

Введение

Как известно, точность автоматов, предназначенных для производств начального уровня, как правило, приводится в технических характеристиках в виде погрешности установки, например, ± 100 мкм. Для автоматов серийного производства, гарантирующих определенное качество технологического процесса, помимо погрешности производитель указывает, например, «при 3σ », или «при $Cpk=1,33$ ». Что значат эти параметры? Достаточно ли знать погрешность установки для определения, какие компоненты можно устанавливать с помощью этого автомата? Для того чтобы получить ответы на эти вопросы, нужно познакомиться с теорией и практикой статистического определения погрешностей, что часто бывает затруднительно из-за избытка формул, сложности терминологии, формулировок и способов подачи информации в официальных документах, а также из-за недостатка информации на русском языке.

Данная статья – это попытка объяснить основы точности сборочных автоматов наглядно, но не удаляясь при этом слишком далеко от математической теории и практического опыта производителей, который был аккумулирован и систематизирован в стандарте ассоциации производителей электроники IPC-9850, ставшем де-факто основным международным стандартом в данной области.

Первая часть статьи посвящена параметрам точности оборудования, а вторая – методам их практического определения.

Теоретические сведения в первой части статьи выделяются курсивом. В зависимости от задачи, текст, набранный курсивом, и остальной текст можно читать независимо. Также независимо можно читать разделы статьи, например, пропуская известные читателю.

Точность и ее роль в сборочном процессе SMT

Качество конечного изделия во многом зависит от правильного выполнения операции установки компонентов на печатную плату. Как известно, компоненты, монтируемые на поверхность печатных плат, при оплавлении паяльной пасты под действием сил поверхностного натяжения стремятся занять правильное положение, что явилось одним из аргументов в пользу технологии поверхностного монтажа для серийного и массового производства, где требуется высокая степень автоматизации. Однако при монтаже аппаратуры повышенной надежности, такой как, например, военная, медицинская, бортовая электроника, такой трудно контролируемый процесс, как самовыравнивание компонентов, не должен быть определяющим в достижении заданного уровня качества изготавливаемой аппаратуры. Кроме того, с переходом на бессвинцовую технологию стали применяться припои, которые обладают свойством выравнивания компонентов в значительно меньшей степени, чем традиционные оловянно-свинцовые сплавы. И, наконец, продолжающаяся микроминиатюризация изделий приводит к необходимости применения компонентов настолько малых размеров и с таким частым расположением выводов, что смещение компонента на несколько десятков микрометров может приводить к браку.

Поэтому одним из первых параметров, на которые обращают внимания современные производители электроники при выборе автомата установки компонентов для поверхностного монтажа, является точность.

Под точностью производства понимают степень соответствия изготовленного изделия заданным размерам, форме, механическим, физическим и иным характеристикам, вытекающим из назначения этого изделия. Точность выполнения операции отличается от точности всего процесса. Например, в приложении к SMT, благодаря самовыравниванию компонентов допустимая точность установки может быть ниже заданной точности процесса сборки.

Точность сборочной операции характеризуется отклонением положения установленных изделий, от заданных (номинальных) положений, называемым погрешностью установки. Диапазон, образованный максимальными отклонениями, не приводящими к браку конечного изделия, называется полем допуска (англ. tolerance).

Под точностью оборудования (в частности, автоматов установки компонентов), вообще говоря, понимают практическую способность этого оборудования обеспечить заданную точность выполнения операции в определенных производственных условиях и при достаточно малом влиянии факторов, не определяющихся этим оборудованием. Иными словами, точность автомата не учитывает факторы, не связанные с самим автоматом, например, точность изготовления печатной платы и электронных компонентов (ЭК).

Максимальное отклонение и вероятностный допуск

Реальное положение любого компонента всегда несколько отличается от номинального. При этом смещение компонента может приводить к браку (если, например, это вызывает короткое замыкание с соседним компонентом или отсутствие контакта с площадкой на плате), а может не сказываться на качестве изделия. В идеале, оборудование должно обеспечивать установку всех компонентов со смещением в пределах поля допуска, т.е. отклонение положения компонента от номинального не должно превышать некоторого максимального значения.

На практике всегда существует вероятность, что компонент будет установлен вне поля допуска, что приводит к появлению брака. Частично этот брак может быть устранен средствами контроля и производственных испытаний, однако данные меры повышают стоимость производства, и, кроме того, на этапе контроля также существует вероятность пропуска дефекта.

Поскольку обычно электронные устройства содержат достаточно большое число компонентов, а автоматическая установка применяется преимущественно в серийном и массовом производстве, то вероятность установки компонента вне поля допуска должна быть достаточно малой. С другой стороны, слишком жесткие требования к вероятности попадания в поле допуска приводят к необоснованному удорожанию оборудования и неадекватным мерам по обеспечению качества.

Поэтому при разработке системы качества производства в зависимости от требований к конечному изделию и планируемых мер по контролю и устранению возникающего брака всегда принимают в расчет вероятностный допуск, который задается при определенной вероятности установки компонента со смещением не более заданного.

Как известно, если на некоторый процесс оказывает влияние большое число независимых равноправных случайных факторов, распределенных равномерно, то сам процесс подчиняется закону распределения Гаусса, или нормальному закону распределения:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

В данном случае x – смещение компонента по каждой отдельно взятой оси X или Y , либо отклонение по углу поворота θ вокруг оси Z . Вероятность попадания случайной величины x в заданный диапазон $(-\delta x, +\delta x)$ равна интегралу $f(x)$ по данному диапазону (рис. 1):

$$P(\delta x^- < x < \delta x^+) = \int_{\delta x^-}^{\delta x^+} f(x) dx$$

Эта вероятность, как несложно заметить, определена двумя величинами: математическим ожиданием μ и среднеквадратичным отклонением σ .

Поскольку вероятность смещения компонента однозначно определяется двумя параметрами μ и σ , вместо вероятности установки компонента в заданное поле допуска можно указать эти два параметра. Например, параметры $\mu = 0$ и $\sigma = 0,05$ мм означают, что вероятность попадания величины в область с отклонением не более $\pm 0,05$ мм составляет примерно 0,683, т.е. 683 компонента из тысячи будут установлены со смещением не более 0,05 мм в обе стороны по одной из осей (см. рис. 1).

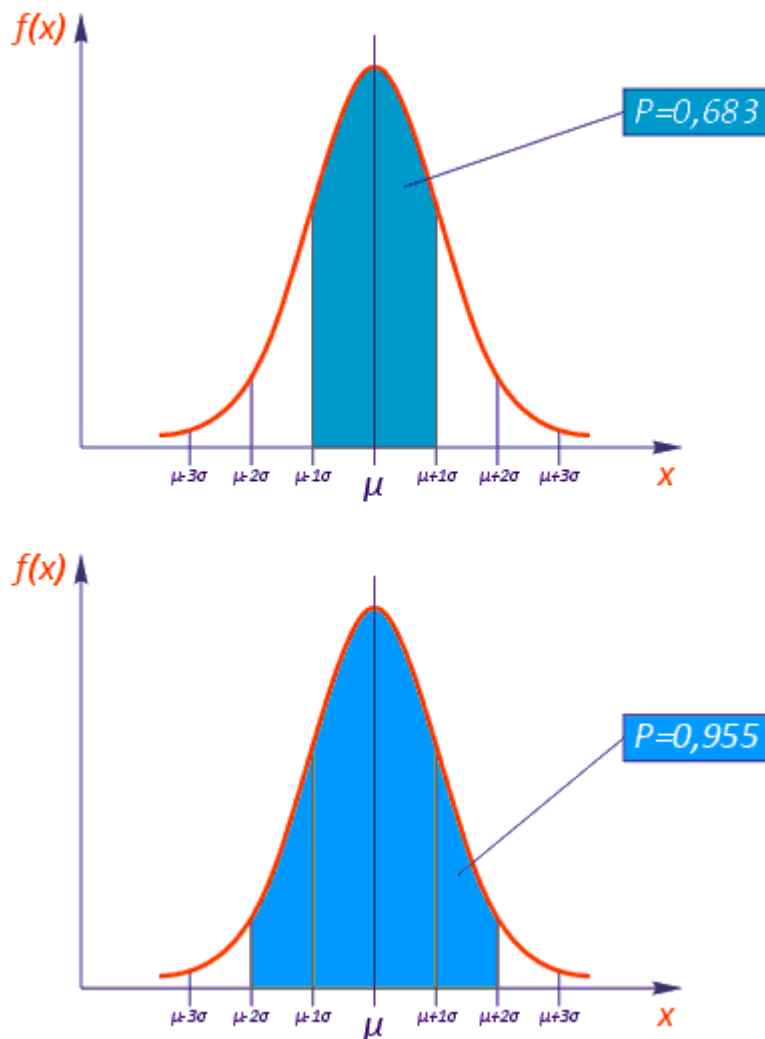


Рис. 1. Функция плотности вероятности для случайной величины, распределенной по нормальному закону

Систематическая и случайная погрешности

Погрешность установки, как и любая погрешность, складывается из систематической и случайной погрешности.

Систематическая составляющая погрешности выражается в смещении положения установленного компонента от номинального на постоянную величину. Т.е. под влиянием систематической погрешности все компоненты будут смещены одинаково.

К систематическим погрешностям следует отнести те из них, которые связаны с точностью изготовления, сборки и наладки данного конкретного автомата – деталей его сборочных головок, приводов, устройства фиксации платы, значений настроечных параметров и пр. Отклонение этих величин от номинальных значений может вызвать неточное позиционирование сборочных головок, смещение и/или перекося печатной платы, смещение начала системы координат автомата и т.д.

Случайная составляющая выражается в смещении каждого отдельного компонента на различную величину.

Случайные ошибки возникают вследствие наличия погрешностей изготовления сборочных компонентов – ЭК и ПП, влияния окружающей среды – прежде всего, температуры и освещенности, питающих напряжений и создаваемого вакуума, точности алгоритмов распознавания образов ЭК и реперных знаков на ПП, вносящих коррекцию в положение захваченного сборочной головкой ЭК и зафиксированной платы, человеческого фактора – навыков и действий оператора и т.д.

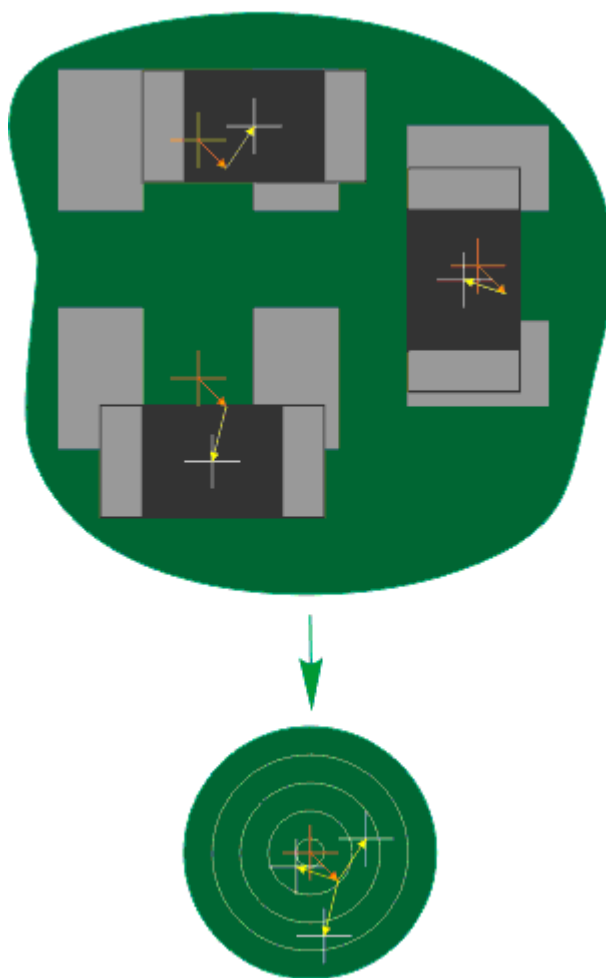


Рис. 2. Случайная и систематическая погрешности.

Красными стрелками показана систематическая составляющая погрешности, желтыми – случайная. Если совместить номинальные точки установки всех компонентов, то красные стрелки совпадут.

Еще раз подчеркнем, что как систематические, так и случайные погрешности могут быть вызваны, с одной стороны, особенностями автомата, с другой – воздействующими факторами, не относящимися к самому автомату. Далее мы будем говорить только о точности оборудования, поскольку прочие факторы являются объектом системы качества предприятия, что выходит за рамки данной статьи. Иными словами, в дальнейших рассуждениях мы будем считать, что воздействия факторов, не определяющихся оборудованием, сведено к минимуму.

На практике большого значения не имеет, какие именно факторы вызывают систематическую погрешность автомата. Важно, что их совокупное действие приводит к постоянному смещению. Чаще всего это смещение может быть скомпенсировано. В большую часть оборудования для поверхностного монтажа заложена возможность проведения калибровки, с помощью которой систематическую погрешность можно практически полностью устранить. Для случайных составляющих проведение такой процедуры, как элемента обслуживания оборудования, не представляется возможным.

Математически совокупное действие факторов, вызывающих систематическую погрешность, выражается в отклонении величины математического ожидания μ от нуля. Случайная составляющая погрешности находит отражение в величине среднеквадратичного отклонения σ : чем больше σ , тем больше разброс положений компонентов вокруг точки с постоянным смещением μ .

Изменение значения μ (систематическая погрешность) приводит к смещению графика нормального распределения вдоль оси абсцисс, увеличение σ вызывает «растягивание» графика, при этом уменьшается его максимальное значение, поскольку общая площадь под графиком на интервале $(-\infty; +\infty)$ должна оставаться равной единице.

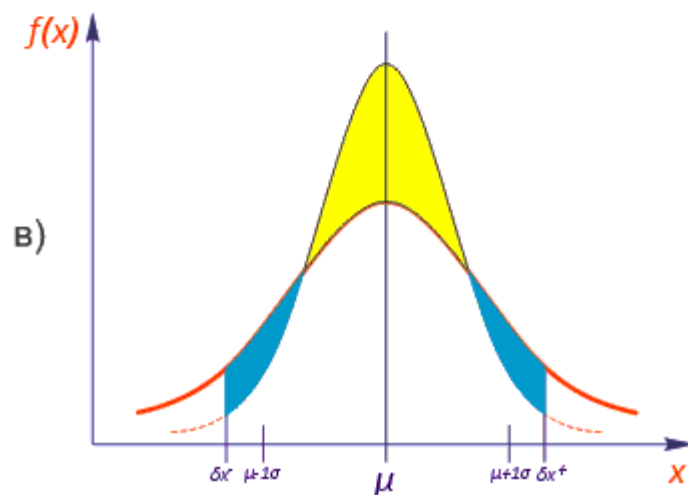
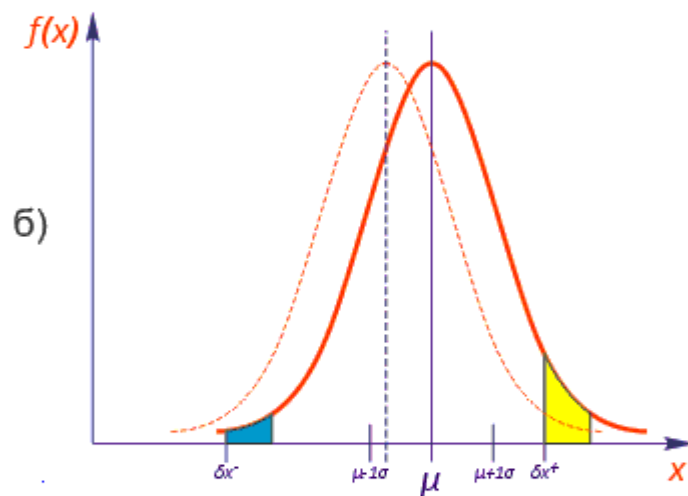
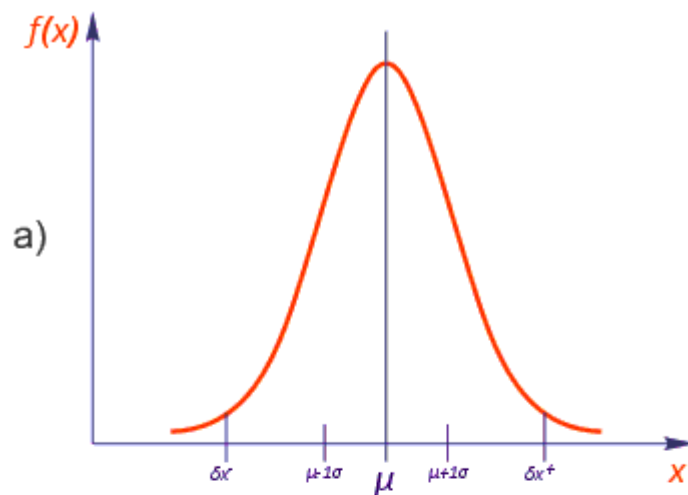


Рис. 3. Влияние μ и σ на вероятность попадания в диапазон.

Голубым отмечена площадь под графиком, увеличивающая вероятность при изменении μ и σ , желтым – уменьшающая.

- а) Исходное распределение вероятности, б) Если μ смещается вправо относительно середины диапазона, в) увеличено значение σ .

При увеличении μ правая (желтая) фигура (см. рис. 3б) под графиком оказывается за пределами поля допуска, а левая фигура (голубого цвета) смещается в поле допуска. Но поскольку площадь левой фигуры всегда меньше правой, то суммарная площадь под графиком в поле допуска оказывается меньше, что соответствует меньшей вероятности правильной установки.

При увеличении σ также уменьшается площадь под графиком в поле допуска, т.е. меньшее число компонентов оказывается установленными без брака.

PPM и число сигм

Ранее мы привели пример: при значении параметров $\mu = 0$ и $\sigma = 0,05$ мм 683 компонента из тысячи попадут в поле допуска $\pm 0,05$ мм. На практике данная вероятность 0,683 очень мала: число компонентов на одной плате может составлять несколько сотен, и в этом случае почти наверняка каждая плата окажется бракованной. Реальная вероятность должна быть на порядок выше. Численное выражение вероятности «правильной» установки будет иметь несколько девяток после запятой. С такими числами работать неудобно, поэтому на практике для определения вероятности попадания/непопадания компонента в поле допуска применяется показатель, равный среднему числу выходов за пределы поля допуска на миллион устанавливаемых компонентов, – ppm (parts per million).

Итак, в указанном примере для поля допуска $\pm 0,05$ мм ppm = 317 тыс. Если с помощью данного автомата (с параметрами $\mu = 0$ и $\sigma = 0,05$ мм) требуется достичь более реального значения ppm, нужно расширять поле допуска (т.е. отказаться от компонентов малого размера и малого шага выводов). Например, значению ppm = 2700 будет соответствовать поле допуска $\Delta = \pm 0,15$ мм. Если же необходимо достичь такого значения ppm при сохранении поля допуска $\Delta = \pm 0,05$ мм, то необходимо выбрать автомат, случайная составляющая погрешности которого в три раза меньше (т.е. $\sigma \approx 0,017$ мм).

Показатель ppm связан с вероятностью установки компонента в поле допуска соотношением ppm = 1 000 000 (1 – P (– $\delta x < x < +\delta x$)).

Как мы уже отмечали, чем больше значение σ , тем меньше вероятность попадания компонента в поле допуска. Если поле допуска расширить, то очевидно соответствующая вероятность увеличится.

При $\mu = 0$ выражение для вероятности попадания в поле допуска (– δx , + δx) приобретает вид:

$$P(\delta x^- < x < \delta x^+) = \int_{-\delta x}^{+\delta x} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx =$$

$$= |y = x/\sigma| = \int_{-\delta x/\sigma}^{+\delta x/\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy$$

Очевидно, данная вероятность зависит только от отношения $\delta x/\sigma$, то есть от числа сигм, укладывающихся в половине поля допуска.

Итак, значение ppm связано с отношением половины ширины поля допуска к значению σ . Значение ppm = 317 тыс при $\Delta / 2\sigma = 1$, ppm = 2700 при $\Delta / 2\sigma = 3$. Поскольку на практике удобно работать с величиной поля допуска, то часто для характеристики вероятности указывают ширину поля допуска и отношение $\Delta / 2\sigma$, называемое числом сигм. Иными словами, число сигм – это сколько значений σ укладывается в половине поля допуска. В нашем примере можно сказать, что точность автомата равна $\pm 0,15$ мм при 3 σ .

Поскольку при одинаковом значении ppm поле допуска пропорционально σ , то зная ширину поля допуска для определенного числа сигм можно легко получить поле допуска для другого числа сигм. В таблице 1 приведены соответствия некоторых полей допуска при различном числе сигм.

Таблица 1. Таблица соответствия технических характеристик автоматов при различных значениях числа σ [7].

Половина поля допуска оборудования при $\pm 4\sigma$, мкм	соответствуют половине поля допуска:		
	при $\pm 3\sigma$,	при $\pm 5\sigma$,	при $\pm 6\sigma$,

	МКМ	МКМ	МКМ
120	90	150	180
100	75	125	150
90	68	113	135
80	60	100	120
70	53	88	105
60	45	75	90
50	38	63	75
40	30	50	60
30	23	38	45
20	15	25	30
15	11	19	23

Обратите внимание, что все эти рассуждения верны только при отсутствии систематической погрешности ($\mu = 0$), т.е. для идеально откалиброванного автомата.

В таблице 2 приведены значения вероятностей попадания случайной величины в допуск и выхода из него для наиболее широко используемых на практике стандартных диапазонов – от $\pm 1\sigma$ до $\pm 6\sigma$.

Таблица 2. Вероятность попадания случайной величины в диапазон, кратный среднеквадратическому отклонению σ , и вероятность выхода из него (при нормальном законе распределения с $\mu = 0$)			
Диапазон	Вероятность попадания в диапазон, %	Вероятность выхода за пределы диапазона	
		%	ppm
$\pm 1\sigma$	68,26	31,74	317400
$\pm 2\sigma$	95,44	4,56	45600
$\pm 3\sigma$	99,73	0,27	2700
$\pm 4\sigma$	99,994	0,006	64
$\pm 5\sigma$	99,99932	0,00068	0,6
$\pm 6\sigma$	99,9999998	0,0000002	0,002

Очевидно, что диапазоны $\pm 1\sigma$ и $\pm 2\sigma$ не имеют реального практического значения для оценки точности из-за слишком большого числа компонентов, погрешность установки которых выходит за пределы этих диапазонов.

Показатель воспроизводимости процесса сборки Cp

Как мы уже показали, для оценки принципиальной возможности автомата выполнить операцию сборки с заданной точностью достаточно определить поле допуска и число сигм. При этом автомат должен быть идеально откалиброван.

Значения числа сигм менее 3 практического смысла не имеют. Поэтому иногда для оценки возможностей автомата в реальном производственном процессе пользуются показателем воспроизводимости процесса сборки C_p , который численно равен числу сигм, деленному на 3.

Показатель C_p рассчитывается по следующей формуле:

$$C_p = \frac{\Delta x}{6\sigma_x}, \text{ где}$$

$\Delta x = \delta x^+ - \delta x^-$ – поле допуска автомата;

δx^+ ; δx^- – соответственно верхнее и нижнее отклонение поля допуска.

Таким образом, для симметричного допуска (при $\delta x^+ = \delta x^- = \delta x$):

$$C_p = \frac{\delta x}{3\sigma_x}.$$

Коэффициент C_p определяет принципиальную возможность исследуемого автомата обеспечивать качество установки компонентов, когда среднее значение ошибки установки лежит в середине поля допуска автомата, указанного в его технических характеристиках.

Положение среднего и, следственно, систематические ошибки при этом не учитываются.

Показатель реализуемости процесса C_{pk}

Все время до этого мы говорили о случае, когда систематическая погрешность отсутствует, т.е. математическое ожидание $\mu = 0$. На практике всегда существует определенная систематическая погрешность, связанная с точностью систем автомата. Более того, со временем автоматы склонны к раскалибровке, т.е. систематическая погрешность увеличивается.

Если систематическая погрешность имеет достаточно большую величину, т.е. среднее положение компонентов достаточно близко к левой или правой границе поля допуска автомата, при сборке будет наблюдаться значительное число выходов ошибки за его пределы, хотя значение коэффициента C_p при этом может оставаться допустимым (см. рис. 4).

Чтобы учесть положение математического ожидания (средней ошибки установки), вводится показатель реализуемости процесса C_{pk} .

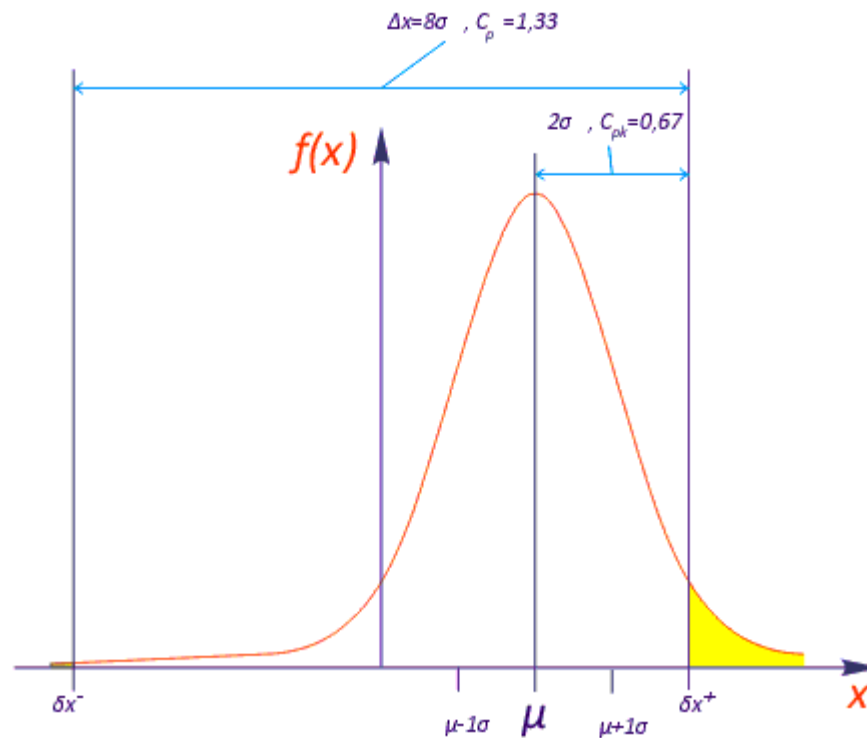


Рис. 4. Показатели C_p и C_{pk} при значительной систематической погрешности. Желтым показана площадь, соответствующая вероятности выхода за пределы поля допуска. Показатель C_p не учитывает смещения плотности вероятности, поэтому в данном случае его значение больше 1, что указывает на достаточно воспроизводимый процесс. Показатель C_{pk} учитывает смещение графика, поэтому в данном случае его значение указывает на низкую вероятность правильной установки.

Показатель реализуемости процесса C_{pk} по определению равен:

$$C_{pk} = \min\{C_{p^+}; C_{p^-}\} = \frac{\min\{\delta x^+ - \mu; \mu - \delta x^-\}}{3\sigma}, \text{ где}$$

$$C_{p^-} = \frac{\mu - \delta x^-}{3\sigma}; C_{p^+} = \frac{\delta x^+ - \mu}{3\sigma}$$

Аналогично, в случае поля допуска, симметричного относительно μ :

$$C_{pk} = \frac{\delta x - \mu}{3\sigma}$$

Следует обратить внимание, что на практике в приложении к автоматам установки компонентов поле допуска как правило симметричное относительно нуля, а не μ . В этом случае последняя формула справедлива только при $\mu = 0$, т.е. для идеально откалиброванного автомата, при этом $C_{pk} = C_p$.

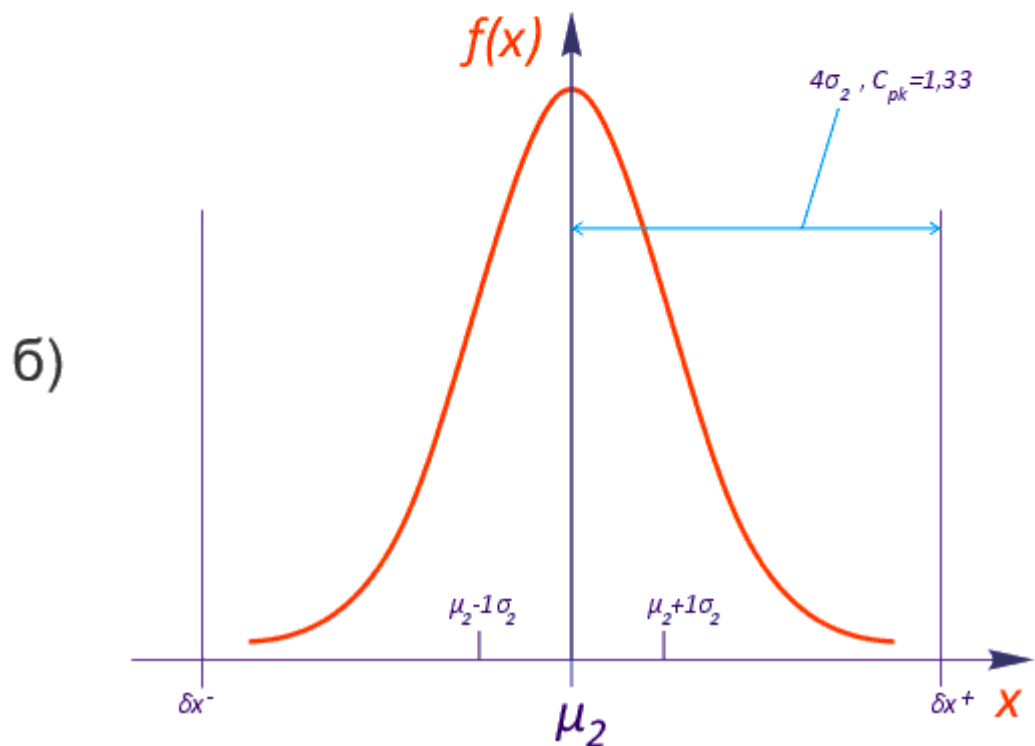
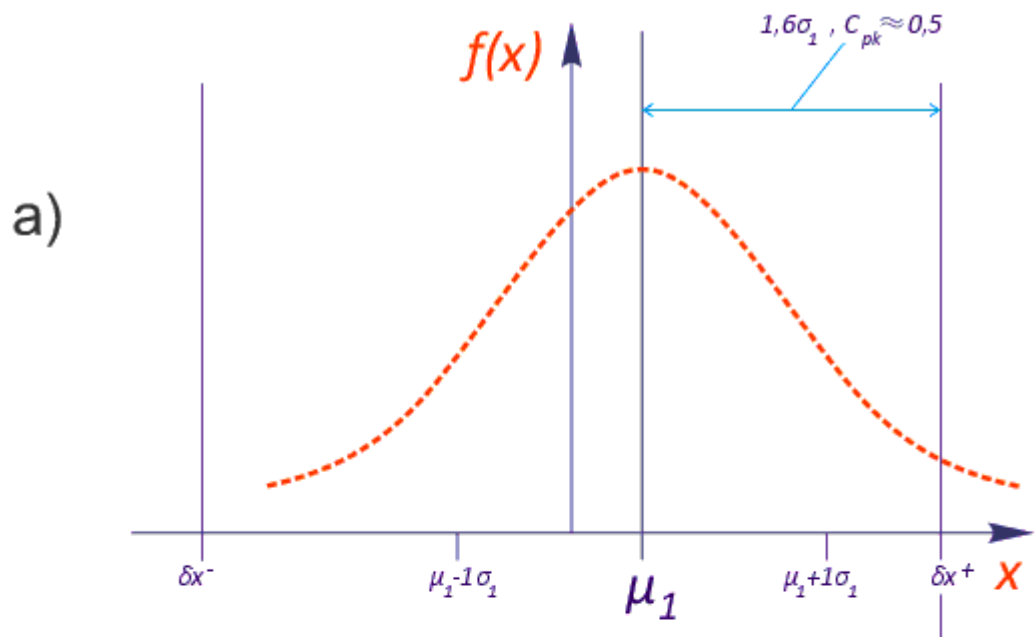


Рис. 5. Показатель C_{pk} учитывает как случайную, так и систематическую погрешность

Математический смысл показателя C_{pk} следующий: данный показатель равен числу σ , уместающихся между средним положением установленных компонентов (μ) и ближайшей к этому значению границе поля допуска, деленному на 3. Высокое значение показателя C_{pk} будет достигаться при значениях рассеивания ошибки σ , малых по сравнению с полем допуска автомата, и близком к нулю значении μ (рис. 5).

Можно сказать, что использование данного показателя одновременно «сдвигает» на величину μ и «сужает» на величину 2μ поле допуска (см. рис. 6) по сравнению со случаем применения показателя C_p .

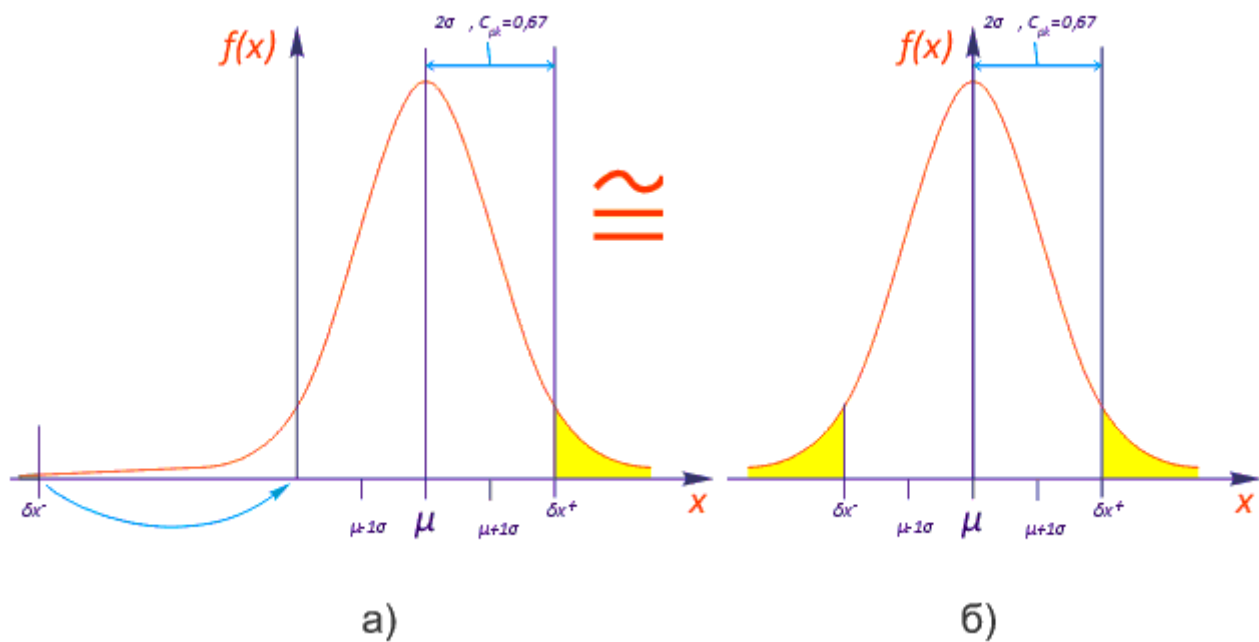


Рис. 6. Различные случаи, соответствующие одному значению C_{pk} .

а) Значительная систематическая погрешность, широкое поле допуска; б) Систематической погрешности нет, поле допуска достаточно узкое.

При наличии систематической погрешности значение C_{pk} соответствует значению C_p при более узком поле допуска, смещенном своим центром на величину μ .

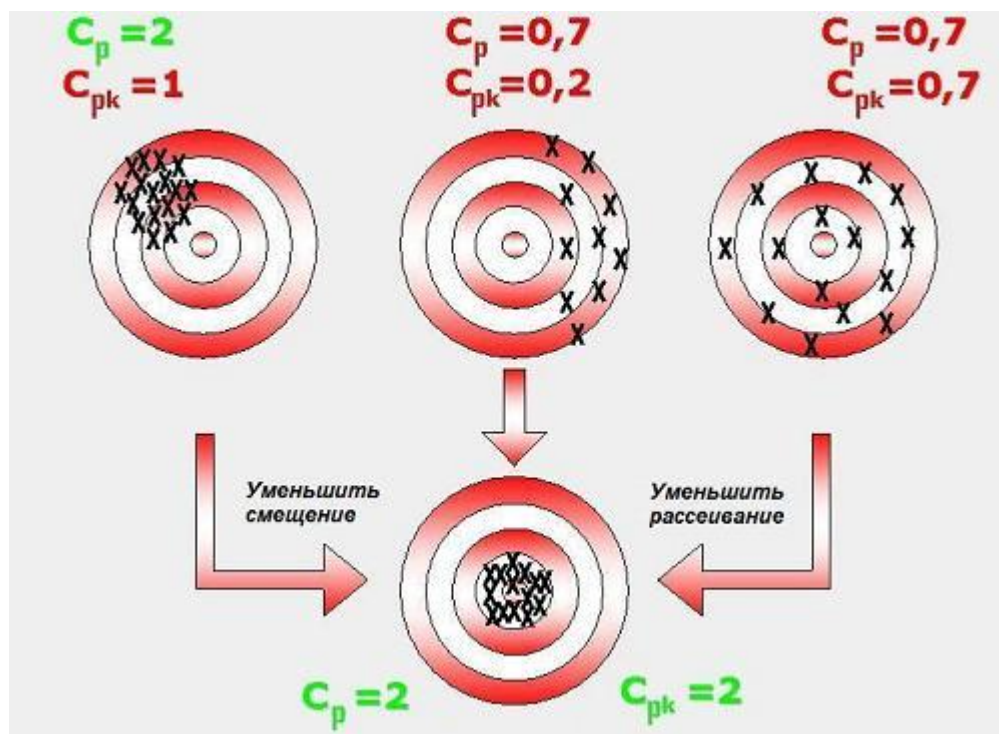


Рис. 7. Достижение высоких значений показателей C_p и C_{pk} возможно при одновременном снижении средней ошибки установки μ и ее рассеивания σ . Рисунок с сайта www.cetaq.net (с точностью до обозначений)

Процесс теоретически считается воспроизводимым, если его $C_p > 1,00$. Тем не менее, воспроизводимый на практике процесс обладает показателем $C_p > 1,33$, так как необходимо заложить некоторый запас, связанный с возможным возникновением различных дополнительных погрешностей (раскалибровка автомата и пр.). Работоспособный процесс характеризуется значением $C_{pk} > 1,33$ [14].

Целевые значения показателей C_p и C_{pk} рассчитываются, исходя из определенных характеристик точности процесса/автомата на уровне $\pm N$ сигма. Ниже приведены соотношения, помогающие лучше понять связь между целевыми значениями и σ :

- $C_p, C_{pk} > 1,00$ соответствуют $\pm 3\sigma$;
- $C_p, C_{pk} > 1,33$ соответствуют $\pm 4\sigma$;
- $C_p, C_{pk} > 1,67$ соответствуют $\pm 5\sigma$;
- $C_p, C_{pk} > 2,00$ соответствуют $\pm 6\sigma$.

Если производитель автомата заявляет точность $\pm 0,05$ при $C_{pk} = 1$, это означает, что даже при $\mu \neq 0$ ppm будет не хуже 2700. Насколько при этом будет велико значение μ и σ пользователя волновать не должно: конструкцией автомата будет обеспечена заданная вероятность.

Почему мы говорим «ppm будет не хуже», можно понять из графика на рис. 8. Поскольку данный показатель определяет число сигм, укладывающихся в расстояние между μ и «ближайшей» границей поля допуска, то в расстояние между μ и второй («дальней») границей будет укладываться большее число сигм, а значит общая вероятность правильной установки, например, при $C_{pk} = 1$ и $\mu \neq 0$ будет больше, чем вероятность из таблицы 1 для 3σ ($C_p = 1$).

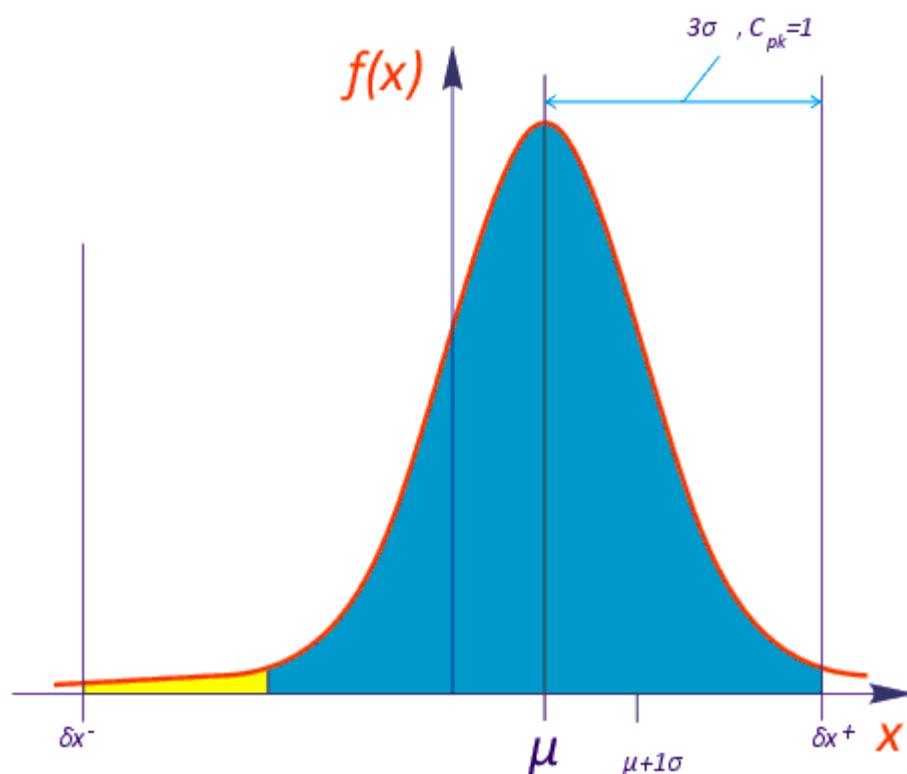


Рис. 8. Вероятность, неучитываемая показателем C_{pk} .

Желтым показана площадь, соответствующая вероятности попадания в поле допуска, которую не учитывает показатель C_{pk} .

Показатели C_m и C_{mk}

Показатели C_p и C_{pk} используются не только при определении точности установки компонентов. Это универсальные показатели, используемые в инструментах систем качества для единого подхода в оценке повторяемости процессов. Как мы уже говорили, показатели точности процесса отличаются от показателей точности оборудования, поэтому вместо показателей C_p и C_{pk} , строго говоря, следует использовать показатели возможностей оборудования C_m и C_{mk} . Формулы для нахождения этих параметров идентичны приведенным выше для C_p и C_{pk} , различие заключается только в характере сбора статистической информации. На практике же обычно пользуются обозначениями C_p и C_{pk} для показателей, характеризующих оборудование. Это не должно вводить в заблуждение, поэтому всегда нужно четко осознавать, о техпроцессе в целом, операции или оборудовании идет речь.

Характеристики точности в спецификации автомата

Подведем небольшой итог в виде общего списка показателей точности, которые используются производителями автоматов при описании их технических характеристик. В данном списке под x будем понимать положение компонента по одной из координат x или y , либо углу поворота θ вокруг оси Z .

- Поле допуска $\pm \delta x$ (для наиболее распространенного – симметричного – случая) – диапазон величин x , попадание в который соответствует качественной установке.
- Число сигм $N \sigma$ – показатель, характеризующий вероятность попадания значений x в поле допуска при отсутствии систематической погрешности.
- Показатель реализуемости процесса C_{pk} – показатель, характеризующий вероятность попадания значений x в поле допуска при наличии систематической погрешности.

Точность установки разных типов корпусов: влияние трех степеней свободы

При установке компонента он имеет три степени свободы: по оси X , по оси Y и по углу поворота θ вокруг оси Z . Фактически, системой управления автомата обеспечивается точность положения центра масс компонента. Но на практике наиболее важным является совмещение вывода с контактной площадкой, однако зная точность положения центра масс, например, по оси X , мы не можем сказать, какова точность положения по оси X некоторой точки на выводе компонента, не зная точности по θ , а также геометрии компонента.

Пусть компонент должен быть установлен в точку $(x;y)$ в координатах платы; некоторая критическая точка A на выводе компонента имеет координаты относительно центра масс компонента $(l;w)$; возможное отклонение положения центра масс компонента при заданной вероятности по трем степеням свободы равно, соответственно, Δx , Δy и $\Delta \theta$. Тогда возможное отклонение положения точки A после установки при данной вероятности будет определяться следующими соотношениями:

$$\Delta l = \Delta x - l + l \cos \Delta \theta - w \sin \Delta \theta$$

$$\Delta w = \Delta y - w + l \sin \Delta \theta + w \cos \Delta \theta$$

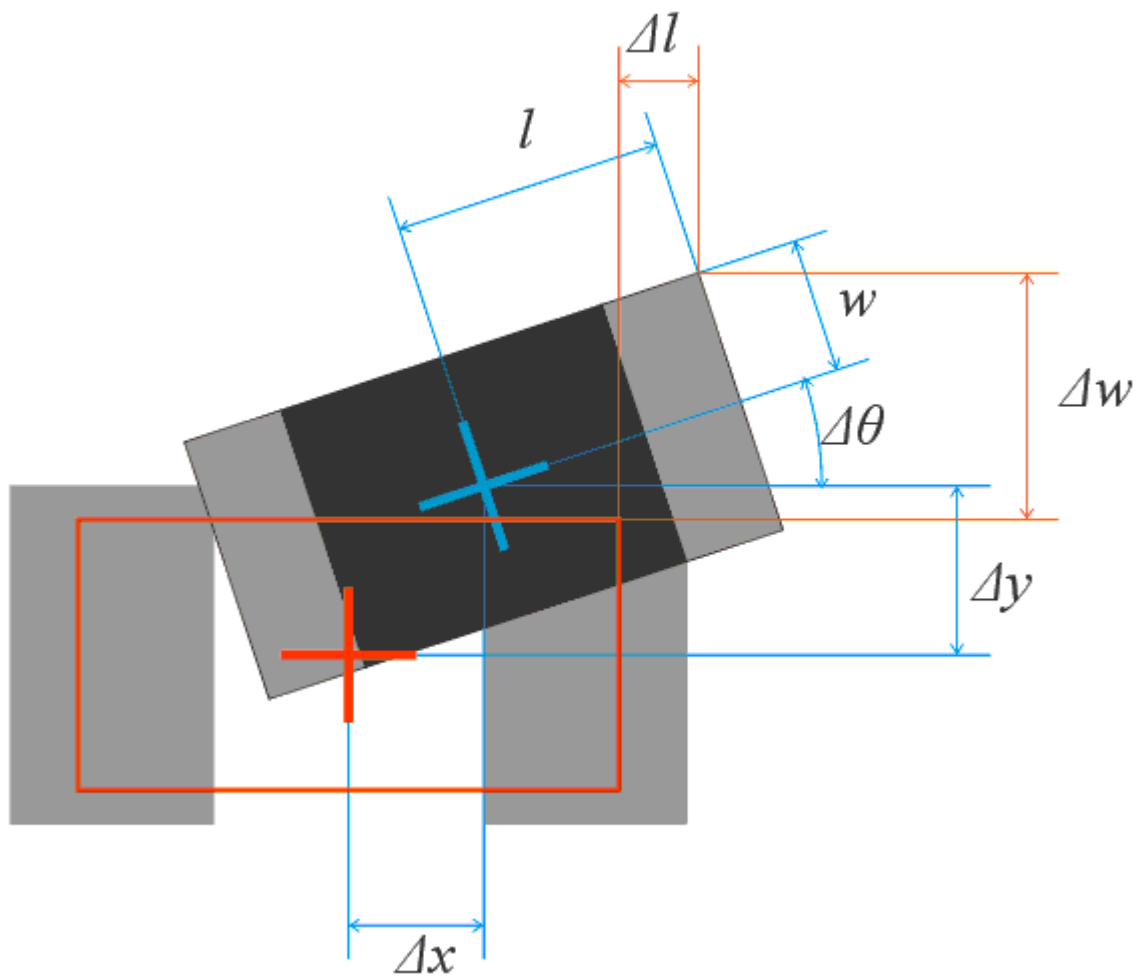


Рис. 9. Результирующее смещение точки компонента

Таким образом, погрешность установки центра масс может не отражать реального поля допуска установки компонента.

Производитель, как правило, указывает только погрешность по одной оси. Как правило, погрешность автомата по второй оси равна либо меньше указанной. Однако, как учесть ошибку поворота компонента, если ее последствия связаны с конкретным типоразмером?

Часто указанная в спецификации погрешность установки компонента справедлива для любой точки выводов (контактных поверхностей) определенного корпуса, т.е. учитывает погрешности по всем степеням свободы (в терминах приведенных выше формул производитель указывает не $\max\{\Delta x, \Delta y\}$ и $\Delta\theta$, а $\max\{\Delta l, \Delta w\}$). Этим типом корпуса может являться один из стандартных компонентов, указанных в стандарте IPC-9850 (чаще всего – ЧИП-компонент размера 0603), либо самый сложный корпус, установка которого гарантируется производителем автомата (например, QFP или BGA максимального размера с минимальным шагом выводов). Однако если производитель не ссылается на стандарт, по которому производилось измерение точности, и не указывает явно, какие компоненты устанавливаются с заданной точностью, эти вопросы следует уточнить.

Что хотел сказать производитель?

Рассмотрим три наиболее часто встречающихся варианта указания данных о точности автомата в его спецификации.

1. «Точность $\pm 0,05$ мм».

Очевидно, что существует вероятность установки автоматом компонента вне поля допуска, однако, эту вероятность производитель не указал. Приведенная формулировка явно не полная. Иногда, если никаких

сведений о вероятности нет, считается, что данное поле допуска приведено для 1σ , но это не является общим правилом. В этом случае следует уточнить у производителя вероятностные характеристики точности.

2. «Точность $\pm 0,05$ мм при 3σ ».

В данном случае производитель указал точность для идеально откалиброванного автомата. Небольшая раскалибровка будет причиной отклонения вероятностных показателей точности от указанных в спецификации, и к каким последствиям это приведет – не известно. Некоторые производители считают, что такая формулировка полностью идентична «точности $\pm 0,05$ мм при $C_{pk} = 1$ », однако это также не является общим правилом. В этом случае у производителя следует уточнить, как на точность сборки будет влиять раскалибровка автомата.

3. «Точность $\pm 0,05$ мм при $C_{pk} = 1$ ».

В данном случае производитель указал наиболее полную информацию о точности автомата, однако и здесь есть некоторая неоднозначность. Дело в том, что значение поля допуска при заданном C_{pk} , измеренное на только что откалиброванном автомате, будет отличаться от значения после некоторого времени работы из-за появления систематической погрешности. В этом случае стоит уточнить, в течение какого периода после калибровки производитель гарантирует данные характеристики.

И в заключение первой части отметим еще одну особенность специфицируемых характеристик точности оборудования. Некоторые производители указывают, например, следующее: «Точность $\pm 0,15$ мм при 3σ , $\pm 0,20$ мм при 4σ ». Зачем указывать два значения, если их можно пересчитать одно в другое (мы ранее показывали, что при $\mu = 0$, число сигм пропорционально ширине поля допуска)? Дело в том, что в технических характеристиках оборудования приводят данные, подтвержденные при испытаниях. Например, данный автомат проходил испытания для 3σ и 4σ , но не проходил для 6σ , и производитель не должен указывать в спецификации «Точность $\pm 0,30$ мм при 6σ », хотя, скорее всего, это на практике будет верно.

Как определяются параметры точности при испытаниях рассматривается во второй части.

Статистическое определение параметров точности оборудования

Оценка точности автомата в общем случае происходит путем анализа некоторой выборки – т.е. установки группы компонентов на ПП, измерении отклонения их положения от номинального и последующего проведения статистического анализа полученных данных.

Предположим, с помощью исследуемого автомата на печатную плату было установлено n компонентов, после чего была измерена ошибка размещения каждого ЭК, т.е. отклонение центра его реального положения на ПП от номинального (по осям X , Y или углу θ).

Важно отметить, что результаты данной процедуры будут в значительной степени зависеть от того, проводится ли она на откалиброванном оборудовании или нет. Также должны быть сведены к минимуму факторы, не относящиеся к автомату: геометрические размеры компонентов и рисунка платы должны быть изготовлены с достаточной точностью, чтобы это не влияло на результаты эксперимента, напряжение питания и давление в пневматической системе должны хорошо контролироваться и т.д.

Считая закон распределения положения компонента нормальным, можно определить несмещенные оценки математического ожидания и среднеквадратичного отклонения по выборке из n компонентов по следующим формулам:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i;$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}$$

Определив данные оценки, можно указать вероятность попадания случайной величины в стандартный диапазон, симметричный относительно нуля и кратный среднеквадратическому отклонению: $\pm 1 \sigma$, $\pm 2 \sigma$ и т.д.

Стандартизованная процедура оценки точности для автоматов установки компонентов

Чтобы обеспечить как производителей автоматов установки компонентов, так и их пользователей стандартной процедурой оценки точности такого оборудования, Ассоциацией IPC в 2002 году был выпущен специальный стандарт IPC-9850 «Surface Mount Placement Equipment Characterization» – «Определение параметров оборудования для установки компонентов поверхностного монтажа» [4].

Точность в данном стандарте вычисляется двумя способами:

1) Отдельно для осей X, Y и угла θ при $Cpk = 1,33$ и $Cpk = 2$.

2) Комплексно, с объединением в одном значении ошибок установки по осям X, Y, Z и углу θ , для показателя перекрытия вывода и КП платы 50% и 75%.

Первый способ является традиционным для производителей сборочного оборудования. Важно отметить, что стандарт предусматривает указание точности при строго определенных значениях показателя работоспособности процесса. Отметим, что корректно сравнивать значения погрешностей двух моделей оборудования можно лишь в том случае, когда оба из них приводятся при одном и том же значении Cpk .

Расчет заключается в определении отклонений симметричного допуска автомата при известных значениях μ , σ и приведенных выше значениях Cpk :

$$\delta x = 3\sigma_x \cdot Cpk + |\mu|.$$

Вычисленные значения по осям X, Y и углу θ записываются в отчетную форму.

Второй способ в большей степени принимает во внимание последующий процесс пайки установленных на плату компонентов. Он позволяет учесть случаи, когда отдельные составляющие суммарной погрешности установки попадают в допустимый диапазон, но в комплексе не обеспечивают формирование требуемой геометрии паяного соединения.

Перекрытие КП платы и вывода на 50 и 75% выбрано разработчиками стандарта, исходя из следующих соображений. Стандартом IPC-A-610D «Критерии качества электронных сборок» [5] предусмотрено разделение электронной аппаратуры на классы:

Class 1 – электронные устройства общего назначения;

Class 2 – специализированные электронные устройства, для которых обязательными являются требования сохранения характеристик в процессе длительной эксплуатации;

Class 3 – электронные устройства с высокими характеристиками, для которых важнейшими требованиями являются сохранение высоких эксплуатационных параметров, при этом условия функционирования могут быть жесткими, а изделие должно функционировать бесперебойно в течение требуемого времени.

Требования к устройствам различных классов с точки зрения точности установки ЭК на плату отличаются по максимально допустимому выступанию вывода за пределы КП – на 50% от ширины вывода для изделий 1 и 2 класса, и на 25% – 3 класса, что соответствует требованиям к минимально допустимой ширине образованного паяного соединения – не менее 50% перекрытия вывода ЭК и КП для изделий 1 и 2 класса, и не менее 75% – для изделий 3 класса [5, 6].

В стандарте приведены формулы для расчета перекрытия, отдельно для компонентов с выводами по двум и четырем сторонам корпуса, а также для компонентов с матричными выводами на основе двумерной математической модели. Размеры КП при этом берутся из стандарта IPC-782A (который в настоящее время заменен на более современный стандарт IPC-7351A).

Процедура расчета при втором подходе следующая:

- определяются ошибки установки компонентов по осям X, Y, Z и углу θ ;
- определяются значения перекрытий выводов отдельно по каждому установленному компоненту согласно формулам стандарта IPC-9850;
- определяются среднее перекрытие μ (в %) и его среднеквадратическое отклонение σ ;
- определяются два значения C_{pk} – для 50% и 75% перекрытия соответственно по следующим формулам:

$$C_{pk}^{50\%} = \frac{\mu - 50\%}{3\sigma}$$

для 50% перекрытия и

$$C_{pk}^{75\%} = \frac{\mu - 75\%}{3\sigma}$$

для 75% перекрытия.

Вычисленные значения C_{pk} отражаются в отчетной форме в качестве результатов.

Под ошибкой установки компонентов в стандарте понимается расстояние между действительным центром установленного на плату компонента и его номинальным положением, определенным согласно CAD-данным относительно реперных знаков тестовой платы. Ошибка определяется по взаимно перпендикулярным осям X и Y, а также по углу θ поворота ЭК вокруг его центра тяжести в плоскости XY; ось X располагается параллельно надписи на тестовой плате, а ось Y – перпендикулярно ей.

Определение повторяемости

Повторяемость согласно стандарту IPC-9850 определяется как среднеквадратическое отклонение ошибки установки компонентов, т.е. представляет собой σ . Результаты отражаются в отчетной форме по осям X, Y и углу θ .

Применяемое измерительное оборудование

После установки компонентов на тестовую плату необходимо точно измерить координаты их расположения на ней и определить ошибку установки по обеим осям и углу. Проведение таких измерений с использованием системы технического зрения (СТЗ) автомата не даст статистически достоверных результатов, так как точность результатов измерений будет иметь тот же порядок, что и определяемая ошибка установки ЭК на плату. Кроме того, автомат не обеспечит достаточной гибкости проведения подобных измерений, так как задача организации разнообразных статистических экспериментов выходит за рамки его функционального назначения. Процедура калибровки, заложенная в ПО автомата, в общем случае отличается от проводимой согласно стандарту IPC-9850, и может не предоставлять пользователю полный набор требуемой статистической информации.

Вследствие этого для проведения измерений следует пользоваться специальными установками – координатно-измерительными машинами (КИМ). Они обеспечивают высокую точность измерений, обладают развитыми возможностями по реализации различных статистических экспериментов и обработке полученной информации.



Рис. 10. Внешний вид КИМ CmController 5 Compact производства компании CeTaQ GmbH. Фото с сайта www.cetaq.net

В качестве примера такого оборудования можно привести изображенную на рис. 10 портальную модель CmController 5 Compact производства компании CeTaQ GmbH [7]. Данная модель предназначена специально для проведения измерений при выполнении различных операций технологии поверхностного монтажа, в том числе непосредственно для выполнения тестов согласно стандарту IPC-9850.

Установка имеет следующий набор параметров:

- Погрешность измерений: для чип-компонентов – 4 мкм; для стеклянных макетов QFP-компонентов – 2 мкм.
- Производительность: 1500 измеренных точек в час.
- Рабочая область: 300 x 200 мм.
- ОС: Windows 2000.
- Оснащение: ЖК-монитор, мышь или трекбол, сетевой адаптер, DVD-RW и пр.
- Программное обеспечение: для обработки изображений (CmCVis) и статистической обработки полученных данных (CmCStat 5.0).
- Габариты: ~ 600 x 600 x 1230 мм.
- Вес: 120 кг.

Подобные КИМ могут использоваться для оценки точности не только автоматов установки компонентов, но и установок для нанесения пасты трафаретной печатью или дозированием, а также систем АОИ.



Рис. 11. Рабочая зона КИМ StController 5 в процессе проведения измерений. Фото с сайта www.cetaq.net

Тестовые платы

Метод оценки точности и повторяемости, предлагаемый стандартом IPC-9850, использует в качестве специальной тестовой платы стеклянную панель.

Стеклянные платы используются вследствие хорошей стабильности их размеров по сравнению с традиционными печатными платами из стеклотекстолита, а также возможности их очень точного изготовления. Кроме того, прозрачность стекла позволяет КИМ использовать подсветку снизу для увеличения повторяемости измерений. Изготовленные из хрома реперные знаки обеспечивают высококонтрастное изображение при распознавании их как посредством СТЗ КИМ, так и СТЗ автомата установки компонентов.

Выпускаются различные тестовые платы – этим занимаются, в частности, сами производители КИМ для поверхностного монтажа – отличающиеся размерами, толщиной, цветом выполненных из хрома изображений (например, коричневый, голубой либо традиционный серебристый цвет), шагом сетки и допуском на ее расположение (типичные значения составляют ~0,5 – 4 мкм). Существуют как стандартные типоразмеры плат, так и возможность их изготовления на заказ под конкретные требования заказчика. Часто платы крепятся на металлическую раму с целью защиты от повреждений или выполнения особых требований к проведению измерений. Тем не менее, возможно применение тестовых плат без рам, как это, в частности, предусмотрено стандартом IPC-9850.

Пример тестовой платы, предназначенной специально для определения точности автомата установки компонентов методами стандарта IPC-9850, приведен на рис 12.

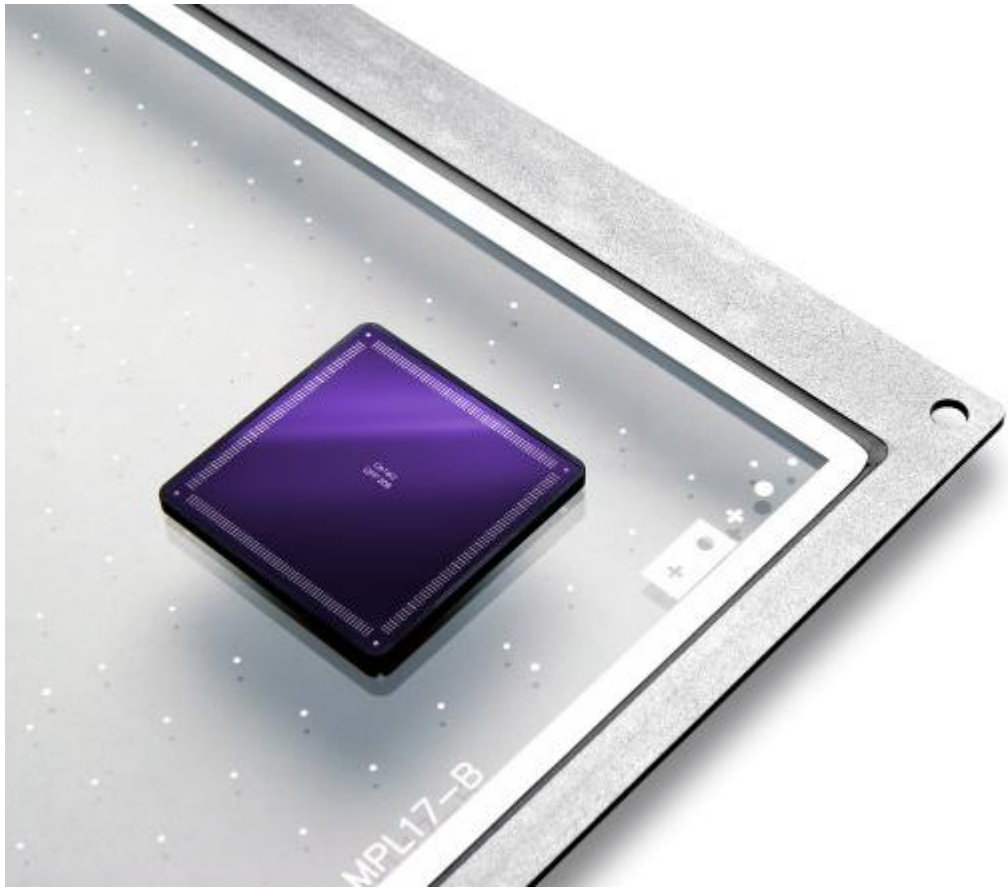
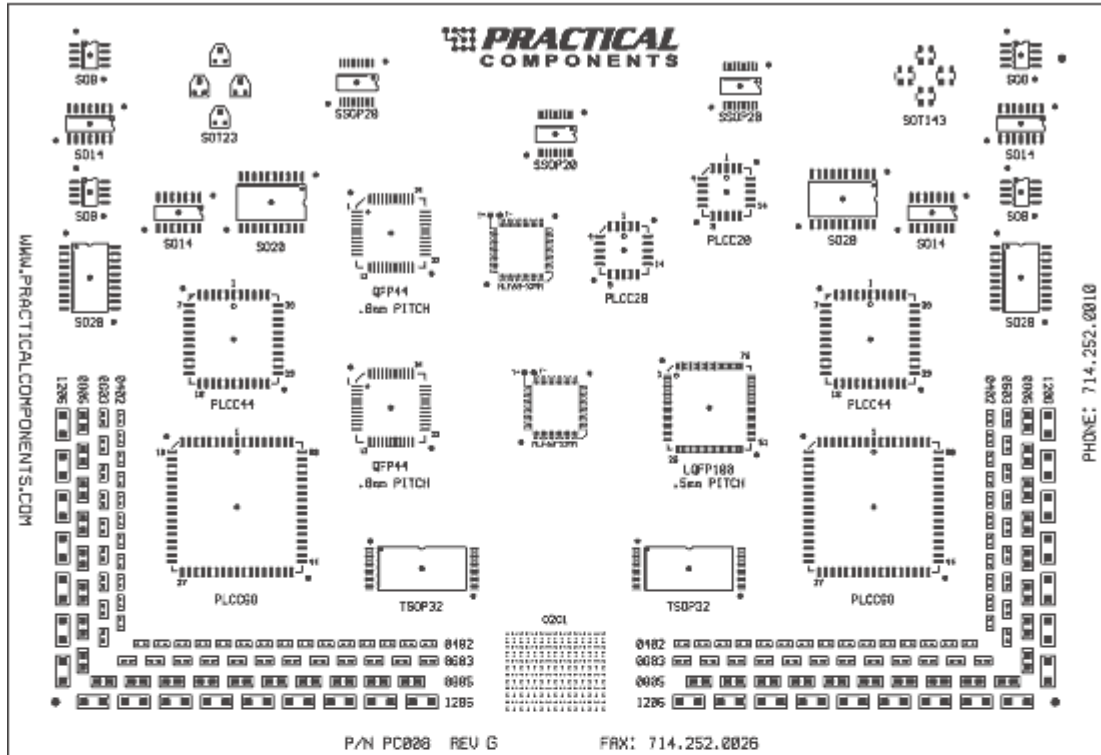


Рис. 12. Панель MPL17, изготовленная в соответствии с требованиями стандарта IPC-9850. Фото с сайта www.cetaq.net

Выпускаются платы, специально предназначенные для осуществления калибровки автоматов. Их предоставляют как сами производители оборудования, так и сторонние фирмы-производители тестовых плат и макетов компонентов [15]. На рис. 13 приведен пример такой многофункциональной платы, предназначенной, в частности, для проведения тестирования/калибровки автоматов.

СТОРОНА 1



СТОРОНА 2

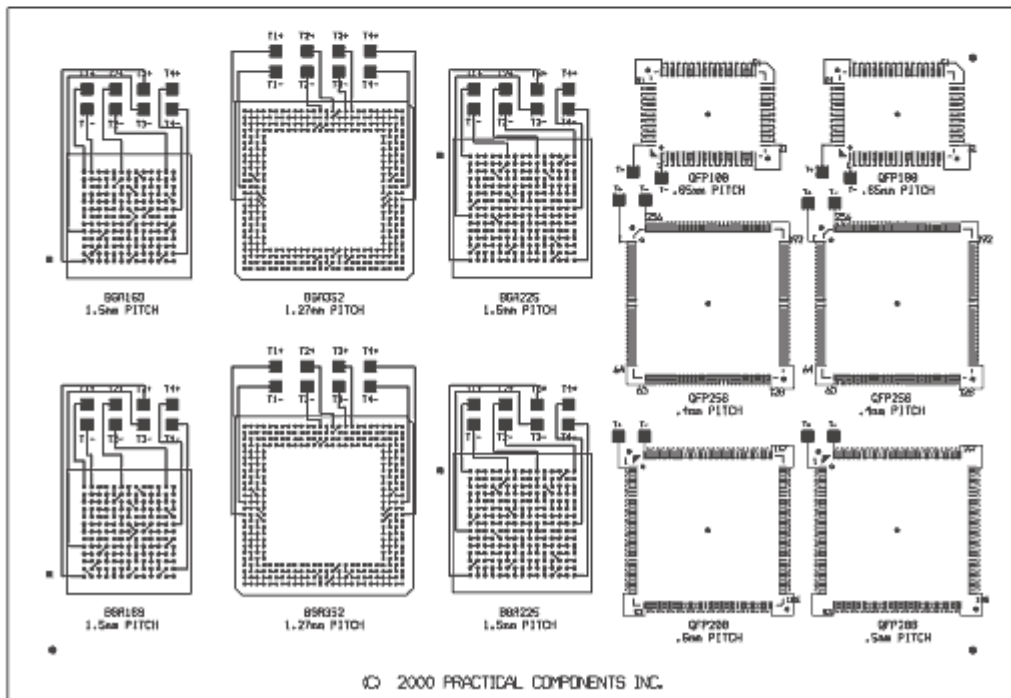


Рис. 13. Тестовая/калибровочная плата. Изображение с сайта www.practicalcomponents.com

Тестовые компоненты

ЭК также представляют собой макетные образцы, с высокой точностью изготовленные из стекла с нанесенными на них изображениями проекции корпуса и выводов, которые выполнены из хрома. Эти макеты компонентов обладают всеми свойствами реальных ЭК, их отличие – исключительно в высокой точности изготовления. Погрешность изготовления таких ЭК составляет менее 2 мкм.

Важно использовать те макеты ЭК, у которых изображение выводов нанесено на сторону, располагаемую ближе к видеокамере СТЗ КИМ. В противном случае, если камера располагается под некоторым углом к плоскости ЭК, возможно формирование побочного изображения, смещенного относительно действительного, вследствие преломления света стеклянным корпусом макета ЭК (рис. 14).



Рис. 14. Влияние расположения стороны платы, на которой расположены изображения выводов из хрома на корпусе макета ЭК, по отношению к позиции камеры СТЗ КИМ на точность формирования изображения: а) изображения расположены на обратной стороне платы; б) изображения расположены на лицевой стороне платы. Рисунок с сайта www.cetaq.com

Стандарт IPC-9850 предусматривает использование четырех типов таких компонентов: QFP (двух типоразмеров), BGA, SOIC-16 и конденсаторов типоразмера 0603 (1608 в метрической системе). Конденсаторы были выбраны вследствие более точного изготовления их сторон в противоположность чип-резисторам, у которых верхние границы выводов, обозреваемые камерой КИМ, могут не совпадать с границами выводов на нижней стороне, обозреваемыми камерой СТЗ нижнего обзора автомата при установке.

Пример стеклянного макета компонента QFP 208 приведен на рис. 15.

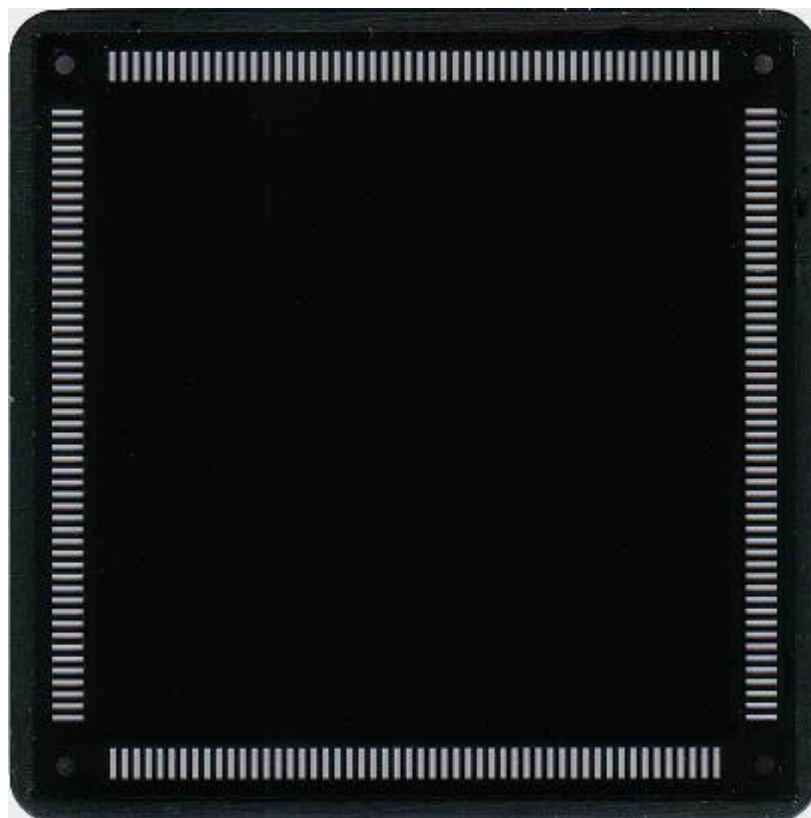


Рис. 15. Макет корпуса ЭК QFP 208. Рисунок с сайта www.cetaq.net

Способ удержания ЭК на тестовой панели

На тестовую панель в позицию установки компонентов наносится клейкое вещество, удерживающее ЭК в процессе установки на автомате и последующих измерений координат их центров с помощью КИМ. Стандартом IPC-9850 не рекомендуется нанесение клея распылением из-за нестабильности полученных результатов, и приведенные в нем рекомендации направлены на применение двусторонних клейких лент и листов. Подробно процедура нанесения клейкого слоя на тестовую плату описана в Приложении С IPC-9850. Отметим, что основным требованием является максимальное смещение ЭК, установленных на тестовую пластину с нанесенным адгезивом, не более чем на 2 мкм в течение времени, прошедшего между двумя последовательными измерениями их положения (минимально – спустя 2 часа после установки). Межоперационную транспортировку тестовой платы с установленными на клейкий слой компонентами следует осуществлять строго в горизонтальном положении [4].

Методы определения центра установленного на панель ЭК

Для чип-компонентов и SOIC-микросхем определение их центра проводится, исходя из результатов измерений расположения соответственно корпусов ЭК и их выводов. Для QFP и BGA-компонентов координаты центра вычисляются, исходя из измеренного положения локальных реперных знаков, расположенных как на тестовой стеклянной пластине, так и на самом стеклянном корпусе макета ЭК. Это сделано с целью сокращения предельной погрешности позиционирования измерительной камеры с высоким разрешением, так как ее поле зрения меньше размеров корпусов крупных BGA- и QFP-компонентов (рис. 16).

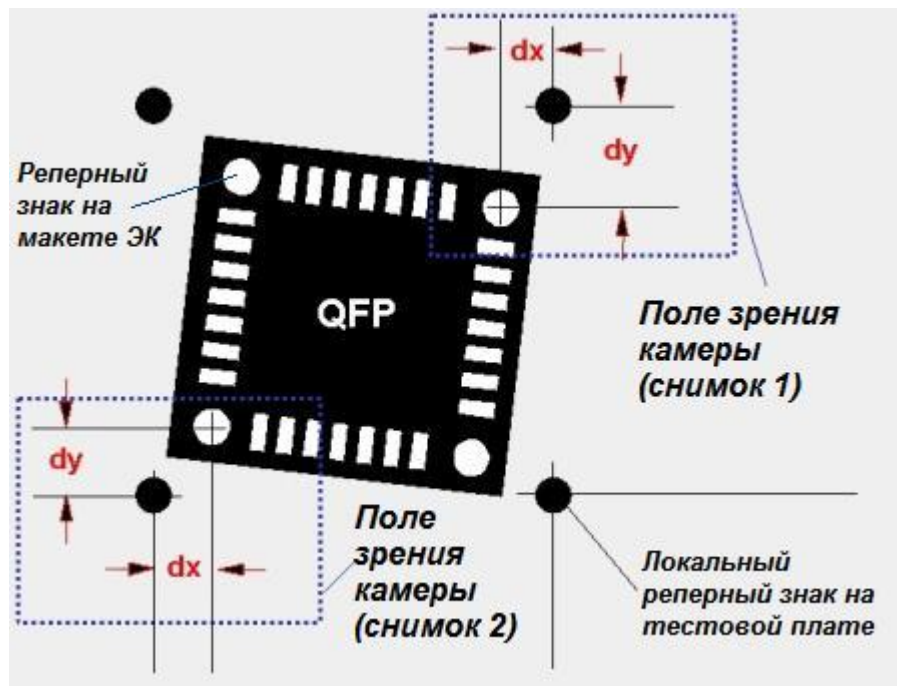


Рис. 16. К определению координат центра QFP и BGA-компонентов с помощью оптической системы КИМ. Рисунок с сайта www.cetaq.com

В Приложении D стандарта IPC-9850 рассмотрено несколько математических методов определения координат центра ЭК, приведены расчетные формулы и даны рекомендации по выбору метода, подходящего для конкретного типа ЭК.

Точность и повторяемость координатно-измерительных машин

Неточность измерений вызывается следующими факторами:

- погрешностью изготовления стеклянной тестовой платы;
- погрешностью изготовления тестовых образцов ЭК;
- точностью и повторяемостью координатно-измерительной машины (КИМ).

Параметры КИМ в части точности и повторяемости измерений должны обеспечивать возможность достоверного определения точности и повторяемости установки компонентов на печатную плату.

Оценка повторяемости и воспроизводимости КИМ

Для оценки параметров КИМ применяются различные методы оценки повторяемости и воспроизводимости Gauge Repeatability and Reproducibility (GR&R), заключающиеся в определении ошибки измерений $\delta(\text{GR\&R})$. Одна из методик определения $\delta(\text{GR\&R})$ приведена в Приложении H стандарта IPC-9850. Пригодность данной КИМ для проведения конкретных измерений определяется отношением этой ошибки к допуску автомата, выраженному в %:

$$GR\&R = \frac{\delta(R\&R)}{\Delta x} \cdot 100\%$$

, где

$$\Delta x = \delta x^+ - \delta x^-$$

В процессе измерений точности и повторяемости КИМ заполненная 24 компонентами специальная тестовая плата Placement Verification Panel (PVP), чертеж которой приведен в стандарте IPC-9850, подвергается трем циклам по три измерения в каждом; при этом необходимо задействовать по крайней мере двух различных операторов КИМ.

В стандарте IPC-9850 результат представляется в виде допустимого верхнего и нижнего отклонения допуска автомата, при которых обеспечивается значение GR&R не хуже 25% (при симметричном допуске):

$$|\pm[\delta x]| = \frac{[\Delta x]}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta(R\&R)}{25\%} \cdot 100\% = 2 \cdot \delta(R\&R)$$

При этом, соответственно, минимально допустимая погрешность установки компонентов для измеряемого автомата, которая приведена в его технических характеристиках, составляет

$$[\Delta x] = 4 \cdot \delta(R\&R)$$

Традиционно значение GR&R должно не превосходить 20-25%; однако, в том же стандарте IPC-9850 приведено более жесткое ограничение на ошибку измерений: GR&R < 10% [4 – Приложение H].

Производитель КИМ [7] отмечает, что средство измерений должно быть, по крайней мере, в 6-10 раз точнее, чем измеряемый объект. Параметры упоминавшейся выше установки CmController позволяют, таким образом, производить измерения точности и повторяемости автоматов установки компонентов с малым шагом выводов, в спецификациях которых указаны значения вплоть до 12 мкм, а высокопроизводительных автоматов для установки чип-компонентов – до 24 мкм (при).

Точность оптической системы КИМ

Кроме описанной выше процедуры оценки повторяемости и воспроизводимости, для КИМ в рамках стандарта IPC-9850 проводится процедура определения точности, с которой оптическая система КИМ способна измерять положение установленных на тестовую стеклянную панель макетов ЭК. Данная процедура проводится с применением стандартизованной Национальным институтом стандартов и технологий США (National Institute of Standards and Technology, NIST) панели проверки точности Accuracy Verification Panel (AVP), также представляющей собой стеклянную панель с вытравленными из хрома прецизионными изображениями проекций корпусов ЭК с выводами (для 1608С и SOIC) и групп из четырех локальных реперных знаков на корпусе компонента (для QFP и BGA). Некоторые из них специально выполнены смещенными и повернутыми относительно своих номинальных положений, задаваемых в программе КИМ, чтобы оценить точность распознавания при рассогласовании между заданным и номинальным расположением компонента на плате.

С помощью КИМ проводятся измерения положения центра каждого ЭК на AVP, после чего из этих значений вычитается номинальное значение, сертифицированное NIST. В результате процедуры определяются верхнее и нижнее отклонения поля допуска КИМ, при которых обеспечивается значение показателя работоспособности процесса Cpk, равного 2.0 (при симметричном допуске):

$$\delta x = 3\sigma_x \cdot Cpk + |\mu|$$

Такие вычисления проводятся для осей X, Y и угла θ . Стандарт не предусматривает оценки соответствия вычисленных отклонений требуемым значениям, однако утверждается, что чем ближе измеренные КИМ значения к номинальным, тем выше измерительные возможности оптической системы данной КИМ.

Итак, точность автоматов, указываемая в их спецификациях в виде поля допуска при определенном числе сигм, относится к идеальным рабочим условиям – полностью откалиброванный автомат, систематическая составляющая погрешности сведена к нулю, сборка идет с применением идеальных плат и компонентов. Ее значение, таким образом, фактически отражает повторяемость установки компонентов и для достоверной оценки числа установленных ЭК, попадающих в указанный диапазон, должна записываться производителем оборудования в технических характеристиках автомата вместе с количеством соответствующих этому диапазону сигм.

Для оценки поведения автомата в реальных производственных условиях, с учетом разброса погрешности и положения ее среднего, необходимо дополнительно определить значения показателя и релизуемости процесса Cpk. Неправильная калибровка автомата либо ее отсутствие может привести к существенному падению показателя Cpk, несмотря на то, что показатель Cp будет находиться при этом в пределах своих допустимых значений. При этом большое число компонентов будет установлено на плату с ошибкой,

выходящей за пределы допуска автомата, указанного в его технических характеристиках. Вследствие этого очень важно проводить регулярное техническое обслуживание и периодическую калибровку автоматов [14].

Точность и повторяемость автоматов оценивается с применением международного стандарта IPC-9850 [4]. Для выполнения этой процедуры необходимо воспользоваться специальным измерительным оборудованием – координатно-измерительными машинами, параметры точности которых допускают получение достоверных результатов при проведении такого эксперимента.