

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции

И ордена Трудового Красного Знамени

Высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана.

А.П. КУЗИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Методические указания к лабораторным работам по курсу

«Технология приборостроения и производства ЭВА»

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции

И ордена Трудового Красного Знамени

Высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана.

А.П. КУЗИН

Утверждены

Редсоветом МВТУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Методические указания к лабораторным работам по курсу

«Технология приборостроения и производства ЭВА»

Под редакцией И.П. Бушминского

Данные методические указания издаются в соответствии с учебным планом.

Рассмотрены и одобрены кафедрой П-8 01.12.86 г., методической комиссией факультета П 17.12.86 г. И учебно-методическим управлением 07.01.87 г.

Рецензент к.т.н. доц. Чижов А.С.

© Московское высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

Содержание

Введение _____	3
Точность технологического процесса _____	3
Основные сведения о производственных погрешностях и точности технологического процесса _____	3
Постановка задачи анализа точности технологического процесса _____	8
Методика вычисления параметров математической модели технологической операции _____	13
Работа № 1. Анализ точности технологического процесса изготовления гибридных интегральных микросхем по показателям точности _____	15
Стабильность и устойчивость технологического процесса _____	18
Основные понятия о стабильности и устойчивости технологического процесса _____	18
Теоретическое представление условий возникновения производственных погрешностей параметров микроэлектронной аппаратуры _____	21
Методика проведения контроля и анализа стабильности технологического процесса статистическим методом _____	30
Работа № 2. Исследование стабильности технологического процесса производства микроэлектронной аппаратуры _____	33
Литература _____	36

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания посвящены вопросам моделирования технологических процессов производства микроэлектронной аппаратуры. Качество и надежность ее определяются в основном точностью и стабильностью технологического процесса, который носит характер группового и многооперационного. Разработка, модернизация и проведение этих процессов требуют применения математического моделирования на основе статических и теоретико-вероятностных методов исследования.

Пособие знакомит студентов, изучающих технологический курс, с основными практическими методами математического моделирования, анализа и контроля технологических процессов производства гибридных интегральных микросхем и микросборок, а также функциональных узлов на их основе, по критериям точности и стабильности параметров качества изделий; дает практический навык исследования статистических процессов и построения их вероятностных моделей.

Пособие содержит:

1. Изложение математико-статистических основ метода анализа и контроля технологических процессов, используемых в отечественной и зарубежной практике и необходимых при математическом моделировании.
2. Конкретную методику и порядок выполнения каждой работы, включенной в лабораторный практикум.

Указания предназначены для студентов дневного и вечернего факультетов всех специальностей, изучающих курсы «Технология приборостроения», «Технология производства ЭВА», «Технология производства радиоаппаратуры».

ТОЧНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Основные сведения о производственных погрешностях

И точности технологического процесса

Производство электронной аппаратуры и ее элементов является многоэтапным и сложным. Каждый технологический процесс или технологическая операция характеризуется влиянием большого числа неконтролируемых факторов: изменением свойств и исходных материалов, влажности и температуры среды, чистоты поверхностей, режимов обработки и т.п., которые носят в основном случайный характер. В результате параметры качества изделий приобретают некоторые отклонения от требуемых (номинальных) значений. Количественно это характеризуется величиной производственной погрешности параметра, равной разности между истинным значением параметра аппаратуры и его номинальным значением. Различают два вида производственных погрешностей – систематические и случайные.

Производственная погрешность носит случайный характер, если в ходе изготовления партии изделий отсутствует закономерность изменения факторов,

вызывающих ее. При этом, ни абсолютную величину, ни знак погрешности параметров заранее определить нельзя.

Систематические погрешности обычно делят на постоянные и закономерно изменяющейся. Если погрешности параметра качества изделий, входящих в партию, одинаковы, то производственную погрешность рассматривают как систематическую постоянную. Систематическую погрешность, изменяющуюся в процессе изготовления изделий по определенному закону, называют закономерно изменяющейся.

В реальных производственных условиях названные виды погрешностей проявляются, как правило, не в единственном числе, а в совокупности, поскольку на постоянные или закономерно изменяющейся факторы, вызывающие систематические погрешности, всегда накладывается действие большого числа случайных.

Основными факторами, вызывающими производственные погрешности параметров аппаратуры и ее элементов являются:

неточность работы оборудования, обусловленная в свою очередь погрешностями электрической, кинематической, оптической схем установок, с помощью которых изготавливаются изделия;

погрешности изготовления инструмента, его износ в процессе эксплуатации. Этот фактор часто является причиной, вызывающей закономерно изменяющейся во времени производственные погрешности;

неточности приспособлений и технологической оснастки, обусловленные в основном недостаточной их жесткостью, погрешностью в конфигурации и размерах, погрешностью установки на оборудовании;

неоднородность электрофизических, механических и прочих свойств материалов и заготовок изделий;

субъективные ошибки оператора при настройке оборудования и поддержании заданных режимов его работы, выполнении контрольных операций;

погрешности измерительных средств при контроле параметров качества изделий.

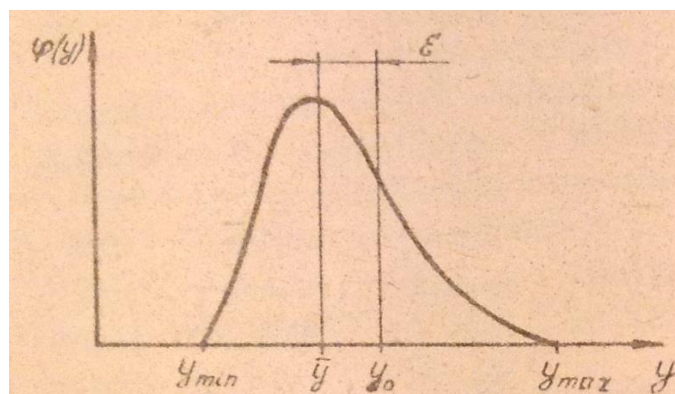


Рис. I.
Распределение производственных погрешностей параметра

качества изделия.

Случайные производственные погрешности характеризуются законами распределения и их качественными характеристиками. На рис.1 представлена функция плотности вероятности распределения производственных погрешностей некоторого параметра качества изделия. Y .

Интервал $(y_{min} \dots y_{max})$ является полем рассеяния, характеризующем случайную составляющую производственной погрешности.

Отклонение ϵ центра группирования погрешностей \bar{y} (среднего статистического значения) от номинала y_0 определяет систематическую составляющую производственной погрешности.

Абсолютные величины случайной и систематической составляющих производственной погрешности дают представление о точности технологического процесса изготовления – одного из важнейших показателей качества и надежности изделий.

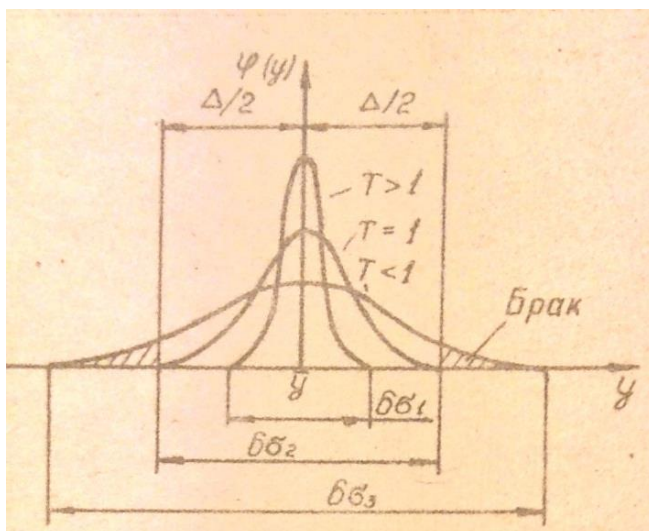
Точность технологического процесса – это степень соответствия фактических отклонений (погрешностей) параметра качества изделия заданным ограничениям на их значения, согласно чертежам, техническим условиям или другой документации на изделие. Количественно точность технологического процесса оценивается рядом показателей.

С точки зрения воздействия случайной составляющей производственной погрешности точность технологической операции (прогресса) часто оценивают коэффициентом точности

$$T = \frac{\Delta}{K \cdot \sigma} ,$$

(I)

где Δ - поле установленного допуска на параметр качества; σ - статистическое среднеквадратическое отклонение параметра качества изделий.



K - коэффициент, зависящий от типа закона распределения погрешностей параметра качества изделий. Для закона Гауса $K = 6$.

На рис. 2 изображены гауссовские распределения погрешностей параметра качества изделия Y при различных

поля рассеяния δ , заданном допуске Δ и центре группирования погрешностей, совпадающем с серединой поля допуска.

Очевидно, чем меньше величина T , тем ниже точность, т.е. тем больше брак.

Для оценки точности операции (прогресса) по систематической составляющей производственных погрешностей используют коэффициент смещения

$$E = \frac{\epsilon}{\Delta}, \quad (2)$$

Где $\epsilon = (\bar{y} - y_0)$.

На рис. 3 приведены распределения погрешностей параметра качества изделий, подчиняющихся гауссовскому закону.

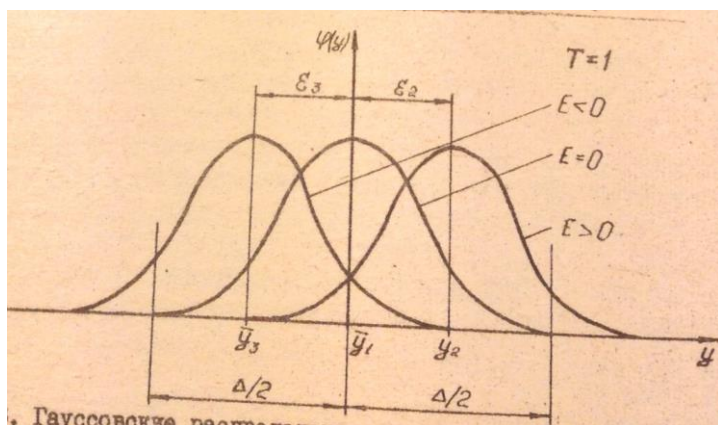


Рис. 3. Гауссовские распределения при различных коэффициентах смещения E

Очевидно, чем ближе к нулю коэффициент смещения E , тем меньше влияние систематических погрешностей, т.е. тем выше точность операции (процесса).

Одна из весьма распространенных оценок точности выполнения партии изделий – вероятность выхода годных изделий. Она носит также название «процент выхода годных» и определяется как площадь, ограниченная кривой распределения и границами установленного допуска на параметр качества изделия.

Все три показателя точности (процент выхода годных P , коэффициент точности T , коэффициент смещения E) взаимосвязаны. В общем случае $P = f(T, E)$. Для гауссовского закона распределения производственных погрешностей эта зависимость в графическом виде представлена на рис.4.

Показатели точности учитывают, не просто соотношение между полем допуска и полем расстояния производственных погрешностей эта зависимость в графическом виде представлена на рис. 4.

Показатели точности учитывают не просто соотношение между полем допуска и полем рассеяния производственных погрешностей, но и закон распределения последних, что с теоретической и практической точек зрения является важным обстоятельством. Знание закона распределения погрешностей, а не только границ поля их рассеяния, позволяют выявить физическую сущность технологического процесса, приводящего к данному распределению.

Имея такую информацию и опираясь на основные положения теории точности, можно решить ряд важных технических и производственных проблем: оценка точности технологического процесса изготовления электронной аппаратуры в целом или на отдельных операциях; оценка стабильности и устойчивости технологического процесса изготовления деталей и сборочных единиц электронной аппаратуры; выявлению видов источников и причин производственных погрешностей параметров качества аппаратуры; выявление степени и характера влияния различных производственных факторов на точность параметров качества изделий, стабильность (устойчивость) технологических процессов их изготовления; расчет и экономическое обоснование межоперационных допусков на параметры качества изделий; выбор технологического метода обеспечения функциональной точности аппаратуры; получение объективных данных для модернизации и проектирования новых образцов изделий; получение данных для оптимизации технологических процессов.

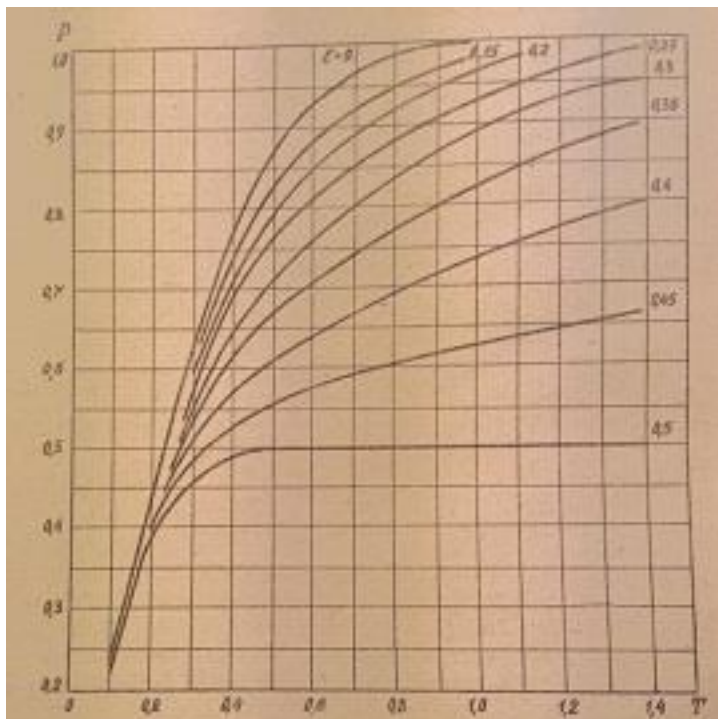


Рис. 4. Вероятность выхода годных изделий при гауссовском законе распределения погрешностей параметра качества

Постановка задачи анализа точности технологического процесса

Выше было сказано, что в любом технологическом процессе изготовления электронной аппаратуры действуют случайные факторы, вызывающие производственные погрешности выходных параметров аппаратуры. Очевидно, чем большее число операций

имеет процесс, тем больше случайных факторов. Несмотря на то, что изменения параметров аппаратуры за счет погрешностей на отдельных технологических операциях могут быть невелики, суммарный эффект их воздействия оказывается значительным. Причиной этому является не количественное изменение параметров, а уменьшение степени детерминированности связи между предметами до и после выполнения операций и увеличению степени случайности этой связи.

Для идеального технологического процесса (источники погрешностей отсутствуют) зависимость величины выходного параметра изделия (элемента, узла, аппаратуры) после каждой операции от значения параметра до операции выражались бы прямой линией, проходящей через начало координат и имеющей тангенс угла наклона к оси абсцисс, равный единице. На практике такая зависимость носит вероятностный характер, т.е. выходной параметр изделия после выполнения технологической операции является функцией случайного аргумента – значения параметра до операции. Поэтому она будет представлена в виде корреляционного поля, каждой точке которого соответствуют два значения выходного параметра изделия – до и после операции.

Результирующая погрешность выходного параметра изделия (погрешность на выходе технологического процесса) является комбинированной и отражает воздействие случайных факторов на всех операциях технологического процесса.

Задача анализа такой погрешности заключается не столько в ее количественной оценке, сколько в построении статистических моделей, отражающих процесс изменения погрешности при выполнении технологических операций. Построение такой модели дает возможность решать задачи анализа и синтеза технологического процесса по основному показателю качества изделия – точности выходных параметров, т.е. прогнозировать величину погрешности параметра для любой операции технологического процесса по заданной величине погрешности на ее входе и рассчитывать технологические операционные допуски.

Для проведения анализа формализуем технологический процесс, представив его в виде цепочки последовательных звеньев (рис. 5). Каждое звено будет формальным аналогом соответствующей технологической операции.

Пусть на входе i -го звена имеется функция распределения случайного параметра y изделия $\varphi_{i-1}(y)$. Звено также характеризуется некоторым оператором A_i , определяющим соответствие между функциями $\varphi_{i-1}(y)$ и $\varphi_i(y)$:

$$\varphi_i(y) = A_i \varphi_{i-1}(y).$$

Введем следующие обозначения:

y - значения параметра изделия до операции;

y' - значения параметра изделия после выполнения операции.

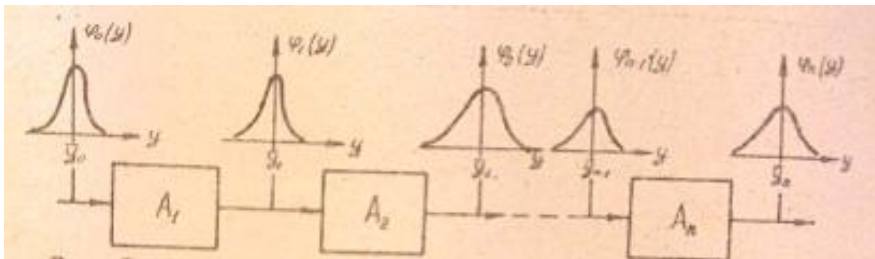


Рис. 5. Формализованное представление многооперационного технологического процесса.

Будем считать, что существует плотность вероятности величины y' .

Экспериментальные исследования производственных погрешностей параметров электронной аппаратуры показывают, что распределения в большинстве случаев соответствуют закону Гаусса. Тогда система 2х случайных величин Y и Y' будет описываться совместным гауссовским распределением с плотностью вероятности

$$\varphi(y, y') = \frac{\exp\left\{-\frac{1}{2(1-\tau^2)} \left[\frac{(y - M(y))^2}{\sigma^2(y)} - 2\tau \frac{(y - M(y))(y' - M(y'))}{\sigma(y)\sigma(y')} + \frac{(y' - M(y'))^2}{\sigma^2(y')} \right]\right\}}{2\pi\sigma(y)\sigma(y')\sqrt{1-\tau^2}} \quad (5)$$

Где $M(y), \sigma^2(y)$ - математические ожидания в дисперсии случайных величин Y и Y' соответственно; τ - коэффициент корреляции между случайными величинами Y и Y' .

Многомерное распределение Гаусса обладает тем свойством, что все его условные распределения также являются гауссовскими. Для случая двух случайных величин имеем

$$\varphi(y'/y) = \frac{\exp\left\{-\frac{[y' - M(y'/y)]^2}{2\sigma^2(y'/y)}\right\}}{\sqrt{2\pi(1-\tau^2)} \sigma(y')} \quad (6)$$

где $M(y'/y) = M(y') + \tau \frac{\sigma(y')}{\sigma(y)} [y - M(y)]$ условное математическое ожидание величины Y' ; $\sigma^2(y'/y) = \sigma^2(y')(1 - \tau^2) / \sigma^2(y)$.

Введем обозначения $b = \tau \sigma(y') / \sigma(y)$, $b_0 = M(y') - b M(y)$ (7)

и запишем выражение для $M(y'/y)$

$$y'(y) = b_0 + b_1 y.$$

(8)

Зависимость (8) представляет собой уравнение прямой на плоскости $y'oy'$, являющейся линией регрессии y' на y и показывающей, как в среднем будет изменяться значение параметра на выходе технологической операции при соответствующих значениях этой величины на входе. Таким образом, выражение (8) является математической моделью, отражающей процесс трансформации среднего значения параметра со входа на выход операции, а следовательно, и всего процесса. Однако для количественной оценки точности операции или процесса необходимо еще знать закономерность изменения дисперсии величины y' .

Ее можно установить, воспользовавшись выражениями (7) и $b^2(y'/y)$ из (6):

$$b^2(y') = b^2(y'/y) + b^2 b^2(y).$$

(9)

Физический смысл составляющих уравнения (9) заключается в следующем. Величина $b(y'/y)$ определяет среднеквадратичное отклонение погрешностей параметра собственно на данной операции, а $b b(y)$ - часть погрешности параметра изделия, переносимой со входа на выход операции. При этом b - коэффициент переноса погрешности.

Нетрудно показать, что

$$b^2(y'/y) = b^2(1 - r^2) b^2(y) / r^2.$$

(10)

Тогда уравнение (9) может быть представлено в более удобной для проведения расчетов вида

$$b^2(y') = b^2 b^2(y) / r^2.$$

(11)

Выражения (8) и (9) являются статистическими моделями технологической операции и отражают процесс изменения погрешности параметра изделия при выполнении операции. Входящие в это выражение величины $r, b, b_0, b(y), b(y'/y)$ представляют собой статистические параметры технологической операции. Значения их определяются по результатам статистического исследования партии изделий. За первичную (исходную) погрешность выходного параметра функционального узла примем его погрешность за счет производственного разброса параметров комплектующих элементов (компоненты, микросхемы, микросборки, электрорадиоэлементы). Тогда, зная статистические параметры и модели технологических операций, пределы изменения первичной погрешности выходного параметра изделия или допустимые пределы его

разброса в готовом изделии, можно определить величину ожидаемого разброса этого параметра для любой операции технологического процесса. Покажем это.

Предел изменения первичной погрешности выходного параметра задается интервалом расстояния $(y_{min} \dots y_{max})_0$. Величины $b_0(y)$ и $M_0(y)$, которые существенно зависят от вида закона распределения первичной погрешности, определяются так:

$$\begin{aligned} M_0(y) &= 0,5[(y_{max} + y_{min})_0 - \alpha(y_{max} - y_{min})_0], \\ b_0(y) &= k(y_{max} - y_{min})/6, \end{aligned} \quad (12)$$

Где α, k - относительные коэффициенты асимметрии и рассеяния закона распределения соответственно.

Значение коэффициентов α и k для некоторых законов распределения приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Относительные коэффициенты законов распределения

Закон распределения	Коэффициенты	
	α	k
Гаусса	0	1
Максвелла	- 0.28	1.14
Равной вероятности	0	1.73
Симпсона	0	1.22

Найденные значения $M_0(y)$ и $b_0(y)$ могут быть с помощью математических моделей (8), (9) трансформированы в соответствующие характеристики $M_i(y)$ и $b_i(y)$ для любой i - й операции являются входными для $(i + 1)$ -й операции в соответствии с формализованным представлением многооперационного технологического процесса.

При гауссовском законе распределения в отсутствии систематической составляющей производственной составляющей производственных погрешностей выходного параметра пределы ожидаемого разброса параметра после выполнения i - й операции технологического процесса рассчитываются по формуле

$$(y_{max} \dots y_{min})_i = M_i(y) \pm 3\sigma_i(y).$$

(13)

Используя выражения (8) – (13), можно провести расчет операционных технологических допусков. При этом исходной информацией являются статистические характеристики данной операции и величина технологического допуска последующей (по ходу выполнения технологического процесса). Допустимый предел разброса выходного параметра в готовом изделии является технологическим допуском для заключительной операции технологического процесса.

С учетом сказанного нетрудно показать, что допуск на предшествующую операцию будет равен

$$(y_{max} \dots y_{min})_{i-1} = \frac{M_i(y) - \beta_{0i} \pm \tau_i \Delta_i(y)}{\beta_i}.$$

(14)

При гауссовском законе распределения погрешностей

$$\Delta_i(y) = 0,5(y_{max} - y_{min})_i.$$

(15)

Методика вычисления параметров математической модели

Технологической операции

Пусть имеется n пар значений параметра устройства (y_i, y'_i) полученных в результате статистического исследования всех операций технологического процесса. Совокупности значений каждой из величин Y и Y' образуют соответствующие статистические ряды.

Для определения значений параметров математической модели (коэффициентов уравнения регрессии) технологической операции применим метод наименьших квадратов.

В результате для статистических рядов Y и Y' получаем оценки:

а) средних значений

$$M(y) = \sum_{i=1}^n y_i / n; \quad M(y') = \sum_{i=1}^n y'_i / n;$$

(16)

б) дисперсий

$$\sigma^2(y) = \sigma_y^2 / (n-1); \quad \sigma^2(y') = \sigma_{y'}^2 / (n-1);$$

(17)

в) коэффициента корреляции

$$r = a_{yy'} / \sqrt{a_y a_{y'}};$$

(18)

г) коэффициентов уравнения регрессии (8)

$$b = a_{yy'} / a_y; \quad b_0 = M(y') - b M(y);$$

(19)

где

$$a_y = \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2 / n; \quad a_{y'} = \sum_{i=1}^n (y'_i)^2 - (\sum_{i=1}^n y'_i)^2 / n; \quad a_{yy'} = \sum_{i=1}^n (yy'_i) - (\sum_{i=1}^n y) \cdot (\sum_{i=1}^n y'_i) / n;$$

(20)

Значимость каждого коэффициента регрессии проверяется по t - критерию Стьюдента

$$\hat{t} = |b| / b_{\delta} \geq t_{(n-2, \rho)}$$

где b_{δ} оценки коэффициентов регрессии b_1 и b_0 , полученные по (19);

$$b_{\delta} = \sqrt{\frac{a_y - b a_{yy'}}{a_y (n-2)}}, \quad b_{\delta_0} = b_{\delta} \sqrt{\frac{a_y}{n} + M^2(y)}$$

(21)

$t_{(n-2, \rho)}$ - табличное значение критерия при числе степеней свободы $\nu = n-2$ и уровне значимости ρ .

Проверку наличия корреляции выполняют также по критерию Стьюдента

$$\hat{t} = |r| \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \geq t_{(n-2, \rho)}$$

(22)

Если это условие выполняется, то корреляционная связь между случайными величинами Y и Y' существует.

Для проверки значимости уравнения регрессии в целом используют F -критерий Фишера. В этом случае общую дисперсию $b^2(y')$ сравнивают с остаточной $b_{ост}^2(y')$,

которая является показателем ошибки предсказания уравнением регрессии результатов опытов. Проверку осуществляют по формуле

$$F = \frac{\sigma^2(y')}{\sigma_{\text{ост}}^2(y')} \geq F(\nu_1, \nu_2, \rho),$$

где $\nu_1 = n - 1$, $\nu_2 = n - 2$ - степени свободы соответственно для $\sigma^2(y')$ и $\sigma_{\text{ост}}^2(y')$; $F(\nu_1, \nu_2, \rho)$ - табличное значение критерия Фишера [2].

Уравнение регрессии статистически значимо при выполнении условия (23) для установленного уровня ρ .

Вычисление остаточной дисперсии $\sigma_{\text{ост}}^2(y')$ проводят по формуле

$$\sigma_{\text{ост}}^2(y') = \sum_{i=1}^n (y_i' - \hat{y}_i')^2 / (n - 2),$$

$$\hat{y}_i' = b_0 + b_1 y_i.$$

(24)

. Работа № 1. Анализ точности технологического процесса изготовления гибридных интегральных микросхем по показателям точности.

Цель работы – изучение методики и проведение анализа точности технологического процесса производства микросхем и микросборок.

В процессе выполнения работы решаются следующие задачи:

ознакомление с классификацией производственных погрешностей и основными факторами, вызывающими их;

изучение показателей оценки точности изготовления электронной аппаратуры;

постановка задачи анализа многооперационного технологического процесса;

изучение методик построения математических моделей технологических операций и определения операционных технологических допусков на основе статистических данных по параметрам качества изделий.

Содержание и порядок выполнения работы

1. Ознакомится с теоретическими сведениями, методикой получения математической модели технологических операций, а также с лабораторной установкой.
2. Произвести измерение электрического параметра изделий в партии после операции установки и монтажа компонентов, сформировать статистический ряд

У

3. Провести измерение электрического параметра изделий в той же партии после заключительной операции технологической тренировки, оформить статистический ряд Y' .
4. Вычислить статистические характеристики электрического параметра изделия для указанных операций технологического процесса и коэффициенты уравнения регрессии. Для этого последовательно определить значения величин по формулам (16)-(19).
5. Провести оценку статистической значимости коэффициентов регрессии, коэффициента корреляции и уравнения регрессии в целом, используя выражения (20)-(24) и табл. 2, 3.

Таблица 2.

Значения t - распределения Стьюдента.

α	Вероятность $P(t \geq t_r)$				
	0,25	0,1	2,05	0,025	0,01
	1,17	1,70	2,05	2,37	2,76
	1,17	1,70	2,04	2,36	2,76
	1,17	1,70	2,02	2,36	2,75
	1,17	1,68	2,02	2,33	2,70

Таблица 3

Значения F - критерия Фишера

δ_2	δ_1		
	24	30	40
	при $\rho = 5\%$		
28	1,9147	1,8687	1,8203
29	1,9005	1,8543	1,8055
30	1,8874	1,8409	1,7918
40	1,7929	1,7444	1,6928
	при $\rho = 10\%$		

28	1,6560	1,6252	1,5929
29	1,6465	1,6155	1,5825
30	1,6377	1,6065	1,5732
40	1,5741	1,5411	1,5056


6. По заданному допуску на выходной параметр готового изделия рассчитать операционные технологические допуски по выражению (14).
7. Провести количественную оценку точности технологического процесса, вычислив показатели точности по (1) и (2) и определив вероятность выхода годных для технологического процесса.
8. Пп. 4, 5 выполняются на ЭВМ. Величина допуска на выходной параметр и уровень значимости задаются преподавателем.

Содержание отчета

1. Название работы и ее цель.
2. Формализованное представление многооперационного технологического процесса и математические модели технологических операций /см. формулы (8), (9)/.
3. Результаты измерений электрического параметра и их статистической обработки, проверки статистической значимости коэффициентов регрессии, корреляции и уравнения регрессии в целом.
4. Статистическая модель технологической операции получена на основе экспериментальных знаний.
5. Формулы и расчеты операционных технологических допусков.
6. Результаты оценки качества технологического процесса по показателям точности (1), (2) и вероятности выхода данных.
7. Выводы по проведенному анализу технологического процесса.

Описание лабораторной установки

В лабораторных условиях невозможно провести анализ всего технологического процесса изготовления одной партии изделия. Поэтому исследования в данной работе проводятся для двух одинаковых партий гибридных интегральных микросхем объемом 40 штук каждая. Первая партия соответствует окончанию операций установки и монтажа компонентов, вторая – окончанию операции технологической тренировки.

В обеих партиях микросхемы подобраны так, что электрические параметры компонентов элементов у соответствующих -х микросхем из каждой партии до

выполнения указанных операций технологического процесса имели близкие значения. Тем самым достигается идентичность партии микросхем в исходном состоянии (перед выполнением операций), и если бы технологический процесс не вносил погрешностей, то математическое ожидание и дисперсия выходного параметра микросхем для двух партий были бы одинаковыми. Такой подход дает возможность рассматривать эти партии как одну на разных стадиях технологического процесса.

Лабораторная установка включает в себя макет и прибор для измерения выходного параметра микросхем, в качестве которого рассматривается электрическое сопротивление.

Макет состоит из двух плат (А и В) с установленными на них микросхемами. На плате А размещена партия микросхем, прошедших операции сборки, а на плате В – партия микросхем после операции технологической тренировки. На платах микросхемы разбиты на четыре группы по десять штук в каждой.

Для каждой платы предусмотрены элементы коммутации (переключатели групп микросхем с положениями I-IV и переключатели микросхем внутри групп с положениями 1-10). Подключение выхода микросхем к измерительному прибору производится следующим образом: в каждом из положений I-IV группового переключателя поочередно устанавливаются положения 1-10 переключателя микросхем в группе. Величина выходного параметра определяется по показанию измерительного прибора, который подключен к выходным клеммам макета.

СТАБИЛЬНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА.

Основные понятия о стабильности и устойчивости

технологического процесса и их оценка

Технологический процесс производства электронной аппаратуры представляет собой определенную систему взаимодействующих факторов, влияющих на параметры качества изделий.

В общем случае система факторов не остается неизменной во времени. Поэтому анализ технологического процесса только по показателям точности может оказаться недостаточно точным ввиду того, что в нем не учитывается фактор времени. В связи с этим рассматриваются понятия и проводятся исследования устойчивости и стабильности технологического процесса.

Устойчивостью технологического процесса называют его свойство сохранять точность параметров качества изделий во времени, а стабильностью – его свойство сохранять постоянным во времени параметры и закон распределения погрешностей параметров качества изделия.

Стабильность технологического процесса является более общим понятием, поскольку общий технологический процесс в ряде случаев может быть и нестабильным. Процесс нельзя считать стабильным, если незначительность отклонений параметров закона распределения погрешностей достигается за счет периодической подстройки процесса.

Оценка стабильности технологического процесса осуществляется выборочным методом. При этом используются текущие выборки, извлекаемые по ходу выполнения технологического процесса и дающие мгновенные распределения.

Мгновенным распределением $\varphi_t(x)$ называется распределение значений случайной величины x за такой малый отрезок времени, в течение которого воздействие всех внешних факторов остается неизменным. Примером мгновенного распределения является распределение отдельных параметров интегральных элементов, полученных на общей подложке за один технологический цикл на данной установке.

Распределение производственных погрешностей параметров качества одной или нескольких партий изделия, выпущенных за некоторый сравнительно большой промежуток времени Δt , представляет собой полное или суммарное распределение. Примером такого распределения может служить распределение параметров элементов интегральных микросхем, полученных за несколько технологических циклов в относительно большой календарный период (смену, неделю, месяц и т.д.).

Такое представление о распределениях до некоторой степени является условным, поскольку в зависимости от задачи исследования технологического процесса рассматриваемому определению можно придать смысл мгновенного или полного.

При нестабильном технологическом процессе полное распределение как по числовым характеристикам, так и по форме закона распределения отличается от мгновенного из-за воздействия различных факторов, меняющихся во времени и преобразующих мгновенное распределение.

На практике стабильность технологических процессов оценивается с помощью контрольных карт или точностных диаграмм.

В первом случае оценка носит приближенный характер. Более точное представление о стабильности процесса дает его точностная диаграмма.

Строится точностная диаграмма в прямоугольных координатах: ось абсцисс – время, ось ординат – значения статистических характеристик мгновенных распределений параметра качества x (среднее, стандартное отклонение после рассеяния). При этом предполагается, что за рассматриваемый промежуток времени Δt вид закона мгновенного распределения не меняется.

На оси абсцисс могут также отмечаться номера выборок. От линии изменения средних значений параметра откладывается вверх и вниз отрезки, равные по величине среднему квадратическому отклонению, а через концы этих отрезков проводятся соответствующие линии обл между которыми штрихуется.

На рис.6 представлена точностная диаграмма технологического процесса, для которого изменения средних среднеквадратических отклонений и полей рассеяния мгновенных распределений в интервале времени $\Delta t = t_2 - t_1$ соответствует линейному закону.

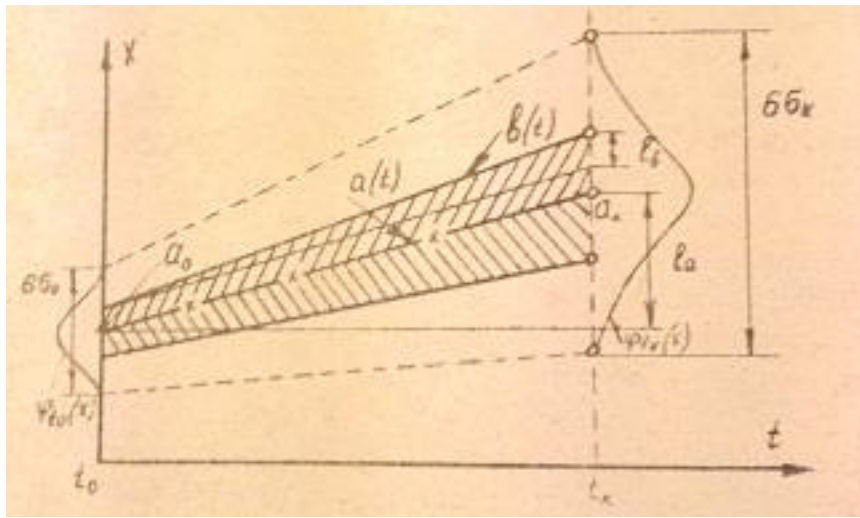


Рис. 6. Точностная диаграмма технологического процесса: $a(t)$ - линия изменения среднего значения параметра качества; $b(t)$ - линия изменения среднего квадратического отклонения; $f_{L_0}(x)$ $f_{L_x}(x)$ - мгновенные распределения; a_0, a_x - центр группирования погрешностей в мгновенных распределениях, t_0 t_x - начальное и конечное значения элемента, ----- границы изменения полей расстояния погрешностей.

Количественно стабильность технологического процесса оценивается следующим соотношением:

$$\lambda_a = 0.5 \sigma_a / b_0 ; \lambda_b = 0.5 \sigma_b / b_0$$

где L_a - диапазон изменения функции смещения средних параметров качества за время Δt ;

L_b - диапазон изменения функции смещения среднеквадратических отклонений параметра качества за время Δt ;

b_0 - среднеквадратическое отклонение параметра качества в начальный момент времени t_0 .

При стабильном технологическом процессе $\lambda_a = \lambda_b = 0$.

По виду точностной диаграммы и типу закона полраспределения можно судить о состоянии анализируемого процесса и выявить дестабилизирующие факторы и причины. Для этого необходимо знать теоретическую схему, по которой возникает рассеяние значений случайной величины X и которая тем самым отображает реальную сущность исследуемого технологического процесса.

Теоретическое представление условий возникновения

Производственных погрешностей и параметров микроэлектронной аппаратуры.

Наиболее распространенной теоретической схемой возникновения производственных погрешностей является схема, согласно которой погрешность параметра качества изделия представляется в общем случае суммой значительного числа случайных и неслучайных частных погрешностей (слагаемых). В зависимости от структуры суммы и свойств ее слагаемых эта схема имеет множество разновидностей, основными из которых являются следующие.

1. Сумма случайных слагаемых, число и характеристики распределения которых не зависят от времени и факторов технологического процесса. Здесь слагаемые взаимонезависимы или слабозависимы, среди них нет резко доминирующих, а их число может быть сколь угодно большим. Это соответствует выполнению условий центральной предельной теоремы, следовательно, гауссовскому закону распределения производственных погрешностей параметра качества изделия.

Технологический процесс, подчиняющийся данной разновидности схемы имеет теоретическую точностную диаграмму (рис. 7). Полное распределение

параметра качества изделия $\varphi_{\Sigma}(x)$ за время от t_0 до t_k подчиняется закону Гаусса. Это говорит о высоком качестве данного технологического процесса.

2. Сумма, в которую кроме случайных слагаемых y_c входит одно или группа неслучайных слагаемых, число или значения которых закономерно изменяются во времени или в зависимости от некоторого другого аргумента t , т.е.

$$x_t = \sum_{i=1}^n y_{ci} + C(t)$$

где $C(t)=f(t)$ сумма неслучайных слагаемых, соответствующих определенному значению аргумента t . При этом мгновенные распределения случайной величины x_t для каждого конкретного значения t , будут гауссовскими с параметрами a_t, σ_t в силу выполнения условий центральной предельной теоремы, где a_t, σ_t - значения среднего и среднеквадратического для гауссовского распределения суммы случайных слагаемых y_c .

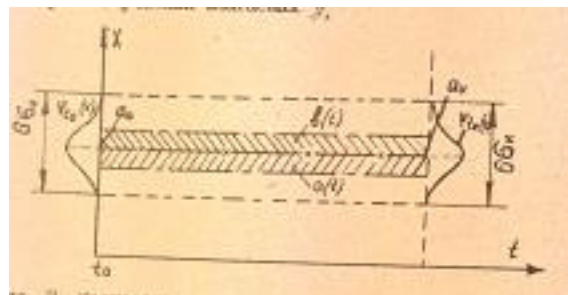


Рис.7. Точностная диаграмма технологического процесса при гауссовском законе полного распределения погрешностей.

В целом же для суммы (25) условия предельной центральной теоремы не выполняются, что приводит к отличию полного распределения случайной величины x_t от гауссовского. Аналитическое выражение полного распределения для данной схемы имеет вид

$$\varphi_{\Sigma}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{dt}{da} \right| \exp \left\{ -\frac{[x - (a_0 + c_t)]^2}{2\sigma_0^2} \right\}$$

где $\left| \frac{dt}{da} \right|$ - модуль производной функции $t(a)$, обратной функции $a(t)$ и влияние неслучайного слагаемого $C(t)$ в сравнении с группой случайных слагаемых λ в сумме (25).

На рис. 8 изображены семейства распределений $\varphi_{\Sigma}(x)$ для различных функций $a(t)$, а на рис. 9 – соответствующие им точностные диаграммы технологических процессов, влияние $C(t)$ оценивается здесь относительным параметром λ_a .

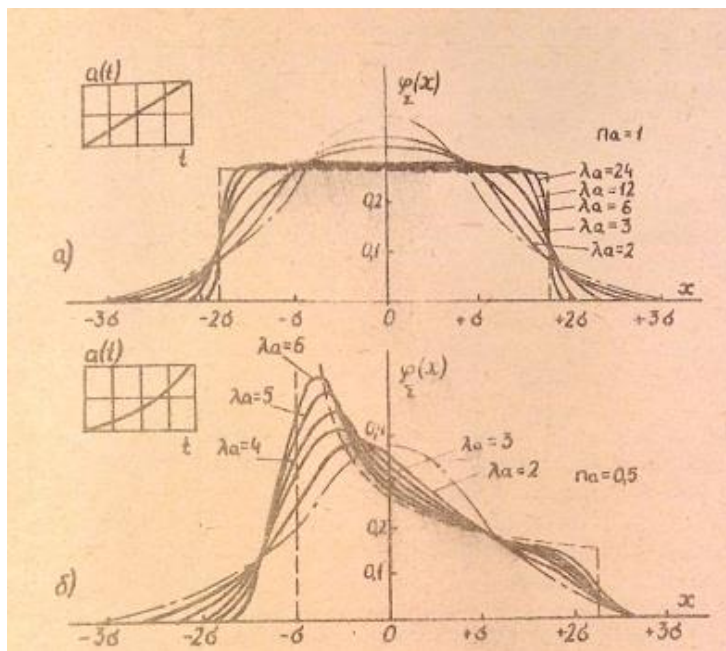


Рис. 8. Полные распределения погрешностей параметра качества изделий при различных функциях $a(t)$: λ_a - показатель степени функции $a(t)$; _____ - _____ гауссовское распределение, - - - - - предельный закон распределения.

При линейной функции $a(t)$ все кривые $\varphi_{\Sigma}(x)$ симметричны (рис. 8). Причем, при увеличении значения λ_a полное распределение стремится к закону явной вероятности, а при уменьшении λ_a - к гауссовскому закону. В первом случае имеет место пренебрежимо малое влияние случайных слагаемых, а во втором – неслучайных

слагаемых. По существу полное распределение для рассматриваемой суммы является композицией гауссовского закона и закона явной вероятности.

Для ускоренно возрастающей функции $a(t)$ композиционные распределения являются ассиметричными (рис 8б), и в пределе, когда влияние $\sum Y_i$ по сравнению с C_t пренебрежимо мало ($\sigma_0 \rightarrow 0$), полное распределение стремится к закону ускоренно возрастающей вероятности.

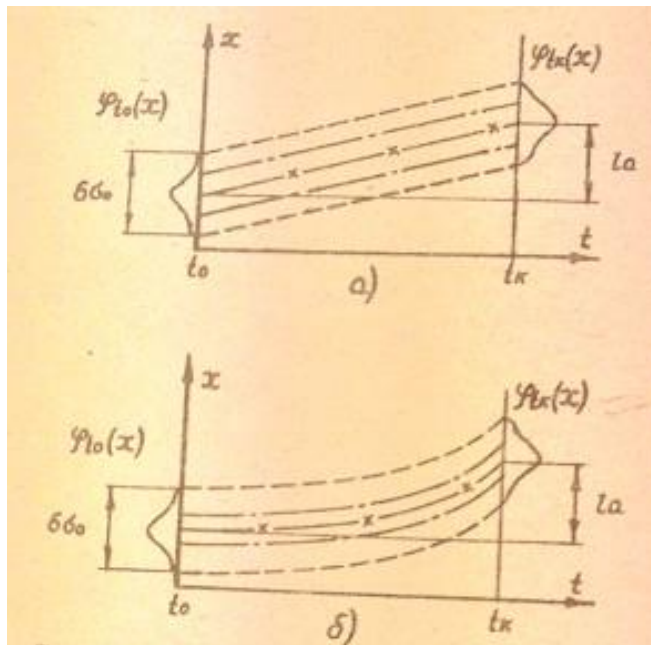


Рис. 9. Точностные диаграммы технологических процессов при линейной (а) и ускоренно возрастающей (б) функции $a(t)$

Рассмотренная схема суммы случайных и неслучайных слагаемых и соответствующие полные распределения часто встречаются в технологии гибридных интегральных микросхем. Так, погрешности параметров качества тонкопленочных конденсаторов и резисторов распределяются по законам, близким изображенным на рис. 8а; распределения погрешностей толщины тонких пленок в партии (при условии равномерного распределения толщины пленок по поверхности отдельно взятых подложек) аналогичны рис. 8б.

- Сумма, состоящая из двух групп случайных слагаемых, из которых первая удовлетворяет условиям центральной предельной теоремы, а вторая – следующему условию: число слагаемых (или значения параметров их рассеяния) изменяется в зависимости от значения некоторого аргумента t , а средние значения остаются неизменными, т.е.

$$X(t) = \sum_{i=1}^n Y_i + \sum_{s=1}^{S(t)} Y_s(t).$$

(29)

Для этой схемы мгновенные распределения подчиняются гауссовскому закону с параметрами $a_t = a_0 + C_t$ и σ_t , а полное распределение определяется так:

$$\varphi_{\Sigma}(x) = \frac{1}{t_K - t_0} \int_{t_0}^{t_K} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma(t)} \exp\left\{-\frac{[x - (a_0 + C_t)]^2}{2\sigma^2(t)}\right\} dt. \quad (30)$$

Формы кривых полного распределения (30) отличаются большим разнообразием, что определяется совместным влиянием всех групп слагаемых и видами функций $a(t)$ и $\sigma(t)$.

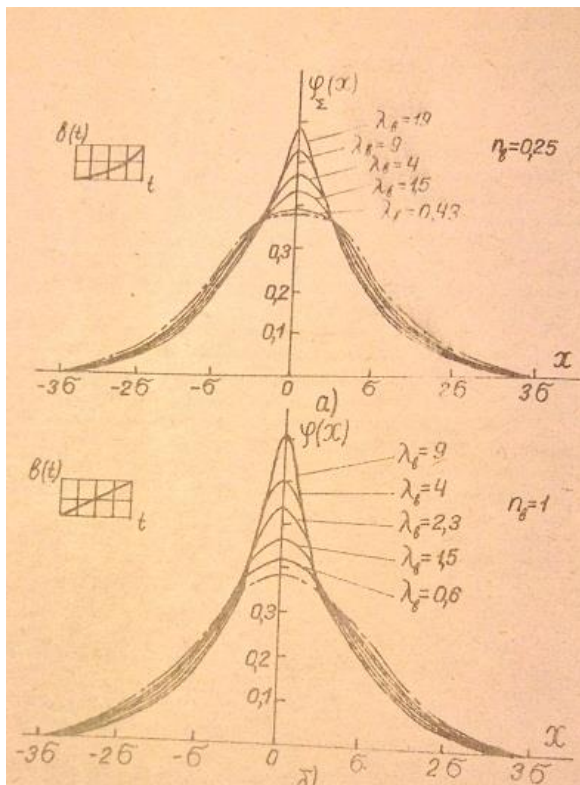


Рис. 10. Полные распределения при различных функциях $\sigma(t)$; n_g - показатель степени функции $\sigma(t)$; _____ - гауссовское распределение

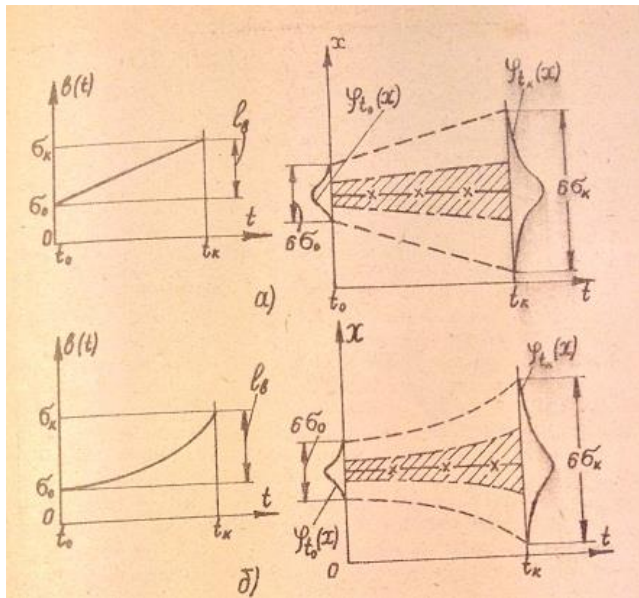
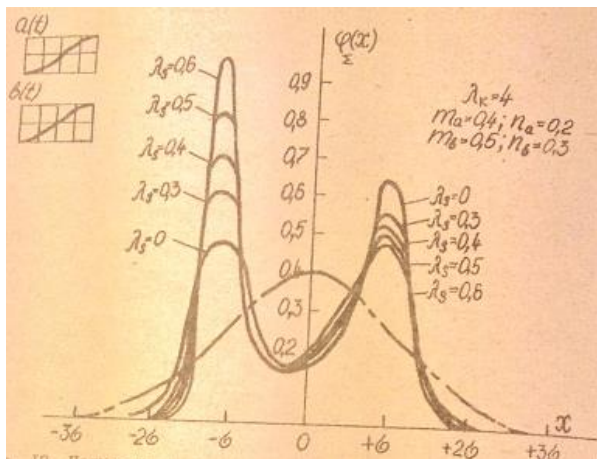


Рис. 11. Точностные диаграммы технологических процессов при различных функциях $b(t)$.

На рис. 12 изображены кривые полных распределений для нелинейных функций $a(t)$ и $b(t)$, имеющих точки перегиба. Соответствующая точностная программа представлена на рис.13. Для удобства здесь вместо параметров λ_a и λ_b введены соответственно параметры

$$\lambda_a = 0,5 l_a / \sigma_{cp}, \quad \lambda_b = 0,5 l_b / \sigma_{cp}, \quad \sigma_{cp} = 0,5 [b_{max}(t) + b_{min}(t)].$$

Такая схема возникновения производственных погрешностей характерна для технологического процесса горячего лужения плат интегральных схем (распределение высоты слоя полуды).



Полные распределения при нелинейных функциях $a(t)$ и $b(t)$ с точками перегиба; _____ - гауссовское распределение, n_a и n_b показатели степени функций $a(t)$ и $b(t)$ соответственно; m_a и m_b абсциссы точек перегиба в функциях $a(t)$ и $b(t)$ соответственно

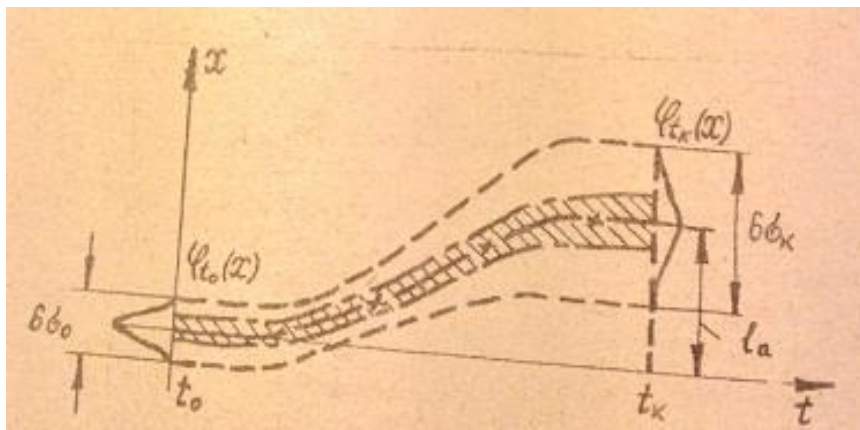


Рис. 13. Точностная диаграмма технологического процесса при нелинейных функциях $a(t)$ и $b(t)$ с точками перегиба

5. Сумма, образованная только случайными слагаемыми y_k , но среди которых есть одно резко доминирующее слагаемое y_k .

В этом случае полным законом распределения погрешностей будет композиция гауссовского распределения случайной величины и некоторого распределения случайной величины

$$\varphi_{\Sigma}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_1(y_k) \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_0} \exp\left\{-\frac{[x - (y_k + a_0)]^2}{2\sigma_0^2}\right\} dy_k \quad (31)$$

где $\varphi_1(y_k)$ - плотность вероятности распределения случайной величины y_k .

Вид кривой распределения $\varphi_{\Sigma}(x)$ зависит от характера закона распределения $\varphi_1(y_k)$. Если доминирующее слагаемое распределено по закону Гауса, то полное распределение тоже гауссовское.

Кроме рассмотренных пяти схем возможны более сложные схемы возникновения производственных погрешностей, для которых случайная величина является функцией одной или нескольких случайных величин, образованных, в свою очередь, по схеме суммы. Такие случаи связаны, например, с наличием погрешностей измерения параметров качества на контрольно-разбраковочных операциях в производстве гибридных интегральных микросхем и микросборок.

Следует отметить, что всегда отклонение распределений производственных погрешностей параметров качества изделий от гауссовского означает нарушение одного из условий центральной предельной теоремы и делает необходимым анализ точности и стабильности технологических процессов с целью установления причин этого нарушения.

Рекомендуется следующий порядок анализа стабильности технологического процесса:

1. Сбор статистического материала, представляющего собой совокупность измерений параметров качества изделий за определенный период времени.
2. Обработка статистического материала с целью получения полного распределения погрешностей параметра качества и точностной диаграммы процесса.
3. По виду полного распределения и точностной диаграммы принимается гипотеза об определенной теоретической схеме возникновения производственных погрешностей в данном технологическом процессе.
4. Анализ физико-технологической сущности процесса и проведение при необходимости дополнительных экспериментов для подтверждения принятой гипотезы и определения факторов, обуславливающих данную теоретическую схему.
5. Выработка рекомендаций к изменению технологического процесса с целью повышения точности и стабильности процесса.
6. Анализ и контроль в течение определенного периода времени для подтверждения эффективности модернизаций.

Методика проведения контроля и анализа стабильности

Технологического процесса статистическим методом

При серийном и массовом производстве электронной аппаратуры необходимо систематически вести оценку стабильности и устойчивости технологических процессов. Материалом для анализа стабильности технологического процесса могут служить те же статистические данные. Что и для анализа точности. Однако они должны быть результатом непрерывных наблюдений в течение большого промежутка времени (месяц, неделя, сутки, смена) или составлены из выборок, извлеченных через определенные фиксированные промежутки времени (час, доли часа). В первом случае исследователь будет располагать достаточно обширным статистическим материалом, порядка нескольких сотен опытов (наблюдений). Во втором случае объем собранного материала будет весьма ограничен – несколько десятков наблюдений, но при этом затраты на проведение контроля и анализа технологического процесса значительно снижаются, а при соответствующей обработке ограниченного статистического материала могут быть получены необходимые сведения. Поэтому в производственных условиях предпочтительным является использование выборок.

Оценки генеральных характеристик (математическое ожидание, дисперсия) случайной величины, полученные на основе выборок, называются точечными оценками. Полученная информация используется для построения точностной диаграммы технологического процесса.

Построенная таким образом точностная диаграмма будет иметь приближенный характер, поскольку при малом числе наблюдений точечная оценка в значительной мере случайна и колеблется от выборки к выборке. Замена генеральной характеристики ее оценкой в этом случае может привести к большим ошибкам, что даст неправильное представление о качестве технологического процесса. Поэтому для каждой статистической характеристики, вычисленной по результатам выборки, следует знать точность и надежность оценки. Для этого строится доверительный интервал при заданной достоверности (доверительной вероятности или надежности).

Обычно достоверность, которую обозначим через β , выбирается близкой к единице (0,9; 0,95; 0,99). Достоверность – это вероятность того, что оцениваемый параметр лежит между доверительными границами. Доверительный интервал рассматривается как интервал значений случайной величины, совместимых с опытными данными и не противоречащими им. При этом величины вероятности и доверительных границ взаимосвязаны.

Рассмотрим вопрос построения доверительных интервалов числовых параметров случайной величины, распределенной по гауссовскому закону.

Постановка задачи

Над случайной величиной X произведено n независимых опытов и получены точечные оценки параметров закона распределения

$$\tilde{m} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad \tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{m})^2}{n}}$$

(32)

Требуется построить доверительные интервалы для обоих параметров, соответствующие заданной доверительной вероятности β .

Построение доверительного интервала для математического ожидания

Будем рассматривать такой доверительный материал, границы которого симметричны относительно оценки \tilde{m} . Обозначим половину длины интервала через ε_β . Величина ε_β должна быть такой, чтобы выполнялось условие

$$P = (|\tilde{m} - M(x)| < \varepsilon_\beta) = \beta,$$

где $M(x)$ - математическое ожидание генеральной совокупности.

Согласно теории вероятностей и математической статистике, величина

ε_β находится по выражению

$$\varepsilon_\beta = t_\beta \tilde{\sigma} / \sqrt{n} \quad (33)$$

Значение параметра t_β , входящего в (33), зависит от доверительной вероятности β и числа степеней свободы $\nu = n - 1$ и определяется по таблице [3].

Искомый доверительный интервал с центром в случайной точке \tilde{m} .

$$(\tilde{m} - t_\beta \tilde{\sigma} / \sqrt{n} ; \tilde{m} + t_\beta \tilde{\sigma} / \sqrt{n}).$$

Построение доверительного интервала для среднего квадратического отклонения

Обозначим границы данного интервала через b_1 и b_2 ($b_1 < b_2$). Требуется найти эти границы из условия

$$P(b_1 < \sigma(x) < b_2) = \beta, \quad (35)$$

где $\sigma(x)$ - среднее квадратическое генеральной совокупности. Чтобы построить доверительный интервал для среднего квадратического отклонения, представим (35) как разность вероятностей событий

$$b_1 < \sigma(x) < b_2 \text{ и } b_1 < \sigma(x) > b_2, \text{ т.е. } P(b_1 < \sigma(x) < b_2) = P_2 - P_1, \text{ где } P_2 = 0,5(1 + \beta), P_1 = 0,5(1 - \beta)$$

Каждой из вероятностей P_1 и P_2 ставятся в соответствие значения величины χ^2

$$\chi_{P_1}^2 = (n-1)\tilde{\sigma}^2 / b_1^2, \quad \chi_{P_2}^2 = (n-1)\tilde{\sigma}^2 / b_2^2, \quad (36)$$

которые оцениваются по таблице [3]. Для числа степеней свободы в соответствующей строке таблицы находится два значения χ^2 : одно для вероятности P_1 , другое - для P_2 . Далее из выражений (36) нетрудно вычислить

значения границ σ_1 и σ_2 . Таким образом, получим искомый доверительный интервал

$$(\sqrt{(n-1)\tilde{\sigma}^2/\chi_1^2}, \sqrt{(n-1)\tilde{\sigma}^2/\chi_2^2}). \quad (37)$$

С использованием полученных данных можно построить точностную диаграмму технологического процесса, которая называется диаграммой доверительных интервалов (рис.14). Для этого по оси абсцисс откладывают номера выборок (или моменты времени), а по оси ординат – значения среднего и среднего квадратического отклонений в выборках. Кроме того, на диаграмму наносятся доверительные границы соответственно для математического ожидания и среднего квадратического отклонения, через которые проводятся параллельно оси абсцисс линии. Доверительная обл затем штрихуется.

Диаграмма доверительных интервалов дает возможность составить более точное суждение об изменениях центра группирования и параметрах рассеяния технологического процесса. Так, если смежные доверительные интервалы не перекрываются, можно с достаточным основанием говорить о наличии изменений центра настройки или рассеивания.

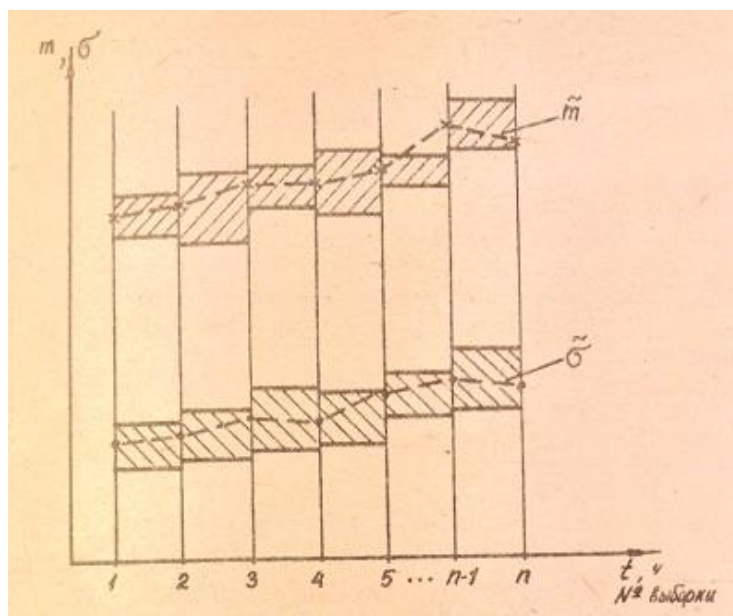


Рис. 14. Диаграмма доверительных интервалов

Работа № 2. Исследование стабильности технологического процесса производства микроселектронной аппаратуры

Цель работы – получение практических навыков по проведению контроля и анализа стабильности технологического процесса производства электронной аппаратуры.

В процессе выполнения работы студенты решают следующие задачи:

Изучают понятие устойчивости и стабильности технологического процесса;

Изучают методики оценки стабильности технологического процесса и построения точностных диаграмм процесса;

Изучают разновидности основной теоритической схемы возникновения производственных погрешностей;

Изучают особенности обработки статистического материала при ограниченном числе опытов (наблюдений);

Экспериментально исследуют стабильность технологического процесса получения компонентов гибридной интегральной микросхемы по методу выборок.

Содержание и порядок выполнения работы

В работе производится исследование стабильности технологического процесса изготовления резистивных элементов гибридных интегральных микросхем. Контролируемый параметр – электрическое сопротивление.

Для выполнения работы требуется:

1. Ознакомится с описанием лабораторной работы и установки. Изучить необходимые теоретические сведения.
2. Провести измерения электрических сопротивлений по выборкам микросхем. Полученный статистический ряд преобразовать. Для этого его необходимо разбить на 5 последовательных групп по 16 значений сопротивления в каждой группе. Каждая группа соответствует выборке, взятой в определенные моменты времени.
3. Провести статистическую обработку каждой выборки, определив точечные оценки математического ожидания и среднего квадратического отклонения электрического сопротивления по формулам (32).
4. Построить доверительные интервалы для математического ожидания и среднего квадратического отклонения по ранее изложенной методике, используя данные табл. 4, 5. Доверительная вероятность задается преподавателем.

Таблица 4

Значения параметра t_{β} в зависимости от β для $\nu = 15$

β	0,8	0,9	0,95	0,98
t_{β}	1,341	1,753	2,13	2,60

Таблица 5

Значения χ^2 в зависимости от P для $\nu = 15$

P	0,99	0,98	0,95	0,90	0,80	0,10	0,05	0,02	0,01
χ^2	5,23	5,98	7,26	8,55	10,31	22,3	25,0	28,3	30,6

5. Все данные, полученные по результатам выполнения пп. 3, 4, занести в табл. 6.
6. Построить диаграмму доверительных интервалов по методике, изложенной ниже
7. Дать заключение о характере технологического процесса и его стабильности.

Таблица 6

№ выборки	R_i , Ом	\bar{m}_i , Ом	\bar{b}_i , Ом	t_{β}	χ^2_1	χ^2_2	Доверительные интервалы	
							$m(R)$	$b(R)$
1								
...								
5								

Содержание отчета

1. Название работы и ее цель
2. Таблица экспериментальных и расчетных данных (табл. 6).
3. Аналитические выражения для определения статистических характеристик (32) и построения доверительных материалов (34), (37).

4. Диаграмма доверительных материалов
5. Выводы по работе

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из макета и измерительного прибора.

Внутри макета установлены исследуемые платы гибридных интегральных микросхем в количестве 80 штук, представляющие собой последовательные выборки объемом 16 штук. Измерительный прибор подключается к входным клеммам макета.

Коммутация прибора и исследуемых изделий осуществляется с помощью двух групп переключателей, обозначенных соответственно А1-А1У и ВУ-ВУШ.

В каждом из положений группового переключателя коммутация плат осуществляется переключателями подгрупп соответственно А1-А10 и В1-В10. Вначале проводятся измерения параметров резисторов на платах. Подключаемых к измерительному прибору с помощью переключателей А1-А1У и А1-А10, затем – переключателей ВУ-ВУШ и В1-В10.

Величина исследуемого параметра определяется по показаниям измерительного прибора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глудкин О.П. Черняев В.Н. Анализ и контроль технологических процессов производства РЭА: Учебн. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1983. – 296 с.
2. Львовский В.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учебн. пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1982. – 224 с.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учебн. пособие для вузов. – М.: Визматгиз, 1962. – 564 с.