

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

—◆—
Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к дипломному проектированию
по специальностям
«КОНСТРУИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО
РЭА И ЭВА»

Данные методические указания издаются в соответствии с учебным планом.
рассмотрены и одобрены кафедрой П-8 21.05.79 г., Методической комиссией факультета П и Учебно-методическим управлением.

Рецензенты: д.т.н. проф. П.В.Сыроватченко,
к.т.н. доц. Э.Г.Богатырев

Авторы:

А.С.Беляева, О.Д.Парфенов, А.К.Еськин, А.В.Фролов

Редактор Л.И.Толстой

Корректор Л.И.Малютина

Заказ 250

Объем 2п.л. (1,9 уч.-издл.) Тираж 400 экз.

Бесплатно

Подписано к печати 19.02.80г.

План 1980 г., письмо
Минвуза СССР № 96-07-
556/26 от 07.12.79г.

Ротапринт МВТУ. 107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5.

I. ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ИЗДЕЛИЯ

Технологичной называют такую конструкцию, которая, полностью отвечая предъявляемым к изделию требованиям, может быть изготовлена с применением наиболее экономичных (для принятого типа производства и объема выпуска изделий) технологических процессов.

Отработка конструкции изделия на технологичность направлена на снижение затрат и сокращение времени по проектированию, технологической подготовке производства, изготовлению, техническому обслуживанию и ремонту изделия при обеспечении необходимого качества. Отработка конструкции изделий на технологичность является важнейшим условием повышения эффективности производства.

В общем случае комплекс работ по снижению трудоемкости и себестоимости изготовления и эксплуатации включает:

- повышение серийности при изготовлении (обработке, сборке, испытании) посредством стандартизации, унификации и группирования изделий и их элементов по конструктивным признакам;

- ограничение номенклатуры конструкций и применяемых материалов;

- приемственность в применении освоенных в производстве конструктивных решений, соответствующих современным требованиям;

- снижение массы изделия;

- применение высокопроизводительных типовых технологических процессов и средств технологического оснащения;

- рациональное выполнение конструкции, обеспечивающее удобство технического обслуживания и ремонта;

- повышение надежности и ремонтпригодности конструкции (при уменьшении количества сменных и запасных частей) без снижения ресурса изделия.

Последние два требования направлены на повышение эксплуатационной технологичности.

Процесс отработки конструкции на технологичность является составной частью технологической подготовки производства и начинается на ранних стадиях проектирования. Ниже приводятся методики оценки технологичности конструкции изделия, в которой используются основные положения ОСТ4.ГО.091.219.

Методика предусматривает оценку производственной технологичности конструкций узлов и блоков РЭА как сборочных единиц

на стадиях разработки технической документации применительно к изготовлению опытного образца (опытной партии), установочной серии и серийного установившегося производства.

Для оценки технологичности используется система относительных частных показателей K_c и комплексный показатель K , рассчитываемый по средневзвешенной величине относительных частных показателей с учетом значений коэффициента φ_c , характеризующего весовую значимость частных показателей, т.е. степень его влияния на трудоемкость изготовления изделия.

Значения относительных частных показателей K_c принимаются согласно ГОСТ 14.202.73 в пределах $0 \leq K_c \leq 1$, при этом увеличение значения показателя соответствует более высокой технологичности изделия. Поэтому выражение для расчета относительного частного показателя может иметь вид либо простого отношения $K = \frac{a}{b}$, либо разности $K = 1 - \frac{a}{b}$. Первое выражение применяется в тех случаях, когда стремление величины a к b соответствует повышению технологичности изделия, а второе - когда приближение величины a к b снижает технологичность.

Значение коэффициента φ_c зависит от порядкового номера основных показателей технологичности, ранжированная последовательность которых установлена экспертно, и рассчитывается по формуле

$$\varphi_c = \frac{c}{2^{c-1}}$$

где, c - порядковый номер показателя по ранжиру.

I.1. Определение относительных частных показателей

Коэффициент применяемости деталей

$$K_{п.д.} = 1 - \frac{D_{т.ор}}{D_t}$$

где $D_{т.ор}$ - количество типоразмеров оригинальных конструктивных деталей в изделии;

D_t - общее количество типоразмеров конструктивных деталей в изделии без учета нормализованного крепежа.

Коэффициент применяемости электрорадиоэлементов (ЭРЭ)

$$K_{п.эрэ} = 1 - \frac{H_{т.ор.эрэ}}{H_t.эрэ}$$

где $H_{т.ор.эрэ}$ - количество типоразмеров оригинальных ЭРЭ в изделии;

$N_{т.э.р.э}$ — общее количество типоразмеров ЭРЭ в изделии.

Примечание: К оригинальным относятся ЭРЭ, разрабатываемые и изготавливаемые впервые как самим предприятием-разработчиком, так и в порядке кооперирования с другими предприятиями. К ЭРЭ относятся транзисторы, диоды, конденсаторы, резисторы, резьемы, дроссели, катушки индуктивности, трансформаторы, микросборки, микросхемы, микромодули и т.п.

Коэффициент применяемости узлов

$$K_{п.е.} = 1 - \frac{E_{т.ор.э}}{E_{т.}}$$

где $E_{т.ор.э}$ — количество типоразмеров оригинальных узлов в изделии;

$E_{т.}$ — общее количество типоразмеров узлов в изделии.

Коэффициент повторяемости деталей и узлов

$$K_{пов.д.е.} = 1 - \frac{D_{т.} + E_{т.}}{D + E}$$

где D — общее количество деталей (без нормализованного крепежа) в изделии, шт.;

E — общее количество узлов в изделии, шт.

Коэффициент повторяемости ЭРЭ

$$K_{пов.э.р.э} = 1 - \frac{N_{т.э.р.э}}{N_{э.р.э}}$$

где $N_{э.р.э}$ — общее количество ЭРЭ, шт.

Коэффициент повторяемости микросхем и микросборок

$$K_{пов.м.с.} = 1 - \frac{N_{т.м.с.}}{N_{м.с.}}$$

где $N_{т.м.с.}$ — количество типоразмеров корпусов микросхем и микросборок в изделии;

$N_{м.с.}$ — общее количество микросхем и микросборок в изделии, шт.

Коэффициент повторяемости печатных плат

$$K_{пов.п.п.} = 1 - \frac{N_{т.п.п.}}{N_{п.п.}}$$

где $N_{т.п.п.}$ — количество типоразмеров печатных плат в изделии, в том числе многослойных печатных плат (МПП) — без учета слоев; типоразмер печатной платы определяется габаритными размерами и материалами, используемыми в конструкции, без учета различий в рисунке проводников;

$N_{п.п.}$ — общее количество печатных плат в изделии, шт.

Коэффициент повторяемости материалов

$$K_{пов.м} = 1 - \frac{H_{мм}}{D_{т.ор}}$$

где $H_{мм}$ - количество маркосортментов материалов, применяемых в изделии.

Под маркосортментом понимается условное обозначение сочетания марки материала и его профиля, применяемого в качестве заготовки, например, сплав Д16Т (пруток диаметром 30 мм), сплав Д16Т (пруток диаметром 40 мм), сплав Д16Т (лист толщиной 2 мм) и т.п.

Коэффициент использования микросхем и микросборок

$$K_{исп.мс} = \frac{H_{мс}}{H_{мс} + H_{эс}}$$

Коэффициент установочных размеров (шагов) всех ЭРЭ

$$K_{у.р} = 1 - \frac{H_{у.р}}{H_{эс}}$$

где $H_{у.р}$ - количество видов установочных размеров всех ЭРЭ в изделии.

Коэффициент сложности печатных плат

$$K_{с.пп} = 1 - \frac{H_{мпп}}{H_{пп}}$$

где $H_{мпп}$ - общее количество МПП, шт.

Коэффициент освоения деталей

$$K_{осв.} = 1 - \frac{D_{ор}}{D}$$

где $D_{ор}$ - общее количество оригинальных деталей в изделии, шт.

Коэффициент сложности сборки

$$K_{с.сб} = 1 - \frac{E_{т.сл}}{E_t}$$

где $E_{т.сл}$ - количество типоразмеров узлов, входящих в изделие, которые требуют регулировки в составе изделия с применением специальных устройств либо пригонки или совместной обработки с последующей доработкой и повторной сборкой.

Коэффициент сборности изделия

$$K_{сб} = \frac{E}{E + D}$$

где E - общее количество узлов в изделии, шт.;
 D - общее количество деталей (без нормализованного

крепёжа) в изделии, шт.

Коэффициент точности обработки

$$K_{т.ч} = 1 - \frac{Д_{т.ч}}{Д}$$

где $Д_{т.ч}$ - количество деталей (в штуках), имеющих размер с допусками по 3а классу точности и выше.

Коэффициент автоматизации и механизации подготовки электрорадиоэлементов к монтажу

$$K_{н.п.эрэ} = \frac{Н_{н.п.эрэ}}{Н_{эрэ}}$$

где $Н_{н.п.эрэ}$ - количество ЭРЭ в штуках, подготовка которых к монтажу может осуществляться или осуществляется механизированным или автоматизированным способом, т.е. имеются механизмы, оборудование или оснащение (или техническая документация) для выполнения этих операций. В число указанных включаются ЭРЭ, не требующие специальной подготовки к монтажу (реле, разъемы, патроны и т.п.).

Коэффициент автоматизации и механизации монтажа изделия

$$K_{а.м} = \frac{Н_{а.м}}{Н_{м}}$$

где $Н_{а.м}$ - количество монтажных соединений, которые могут осуществляться или осуществляются механизированным или автоматизированным способом, т.е. имеются механизмы, оборудование или оснащение (или техническая документация) для выполнения монтажных соединений;

$Н_{м}$ - общее количество монтажных соединений.

Коэффициент $K_{м.к.н}$ автоматизации и механизации операций контроля и настройки электрических параметров

$$K_{м.к.н} = \frac{Н_{м.к.н}}{Н_{к.н}}$$

где $Н_{м.к.н}$ - количество операций контроля и настройки, которые можно осуществить механизированным или автоматизированным способом. В число указанных включаются операции, не требующие средств механизации;

$Н_{к.н}$ - общее количество операций контроля и настройки.

Коэффициент применения типовых технологических процессов

$$K_{т.п} = \frac{Н_{т.п}}{Н_{п}}$$

где $N_{т.п}$ - количество наименований типовых технологических процессов всех уровней (отраслевых, главных управлений, предприятий), используемых при изготовлении изделия;

N_p - общее количество наименований технологических процессов, применяемых для изготовления изделия (в том числе оригинальных).

Коэффициент прогрессивности формообразования деталей

$$K_{\text{ф}} = \frac{D_{\text{пр}}}{D}$$

где $D_{\text{пр}}$ - количество деталей, заготовки которых или сами детали получены прогрессивными методами формообразования (штамповкой, прессованием, порошковой металлургией, литьем по выплавляемым моделям, под давлением и в кокиль, пайкой, сваркой, склеиванием, из профилированного материала), шт.

Коэффициент сложности обработки

$$K_{\text{с.о}} = 1 - \frac{D_M}{D}$$

где D_M - количество деталей, включая заимствованные и стандартные, требующие обработки снятием стружки, шт.;

D - общее количество деталей (без нормализованного крепежа) в изделии, шт.

Коэффициент использования материалов

$$K_{\text{ц.м}} = \frac{M}{M_H}$$

где M - масса изделия без учета комплектующих, кг;

M_H - масса материала, израсходованного на изготовление изделия без учета комплектующих, кг.

1.2. Выбор базовых показателей и определение комплексного показателя технологичности конструкции

Для характеристики технологичности конструкции конкретного изделия из номенклатуры относительных частных показателей, рассмотренных выше, отбираются такие базовые показатели (не более семи), которые оказывают наибольшее влияние на технологичность данного изделия с учетом его назначения и условий применения. В связи с этим все блоки РЭА условно разбиты на 4 класса:

1. Радиотехнические.
2. Электронные.
3. Электромеханические и механические.
4. Соединительные, коммутационные, распределительные.

Состав базовых показателей, их ранжирование по значимости, весовой коэффициент φ_i , а также обязательность их определения на различных стадиях проектирования изделия приведены в табл. I.

Основным показателем, используемым для оценки технологичности конструкции, является комплексный показатель технологичности, определяемый на основе базовых показателей:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{z} K_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^{z} \varphi_i} = \frac{K_1 \varphi_1 + K_2 \varphi_2 + \dots + K_z \varphi_z}{\varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_z}$$

- где K_i - значение показателя по табл. I;
 φ_i - функция, нормирующая весовую значимость показателя в зависимости от его порядкового номера в табл. I;
 i - порядковый номер показателя по ранжиру (место в таблице);
 z - общее число относительных частных показателей в таблице для данной стадии разработки изделия.

Таблица I

ЭЛЕКТРОННЫЕ БЛОКИ

Порядков. номер по ранжиру	Показатель технологичности-коэффициент	Обозначение	φ_i	Эскизный проект	Технический проект	Рабочая документация		
						опытного образца	уст. но-воч. раз-се-рий	серийного произ-водст.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	использования микросхем и микросборок в блоке	$K_{исл.мс}$	1,000	П	П	0	0	0
2	автоматизации и механизации монтажа	$K_{а.м}$	1,000	Н	П	0	0	0

Продолжение табл. I

I	2	3	4	5	6	7	8	9
3	механизации подготовки ЭРЭ	$K_{н.п.эрэ}$	0,750	п	0	0	0	0
4	механизации контроля и настрйки	$K_{м.к.н}$	0,500	н	п	0	0	0
5	повторяемости ЭРЭ	$K_{пов.эрэ}$	0,310	п	п	0	0	0
6	применяемости ЭРЭ	$K_{п.эрэ}$	0,187	п	п	0	0	0
7	прогрессивности формообразован- ния деталей	$K_{ф}$	0,110	н	н	0	0	0

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ БЛОКИ

1	механизации подготовки ЭРЭ к монтажу	$K_{н.п.эрэ}$	1,000	п	п	0	0	0
2	автоматизации и механизации монтажа	$K_{а.м}$	1,000	н	п	0	0	0
3	сложности сборки	$K_{с.сб.}$	0,750	н	п	0	0	0
4	механизации контроля и на- стройки	$K_{м.к.н}$	0,500	н	н	п	0	0
5	прогрессивности формообразования деталей	$K_{ф}$	0,310	н	н	п	0	0
6	повторяемости ЭРЭ	$K_{пов.эрэ}$	0,187	н	н	0	0	0
7	тщности обра- ботки	$K_{т.ч}$	0,110	н	н	0	0	0

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ

1	точности обра- ботки	$K_{т.ч}$	1,000	н	н	0	0	0
2	прогрессивности формообразова- ния деталей	$K_{ф}$	1,00	н	н	п	0	0

Продолжение табл. I

I	2	3	4	5	6	7	8	9
3	сложности обработки	$K_{с.о}$	0,750	Н	П	0	0	0
4	повторяемости деталей и сб. единиц	$K_{пов.д.е}$	0,500	Н	П	0	Н	Н
5	сборности	$K_{сб}$	0,310	Н	П	0	Н	0
6	сложности сборки	$K_{с.сб}$	0,187	П	П	0	0	0
7	использования материалов	$K_{ц.м}$	0,110	Н	Н	П	0	0

СОЕДИНИТЕЛЬНЫЕ КОММУТАЦИОННЫЕ, РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ

1	повторяемости материал.	$K_{пов.м}$	1,000	Н	Н	П	0	0
2	сложности сборки	$K_{с.сб}$	1,000	Н	П	0	0	0
3	точности обработки	$K_{т.ч}$	0,750	Н	Н	П	0	0
4	прогрессивности формообразования деталей	$K_{ф}$	0,5000	Н	П	П	0	0
5	использования материалов	$K_{ц.м}$	0,310	Н	П	П	0	0

Примечание: 0 - показатель определяется;
 П - показатель определяется приближенно;
 Н - показатель не определяется.

1.3. Нормативы показателей технологичности конструкций по классам РЭА и ЭВА

Нормативы комплексных показателей технологичности изделий, разрабатываемых и модернизируемых, должны находиться в пределах, указанных - для блоков РЭА - в табл. 2, для блоков автоматизированных систем управления и электронно-вычислительной техники - в табл. 3.

Нормативы комплексных показателей технологичности устанавливаются для стадии разработки рабочей документации. На ранних этапах (эскизный и технический проекты) показатели тех-

нологичности должны контролироваться разработчиком по составу частных показателей (табл. I) с тем, чтобы они находились в заданных для рабочего проекта пределах.

Нормативы показателей технологичности в зависимости от конструктивно-технологических особенностей изделий разбиваются на группы:

- для электронных изделий (логические и аналоговые блоки, блоки оперативной памяти и индикаторные, генераторы сигналов, приемно-усилительные блоки и т.п.);

- для электромеханических изделий (механизмы привода, отсчетные устройства, кодовые преобразователи и т.п.);

- для радиотехнических изделий (вторичные источники питания и т.п.);

- для коммутационно-распределительных изделий (коммутаторы, коробки распределительные и т.п.);

- для механических изделий (редукторы, волноводные блоки и т.п.).

По мере накопления статистических данных нормативные значения показателей технологичности уточняются, а номенклатура изделий, охватываемых нормативами, пополняется соответствующими изменениями и дополнениями к ОСТУ.

Таблица 2

Класс блоков	Стадии разработки рабочей документации		
	Опытный образец (партия)	Установочная серия	Установившееся серийное производство
Электронные	0,80 - 0,60	0,40 - 0,70	0,50 - 0,75
Электромеханические	0,20 - 0,50	0,40 - 0,60	0,45 - 0,65
Механические	0,10 - 0,30	0,25 - 0,35	0,30 - 0,40
Радиотехнические	0,20 - 0,50	0,25 - 0,55	0,30 - 0,60
Соединительные, коммутационные, распределительные	0,20 - 0,60	0,25 - 0,65	0,30 - 0,70

Таблица 3

Класс блоков	Стадии разработки рабочей документации		
	Опытный образец (партия)	Установочная серия	Установившееся серийное производство
Электронные	0,40 - 0,70	0,45 - 0,75	0,50 - 0,80
Электромеханические и механические	0,30 - 0,50	0,40 - 0,55	0,45 - 0,60
Радиотехнические	0,40 - 0,60	0,75 - 0,80	0,80 - 0,85
Соединительные, коммутационные, распределительные	0,35 - 0,55	0,50 - 0,70	0,55 - 0,75

○ 1.4. Порядок расчетов технологичности конструкции изделия

I. Подготовка исходных данных.

В соответствии с табл. I производится выбор частных показателей технологичности конструкции изделия, по которым и выполняется расчет комплексного показателя для проектируемого устройства.

В число отбираемых должны включаться такие частные показатели технологичности, которые оказывают наибольшее влияние на технологичность конструкции разрабатываемого блока.

2. Определение частных показателей технологичности.
3. Расчет комплексного показателя технологичности конструкции.
4. Определение нормативных показателей технологичности конструкции по табл. 2, 3.
5. Оценка уровня технологичности разрабатываемого изделия.

II. РАСЧЕТ ТОЧНОСТИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ РЭА И ЭВА НА ЭТАПЕ СБОРКИ

В процессе проектирования, изготовления и эксплуатации электронных устройств приходится решать две основные взаимосвязанные задачи: первая - анализ точности выходных параметров электронных устройств, вторая - синтез заданной точности выходных параметров. Следует отметить, что задача синтеза, т.е. определение допусков на комплектующие электрорадиоэлементы (КЭ)

устройства по заданным техническим требованиям, в настоящее время не имеет единственного корректного решения. Решение этой задачи сводится, как правило, к выбору допусков на КЭ. Задача анализа точности, рассматриваемая в данном руководстве, имеет единственное решение. Для этого используется расчетно-статистический метод, который предполагает наличие математической модели устройства, определяющей функциональную связь КЭ с выходными параметрами. При этом предполагается, что законы распределения погрешностей КЭ известны.

П.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ПРИ АНАЛИЗЕ ТОЧНОСТИ ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Из общей постановки задачи анализа выходных параметров следует, что для ее решения необходимо располагать исходными данными, которые можно разделить на четыре основные группы.

К первой относятся математические модели функциональных узлов или электронных устройств, а также функциональные зависимости выходных параметров от параметров КЭ. Следует заметить, что функциональные зависимости обычно известны лишь для простейших функциональных узлов электронной аппаратуры.

Ко второй группе исходных данных относятся заданные технические требования на выходные параметры электронных устройств. Обычно они ограничиваются допустимой погрешностью выходных параметров, например, допустимым отклонением коэффициента усиления, длительности импульса и т.д. В большинстве случаев эти данные известны.

К третьей группе относятся производственные погрешности КЭ, из которых собирается функциональный узел или устройство. Предельно допустимая погрешность КЭ, как правило, известна и гарантируется величиной производственного допуска.

К четвертой группе исходных данных относятся условия эксплуатации электронных устройств. Колебания значений физических факторов, определяющих состояние окружающей среды, приводят к значительным изменениям выходных параметров.

П.2. Расчет точности выходных параметров электронных устройств при известных функциональных зависимостях между параметрами

Определение точности выходных параметров электронных устройств сводится к определению и согласованию между собой

допусков на КЭ и блоки устройства и проверке обеспечения заданных допусков на его выходные параметры.

Различают эксплуатационные, ремонтные и производственные допуски. Эксплуатационные характеризуют точность работы электронного устройства и накладывают ограничения на отклонения выходных параметров, вызванные внешними воздействиями при работе, старением и производственным разбросом параметров КЭ. Ремонтные допуски не учитывают старения материалов. На основании их производится приемка готовой продукции. Производственные допуски ограничивают отклонения параметров электронных устройств при нормальных условиях эксплуатации.

П.2.1. Расчет конструкторской точности выходных параметров электронных устройств

В результате последовательного выполнения технологических операций КЭ оформляются в функциональное устройство. Погрешности КЭ прежде всего определяют точность выходных параметров электронного устройства. Конструкторская точность устройства рассчитывается как погрешность выходного параметра, обусловленная погрешностями КЭ. При этом предполагается известной аналитическая функция, определяющая зависимость выходного параметра от параметров КЭ:

$$Y = \varphi (X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (1)$$

При расчете отклонения параметров от номинальных значений отклонения параметров считаются малыми, а их изменения в пределах допуска — линейными. Разложив выражение (1) в ряд, удержав первые члены ряда и перейдя к конечным приращениям, получим уравнение погрешности выходного параметра:

$$\Delta \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial \varphi}{\partial x_n} \Delta x_n = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \Delta x_i. \quad (2)$$

Выражение (2) удобно для расчетов, если все параметры имеют одинаковую размерность, так как погрешности Δx_i являются размерными величинами. При расчете точности параметров электронных устройств в выражение (2) входят погрешности различных физических величин, поэтому удобнее оперировать безразмерными относительными погрешностями. Разделив уравнение (2) на (1), получим исходное выражение для определения допусков на выходные параметры:

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{\varphi} \right) \frac{\Delta X_i}{X_i}, \quad (3)$$

где ΔY - абсолютная погрешность выходного параметра;

$\Delta Y/Y$ - относительная погрешность выходного параметра;

ΔX_i - абсолютные погрешности параметров КЭ;

$\Delta X_i / X_i$ - относительные погрешности параметров КЭ;

$A_i = \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{\varphi}$ - коэффициент влияния КЭ, вычисленный при номинальном значении параметра x_i .

Как правило, все погрешности, входящие в выражение (3), являются случайными величинами и описываются законами распределения. На рис. 7 показан общий вид распределения случайной величины и основные числовые характеристики распределения. Этими характеристиками являются:

- математическое ожидание или среднее значение отклонений $M(x)$ параметра от номинала, которое обычно характеризует центр группирования отклонений случайной величины;

- среднее квадратическое отклонение σ_x , характеризующее меру рассеивания случайной величины от центра группирования и форму кривой плотности распределения $f(x)$;

- асимметрия распределения $\alpha = \alpha_i \cdot \delta_i$;

- коэффициент относительного рассеивания $\kappa_i = \lambda_i / \lambda_N = 3 \lambda_i^*$, который позволяет привести среднее квадратическое отклонение и допуски любого закона распределения к среднему квадратическому отклонению нормального закона и таким образом произвести их суммирование.

Поскольку для характеристики отклонений параметров элементов в технике пользуются величинами половины поля допуска E_i и координатой середины поля допуска ξ_i , а в теории вероятности и математической статистике - величинами математического ожидания и среднего квадратического отклонения, необходимо связать их между собой. Эта связь осуществляется с помощью коэффициента относительного рассеивания κ_i и коэффициента относительной асимметрии

$$\alpha_i = \frac{M(x_i) - \xi(x_i)}{\delta_i}$$

* λ_i - относительное среднее квадратическое отклонение данного закона распределения;

λ_N - относительное среднее квадратическое отклонение нормального закона распределения.

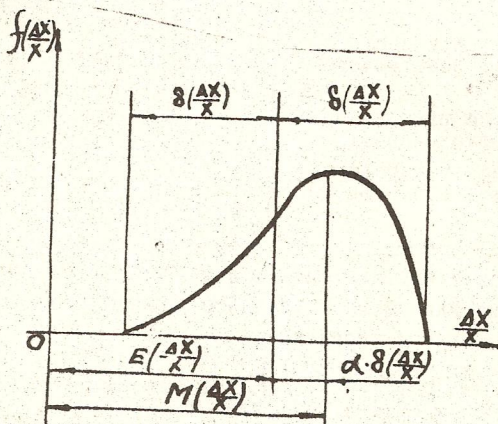


Рис. I

Используя уравнение погрешностей (3), с помощью этих коэффициентов можно получить соотношения, устанавливающие связь между числовыми характеристиками законов распределения погрешностей параметров КЭ и выходных параметров электронных устройств. Значения коэффициентов α_i и κ_i при различных законах распределения параметров КЭ приведены в табл. 4.

Таблица 4

Распределение	α_i	κ_i	Примечание
Закон:			
нормальный	0	1	
Симпсона (равнобедренного треугольника)	0	1,22	
равной вероятности	0	1,73	
равномерного возрастания	0,33	1,41	
арксинуса (арккосинуса)	0	2,12	
Максвелла	-0,28	1,14	
Композиция нормального закона и закона равной вероятности	0	от $\frac{1}{1}$ до $\frac{1}{1,5}$	κ_i зависит от отношения $\delta/3\sigma_i$

I	2	3	4
Композиция нормального и равномерно возрастающего законов	от 0 до + 0,53	от I до I,4I	
Антимодальное распределение из отрезков прямых	0	2,12	
Антимодальное распределение из ветвей нормального закона	0	2,28	

На основании правила сложения математических ожиданий получим выражение для расчета среднего значения относительной погрешности выходного параметра:

$$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right) = E\left(\frac{\Delta y}{y}\right) = \sum_{i=1}^n A_i \left[E\left(\frac{\Delta X_i}{X_i}\right) + \alpha_i \delta\left(\frac{\Delta X_i}{X_i}\right) \right] \quad (4)$$

На основании одной из центральных предельных теорем математической статистики можно сделать допущение о том, что погрешность выходного параметра подчиняется нормальному закону распределения. Поэтому в выражении (4) $M(\Delta y/y) = E(\Delta y/y)$. Часто погрешности и допуски КЭ расположены симметрично относительно номинального значения, тогда расчет среднего значения выходного параметра можно производить по формуле, в которой предполагается равенство величины математического ожидания и середины полей допусков всех параметров схемы:

$$M\left(\frac{\Delta y}{y}\right) = E\left(\frac{\Delta y}{y}\right) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot M\left(\frac{\Delta X_i}{X_i}\right) \quad (5)$$

Отклонение выходного параметра от его среднего значения (половина поля допуска на этот параметр) определяется на основании правила сложения дисперсий. В электронных устройствах погрешности большинства параметров полупроводниковых приборов и интегральных микросхем связаны между собой, поэтому отклонения выходного параметра от среднего значения определяются на основании теоремы о суммировании дисперсий случайных величин, связанных корреляционной зависимостью:

$$\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 \kappa_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta X_i}{X_i}\right) + 2 \sum_{i \neq j} \kappa_i \kappa_j A_i A_j \delta\left(\frac{\Delta X_i}{X_i}\right) \delta\left(\frac{\Delta X_j}{X_j}\right)} \quad (6)$$

Коэффициент гарантированной надежности γ корректирует величину $\delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)$ для заданной надежности. В формуле (6) по δ сум-

мируются все независимые и зависимые погрешности, а по ζ_{ij} — пары погрешностей, связанных функциональной или корреляционной зависимостью. Коэффициент корреляции между случайными параметрами X_i и X_j изменяется в пределах $-1 \leq \zeta_{ij} \leq +1$. При функциональной зависимости параметров $\zeta_{ij} = \pm 1$, а если параметры независимы, $\zeta_{ij} = 0$. Значения коэффициента корреляции определяются экспериментально или на основе паспортных данных. Значения коэффициента гарантированной надежности γ при заданной надежности на выходной параметр ρ_r приведены в табл. 5.

Таблица 5

ρ_r	γ	ρ_r	γ
0,80	0,427	0,980	0,777
0,85	0,480	0,990	0,857
0,90	0,550	0,9973	1,000
0,95	0,653	0,9990	1,100
0,96	0,685	0,9995	1,167
0,97	0,718	0,9999	1,300

Если погрешности параметров КЭ взаимно независимы, выражение (6) примет вид:

$$\delta \left(\frac{\Delta y}{y} \right) = \gamma \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 K_i^2 \delta^2 \left(\frac{\Delta X_i}{X_i} \right)}. \quad (7)$$

Рассчитав среднее значение погрешности выходного параметра и половину поля допуска, можно определить предельные значения погрешности

$$\delta \left(\frac{\Delta y}{y} \right)_{np} = M \left(\frac{\Delta y}{y} \right) \pm \delta \left(\frac{\Delta y}{y} \right) \quad (8)$$

и предельные значения выходного параметра

$$y_{np} = y_0 + M \left(\frac{\Delta y}{y} \right) \cdot \frac{y_0}{100} \pm \delta \left(\frac{\Delta y}{y} \right) \cdot \frac{y_0}{100}. \quad (9)$$

П.2.2. Определение коэффициентов влияния

Коэффициенты влияния КЭ на выходной параметр электронного устройства находят в результате преобразования аналитической зависимости, связывающей эти элементы и выходные параметры. В большинстве случаев аналитическое выражение выходного параметра представляет собой дробную линейную, дробную рациональную или, реже, дробную иррациональную функцию параметров КЭ. Для

этих функций можно получить формулы определения коэффициентов влияния, исключая сложные промежуточные преобразования и вычисления.

Предположим, что аналитическое выражение выходного параметра представляет собой отношение многочленов $Y = Q/F$. Подставив это отношение в выражение коэффициента влияния, получим

$$A_i = \left(F \frac{\partial Q}{\partial x_i} - Q \frac{\partial F}{\partial x_i} \right) \frac{x_i}{Q \cdot F} \quad (10)$$

Если показатель степени параметра X в числителе отношения многочленов Q/F равен ℓ , а в знаменателе — ϵ , то выполнив дифференцирование и необходимые преобразования выражения (10), получим

$$A_i = \frac{\ell \cdot Q(x_i)}{Q} - \frac{\epsilon \cdot F(x_i)}{F} \quad (11)$$

где $Q(x_i)$ и $F(x_i)$ — части многочленов Q и F , содержащие x_i .

Выражение (11) справедливо, если показатели степени ℓ и ϵ параметра КЭ являются дробными числами, т.е. выражение (11) — иррациональная дробь.

Если аналитическое выражение для выходного параметра — дробная линейная функция, то формула определения коэффициента влияния примет вид:

$$A_i = \frac{Q(x_i)}{Q} - \frac{F(x_i)}{F} \quad (12)$$

Если параметр ϵ — то КЭ не входит в знаменатель выражения или же знаменатель равен единице, то из (11) и (12) получим соответственно:

$$A_i = \ell \cdot Q(x_i) / Q, \quad (11a)$$

$$A_i = Q(x_i) / Q. \quad (12a)$$

Если параметр x_i не входит в числитель исходного выражения или числитель этого выражения равен единице, коэффициенты влияния определяются по формулам:

$$A_i = -\epsilon \cdot F(x_i) / F, \quad (11б)$$

$$A_i = -F(x_i) / F. \quad (12б)$$

П.2.3. Определение точности выходных параметров в процессе эксплуатации. Расчет погрешностей, обусловленных старением, влиянием влажности, температуры

Выше определялась конструкторская точность выходных параметров электронного устройства. Обычно погрешность выходного параметра, обусловленная погрешностями КЭ, принимается за производственный допуск. При этом не учитывается влияние технологических операций.

Помимо погрешностей параметров КЭ и влияния технологических операций, на изменение параметров электронных устройств в процессе эксплуатации оказывает влияние старение КЭ, воздействие влажности, температуры. Влияние температуры составляет 60-70%, а совместное действие температуры, влажности и старения - 95-98% нестабильности выходных параметров.

Влияние эксплуатационных факторов учитывается с помощью соответствующих коэффициентов выходного параметра:

K_T - температурного коэффициента (ТК) выходного параметра электронного устройства;

K_B - коэффициента влияния влажности (КВ) на выходной параметр;

K_C - коэффициента старения (КС).

Исходным уравнением для определения погрешностей выходных параметров, обусловленных старением, влиянием температуры или влажности, является уравнение (3). В этом случае под величиной $\Delta X_c / X_c$ понимаются температурные, временные (для старения) и другие эксплуатационные погрешности. Расчетные формулы аналогичны (4)-(8). При расчете принимается принцип независимости погрешностей, возникающих из-за старения, воздействия влажности и температуры.

Особенности расчета температурных погрешностей. Температурную погрешность выходного параметра электронного устройства определим, переписав выражение (3) в виде

$$(\Delta Y/Y)_T = \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot A_i \right] \Delta t,$$

где $\Delta t = t - 20^\circ\text{C}$ - разность между предельной рабочей и нормальной температурой,

α_i - температурный коэффициент i -го параметра электронной схемы.

Сомножитель в квадратных скобках в правой части предыдущего

выражения представляет собой ТК выходного параметра. Расчет ТК выходных параметров электронного устройства ведется при допущении, что распределение ТК в заданных пределах подчиняется нормальному закону. Тогда, аналогично выражению (5), среднее значение ТК выходного параметра

$$M(K_T) = \sum_{i=1}^n A_i \cdot M(\alpha_i). \quad (13)$$

величина половины поля рассеивания ТК

$$\delta(K_T) = \delta \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 \delta^2(\alpha_i) + 2 \sum_{i \neq j} \tau_{ij} A_i A_j \delta(\alpha_i) \delta(\alpha_j)}. \quad (14)$$

Предельные значения ТК

$$K_{Tn} = M(K_T) \pm \delta(K_T). \quad (15)$$

Предельные значения температурных отклонений выходного параметра рассчитываются как для максимальной, так и для минимальной рабочей температуры. Пределы температурных отклонений параметров электронных устройств

$$\delta_{yT} = M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\pm} \pm \delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\pm} = K_{Tn} \cdot \Delta t_{\pm}. \quad (16)$$

Здесь величины с индексами "+" вычисляются для положительных и отрицательных значений температуры.

Рис. 2 иллюстрирует влияние температуры на выходной параметр электронного устройства. В данном примере $K_{Tn} = (2 \pm 5) \cdot 10^{-4} \text{ I}^\circ\text{C}$, рабочий диапазон температур от -60 до $+80^\circ\text{C}$. Пределы температурных отклонений выходного параметра из выражения (16) равны:

$$\delta_{y-} = M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{-} \pm \delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{-} = K_{Tn} \cdot \Delta t_{-} = (2 \pm 5) \cdot 10^{-4} \cdot (-60 - 20) = (-1,6 \pm 4) \%$$

$$\delta_{y+} = M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{+} \pm \delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{+} = (2 \pm 5) \cdot 10^{-4} \cdot (80 - 20) = (1,2 \pm 3) \%$$

Из рис. 2 видно, что при каждой конкретной температуре распределение плотности вероятности температурных погрешностей соответствует нормальному закону распределения. При изменении температуры в любую сторону от 20°C происходит сдвиги и увеличение поля рассеивания температурных погрешностей. Результирующее распределение температурной погрешности при заданном диапазоне температур изображено кривой "д".

Температурные допуски рассчитываются при допущении, что изменения параметров под воздействием температуры линейны.

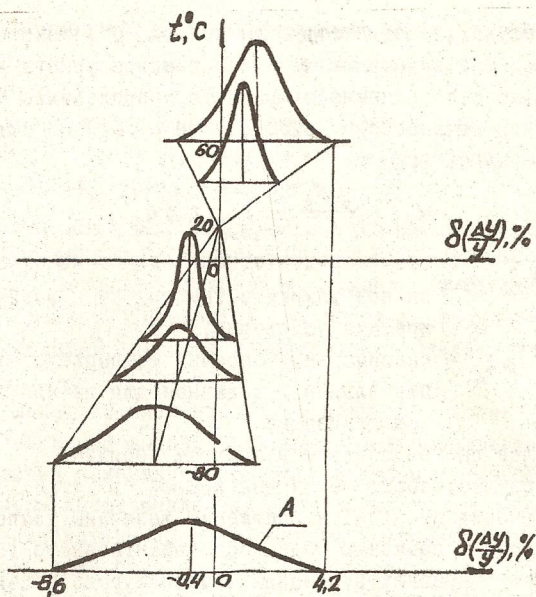


Рис. 2

Чаще эти изменения носят нелинейный характер, а закон этих изменений неизвестен. В документации указывается лишь максимальная величина относительного изменения параметра в крайних точках рабочего интервала температур. На рис. 3 показаны два предельных случая изменений параметров элементов.

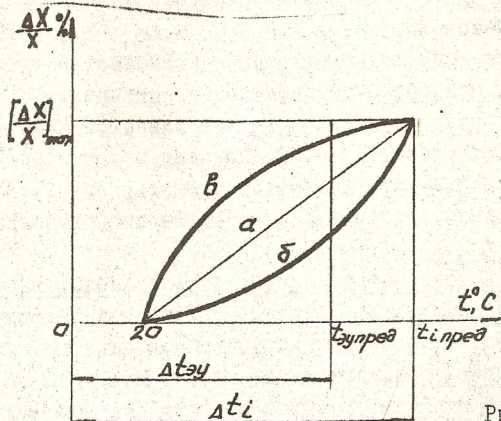


Рис. 3

В случае, соответствующем кривой "б", линейная аппроксимация ведет к завышению величины температурного допуска. При этом повышается надежность расчета. Определение температурного влияния начинается в этом случае с определения ТК элементов по обычной формуле

$$\alpha_i = \left(\frac{\Delta X_i}{X_i} \right)_{\max} / \Delta t_i, \quad (17)$$

где $\left(\frac{\Delta X_i}{X_i} \right)_{\max}$ - максимальное относительное изменение параметра под влиянием температуры, заданное техническими условиями,

Δt_i - максимальный перепад температур относительно нормальной в заданном для детали температурном диапазоне.

Далее расчет ведется в обычном порядке.

В случае, соответствующем кривой "в" (рис. 3), линейная аппроксимация приводит к занижению величины температурной погрешности и снижению надежности электронного устройства, так как при крайних значениях температур возможен уход параметров за пределы расчетных погрешностей. Чтобы избежать этого, ТК следует определять по формуле

$$\alpha_i = \left(\frac{\Delta X_i}{X_i} \right)_{\max} / \Delta t_{\text{ЭУ}}, \quad (18)$$

где $\Delta t_{\text{ЭУ}}$ - максимальный перепад температуры относительно нормальной для электронного устройства, в котором применяется КЭ.

При правильном выборе КЭ интервал рабочих температур устройства всегда меньше или равен температурному интервалу КЭ. Следовательно, при расчете ТК для $\Delta t_{\text{ЭУ}}$ величина $\left(\frac{\Delta X_i}{X_i} \right)_{\max}$, заданная техническими условиями на КЭ, сохраняется и в другом температурном диапазоне. Это позволяет считать, что нужная надежность обеспечения температурных погрешностей выполняется.

Особенности расчета погрешностей, обусловленных влиянием влаги. Параметры механических деталей, полупроводниковых приборов, конденсаторов и проволочных резисторов под непосредственным действием влаги практически не меняются (изменения, вызванные коррозией и плесенью, можно считать независимыми от влажности). Изменениям под действием влажности подвержены параметры неспролочных и пленочных резисторов. Отклонения

выходных параметров электронных устройств, обусловленные влажностью, не превышают 15% от общей нестабильности выходных параметров.

Аналогично расчету температурных погрешностей, $M(\kappa_B)$, $\delta(\kappa_B)$ и κ_{Bnp} определяются соответственно по формулам (13), (14) и (15) с заменой κ_T на κ_B и α_c на κ_{Bc} .

Особенности расчета погрешностей, обусловленных старением КЭ. В зависимости от времени работы нестабильность характеристик КЭ, вызванная старением, колеблется от единиц до нескольких десятков процентов от общей нестабильности. Погрешности старения приводят к постепенным отказам электронных устройств.

Распределения КС элементов схем подчинены нормальному закону [2]. Изменения выходных параметров в результате старения КЭ аналогичны изменениям под воздействием температуры, хотя эти формулы имеют различный физический смысл. Поэтому числовые характеристики КС электронного устройства или его функционального узла определяются из выражений (13), (14), (15) при замене κ_T на κ_c , α_c на κ_{cc} . Предельное отклонение выходного параметра от его номинального значения в результате старения за период работы $\Delta \tau$ определяется из выражения (16) при замене $\Delta \epsilon_x$ на $\Delta \tau$.

Определение эксплуатационной точности выходных параметров. Величина эксплуатационной, или суммарной, погрешности определяется по найденным погрешностям: производственной, температурной, влажности и старения. Рис. 4 иллюстрирует обоснование и расчет эксплуатационной погрешности. Сначала определяются максимальные пределы смещения среднего значения суммарного поля рассеивания путем раздельного суммирования положительных и отрицательных средних значений всех погрешностей: температурной, влажности и старения. Суммирование ведется относительно среднего значения производственного допуска без компенсации средних значений погрешностей. При суммировании берут две предельные величины среднего значения поля рассеивания температурных погрешностей при крайних положительных и отрицательных значениях температуры в отличие от полей рассеивания других погрешностей, имеющих одно среднее значение. Расчет производится по формуле

$$M(\Delta y/y)_{\Sigma \pm} = M(\Delta y/y)_{p.} \pm \sum_{i=1}^n M(\Delta y/y)_{\pm} \quad (19)$$

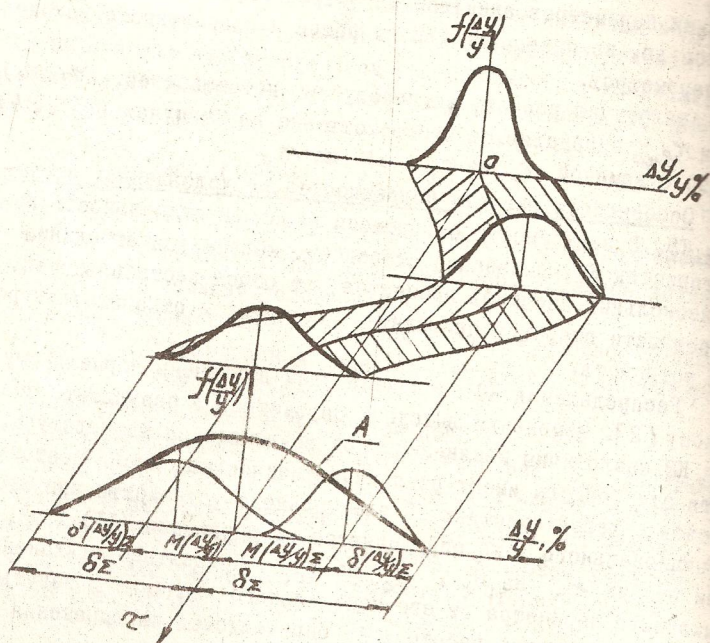


Рис. 4

Затем определяют случайную составляющую суммарного рассеивания:

$$\delta(\Delta y / y)_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2(\Delta y / y)} \quad (20)$$

Случайная составляющая суммарного поля рассеивания (20) определяется при наибольшей величине половины температурной погрешности.

Величина суммарного допуска

$$\delta_{\Sigma} = \xi \left\{ \left[M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma+} + \delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma} \right] \dots \left[M\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma-} - \delta\left(\frac{\Delta y}{y}\right)_{\Sigma} \right] \right\} \quad (21)$$

где $M(\Delta y / y)_{\Sigma+}$ - сумма положительных средних значений;
 $M(\Delta y / y)_{\Sigma-}$ - сумма отрицательных средних значений;
 ξ - коэффициент запаса на уход параметров под воздействием дестабилизирующих факторов, неучтенных при расчете: пыль, вибрации, радиация, атмосферное давление и т.д.

Практика показывает, что нестабильность характеристик электронных устройств, обусловленная неучтенными при расчете факторами, не превышает 5-10%, поэтому $\xi = 1,05-1,2$ с некоторым запасом.

Изложенная методика позволяет рассчитывать эксплуатационные допуски на выходные параметры электронных устройств с требуемым уровнем надежности для любых условий работы.

П.3. Содержание и оформление технологического раздела пояснительной записки дипломного проекта

В дипломном проекте требуется рассчитать эксплуатационный допуск на выходной параметр функционального узла электронного устройства без учета влияния режимов технологического процесса на точность выходного параметра.

Пояснительная записка должна содержать необходимые для расчета проанализированные исходные данные:

- принципиальную электрическую схему функционального узла электронного устройства и краткую характеристику ее работы;
- функциональные зависимости, связывающие выходные параметры с КЭ схемы, или ее математическую модель;
- технические требования на выходные параметры, требуемую точность выходных параметров;
- производственные погрешности КЭ, питающих напряжений и входных сигналов, и характеристики их законов распределения;
- условия эксплуатации электронного устройства.

При определении погрешностей выходных параметров приводятся основные расчетные выражения и необходимые справочные данные.

При расчете суммарных допусков на выходные параметры по заданным условиям эксплуатации, типам элементов и допускам на их параметры порядок выполнения задания следующий:

1. Составить уравнение погрешностей выходных параметров и определить численные значения коэффициентов влияния.
2. Определить производственные допуски на выходные параметры по формулам (4)-(8).
3. Определить температурные погрешности. Для этого по техническим данным на КЭ или по формулам (17)-(18) найти ТК их параметров, считая, что распределения ТК элементов в за-

данных пределах соответствуют нормальному закону. Затем разделить средние значения и значения половины поля рассеивания ТК выходных параметров по формулам (13) и (14). По формуле (16) определить значения полей рассеивания температур погрешностей в крайних точках заданного интервала температур и по их предельным значениям найти температурные погрешности, вызванные влажностью, приняв закон распределения КВ нормальным, по формулам (13), (14) и (15).

4. Рассчитать погрешности, обусловленные старением. Определить КС исходя из того, что изменение параметров КЭ во времени линейное, а их распределение в пределах, установленных техническими условиями, подчинено нормальному закону. Найти среднее значение и значение половины поля рассеивания КС для выходных параметров по формулам (13) и (14). Для заданного интервала времени определить погрешности старения выходных параметров устройства по формуле (15).

5. Рассчитать величину эксплуатационной погрешности. По формуле (19) рассчитать пределы смещения среднего значения суммарного поля рассеивания относительно среднего значения полей рассеивания производственных погрешностей. Раздельно суммировать положительные и отрицательные средние значения полей допусков температурных погрешностей при крайних температурах заданного интервала, производственных погрешностей, влажности и старения. По формуле (20) найти случайную составляющую суммарного поля рассеивания путем квадратичного сложения значений половин полей рассеивания производственных погрешностей, погрешностей влажности и старения, а также наибольшей случайной составляющей температурного поля рассеивания. Выбрав коэффициент запаса ξ , по формуле (21) рассчитать величину эксплуатационной погрешности выходного параметра функционального узла электронного устройства.

П.4. Пример решения задачи анализе

Требуется рассчитать эксплуатационную погрешность времени срабатывания $t_{ср}$ ждущего мультивибратора для формирования импульсов отрицательной полярности длительностью 10 мкс. Принципиальная схема мультивибратора приведена на рис. 5.

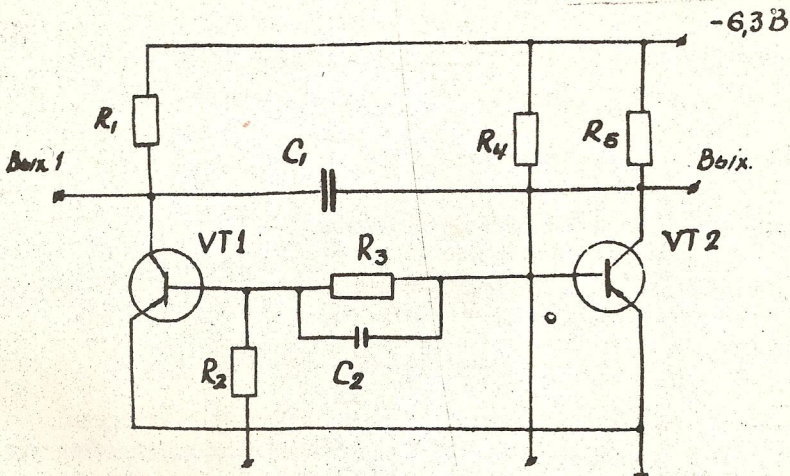


Рис. 5

Исходные данные

1.
$$\tau_{cp} = \tau_3 \cdot R_{Bx} / (R_1 + R_2)$$

$$\tau_3 = C_2 \cdot R_3 \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)$$
2. $R_1 = 1,5 \text{ кОм} \pm 10\%$; $R_2 = 2,2 \text{ кОм} \pm 10\%$;
 $R_3 = 3,6 \text{ кОм} \pm 10\%$; $R_4 = 15 \text{ кОм} \pm 10\%$;
 $R_5 = 1,2 \text{ кОм} \pm 10\%$; $C_1 = 1000 \text{ пФ} \pm 10\%$;
 $C_2 = 510 \text{ пФ} \pm 10\%$. Транзисторы типа МП-40А $R_{Bx} \geq 2,3 \text{ кОм}$.
3. Условия эксплуатации: мультивибратор работает в интервале температур от -60°C до $+80^\circ\text{C}$; относительная влажность воздуха 95% при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$; время работы функционального узла - 1000 часов с гарантированной надежностью $P_r = 0,99$.

Корреляция параметров, входящих в функциональную зависимость, отсутствует.

Расчет производственного допуска

Подставив в формулу для τ_{cp} выражение τ_3 , получим:

$$\tau_{cp} = \frac{R_1 R_2 R_3 C_2 R_{Bx}}{(R_1 + R_2)^2} = \frac{Q}{F}$$

Номинальное значение выходного параметра равно:

$$\tau_{cp} = \frac{1,5 \cdot 2,2 \cdot 3,6 \cdot 10^9 \cdot 510 \cdot 10^{-12} \cdot 2,3 \cdot 10^3}{(2,2 + 1,5)^2 \cdot 10^6} = 1,02 \text{ мс.}$$

Уравнение относительной погрешности (3) примет вид:

$$\frac{\Delta Y}{Y} = A_{R_1} \frac{\Delta R_1}{R_1} + A_{R_2} \frac{\Delta R_2}{R_2} + A_{R_3} \frac{\Delta R_3}{R_3} + A_{C_2} \frac{\Delta C_2}{C_2} + A_{R_{\text{вх}}} \frac{\Delta R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}}}$$

На основании формулы (12а) имеем:

$$A_{R_3} = A_{C_2} = A_{R_{\text{вх}}} = 1.$$

A_{R_1} и A_{R_2} определяем по формуле (12):

$$A_{R_1} = \frac{C_2 R_3 R_2 R_{\text{вх}}}{C_2 R_3 R_2 R_{\text{вх}}} - \frac{R_1^2 + 2R_1 R_2}{R_1^2 + 2R_1 R_2 + R_2^2} = 1 - \frac{2,25 + 2,15 \cdot 2,2}{2,25 + 3,2 \cdot 4,84} = 0,35$$

$$A_{R_2} = 1 - \frac{R_2^2 - 2R_1 R_2}{R_1^2 + 2R_1 R_2 + R_2^2} = 0,13.$$

Тогда

$$\frac{\Delta \tau_{\text{ср}}}{\tau_{\text{ср}}} = 0,35 \frac{\Delta R_1}{R_1} + 0,13 \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta C_2}{C_2} + \frac{\Delta R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}}}.$$

Известно, что параметры резисторов, конденсаторов и значения питающих напряжений распределены по нормальному закону, а входное сопротивление транзистора — по закону равной вероятности. Средняя относительная величина выходного параметра определяется в этом случае по формуле (5) и равна 0.

Учитывая, что параметры КЭ не коррелированы, величина поправки производственной погрешности $\tau_{\text{ср}}$ рассчитывается по формуле (7):

$$\xi \left(\frac{\Delta \tau_{\text{ср}}}{\tau_{\text{ср}}} \right) = 0,857 \sqrt{0,35^2 \cdot 10^2 + 0,13^2 \cdot 10^2 + 10^2 + 10^2 + 1,73^2 \cdot 10^2} = 1,95\%$$

$$\tau_{\text{ср}} = 1,02 \pm 1,95\%$$

Расчет температурных погрешностей

В мультивибраторе используются резисторы типа МЛТ и конденсаторы типа МБМ. В диапазоне температур от 20 до 100°C ТКС = $\pm 7 \cdot 10^{-2}$ %/°C. В диапазоне температур от 20 до -60°C ТКС = $\pm 12 \cdot 10^{-2}$ %/°C. Конденсаторы имеют в диапазоне температур от -60 до +100°C ТКЕ = $12,5 \cdot 10^{-2}$ %/°C. Входное сопротивление транзистора в диапазоне температур от -60°C до +60°C изменяется в пределах (-30...+40) $\pm 20\%$. Отсюда

$$(ТКС)_{R_{\text{вх}}^+} = \frac{40 \pm 20}{70} = (0,67 \pm 0,29) \% / ^\circ \text{C};$$

$$(ТКС)_{R_{\text{вх}}^-} = \frac{-30 \pm 20}{60} = (0,5 \pm 0,33) \% / ^\circ \text{C}.$$

По формуле (13) находим:

$$M(K_T)_+ = A_{R_1} \cdot M(\alpha_{R_1})_+ + A_{R_2} \cdot M(\alpha_{R_2})_+ + M(\alpha_{R_3})_+ + M(\alpha_{C_2})_+ +$$

$$+ M(\alpha_{R_1})_+ = 0,67 \% / ^\circ\text{C} \text{ , так как}$$

$$M(\alpha_{R_1})_+ = M(\alpha_{R_2})_+ = M(\alpha_{R_3})_+ = M(\alpha_{C_2})_+ = 0.$$

Половину поля рассеивания температурного коэффициента для положительных температур определяем по формуле (14):

$$\delta(K_T)_+ = 0,857 [(0,35)^2 \cdot (7 \cdot 10^{-2})^2 + (0,13)^2 \cdot (7 \cdot 10^{-2})^2 + (7 \cdot 10^{-2})^2 + (12,5 \cdot 10^{-2})^2 + (0,29)^2]^{1/2} = 0,3 \% / ^\circ\text{C}.$$

Предельные значения температурного коэффициента $\epsilon_{\text{ср}}$ для положительных температур определяются по формуле (15):

$$K_{Tn} = (0,07 \pm 0,3) \% / ^\circ\text{C}.$$

Умножив K_T на соответствующее значение предельной температуры, из выражения (16) определяем температурный допуск на время срабатывания мультивибратора на верхней границе рабочего диапазона температур:

$$\delta_T \left(\frac{\Delta \epsilon_{\text{ср}}}{\epsilon_{\text{ср}}} \right)_+ = (0,67 \pm 0,3) \cdot (80 - 20) = (40 \pm 17,5) \%.$$

Аналогично для отрицательных температур:

$$M(K_T)_- = 0,5 \% / ^\circ\text{C};$$

$$\delta(K_T)_- = 0,857 [(0,35)^2 \cdot (12 \cdot 10^{-2})^2 + (0,13)^2 \cdot (12 \cdot 10^{-2})^2 + (12 \cdot 10^{-2})^2 + (12,5 \cdot 10^{-2})^2 + (0,33)^2]^{1/2} = 0,3 \% / ^\circ\text{C}$$

$$\delta_T \left(\frac{\Delta \epsilon_{\text{ср}}}{\epsilon_{\text{ср}}} \right)_- = (0,5 \pm 0,3) \cdot (-60 - 20) = (40 \pm 24) \%.$$

Расчет погрешности, обусловленной влажностью

Так как воздействие влажности в данной схеме сказывается только на резисторах, уравнение погрешности $\epsilon_{\text{ср}}$ значительно упрощается:

$$\frac{\Delta \epsilon_{\text{ср}}}{\epsilon_{\text{ср}}} = 0,35 \frac{\Delta R_1}{R_1} + 0,13 \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3}.$$

Резисторы МЛТ имеют коэффициент влажности

$$K_{BR} = M(K_{BR}) \pm \delta(K_{BR}) = (1,5 \pm 4,5) \%.$$

По формуле (13) определяем систематическую составляющую погрешности влажности для времен. срабатывания мультивибратора:

$$M(K_g) = (0,35 + 0,13 + 1) \cdot 1,5 = 2,22 \%.$$

По формуле (14) определяем половину случайной погрешности, обусловленной влажностью для τ_{cp} :

$$\delta(k_g) = 0,857 \sqrt{(0,35^2 + 0,13^2 + 1) \cdot (4,5)^2} = 4,12\%$$

Погрешность влажности для τ_{cp} из выражения (15) равна:

$$k_g = (2,22 \pm 4,12) \%$$

Расчет погрешности старения

По техническим условиям на резисторы МЛТ величина их сопротивления после 2000 часов работы изменяется на $\pm 4\%$. Тогда для резисторов $K_{CR} = \pm 4/2000 = \pm 2 \cdot 10^{-3} \%$ /ч, $K_{CC_2} = (-3 \pm 3) \cdot 10^{-3} \%$ /ч. Параметры транзисторов меняются со временем мало.

По формуле (13) определяем

$$M(K_C) = A_{C_2} \cdot M(K_{C_2}) = -3 \cdot 10^{-3} \%/ч, \text{ так как } M(K_{C_R}) = 0.$$

По формуле (14)

$$\delta(k_C) = 0,857 \sqrt{(2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (0,35)^2 + (0,13)^2 + 1 + (3 \cdot 10^{-3})^2} = 3,22 \cdot 10^{-3} \%/ч.$$

Предельное отклонение τ_{cp} в результате старения за 1000 часов работы определяем из выражения (15):

$$\left(\frac{\Delta \tau_{cp}}{\tau_{cp}} \right) = (-3 \pm 3,22) \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 = (-3 \pm 3,22) \%$$

Расчет эксплуатационной погрешности

Максимальные пределы смещения среднего значения τ_{cp} определяются по формуле (19):

$$M \left(\frac{\Delta \tau_{cp}}{\tau_{cp}} \right) = \sum_{i=1}^n M_i \left(\frac{\Delta \tau_{cp}}{\tau_{cp}} \right) = 40 + 2,22 = 42,22\%$$

$$M(\Delta \tau_{cp} / \tau_{cp}) = -40 - 3 = -43\%$$

По формуле (20) определяем случайную составляющую эксплуатационной погрешности, подставляя максимальную температурную погрешность, которая в данном случае равна $\pm 24\%$:

$$\delta \left(\frac{\Delta \tau_{cp}}{\tau_{cp}} \right) = \sqrt{(19,5)^2 + 24^2 + (4,12)^2 + (3,22)^2} = 31,35\%$$

Приняв $\xi = 1,05$, по формуле (21) определим эксплуатационную погрешность:

$$J_{\xi} = 1,05 \cdot (42,22 + 31,35) \cdot 1,05 \cdot (-43 - 31,35) = (77 \dots 81,6)\%$$

Таким образом, время срабатывания мультивибратора может изменяться в процессе эксплуатации в диапазоне 0,23-1,85 мс при номинальном значении 1,02 мс.

Литература

1. Гехер К. Теория чувствительности и допусков электронных цепей. М., "Сов.радио", 1973.
2. А.В.Фомин, В.Ф.Борисов, В.В.Чермошенский. Допуски в РЭА. М., "Сов.радио", 1973.
3. А.В.Михайлов, С.К.Савин. Точность радиоэлектронных устройств. М., "Машиностроение", 1976.
4. А.В.Фомин, О.Н.Умрихин. Сборник задач по курсу "Теоретические основы конструирования, технологии и надежности микроэлектронной аппаратуры". М., изд. МАИ, 1978.

ОГЛАВЛЕНИЕ

I. Оценка технологичности конструкций изделия	3
I.1. Определение относительных частных показателей	4
I.2. Выбор базовых показателей и определение комплексного показателя технологичности конструкции	8
I.3. Нормативы показателей технологичности конструкции по классам РЭА и ЭВА	II
I.4. Порядок расчетов технологичности конструкции изделия	13
II. Расчет точности выходных параметров электронных устройств РЭА и ЭВА на этапе сборки	13
II.1. Исходные данные при анализе точности выходных параметров электронных устройств	14
II.2. Расчет точности выходных параметров электронных устройств при известных функциональных зависимостях между параметрами	14
II.2.1. Расчет конструкторской точности выходных параметров электронных устройств	15
II.2.2. Определение коэффициентов влияния	19
II.2.3. Определение точности выходных параметров в процессе эксплуатации. Расчет погрешностей, обусловленных старением, влиянием влажности, температуры	21
II.3. Содержание и оформление технологического раздела пояснительной записки дипломного проекта	27
II.4. Пример решения задачи анализа	28
Литература	33