

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИСТИТУТ
(государственный технический университет)**

М.А. Сахаров

**Анализ и синтез точности технологических процессов
производства РЭС**

Учебное пособие к практическим занятиям

Утверждено
на заседании редсовета
6 июня 2005 г.

Москва
Издательство МАИ
2006

Сахаров М.А. Анализ и синтез точности технологических процессов производства РЭС: Учебное пособие к практическим занятиям. - М.: Изд-во МАИ, 2006. - 20 с.

Пособие содержит описание двух практических занятий, посвященных расчетно-аналитическому методу оценки производственных погрешностей, а также синтезу точности технологических процессов изготовления РЭС.

Предназначено для студентов радиотехнических специальностей, выполняющих практические занятия, и может быть использовано в курсовом и дипломном проектировании.

Рецензенты:

кафедра «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры» МГТУ им. Н.Э. Баумана (зав. кафедрой, засл. деят. науки РФ, проф., д-р техн. наук В.А. Шахнов);

канд. техн. наук, доц. Ю.Н. Корниенко

ISBN 5-7035-1671-4 © Московский авиационный институт
(государственный технический университет), 2006

Тем. план 2006, поз.7

Сахаров Михаил Алексеевич

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ТОЧНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА РЭС

Редактор *М. С. Винниченко*

Подписано в печать 3.04.06. Бум. офсетная. Формат 60x84 1/16;
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,1-би Уч.-изд. л. 1,25. Тираж 500 экз.
Зак. 3354/1995. С. 448.

Издательство МАИ «МАИ», Волоколамское ш., д. 4,
Москва, А-80, ГСП-3 125993

Типография Издательства МАИ «МАИ», Волоколамское ш., д.
4, Москва, А-80, ГСП-3 125993

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие содержит описание двух практических занятий по дисциплине «Технология РЭС» и представляет собой переработку ранее опубликованных (1979 и 1994 гг.) Вместо них предлагаются следующие:

ЗАНЯТИЕ 2. Расчетно-аналитический метод анализа технологических процессов производства РЭС. В отличие от ранее изданного, направлено не на расчет точности выходных характеристик элементов памяти ЭВА, а на анализ точности технологических процессов (ТП) изготовления аналоговых РЭС.

ЗАНЯТИЕ 4. Синтез точности технологических процессов изготовления РЭС. Переработано радикально. Вместо метода ранговой корреляции сделан акцент на расчет допусков для технологических факторов (режимов), исходя из требуемой точности параметра ТП. Эта задача сводится к расчленению допуска на параметр ТП таким образом, чтобы установленные (назначенные) допуски на отдельные факторы в результате суммирования (синтеза) обеспечивали заданную точность ТП.

В обоих случаях анализ (занятие 2) и синтез (занятие 4) точности ТП ведутся с применением в качестве исходных данных математических моделей, полученных композиционным рототабельным планированием эксперимента (КРПЭ). Уравнения математических моделей ТП после проверки значимости коэффициентов и адекватности переведены из безразмерной (кодированной) формы в натуральный масштаб измерения факторов.

Учебное пособие, кроме прямого назначения, может быть использовано студентами при выполнении курсового и дипломного проектирования.

ЗАНЯТИЕ 2. РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА РЭС

Цель занятия - научить студентов практически оценивать точность технологических процессов на примере отдельных операций с использованием их математических моделей (ММ), полученных экспериментальными методами.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ

Одной из основных задач аттестации технологических процессов является оценка их точности с целью дальнейшей паспортизации. Точность ТП — наиболее важный параметр, который фиксируется в паспортных данных наряду с другими параметрами (надежность ТП, устойчивость, стабильность, производительность, процент выхода годных). Количественная оценка точности учитывается при выборе наилучшего варианта ТП из числа нескольких конкурирующих.

Точность ТП - это его свойство обеспечивать идентичность параметров однотипных изделий в заданных пределах с определенной доверительной вероятностью. Количественно точность ТП выражают как отношение поля погрешности к величине поля допуска согласно формуле

$$\Delta TP = \frac{2t \cdot S(y)}{(Y_B - Y_H)} \quad (1)$$

где t - коэффициент, характеризующий уровень доверительной вероятности $P=f(t)$. Обычно принимают $t=3$, что соответствует $P=0,9973$; $S(y)$ – среднее квадратическое отклонение погрешностей реального ТП от среднего \bar{y} или номинального значений $N(y)$, оценивается экспериментально статистическими методами с использованием тестовых схем или математических моделей; Y_B и Y_H - соответственно верхнее и нижнее допустимые значения предельных отклонений параметра изделий по ТУ.

Таким образом, погрешность ТП - это отношение поля погрешности реального ТП к величине поля допуска на параметры изделий. Можно констатировать, что погрешность ТП - это отклонение параметров его состояния от установленных норм. Величины этих отклонений регламентируют (ограничивают) допусками.

Поскольку абсолютно точных ТП не бывает и быть не может в реальных производственных условиях, то в договоре на поставку продукции заказчик (потребитель) оговаривает требования по качеству Q_T . Предприятие-изготовитель, стараясь оградить себя от рекламаций и в целях

повышения престижа в конкурентной рыночной борьбе, стремится обеспечить качество своей продукции на уровне $Q_2 > Q_1$. По величине Q изделия в процессе производства могут быть отнесены к одной из трех категорий:

- 1) продукция высочайшего качества;
- 2) продукция допустимого качества;
- 3) брак — точность ТП не отвечает требованиям, так как уровень качества продукции Q не соответствует условиям заказчика. Здесь уровень качества продукции исследуемого ТП Q оценивается величиной P , вычисляемой в дальнейшем по формуле (19), т.е. принимается равным P .

Точность ТП зависит от ряда факторов и определяется:

- точностью оборудования;
- принятыми методами реализации ТП;
- квалификацией исполнителей;
- соблюдением технологических режимов;
- правильностью наладки оборудования;
- наличием необходимой технологической оснастки, приспособлений и измерительных средств.

Кроме перечисленных управляемых факторов, на точность ТП влияют случайные неуправляемые факторы (колебания параметров окружающей среды, отклонения питающих напряжений и т.д.).

В конечном счете результирующая погрешность реального ТП будет складываться из двух составляющих: систематической и случайной.

Систематические погрешности имеют вполне определенную величину в отличие от случайных, имеющих вероятностный характер. Систематические погрешности обязаны своим происхождением действию доминирующих (заметно выделяющихся) на фоне случайных факторов и имеют явно выраженную тенденцию изменять параметры объекта производства (изделий) в одну вполне определенную сторону относительно центра группирования погрешностей. При оценке технологической точности систематические погрешности выявляются после оценки среднего значения параметра ТП \bar{y} , вычисляемого подстановкой в уравнение математической модели средних значений технологических факторов \bar{x}_i :

$$\bar{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \bar{x}_i + \sum_{\substack{i \neq u \\ i=1}}^{c_k^2} b_{iu} \bar{x}_i \cdot \bar{x}_u + \sum_{i=1}^k b_{ii} \bar{x}_i^2 \quad (2)$$

Наличие существенных систематических погрешностей фиксируется с помощью критерия Стьюдента путем сравнения среднего значения параметра ТП с его номиналом:

$$|\overline{y - N(y)}| \leq \frac{t \cdot \sigma(y)}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

где $N(y)$ - номинальное значение параметра изделий;
 $\sigma(y)$ - стандартное среднее квадратичное отклонение (СКО),

$$\sigma(y) = \frac{(Y_B - Y_H)_{\text{ТУ}}}{6} \quad (4)$$

n - количество экспериментальных данных, по которым оценивают величину \bar{y} . При наличии существенных систематических погрешностей, зафиксированных с помощью критерия Стьюдента, в расчет технологической точности вводят коэффициент асимметрии

$$\alpha_i = \frac{\bar{y} - N(y)}{\delta(y)_{\text{ТУ}}} \quad (5)$$

где i - номер технологического фактора;

$\delta(y)_{\text{ТУ}}$ - половина поля допуска по ТУ, определяемая из выражения

$$\delta(y)_{\text{ТУ}} = \frac{(Y_B - Y_H)_{\text{ТУ}}}{2} \quad (6)$$

При соблюдении требования критерия Стьюдента в соответствии с выражением (3) принимают $\alpha_i = 0$.

Случайные погрешности вызываются действием множества случайных (неуправляемых) факторов и не проявляют стремления группироваться (в отличие от систематических) в каком-либо одном направлении относительно центра группирования. Они характеризуются следующими признаками:

- малые по абсолютной величине погрешности встречаются чаще, чем большие;
- одинаковые по абсолютной величине, но противоположные по знаку случайные погрешности в производстве встречаются одинаково часто;
- абсолютное значение случайной погрешности не превосходит некоторой величины, называемой предельной погрешностью, равной величине $3\sigma(y)$.

При отсутствии заметно выделяющихся доминирующих факторов случайные погрешности распределяются по нормальному закону (закон Гаусса). Этот закон описывается формулой плотности вероятности:

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma(y)} \cdot e^{-\frac{(y-N(y))^2}{2\sigma^2(y)}} \quad (7)$$

Графическая дифференциальная кривая распределения (7) представляет собой кривую, которая называется *колоколом Гаусса*. Сходство с колоколом подтверждается графиком этой функции.

Вероятность попадания случайной величины погрешностей в заданное поле допуска определяется с помощью нормированной функции Лапласа:

$$P(Y_H < y < Y_B) = \Phi_1\left(\frac{Y_B - \bar{y}}{\sigma(y)}\right) - \Phi_2\left(\frac{Y_H - \bar{y}}{\sigma(y)}\right) \quad (8)$$

Здесь в общем случае при $\bar{y} = N(y)$

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

t - аргумент функции Лапласа. При $t = \pm 3$ выражение (8) принимает значение

$$P(Y_H < y < Y_B) = 2\Phi(t) \approx 0,9973 \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что для нормального закона при $\bar{y} = N(y)$ и

$S(y) = \sigma(y)_{\text{ТУ}}$ процент выхода годных изделий, параметры которых не выходят за предельные значения, составляет 99,73% и брак 0,27%.

Наличие существенных случайных погрешностей отдельных факторов технологического процесса оценивают по критерию Фишера путем сравнения дисперсии $S^2(x_i)$ и дисперсии, определяемой величиной стандартного СКО, $\sigma^2(x_i)$, где i - номер фактора. С этой целью рассчитывают показатель достоверности по формуле

$$\theta_i = \frac{S^2(x_i)}{\sigma^2(x_i)} \text{ при } S^2(x_i) > \sigma^2(x_i) \quad (10)$$

В числителе формулы (10) всегда должна использоваться большая из этих двух дисперсий. Вычисленное значение показателя достоверности θ сравнивают с граничным значением критерия Фишера F . Нормальному состоянию ТП по показателю точности должно соответствовать соотношение

$$\theta \leq F \quad (11)$$

Значения критерия Фишера F зависят от числа степеней свободы $k=n-1$ сравниваемых дисперсий и уровня доверительной вероятности. Если расчетное значение показателя достоверности θ окажется больше граничного значения критерия Фишера F , то это свидетельствует о существенном расхождении между полем погрешности реального ТП и полем допуска ΔY по ТУ.

Наличие существенных случайных погрешностей в подобной ситуации пре-

допределяет необходимость вычисления и учета в точностных расчетах коэффициента относительного рассеивания по формуле

$$k_i = \frac{3 \cdot S(x_i)}{\sigma(x_i)} \quad (12)$$

При несущественных расхождениях $\theta \leq F$ коэффициент k_i принимают равным единице. Случайную составляющую результирующей погрешности реального ТП определяют по правилам сложения случайных величин, т.е. дисперсия суммы случайных величин погрешностей равна сумме их дисперсий.

Переходя к выражению половины поля погрешности ТП в относительной форме, будем иметь

$$\frac{\delta y}{\bar{y}} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2 \cdot k_i^2 \left(\frac{\delta x_i}{\bar{x}_i}\right)^2} \quad (13)$$

где B_i - коэффициент влияния i -го технологического фактора, определяющего режим ТП; n - число факторов, принимаемых в расчет технологической точности; $\left(\frac{\delta x_i}{\bar{x}_i}\right)$ - относительная погрешность i -го технологического фактора.

Коэффициент влияния B_i учитывая различную физическую сущность технологических факторов (температура, время, напряжение питания, плотность тока, концентрация технологических сред и т.д.), представляют в относительной форме:

$$B_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{\bar{x}_i}{\bar{y}} \quad (14)$$

где $\frac{\partial y}{\partial x_i}$ - частная производная уравнения математической модели ТП по i -му фактору; \bar{x}_i - среднее значение i -го фактора; \bar{y} - среднее значение параметра ТП.

Из выражения (13) вычисляют СКО $S(y)$ параметра ТП по формуле

$$S(y) = \frac{\delta y \cdot \bar{y}}{\bar{y} \cdot 3} \quad (15)$$

В общем случае при наличии существенных отклонений от нормального закона, оцениваемых величинами коэффициентов a_i и k_i , определяют

предельные значения производственных погрешностей и сравнивают их с допустимыми нижней Y_H и верхней Y_B границами допуска. С вероятностью $P=0,9973$ должны выдерживаться соотношения

$$y_{min} = [N(y) - \delta(y)_{ТУ} \cdot (k_i - \alpha_i)] \geq Y_H \quad (16)$$

$$y_{max} = [N(y) + \delta(y)_{ТУ} \cdot (k_i + \alpha_i)] \leq Y_B \quad (17)$$

где k_i вычисляют из выражения $k_i = \frac{3 \cdot S(y)}{\delta(y)_{ТУ}}$, а α_i - по формуле (5).

Вероятность P совпадения поля погрешности реального ТП с границами поля допуска по ТУ определяют с учетом скорректированного выражения (8)

$$P_y = \Phi_1 \left[3 \left(\frac{1 - \alpha_i}{k_i} \right) \right] - \Phi_2 \left[(-3) \left(\frac{1 + \alpha_i}{k_i} \right) \right] \quad (18)$$

$$P_y = \Phi_1 \left[3 \left(\frac{1 - \alpha_i}{k_i} \right) \right] + \Phi_2 \left[3 \left(\frac{1 + \alpha_i}{k_i} \right) \right] \quad (19)$$

Величина P , вычисленная по формуле (19), определяет вероятность или (после умножения на 100) процент выхода годных изделий.

ЗАДАНИЕ

1. Получить вариант задания в виде уравнения математической модели ТП.

2. Провести анализ исходных данных и рассчитать основные характеристики по требованиям технических условий и экспериментальным данным.

3. Рассчитать в соответствии с выражением (2) среднее значение \bar{y} выходного параметра ТП.

4. Оценить правильность настройки ТП на заданный номинал, пользуясь критерием Стьюдента (формула (3)). Вычислить в случае существенных

систематических погрешностей коэффициент α_i по формуле (5).

5. Используя критерий Фишера (формулы (10) и (11)), оценить соответствие величины случайной погрешности требованиям допуска. При наличии существенных отклонений вычислить по формуле (12) коэффициент k_i для каждого фактора.

6. Рассчитать по формуле (14) коэффициенты влияния B_i для каждого фактора и провести их ранжирование по характеру и степени воздействия на выходной параметр ТП.

7. Рассчитать величину половины поля погрешности ТП в относительной форме по формуле (13) и соответствующее значение СКО $S(y)$.

8. Рассчитать предельные значения производственных погрешностей параметра ТП и сравнить их с допустимыми границами по ТУ в соответствии с выражениями (16) и (17).

9. Оценить вероятность выхода годных изделий по формуле (19).

10. Оценить точность ТП по формуле (1). Сравнить качество продукции процесса Q с требованиями качества Q_1 и Q_2 , заданными в исходных данных.

11. Дать выводы по работе.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

Методика выполнения практического задания иллюстрируется конкретным примером.

1. Задана математическая модель ТП сварки монтажных соединений микросборки (МСБ) термокомпрессией в виде

$$y = 2376,83 + 3,41x_1 - 36,928x_2 + 501,38x_3 - 0,018x_1x_2 - \quad (20) \\ - 0,462x_1x_3 - 1,112x_2x_3 + 0,133x_2^2 - 118,425x_3^2$$

Где y - параметр ТП (механическая прочность сварных соединений на отрыв, Γ); x_1 - усилие, приложенное к сварочному электроду, поддерживалось в процессе эксперимента на уровне среднего значения $\bar{x}_1=260$ г и варьировалось в пределах $\delta x_1=\pm 30$ г с точностью $S(x_1)=\pm 8$ г; x_2 - напряжение питания установки фиксировалось на уровне $\bar{x}_2=160\pm 10$ В с точностью $S(x_2)=\pm 3$ В; x_3 - длительность сварочного импульса устанавливалась на уровне $\bar{x}_3=0,8\pm 0,2$ с с точностью $S(x_3)=0,1$ с.

Всего было проведено опытов в количестве $n=28$. Исходные данные: номинальное значение параметра ТП $N(y)=82$ г; верхняя граница допуска $Y_B=93$ г; нижняя граница $Y_H=71$ г; уровень приемлемого качества $Q_2=0,92$, уровень бракования $Q_1=0,95$.

2. На основе анализа исходных данных рассчитываем значения стандартного СКО для параметра прочности сварных соединений по формуле (4):

$$\sigma(y) = \frac{(Y_B - Y_H)_{\text{ТУ}}}{6} = \frac{93 - 71}{2} = 3,667 \text{ г.}$$

Соответственно половина поля допуска по ТУ согласно формуле (6) составит

$$\delta(y)_{\text{ТУ}} = \frac{(Y_B - Y_H)_{\text{ТУ}}}{2} = \frac{93 - 71}{2} = 11 \text{ г.}$$

3. Рассчитываем среднее значение прочности сварных монтажных соединений. С этой целью, пользуясь формулой (2), подставим в уравнение математической модели (20) средние значения факторов \bar{x}_i :

$$y = 2376,83 + 3,41 \cdot 260 - 36,928 \cdot 160 + 501,38 \cdot 0,8 - 0,018 \cdot 260 \cdot 160 - 0,462 \cdot 260 \cdot 0,8 - 1,112 \cdot 160 \cdot 0,8 + 0,133 \cdot 160^2 - 118,425 \cdot 0,8^2 = 84,572 \text{ г.}$$

4. Отсутствие существенных систематических погрешностей проверяем путем сравнения полученного в п.3 среднего значения \bar{y} и номинала с использованием критерия Стьюдента по формуле (3)

$$|84,572 - 82| \leq \frac{3 \cdot 3,667}{\sqrt{28}} = 2,709.$$

Получаем $2,572 > 2,079$, т.е. критерий не выдерживается, что свидетельствует о неправильной настройке ТП. Для последующих технологических расчетов необходимо учесть коэффициент относительной асимметрии. По формуле (5) имеем

$$\alpha_1 = \frac{\bar{y} - N(y)}{\delta(y)_{\text{ТУ}}} = \frac{84,572 - 82}{11} = 0,234$$

5. Наличие существенных случайных погрешностей, возникающих при наладке ТП по каждому фактору, оцениваем с использованием критерия Фишера (формулы (10) и (11)). Показатель достоверности для 1-го фактора равен

$$\theta_1 = \frac{\sigma^2(x_1)}{S^2(x_1)} = \frac{10^2}{8^2} = 1,562$$

Сравнение полученного значения θ_1 с граничным критерием Фишера $F=1,65$ (при $t=0,95$, числе степеней свободы для $\sigma^2(x_1) = \infty$ и число степеней свободы для $S^2(x_1)$ из табл. П.2 [1]) указывает на соответствие показателя

теля достоверности требованиям критерия Фишера: $\theta_1 < F$. В данном случае коэффициент относительного рассеяния принимается равным $k_1=1$.

$$\theta_2 = \frac{\sigma^2(x_2)}{S^2(x_2)} = \frac{3,33^2}{3^2} = 1,235 < 1,65$$

Для 2-го фактора также принимаем $k_2=1$.

Третий фактор характеризуется величиной

$$\theta_3 = \frac{0,1^2}{0,067^2} = \frac{0,01^2}{0,004^2} = 2,55 > 1,65$$

и, следовательно, необходимостью учета в точностных расчетах коэффициента относительного рассеяния, отличающегося от единицы. По формуле (12) имеем

$$k_3 = \frac{3 \cdot S(x_3)}{\sigma(x_3)} = \frac{3 \cdot 0,1}{0,2} = 1,5.$$

6. Расчет значений коэффициентов влияния B_i по формуле (14) дает следующие результаты:

$$\frac{\partial(y)}{\partial(x_1)} = 3,41 - 0,018\bar{x}_2 - 0,462\bar{x}_3 = 0,16,$$

откуда

$$B_1 = \frac{\partial(y)}{\partial(x_1)} \cdot \frac{\bar{x}_1}{\bar{y}} = 0,16 \cdot \frac{260}{84,572} = 0,492.$$

Соответственно

$$\frac{\partial(y)}{\partial(x_2)} = -36,928 - 0,018\bar{x}_1 - 1,112\bar{x}_3 + 0,266\bar{x}_3 = 0,062;$$

$$B_2 = \frac{\partial(y)}{\partial(x_2)} \cdot \frac{\bar{x}_2}{\bar{y}} = 0,062 \cdot \frac{160}{84,572} = 0,117;$$

$$\frac{\partial(y)}{\partial(x_3)} = 501,38 - 0,462\bar{x}_1 - 1,112\bar{x}_2 - 236,85\bar{x}_3 = 13,86$$

$$B_3 = \frac{\partial(y)}{\partial(x_3)} \cdot \frac{\bar{x}_3}{\bar{y}} = 13,86 \cdot \frac{0,8}{84,572} = 0,131.$$

Из анализа полученных значений коэффициентов влияния следует, что все они являются увеличивающими и наибольшим влиянием на прочность

соединений отличается усилие, приложенное к сварочному электроду; длительность сварочного импульса занимает промежуточное значение; напряжение питания установки замыкает этот ряд.

7. Оценка величины поля погрешности ТП в относительной форме в соответствии с (13) составит

$$\frac{\delta(y)}{\bar{y}} = \pm \sqrt{0,492^2 \cdot \left(\frac{30}{260}\right)^2 + 0,117^2 \cdot \left(\frac{10}{160}\right)^2 + 0,131^2 \cdot \left(\frac{0,2}{0,8}\right)^2 \cdot 1,5^2} = 0,0785$$

откуда половина поля погрешности будет равна $\delta(y)=0,0785 \cdot 84 \cdot 572=6,639$,

среднеквадратичное отклонение $S(y) = \frac{\delta(y)}{3} = \frac{6,639}{3} = 2,213$ и отношение

Правдоподобия для параметра ТП будет равно

$$\theta(y) = \frac{\sigma^2(y)}{S^2(y)} = \frac{3,667^2}{2,213^2} = 2,746.$$

Сравнение полученного значения $\theta(y)$ с величиной критерия Фишера $F=3,0, f_{en}=14, f_{ao}=14-9=5$ указывает на отсутствие расхождения между ними. В данном случае поле погрешности реального ТП меньше величины поля допуска по ТУ, т.е. имеет место избыточная точность. Коэффициент относительного рассеяния составит

$$k = \frac{3 \cdot S(y)}{\sigma(y)} = 0,603.$$

8. Рассчитаем предельные значения производственных погрешностей по формулам (16) и (17):

$$y_{min} = [82 - 11(0,603 - 0,234)] = 77,94 > Y_H = 71\text{г},$$

$$y_{max} = [82 + 11(0,603 + 0,234)] = 91,21 > Y_B = 93\text{г}.$$

Полученные расчеты подтверждают отсутствие нарушения границ поля допуска.

9. Вероятность выхода годных изделий в соответствии с формулой (19) получает следующее значение:

$$\begin{aligned} P_y &= \Phi_1 \left[3 \left(\frac{1 - 0,234}{0,603} \right) \right] + \Phi_2 \left[3 \left(\frac{1 + 0,234}{0,603} \right) \right] \\ &= \Phi_1(3,811) + \Phi_2(6,139) = 0,4997 + 0,5 = 0,9997. \end{aligned}$$

Численные значения функций Φ_1 и Φ_2 Лапласа выбирают из табл. П.1 [2].

10. Точность ТП в соответствии с формулой (1) принимает значение

$$\Delta TP = \frac{2 \times 3 \times 2,213}{(93 - 71)} = 0,603$$

и в соответствии с критерием Фишера имеет избыточное значение, что обеспечивает определенный запас точности ТП и позволяет отнести качество изделий к первой категории:

$$Q_2 = P_y = 0,9997 > Q_1 = 0,95.$$

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Математическая модель ТП в натуральном масштабе измерения технологических факторов, с указанием их средних значений \bar{x}_i , и уровней варьирования ∂x_i ; номинальное значение $N(y)$ параметра ТП; верхняя Y_B и нижняя Y_H границы допуска, а также уровни приемлемого Q_2 и браковочного Q_1 качества изделий.

2. Результаты расчета основных характеристик распределения погрешностей исходя из требований ТУ: $\sigma(y)$, $\delta(y)_{ТУ}$;

3. Расчетные значения коэффициентов влияния B_i .

4. Оценка характеристик реального распределения погрешностей: \bar{y} , $\delta(y)_p$, $S(y)$, y_{max} , y_{min} , P_y , и ΔTP .

5. Выводы о: правильности настройки ТП; соответствии точности ТП требованиям критерия Фишера; соблюдении границ поля допуска; вероятности выхода годных и соответствии качества продукции требованиям Q_1 и Q_2

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сахаров М.А. Моделирование и оптимизация технологических процессов изготовления РЭС и БВС. - М.: Изд-во МАИ, 1992.

2. Сахаров М.А. Методические разработки к практическим занятиям по курсу «Технология производства радиоаппаратуры». - М.: МАИ, 1982.

ЗАНЯТИЕ 4. СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЭС

Цель занятия — освоить методику расчета допусков на технологические факторы исходя из допуска на параметр технологического процесса.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ

Точность ТП в практике производства РЭС играет важную роль. Количественная оценка точности учитывается при выборе наилучшего варианта ТП из числа нескольких конкурирующих. Производственные погрешности, определяющие точность ТП, являются неизбежным спутником любого производства и вызываются многочисленными и разнообразными факторами. Как известно, производственные погрешности складываются из двух составляющих: систематических погрешностей и случайных.

Наличие существенных систематических погрешностей, как правило, поддается выявлению с помощью критерия Стьюдента, и они устраняются путем подналадки оборудования, соответствующих изменений размеров фотошаблонов и масок, коррекции соотношений компонентов технологических сред и т.д.

Случайная составляющая результирующей погрешности ТП определяется как сумма погрешностей отдельных факторов, определяющих, например, технологические режимы. Существуют различные методы суммирования случайных погрешностей.

1. Метод максимума-минимума.
2. Метод квадратичного суммирования.
3. Теоретико-вероятностный метод.

Наиболее точным является последний, который основан на одном из основных правил сложения случайных величин — дисперсия суммы случайных величин погрешностей равна сумме их дисперсий. Переходя к выражению половины поля погрешности ТП, в зависимости от случайных погрешностей технологических факторов, получают математическую модель точности ТП в виде

$$\delta(y) = \pm \sqrt{\sum_{j=1}^k B_j^2 \cdot \delta^2(x_j)}, \quad (21)$$

где $\delta(y)$ — половина поля погрешности выходного параметра ТП; B_j — коэффициент влияния j -го фактора на параметр ТП; $\delta(x_j)$ — половина поля погрешности технологического фактора, определяющего режим ТП.

Учитывая различную физическую природу технологических факторов (время, температура, напряжение, плотность тока, концентрация технологических сред и т.д.), коэффициенты влияния B_j представляют в относительной безразмерной форме:

$$B_j = \frac{\partial y}{\partial x_j} \cdot \frac{\bar{x}_j}{N(y)} \quad (22)$$

где $\partial y / \partial x_j$ — частная производная уравнения математической модели ТП по j -му фактору; \bar{x}_j — среднее значение j -го фактора; $N(y)$ — номинальное значение выходного параметра ТП.

При отсутствии математической модели значения B_j определяют экспериментальным путем. Здесь в качестве исходных данных задаются: математическая модель ТП в виде полинома второй степени; номинальное значение параметра y ТП; средние значения технологических факторов (режимов) \bar{x}_j ; $\delta(y)$ на параметр y .

При известных численных значениях B_j и заданных допусках на отклонения технологических режимов $\delta(x_j)$ уравнение (21) позволяет решить задачу анализа технологической точности параметра y ТП.

В практике проектирования очень часто решается задача синтеза точности ТП, т.е. расчета и назначения допусков на технологические факторы, исходя из допуска на параметр ТП. Сложность этой задачи состоит в том, что по одной заданной величине допуска на параметр ТП $\delta(y)$ требуется рассчитать допуски на несколько различных технологических факторов $\delta(x_j)$ так, чтобы соблюдалось условие (21). Здесь все допуски представлены в относительной форме.

Для простоты расчетов на данном этапе занятий принимаем значения случайных погрешностей факторов $\delta(x_j)$ взаимонезависимыми и распределенными по нормальному закону, $k_j=1$. После ранжирования коэффициентов влияния B_j по абсолютной величине и расположения их в ряд по убыванию можно записать уравнение погрешностей в виде

$$\delta y = \pm \sqrt{B_1^2 \delta^2 x_1 + B_2^2 \delta^2 x_2 + \dots + B_k^2 \delta^2 x_k} \quad (23)$$

После некоторых преобразований расчетное значение допуска на технологический фактор $\delta(x_{1p})$, имеющий наибольший коэффициент влияния B_1 , с некоторым технологическим запасом $a_1 > 0$ будет иметь вид

$$\delta(x_1)_p + a_1 = \frac{\delta(y)}{\sqrt{\sum_{j=1}^k B_j^2}} \quad (24)$$

Из полученного расчетного значения $\delta(x_1)_p$ выделяют определенную часть в качестве технологического допуска $\delta(x_1)$ так, чтобы разность

$$\delta(x_1)_p - \delta(x_1) = a_1 > 0. \quad (25)$$

Для вычисления расчетного значения допуска на второй фактор $\delta(x_2)_p$ со своим технологическим запасом $a_2 > 0$ необходимо из величины заданного допуска на параметр ТП $\delta(y)$ вычесть величину произведения $B_1^2 \cdot \delta^2(x_1)$ разность разделить на сумму квадратов всех весовых коэффициентов за вычетом B_1^2 и из полученного результата извлечь квадратный корень согласно выражению

$$\delta(x_2)_p + a_2 = \sqrt{\frac{\delta^2(y) - B_1^2 \cdot \delta^2(x_1)}{\sum_{j=1}^k B_j^2 - B_1^2}} \quad (26)$$

В данной работе используются трехфакторные технологические процессы, поэтому для практических расчетов допуска на третий (последний) фактор с технологическим запасом аз нужно пользоваться уравнением

$\delta(x_3)_p + a_3 = \sqrt{\frac{\delta^2(y) - B_1^2 \cdot \delta^2(x_1) - B_2^2 \cdot \delta^2(x_2)}{\sum_{j=1}^k B_j^2 - B_1^2 - B_2^2}}$	(27)
---	------

и в качестве технологического допуска $\delta(x_3)$ выбрать величину из стандартного ряда допусков, ближайшую к $\delta(x_3)_p$, но так, чтобы $a_3 > 0$.

Правильность назначения допусков на технологические факторы проверяют в соответствии с выражением (23). При этом $\delta(y)_p$ не должно превышать величины установленного допуска на параметр ТП $\delta(y)$. Пользуясь приведенной методикой можно разложить допуск выходного параметра ТП на большее число технологических факторов последовательно, соблюдая очередность по убыванию B_j .

ЗАДАНИЕ

1. Получить вариант индивидуального задания.

2. Рассчитать значения коэффициентов влияния для каждого фактора.
3. Составить уравнение технологической случайной погрешности с учетом убывания численных значений коэффициентов влияния.
4. Вычислить сумму квадратов весовых коэффициентов технологических факторов.
5. Рассчитать допустимые погрешности технологических факторов с использованием формул (24)...(27) и назначить соответствующие допуски для них.
6. Оценить правильность назначения допусков для каждого фактора с учетом заданного допуска на параметр ТП.
7. Оформить и сдать отчет о выполнении задания, содержащий анализ полученных результатов и выводы.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЯ

Методика расчета допусков на технологические факторы с учетом заданного допуска на параметр ТП иллюстрируется конкретным примером.

1. Задана математическая модель ТП травления медной фольги при изготовлении печатных плат

$$y = 6,0375x_1 + 1,5575x_2 + 14,026x_3 - 0,0512x_1x_2 - 0,0675x_1x_3 - 0,0675x_1x_3 - 0,0675x_2x_3 + 0,094x_2^2 - 801,35 \quad (28)$$

где y — подтрав по ширине проводников, мкм; x_1 — концентрация H_2O_2 , $\bar{x}_1=150$ г/л; x_2 — концентрация HCl , $\bar{x}_2=50$ г/л; x_3 — температура раствора, $\bar{x}_3=45^\circ C$. Номинальное значение параметра ТП $N(y) = 50$ мкм с допуском $\delta(y) = \pm 10\%$. С учетом заданного допуска на параметр ТП необходимо назначить допуски на технологические факторы $\delta(x_j)$, $j=1,2,3$.

2. Рассчитаем значения коэффициентов влияния по формуле (22):

$$B_j = \frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot \frac{\bar{x}_1}{N(y)} = (6,0375 - 0,0512x_2 - 0,067x_3) \frac{150}{50}$$

После подстановки в это выражение средних значений $x_2=50$ г/л и $x_3=45^\circ C$ получим $B_1=1,32$. Аналогично вычисляются коэффициенты $B_2=0,24$ и $B_3=0,47$.

3. Уравнение случайной составляющей технологической погрешности ТП принимает вид

$$\frac{\Delta y}{\bar{y}} = 1,32 \cdot \frac{\Delta x_1}{x_1} + 0,47 \cdot \frac{\Delta x_2}{x_2} + 0,24 \cdot \frac{\Delta x_3}{x_3} \quad (29)$$

Для предельных отклонений погрешностей вместо (29) можно записать уравнение половин поля погрешностей согласно (21):

$$\delta^2(y) = 1,32^2 \cdot \delta^2(x_1) + 0,47^2 \cdot \delta^2(x_3) + 0,24^2 \cdot \delta^2(x_2)$$

4. Сумма квадратов коэффициентов влияния

$$\sum_{j=1}^k B_j^2 = 1,32^2 + 0,47^2 + 0,24^2 = 2,0209$$

5. В соответствии с (24) рассчитывается допустимая погрешность на концентрацию перекиси водорода H_2O_2 в относительной форме (в процентах от среднего \bar{x}_1):

$$\delta(x_1)_p = \frac{\delta(y)}{\sqrt{\sum_{j=1}^3 B_j^2}} = \frac{10\%}{\sqrt{2,0209}} = \frac{10\%}{1,422} = 7,03\%$$

Из полученной расчетной величины погрешности выделим в качестве технологического допуска $\delta(x_1)=5\%$ так, чтобы в соответствии с выражением (25) технологический запас a_i оставался положительным. В данном случае $7,03\% - 5\%=2,03\%$.

Допустимая величина погрешности температуры раствора согласно (26) принимает значение

$$\delta(x_3)_p = \sqrt{\frac{\delta^2(y) - B_1^2 \cdot \delta^2(x_1)}{\sum_{j=1}^k B_j^2 - B_1^2}} = \sqrt{\frac{10^2 - 1,7424 \cdot 25}{2,0209 - 1,7424}} = \sqrt{\frac{56,44}{0,2785}} = 14,2\%$$

Принимаем в качестве допуска $\delta(x_3)=10\%$.

Расчетное значение допустимой погрешности концентрации соляной кислоты $\delta(x_2)_p$ по формуле (27)

$$\delta(x_2)_p = \sqrt{\frac{56,44 - 0,47^2 \cdot 10^2}{0,2785 - 0,47^2}} = \sqrt{\frac{34,35}{0,0576}} = 24,4\%$$

Принимаем в качестве допуска $\delta(x_2)=20\%$.

6. Правильность назначения допусков на технологические факторы проверяем путем сравнения расчетной величины погрешности параметра ТП в соответствии с выражением (1) с заданным допуском $\delta(y)=\pm 10\%$:

$$\delta(y)_p = \sqrt{B_1^2 \cdot \delta^2(x_1) + B_3^2 \cdot \delta^2(x_3) + B_2^2 \cdot \delta^2(x_2)}$$

$$= \sqrt{1,7424 \cdot 5^2 + 0,2209 \cdot 10^2 + 0,0576 \cdot 20^2} = \sqrt{88,69} = \pm 9,42\%$$

Результирующая погрешность $\delta(y)_p$ не выходит за пределы допуска $\delta(y) = \pm 10\%$, что свидетельствует о правильности назначения допусков на технологические факторы.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Математическая модель ТП с указанием номинального значения параметра и допуска на него, а также средние значения технологических факторов.
2. Численные значения коэффициентов влияния технологических факторов.
3. Уравнение погрешности ТП с численными значениями коэффициентов влияния (формула (29)).
4. Формулы и результаты расчета допусков на технологические факторы.
5. Оценка правильности назначения допусков на технологические факторы.
6. Выводы о характере (по знаку B_j) и степени влияния технологических факторов на параметр ТП.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

ЗАНЯТИЕ 2. Расчетно-аналитический метод оценки точности технологических процессов производства РЭС.....	4
ЗАНЯТИЕ 4. Синтез технологической точности технологических процессов изготовления РЭС	15