

Работа 3. ОТРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МИКРОСБОРОК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ

Цель работы – изучение методов экспериментальной отработки функциональных показателей МСБ, определение параметров модели функциональной точности и расчет допусков показателей МСБ.

Краткие теоретические сведения

Показатели качества конструкций МЭА принято делить на функциональные и материальные. К функциональным относятся все энергоинформационные показатели: выходная мощность, несущая частота сигнала, чувствительность, коэффициент передачи, ширина полосы пропускания фильтра, быстродействие и др. Материальные показатели (масса, объем, стоимость, интенсивность отказов и др.) характеризуют материальное содержание конструкции.

Исходя из многоуровневого принципа построения, в конструкции выделяются функционально и конструктивно законченные части – конструктивно технологические единицы (КТЕ). Требуемая точность функциональных показателей КТЕ высоких уровней (блоков, устройств) обеспечивается выбором строго определенных значений показателей КТЕ низких уровней (МСБ, функциональных узлов). Отработка функциональных показателей микросборки по своему содержанию является задачей обеспечения функциональной точности и решается в следующем порядке:

получение математической модели МСБ в виде

$$F_j = F_j(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (3.1)$$

где F_j - функциональный показатель МСБ; x_i - параметры элементов, определяющие значение F_j ;

анализ параметрической чувствительности, состоящий в определении абсолютных

$$A_{ij} = A_{ij}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\partial F_j}{\partial x_i} \quad (3.2)$$

и относительных

$$B_{ij} = B_{ij}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\partial F_j}{\partial x_i} \frac{x_i}{F_j} \quad (3.3)$$

функций чувствительности и их количественных оценок - коэффициентов влияния;

составление модели функциональной точности в виде уравнения относительной погрешности функционального показателя

$$\frac{\Delta F_j}{F_j} = \sum_{i=1}^n B_{ij} \frac{\Delta x_i}{x_i}, \quad (3.4)$$

где B_{ij} - относительные (безразмерные) коэффициенты влияния; $\Delta x_i/x_i$ - относительные погрешности параметров x_i ;

расчет допусков функционального показателя F_j одним из известных методов: наихудшего случая (максимум-минимум), квадратичного суммирования или вероятностным.

Метод наихудшего случая базируется на предпосылке о неслучайном характере отклонений параметров элементов. Суммирование отклонений производится алгебраически исходя из принципа их наихудшего сочетания. Половину поля допуска функционального показателя находят в виде

$$\delta\left(\frac{\Delta F_j}{F_j}\right) = \sum_{i=1}^n \left| B_{ij} \frac{\Delta x_i}{x_i} \right|. \quad (3.5)$$

В методе квадратичного суммирования отклонения параметров элементов считают случайными величинами, распределенными по нормальному закону с математическим ожиданием $M\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right) = 0$. Половину поля допуска определяют по формуле

$$\delta\left(\frac{\Delta F_j}{F_j}\right) = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n B_{ij}^2 \delta^2\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right)}, \quad (3.6)$$

где $\delta\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right)$ - половина поля допуска отклонений параметра x_i .

Вероятностный метод, в отличие от метода квадратичного суммирования, учитывает смещение центра группирования отклонений, (математическое ожидание $M\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right) \neq 0$).

Рассчитывается математическое ожидание распределения функционального показателя

$$M\left(\frac{\Delta F_j}{F_j}\right) = \sum_{i=1}^n B_{ij} M\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right) \quad (3.7)$$

и половина поля допуска

$$\delta\left(\frac{\Delta F_j}{F_j}\right) = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n B_{ij}^2 \delta^2\left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right)}. \quad (3.8)$$

Выражения (3.7) и (3.8) определяют границы поля допуска функционального показателя

$$\Delta\left(\frac{\Delta F_j}{F_j}\right) = M\left(\frac{\Delta F_j}{F_j}\right) \pm \delta\left(\frac{\Delta F_j}{F_j}\right). \quad (3.9)$$

Как показано в [2, 3], вероятностный метод применим и для распределений, отличных от нормального. В этом случае реальные распределения приводятся к нормальному введением коэффициентов относительной асимметрии распределения a_i и коэффициента относительного рассеяния K_i (см. приложение).

В зависимости от природы возникновения отклонений параметров элементов $\frac{\Delta x_i}{x_i}$ допуски на функциональные показатели подразделяются на производственные, температурные, влажности и старения.

Если найденные значения допуска функционального показателя не соответствуют требованиям технического задания, производится корректировка допусков параметров элементов x_i или их номинальных значений. Наиболее сложной частью задачи отработки функциональных показателей является получение математической модели КТЕ в виде (3.1). Вследствие высокой трудоемкости математического моделирования устройств современной МЭА и принципиальной невозможности получения точных математических моделей для определенного класса устройств (например, нелинейных) возникает необходимость обращения к экспериментальным методам отработки функциональных показателей.

Экспериментальные методы позволяют, минуя этап получения математической модели, находить абсолютные и относительные коэффициенты влияния, производить корректировку допусков и номинальных значений параметров элементов. Знание коэффициентов влияния дает возможность записать модель функциональной точности (3.4).

Для отработки функциональных показателей МСБ применяются методы малых приращений, парциальных характеристик, граничных и матричных испытаний.

Метод малых приращений (малого параметра) предназначен для экспериментального определения абсолютных и относительных коэффициентов влияния. В теоретическом аспекте метод базируется на замене в (3.2) и (3.3) бесконечно малых приращений конечными приращениями. В результате расчет абсолютного и относительного коэффициентов влияния производится по формулам

$$A_{ij} = \Delta F_j / \Delta x_i \quad \text{и} \quad B_{ij} = (\Delta F_j / \Delta x_i) (x_i / F_j),$$

где ΔF_j — приращение функционального параметра, обусловленное малым приращением Δx_i параметра x_i ; F_j, x_i — номинальные значения функционального параметра и параметра элемента.

Приращение ΔF_j находят в результате постановки на макете МСБ однофакторного эксперимента, который заключается в парциальном изменении на величину Δx_i параметров элементов. Точность определения коэффициентов влияния тем выше, чем меньше Δx_i , однако приращение Δx_i должно быть таким, чтобы используемая в эксперименте аппаратура обеспечивала необходимую точность измерения приращения.

Метод малых приращений прост в реализации, но из-за тесных корреляционных связей между параметрами активных элементов применяется лишь для определения коэффициентов влияния параметров пассивных элементов.

Метод парциальных характеристик предназначен для экспериментального определения относительных и абсолютных коэффициентов влияния, корректировки допусков и номинальных значений функционального параметра и параметра элемента. Метод состоит в экспериментальном снятии зависимостей относительного изменения функционального параметра $\Delta F_j / F_j$ от относительного изменения параметра элемента $\Delta x_i / x_i$.

В общем случае графики этих зависимостей имеют вид, представленный на рис. 3.1. Для любой точки графика можно определить относительный и абсолютный коэффициенты влияния. Номинальные значения параметров F_j и x_i задаются условиями эксперимента.

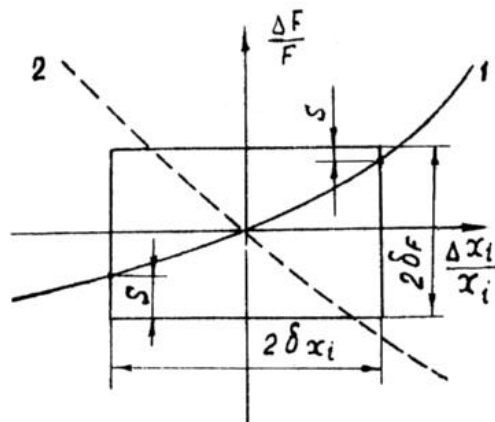


Рис. 3.1

нальные значения параметров F_j и x_i задаются условиями эксперимента.

В координатной плоскости $\frac{\Delta F_j}{F_j}$, $\frac{\Delta x_i}{x_i}$ строят рабочую область (РО) МСБ, границы которой определяются полями допусков на функциональный показатель F_j и параметр x_i . Корректировка параметров и допусков не требуется, если при $\Delta x_i / x_i = \pm \delta x_i$ отклонение функционального показателя $|\frac{\Delta F_j}{F_j}| < \delta_F$, а запас работоспособности $S = \delta_F - |\frac{\Delta F_j}{F_j}|$ достаточен и приблизительно одинаков для правой и левой ветвей парциальной характеристики. Так, например, для характеристики 1 (см. рис. 3.1) желательно выравнивать запас работоспособности S , для чего необходимо уменьшить номинальные значения функционального показателя и параметра x_i . Положение парциальной характеристики 2 относительно рабочей области говорит о том, что по параметру x_i МСБ не работоспособна. В целях обеспечения работоспособности требуется уменьшить допуск на параметр x_i или расширить допуск на функциональный показатель F_j .

При отработке функциональных показателей МСБ методом парциальных характеристик исследование проводится по всем параметрам. Множество параметров в общем случае может содержать параметры радиоэлементов, входных сигналов, источников питания, внешних воздействий и т.д.

Как и метод малых приращений, метод парциальных характеристик является однофакторным экспериментом; он неприменим к параметрам активных элементов и не позволяет смоделировать реальные рабочие ситуации, возникающие в аппаратуре, когда под воздействием внешних дестабилизирующих факторов одновременно изменяются параметры всех элементов.

Метод граничных испытаний решает те же задачи, что и метод парциальных характеристик и заключается в экспериментальном построении областей работоспособности (ОР) по результатам исследования макета МСБ или реального изделия. На границах ОР наступает отказ МСБ, определяемый по заранее оговоренному признаку (критерию). Обычно используют два критерия отказа:

нарушение выполняемых МСБ функций (отсутствие сигнала на выходе, резкое изменение частоты сигнала, нарушение устойчивости, срыв синхронизации и т.д.);

изменение функционального показателя до границ определенного техническим заданием поля допуска. В первом случае целью граничных испытаний является исследование МСБ на общее функционирование (работоспособность); во втором — исследование функционирования

МСБ по полю допуска. При этом на границах ОР функциональный показатель достигает значения, оговоренного ТЗ или же условиями эксперимента.

Границы ОР получают в результате активного воздействия на два параметра: граничный χ_{zp} и параметр элемента χ_i .

Граничный параметр должен удовлетворять ряду требований. Желательно, чтобы изменение χ_{zp} оказывало сильное влияние на функцио-

нальный показатель F_j и практически не влияло на параметр χ_i . Руководствуясь этими требованиями, в качестве граничного параметра обычно выбирают напряжение источника питания.

Область работоспособности удобно строить в координатах

$\frac{\Delta \chi_{zp}}{\chi_{zp}}$ и $\frac{\Delta \chi_i}{\chi_i}$.

В общем случае границы ОР представляют собой непересекающиеся кривые (рис. 3.2), расположенные справа и слева от начала координат. В верхней и нижней полуплоскостях ОР может быть

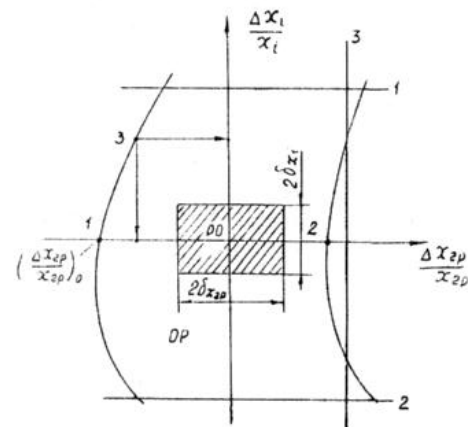


Рис. 3.2

ограничена допустимым изменением параметра χ_i , при котором обеспечивается безопасный электрический режим работы активных элементов (границы 1 и 2). В правой полуплоскости граница ОР не должна пересекать линию, определяющую верхнее допустимое значение параметра χ_{zp} (прямая 3).

Для построения ОР сначала при $\Delta \chi_i / \chi_i = 0$ изменяют значение граничного параметра в сторону увеличения и уменьшения до появления признака отказа. В результате получают точки 1 и 2 границ ОР. Затем повторяют эксперимент для ряда значений $\Delta \chi_i / \chi_i \neq 0$, и полученные точки соединяют плавными кривыми.

Чтобы упростить анализ результатов исследования, ОР совмещают с рабочей областью МСБ по параметрам χ_{zp} и χ_i . Корректировка допусков и номинальных значений параметров χ_{zp} и χ_i не требуется, если рабочая область лежит внутри ОР симметрично относительно границ и при этом обеспечивается достаточный запас работоспособности.

Определение коэффициентов влияния по результатам граничных испытаний возможно лишь в том случае, если исследование работоспо-

собности МСБ проведено по полю допуска. На границах ОР функциональный показатель изменяется на величину

$$\frac{\Delta F_j}{F_j} = B_{ij} \frac{\Delta \chi_{zp}}{\chi_{zp}} + B_{zpj} \frac{\Delta \chi_i}{\chi_i}, \quad (3.10)$$

где B_{ij} , B_{zp} — относительные коэффициенты влияния параметров χ_i и χ_{zp} соответственно.

Если в пределах изменения параметра χ_i границы ОР близки к прямолинейным, значение B_{zpj} можно определить при $\Delta \chi_i / \chi_i = 0$ как

$$B_{zpj} = \frac{\Delta F_j}{F_j} / \left(\frac{\Delta \chi_{zp}}{\chi_{zp}} \right)_0.$$

После подстановки B_{zpj} в (3.5) и решения уравнения относительно B_{ij} получим

$$B_{ij} = \frac{\frac{\Delta F_j}{F_j} \left[1 - \frac{\Delta \chi_{zp}}{\chi_{zp}} / \left(\frac{\Delta \chi_{zp}}{\chi_{zp}} \right)_0 \right]}{\frac{\Delta \chi_i}{\chi_i}}. \quad (3.11)$$

Все величины, входящие в правую часть (3.11), должны иметь знаки, соответствующие точке на границе ОР, для которой определяют коэффициенты влияния.

Формула (3.11) позволяет найти значения B_{ij} для любой точки на границе ОР, кроме точки $\frac{\Delta \chi_i}{\chi_i} = 0$. Точность определения коэффициентов влияния тем выше, чем ближе границы ОР к прямым линиям.

Методу граничных испытаний свойственны практически все недостатки метода парциальных характеристик. Поэтому, чтобы убедиться в правильности принятых решений, исследование работоспособности с помощью парциальных характеристик и граничных испытаний часто дополняется матричными испытаниями.

Матричные испытания представляют собой активный многофакторный эксперимент, предназначенный для оптимизации номинальных значений и допусков параметров элементов. В отличие от рассмотренных выше методов, матричные испытания позволяют смоделировать реальные ситуации, возникающие в аппаратуре под воздействием внешних и внутренних дестабилизирующих факторов, путем одновременного изменения параметров всех элементов.

Стратегию эксперимента обычно представляют матрицей ситуаций, каждая строка которой соответствует постановке одного опыта. При изменении (варьировании) k включенных в эксперимент параметров элементов на двух уровнях (верхнем и нижнем) число опытов $m = 2^k$. Матрица ситуаций для $k = 3$ представлена в виде табл. 3.1. В столб-

цах, относящихся к параметрам x_1, x_2, x_3 , знаком "+" обозначены верхние уровни параметров, знаком "-" - нижние; в последнем столбце по принятому признаку отказа в каждом опыте отмечают состояние исследуемой МСБ. Обычно работоспособность микросборки обозначают единицей, отказ - нулем.

Т а б л и ц а 3.1

№ опыта	x_1	x_2	x_3	Состояние МСБ
1	+	+	+	0
2	-	+	+	1
3	+	-	+	0
4	-	-	+	1
5	+	+	-	0
6	-	+	-	1
7	+	-	-	1
8	-	-	-	0

Изменение параметров элементов в эксперименте обычно производят в пределах полей допусков так, чтобы значения параметра на верхнем и нижнем уровнях находились на соответствующих границах поля допуска.

В тех случаях, когда матричными испытаниями дополняют другие методы экспериментальной отработки функциональных показателей, уровни варьирования параметров элементов выбирают исходя из полученных результатов и поставленной задачи исследования.

После реализации всех опытов, предусмотренных табл. 3.1, производится анализ полученных результатов, для чего составляется табл. 3.2, в которой указывают число рабочих или отказовых ситуаций, связанных с значениями параметров на верхнем (x_i+) и нижнем (x_i-) уровнях.

Т а б л и ц а 3.2

Значение параметра	x_{1+}	x_{1-}	x_{2+}	x_{2-}	x_{3+}	x_{3-}
Число отказовых ситуаций	3	1	2	2	2	2

Данные табл. 3.2 позволяют принять решение о направлении корректировки номинальных значений параметров элементов. Так, например, преобладание отказовых ситуаций на верхнем уровне параметра x_1 говорит о необходимости уменьшения его номинального значения. Шаг изменения параметров x_i выбирают с учетом результатов анализа параметрической чувствительности, разрешающей способности технологического процесса изготовления элементов и шкалы номинальных или предпочтительных значений параметров. После выполнения коррек-

тировки матричные испытания повторяют с новыми значениями параметров элементов.

Как и все рассмотренные методы, матричные испытания применимы лишь к параметрам пассивных элементов. Недостатком метода является также значительная трудоемкость эксперимента, резко возрастающая с ростом числа параметров k . Снижению трудоемкости матричных испытаний способствует выбор оптимального как по числу опытов, так и по точности ожидаемых результатов значения k , который может быть произведен по результатам анализа параметрической чувствительности. Трудоемкость матричных испытаний можно существенно снизить путем автоматизации эксперимента. Разработаны и применяются полуавтоматические стенды матричных испытаний, состоящие из наборного поля элементов с электронной коммутацией, устройства управления и ЭВМ для обработки данных эксперимента. Использование стендов-полуавтоматов одновременно позволяет значительно расширить возможности метода.

Описание объекта исследования

Объектом исследования является МСБ активного полосового фильтра, электрическая принципиальная схема которого приведена на рис. 3.3.

Фильтр собран на операционном усилителе DA1, охваченном параллельной отрицательной обратной связью. Полосовая амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра формируется цепями $R1$, $C1$ (фильтр нижних частот) и $R2$, $C2$ (фильтр верхних частот).

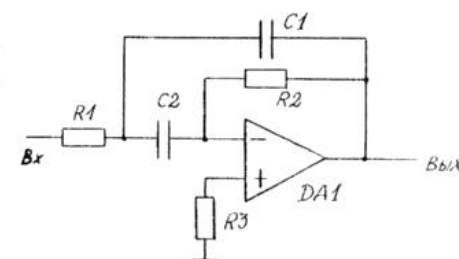


Рис. 3.3

Основными функциональными параметрами фильтра являются: центральная частота f_0 , соответствующая максимуму АЧХ; полоса пропускания $\Delta f = f_2 - f_1$, где f_1, f_2 - частоты расстройки фильтра до уровня 0,7 от максимума АЧХ; добротность фильтра Q ; коэффициент передачи в полосе пропускания K_n .

Названные функциональные показатели связаны следующими аналитическими соотношениями:

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2}, \quad Q = f_0 / (f_2 - f_1), \quad K_n \approx 2Q^2.$$

При настройке фильтра f_0 устанавливается с помощью одновременного изменения C_1 и C_2 , добротность Q — изменением величины отношения R_1/R_2 , при этом произведение $R_1 R_2$ должно оставаться постоянным.

Содержание работы

1. Расчет по исходным данным номинальных значений емкости конденсаторов C_1 , C_2 и сопротивлений резисторов R_1 , R_2 .

2. Снятие АЧХ и определение экспериментальных значений функциональных параметров фильтра.

3. Экспериментальная отработка функциональных параметров фильтра на соответствие исходным требованиям.

4. Определение параметров модели функциональной точности МСБ и расчет производственного допуска.

Описание лабораторной установки

Структурная схема лабораторной установки приведена на рис. 3.4., электрическая принципиальная схема макета МСБ — на рис. 3.5.

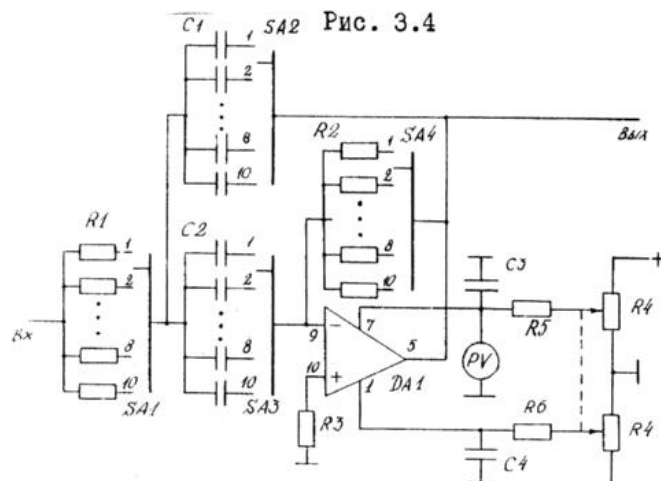


Рис. 3.5

Макет МСБ полосового активного фильтра выполнен на дискретных радиоэлементах: операционном усилителе 140УД1А (140УД8Б), резисторах типа ОМЛТ-0,25, конденсаторах типа КМ и КЛС. Каждый элемент электрической принципиальной схемы фильтра в макете МСБ представлен десятью номинальными значениями в соответствии со шкалой номинальных значений сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов (см. табл. 3.3).

Таблица 3.3

Элемент схемы	Номинальные значения параметров ЭРЭ									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_1 , кОм	2,2	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1
R_2 , кОм	220	240	270	300	330	360	390	430	470	510
C_1 , пФ	510	560	620	680	750	820	910	1000	1100	1200
C_2 , пФ	510	560	620	680	750	820	910	1000	1100	1200

Набор элементов позволяет реализовать фильтры, функциональные показатели которых следующие: f_0 — от 3,4 до 6,8 кГц; f_1 — от 2,9 до 5,9 кГц; f_2 — от 4,0 до 8 кГц; Q — от 3 до 5.

Приращение параметров элементов между соседними значениями позволяет с достаточной точностью определять коэффициенты влияния и производить отработку функциональных показателей активного фильтра любым из рассмотренных выше методов.

Выбор элемента с требуемым значением параметра производится с помощью переключателей $SA_1 \dots SA_4$. Для установки напряжения питания операционного усилителя используется двоянный переменный резистор R_4 типа СП-0,5. Перемещение движков двоянного резистора позволяет одновременно управлять и положительным, и отрицательным источником напряжения. Контроль напряжения питания осуществляется вольтметром PV со шкалой на 30В. Электрическая принципиальная схема макета МСБ помещена на передней панели корпуса.

На корпусе макета установлены двухполюсные гнезда для подключения звукового генератора ГЗ-112, осциллографа СИ-72, частотомера ЧЗ-34, вольтметра ВЗ-38 и двухполярного источника питания.

Звуковой генератор является источником сигнала, поступающего на вход активного фильтра. Совместно с вольтметром и частотомером звуковой генератор используется для снятия АЧХ и определения функциональных параметров фильтра. При изменении коэффициента передачи

фильтра K_n выходной сигнал генератора с помощью переключателя SA5 может быть подан непосредственно на вход вольтметра ВЗ-38.

Осциллограф служит для контроля сигнала на выходе фильтра.

Порядок выполнения работ

1. Получить задание у преподавателя. Варианты возможных заданий приведены в приложении (табл. П.3.1).

2. В соответствии со структурной схемой рис. 3.4 собрать лабораторную установку. Получить у лаборанта разрешение на ее включение.

3. Вывести переменный резистор R_4 на макете фильтра в крайнее левое положение; включить источник питания и установить на выходах источника +20 В и -20 В с точностью до 0,5 В.

4. Переменным резистором R_4 установить номинальное значение напряжения питания операционного усилителя. Тумблер SA5 перевести в положение "Вкл".

5. Включить звуковой генератор, осциллограф, вольтметр и частотомер. На выходе генератора установить синусоидальное напряжение 10...100 мВ.

6. По заданным f_1 и f_2 произвести расчет функциональных параметров фильтра, номинальных значений емкости конденсаторов C_1 , C_2 и сопротивлений резисторов R_1 , R_2 . Для этого:

определить центральную частоту фильтра $f_0 = \sqrt{f_1 f_2}$;

найти добротность фильтра

$$Q = f_0 / (f_2 - f_1);$$

в пределах значений, приведенных в табл. 3, выбрать $C_1 = C_2 = C$;

определить $R_1 = 1 / 4\pi f_0 Q C$;

определить $R_2 = 2Q / 2\pi f_0 C$;

найти коэффициент передачи фильтра $K_n = 2Q^2$.

7. С помощью переключателей SA1 ... SA4 набрать ближайшие к расчетным значения параметров элементов.

8. Используя звуковой генератор ГЗ-112 и вольтметр ВЗ-38, снять АЧХ фильтра и определить экспериментальные значения функциональных показателей.

9. Методом малых приращений определить коэффициенты влияния параметров элементов и напряжения источников питания на функциональные показатели активного фильтра. Учитывая знак и величину коэффициентов влияния, выбрать направление корректировки параметров элементов.

10. Произвести корректировку параметров элементов, снять АЧХ фильтра и определить новые значения функциональных показателей фильтра.

11. Заданным однофакторным методом провести исследование работоспособности и параметрической чувствительности фильтра при выбранных значениях параметров элементов. Дать анализ полученных результатов, установить допуски на параметры элементов.

12. Проверить справедливость принятых решений методом матричных испытаний.

13. Записать модель функциональной точности заданного показателя фильтра. Рассчитать производственный допуск методами наихудшего случая, квадратичного суммирования и вероятностным, приняв разброс обобщенного параметра операционного усилителя $\frac{\Delta_{оп}}{\Delta_{оп}} = (5 \pm 20)\%$, относительный коэффициент влияния $B_{оп} = +0,3$. Проанализировать полученные результаты.

14. Выключить лабораторную установку. Оформить отчет и представить его к защите.

Содержание отчета

1. Цель лабораторной работы. Содержание задания.
2. Структурная схема лабораторной установки.
3. Расчет функциональных показателей и номинальных значений параметров элементов фильтра.
4. АЧХ фильтра при расчетных и скорректированных значениях параметров элементов. Таблица коэффициентов влияния.
5. Парциальные характеристики или графики граничных испытаний и их анализ.
6. Матрица ситуаций. Результаты матричных испытаний и их анализ.
7. Уравнение погрешности заданного функционального показателя активного фильтра. Расчет производственного допуска, анализ полученных результатов.
8. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Основные функциональные параметры активного фильтра.
2. Содержание задачи отработки функциональных показателей КТЕ.
3. Методы расчета допусков.