 $\pm 20\%$	3,0 $\pm 5\%$	16 $\pm 20\%$	3,3 $\pm 5\%$	0,75 $\pm 10\%$	18 $\pm 20\%$	КС168 А	К140УД7
6	6,2 $\pm 5\%$	6,8 $\pm 20\%$	3,0 $\pm 5\%$	16 $\pm 10\%$	4,7 $\pm 10\%$	0,68 $\pm 2\%$	16 $\pm 5\%$	КС147 А	К140УД2
7	6,8 $\pm 10\%$	4,7 $\pm 20\%$	1,5 $\pm 20\%$	24 $\pm 1\%$	4,7 $\pm 10\%$	1,5 $\pm 5\%$	16 $\pm 15\%$	КС147 А	К140УД2
8	7,5 $\pm 5\%$	3,6 $\pm 1\%$	1,5 $\pm 5\%$	18 $\pm 10\%$	4,3 $\pm 10\%$	0,68 $\pm 20\%$	14 $\pm 5\%$	КС156 А	К140УД1
9	8,2 $\pm 2\%$	7,5 $\pm 5\%$	3,3 $\pm 10\%$	20 $\pm 20\%$	3,6 $\pm 5\%$	0,47 $\pm 10\%$	15 $\pm 10\%$	КС156 А	К140УД8

4.8. Для условий задачи 4.7 определить, какой максимальный разброс выходного параметра y будут иметь 95 % функциональных узлов рассматриваемого вида при условии их использования в составе РЭУ в течение времени $t = 5000$ ч. РЭУ относится к категории исполнения УХЛ 3.1 согласно ГОСТ 15150–69 для электрических схем 1...5 табл. 4.2 и У 2.1 согласно ГОСТ 15150–69 для электрических схем 6...9 табл. 4.2

4.9. Для первичных параметров, определяющих выходной параметр y функционального узла РЭУ, определить коэффициенты влияния методом малых приращений и сравнить их значения со значениями, полученными расчетно–аналитическим способом. Электрические принципиальные схемы функциональных узлов РЭУ и их математические модели приведены в табл. 4.2, а параметры элементов указаны в табл. 4.3.

4.10. Требуется назначить производственный допуск на параметры элементов функциональных узлов РЭУ так, чтобы для относительной производственной погрешности выходного параметра функционального узла (величины $\Delta y/y$) выполня-

лось условие $\Delta y/y \leq \pm 10\%$ с гарантированной вероятностью: а) 0,9; б) 0,95; в) 0,99; г) 0,9973; д) 0,999.

Электрическую принципиальную схему функционального узла РЭУ и его математическую модель выбрать из табл. 4.2, значения первичных параметров и тип активных элементов – из табл. 4.3. При использовании табл. 4.3 производственные допуски не используются (игнорируются).