



## МЕТОДИКА ДОСТИЖЕНИЯ ЗАПЛАНИРОВАННОГО УРОВНЯ КАЧЕСТВА И НАДЕЖНОСТИ

Станислав Гафт  
lines@ostec-group.ru

**З**апланированный уровень качества и надёжности выпускаемой продукции является величиной расчётной и определяется максимально допустимой стоимостью ремонтов, которые предполагается провести в гарантийный период в зависимости от требований потребителя, условий эксплуатации выпускаемой продукции и стратегии проведения гарантийных ремонтов.

Если потребитель при заключении договора на поставку 10 тысяч приборов требует, чтобы гарантийный срок составлял 10 лет, география использования включает всю территорию России, а ремонт предполагается проводить силами предприятия-изготовителя, нетрудно подсчитать, что при уровне отказов в 1% необходимо будет совершить 100 выездов для проведения гарантийных ремонтов. Затраты на проведение гарантийных ремонтов планируются, как правило, на уровне 2...4% от отпускной цены. Если прибор стоит 100 тысяч рублей, то на проведение ремонтов всей партии может быть запланирована сумма в 3 млн. рублей. Это значит, что в среднем на одну командировку может быть затрачено 30 тыс. рублей. Если указанные приборы будут эксплуатироваться преимущественно в Западной Сибири и на Дальнем Востоке, запланированных средств будет явно недостаточно. Если приборы стоят 10 тыс. рублей, а в партии – 100 тысяч штук, ситуация резко усугубляется, так как планируемые затраты на проведение гарантийных ремонтов возрастут десятикратно и могут превысить запланированный уровень прибыли. Повышение отпускной цены для компенсации указанных затрат будет снижать конкурентоспособность выпускаемой продукции и может стать препятствием для заключения выгодного контракта. Учитывая всё вышесказанное, становится понятным наиболее часто встречающееся значение планируемого уровня дефектности: 0,1% или 1000 ppm.

Используя данные приведенных выше примеров, попробуем рассчитать максимальные затраты на ремонт в процессе производства.

Если в структуре цены прибора (100 тыс. руб.) прибыль составляет 20%, то себестоимость равна 80 тыс. рублей. В структуре себестоимости компоненты, комплектующие и материалы составляют 70% (величина характерная при производстве электронных приборов), а работы – 30% (24 тыс. рублей). Допустим, прибор имеет одноплатную конструкцию с 1000 компонентов и 3000 паяных соединений. При использовании первоклассного сборочного оборудования максимально достижимый уровень дефектности составляет 100ppm в середине большой партии. В этом случае на партии в 10 тыс. штук печатных узлов мы получим:  $3\ 000 \cdot 10\ 000 \cdot 100 / 1\ 000\ 000 = 3\ 000$  потенциально дефектных паяных соединений.

Кроме того, первоклассные поставщики и производители электронных компонентов гарантируют уровень дефектности 10 ppm. Это означает, что на партии в 10 тыс. штук мы получим:  $1\ 000 \cdot 10\ 000 \cdot 10 / 1\ 000\ 000 = 100$  потенциально дефектных компонентов.

Это означает, что 31% спаянных печатных узлов будут иметь потенциальные дефекты.

Трудоёмкость диагностики и локализации дефекта на электронном модуле, имеющем 1 000 компонентов, в среднем составляет



Рис. 11 Схема технологического процесса сборки печатных узлов без систем контроля и инспекции



Рис. 12 Алгоритм процесса достижения запланированного уровня качества выпускаемой продукции

не менее 4 часов. При стоимости нормо-часа для высококвалифицированного специалиста на уровне 25 долларов США (с учётом накладных расходов), затраты на ремонт при выпуске партии указанных приборов без средств автоматической диагностики и локализации дефектов составят:

$3\ 100 \cdot 4 \cdot 25 = 310\ 000$  долларов США или около 10 000 000 рублей.

Средние минимальные затраты на ремонт одного прибора составят:

$10\ 000\ 000 / 10\ 000 = 1\ 000$  рублей.

Более того, указанные расчёты справедливы, если все печатные узлы будут обработаны в одной партии, так как в начале и конце партии уровень дефектности, как правило, в несколько раз выше (в начале партии необходимо устранить последствия ошибок операторов, несоответствующих компонентов и комплектующих, а в конце партии – нехватки компонентов).

Кроме того, самый квалифицированный наладчик/регулировщик и самый добросовестный контролёр не в состоянии в полном объёме проверить выпускаемую продукцию на соответствие её конструкторской и нормативной документации. Как результат – дополнительные затраты на ремонт приборов, отказавших в процессе приёмо-сдаточных испытаний и у потребителя в гарантийный период.

Приведенные выше примеры наглядно подтверждают известный постулат: «Стоимость устранения дефекта тем ниже, чем ближе к месту его потенциального возникновения он обнаружен». А это означает, что необходимо добиваться выпуска качественной и надёжной продукции на заводе-изготовителе. Вопрос второй: «Какая технология обеспечивает достижение запланированных уровней качества и надёжности и какие затраты для этого

Таблица 7 Классификация технологических дефектов при последовательном внедрении автоматических систем контроля и инспекции

Дефект	Количество дефектов за отчётный период при последовательном внедрении автоматических систем инспекции и контроля					Наиболее вероятная причина возникновения дефекта	Примечание
	До начала внедрения систем инспекции и контроля	Внедрение системы рентгеновской инспекции	Внедрение системы АОИ контроля качества монтажа и паяных соединений	Внедрение системы автоматического внутрисъемного контроля	Внедрение системы АОИ нанесения паяльной пасты		
1 Установлен несоответствующий компонент	500	500	500	0	0	Ошибка оператора	Технологический дефект
2 Увеличенное количество пустот в паяном соединении	1500	5	5	5	5	Неудовлетворительная паяемость вывода компонента	Несоответствующий компонент
3 Неточное совмещение вывода компонента с контактной площадкой	800	800	6	6	6	Сбой в работе оборудования (сборочного автомата)	Технологический дефект
4 Недостаточный объём припоя в паяных соединениях	200	200	200	200	3	Неудовлетворительное качество трафарета Некорректные параметры технологического процесса	Технологический дефект



### Технология достижения запланированного уровня качества



Рис. 13 Снижение уровня дефектности выпускаемой продукции при последовательном внедрении автоматических систем инспекции и контроля

нужны?»

Итак, мы определили цель: разработать и внедрить технологию, обеспечивающую запланированные (расчётные) уровни качества и надёжности выпускаемой продукции при минимальных (оптимальных) затратах.

Рассмотрим пример: на предприятии внедрён типовой технологический процесс сборки печатных узлов (рис.11).

Алгоритм процесса достижения запланированного уровня

качества выпускаемой продукции (рис.12) включает следующую последовательность действий:

- Сбор статистических данных о дефектах
- Классификация выявленных дефектов
- Выявление наиболее значимых типов дефектов
- Внедрение наиболее эффективных средств диагностики и локализации дефектов для снижения стоимости ремонтов
- Анализ эффективности проводимых преобразований.

Таблица 8 Критерии качества монтажа поверхностно-монтажных компонентов в соответствии с требованиями различных стандартов

Тип дефекта	Критерии соответствия по стандартам		
	IPC-A-610D	NASA-STD 87392.2	MIL-HDBK-2000 MIL-STD-2000A
Неточное совмещение вывода компонента с контактной площадкой 	п. 8.2.2.1 Дефект - Класс 1, 2. Боковое смещение (A) превышает 50% ширины контактной поверхности (W) или 50% ширины контактной площадки (P) (выбирается меньшее значение).	п. 8.7.3 g Дефект - Класс 1, 2. Боковое смещение (A) превышает 50% ширины контактной поверхности (W) или 50% ширины контактной площадки (P) (выбирается меньшее значение).	п. 10.7 (рис. 50) Дефект Боковое смещение (A) превышает 10% ширины контактной поверхности (W).
	Дефект - Класс 3 Боковое смещение (A) превышает 25% ширины контактной поверхности (W) или 25% ширины контактной площадки (P) (выбирается меньшее значение).	Дефект - Класс 3 Боковое смещение (A) превышает 25% ширины контактной поверхности (W) или 25% ширины контактной площадки (P) (выбирается меньшее значение).	
Неточное совмещение вывода компонента с контактной площадкой 	п. 8.2.5.1 Дефект - класс 1, 2 Максимальное боковое смещение (A) превышает 50% ширины вывода (W) или 0,5 мм (выбирается меньшее значение).	п. 8.7.3 h Дефект - класс 1, 2 Максимальное боковое смещение (A) превышает 50% ширины вывода (W) или 0,5 мм (выбирается меньшее значение).	п. 4.23.7.2 (рис. 17) Дефект Максимальное боковое смещение (A) превышает 25% ширины вывода (W).
	Дефект - класс 3 Максимальное боковое смещение (A) превышает 25% ширины вывода (W) или 0,5 мм (выбирается меньшее значение).	Дефект - класс 3 Максимальное боковое смещение (A) превышает 25% ширины вывода (W) или 0,5 мм (выбирается меньшее значение).	



Рис. 14 Схема технологического процесса сборки печатных узлов при внедрении современных автоматических систем инспекции и контроля

- Разработка и внедрение корректирующих и предупреждающих воздействий

Таблица 9 Критерии приёмки качества нанесения паяльной пасты в соответствии с NASA-STD-8739

	Паста должна быть нанесена с точным совмещением с контактными площадками, а также иметь однородную толщину. Без мостиков, пузырьков, корок и смазывания. Соответствует NASA-STD-8739.2 [ 8.2 ], [ 8.6 ]
	Образование мостиков – индикатор некорректных параметров процесса нанесения паяльной пасты. Не соответствует NASA-STD-8739.2 [ 8.7.4.f ], [ 12.6.1.a.1 ]
	Смазывание пасты при нанесении. Не соответствует NASA-STD-8739.2 [ 8.7.4.f ], [ 12.6.1.a.6 ]
	Отсутствие (недостаточное количество) паяльной пасты на контактных площадках. Не соответствует NASA-STD-8739.2 [ 8.7.4.f ], [ 12.6.1.a.6 ]
	Неудовлетворительное совмещение трафарета с контактными площадками. Не соответствует NASA-STD-8739.2 [ 12.6.1.a.5 ]
	Неудовлетворительное совмещение трафарета с контактными площадками. Смещение отпечатка более, чем на 25% расстояния между контактными площадками. Не соответствует NASA-STD-8739.2 [ 12.6.1.a.5 ]
	Пузырьки свидетельствуют о некорректной подготовке паяльной пасты к работе, что может привести к неудовлетворительному качеству паяных соединений. Не соответствует NASA-STD-8739.2 [ 12.6.1.a.3 ]
	Неудовлетворительное (избыточное сверху и недостаточное снизу) количество паяльной пасты на контактных площадках. Не соответствует NASA-STD-8739.2 [ 12.6.1.a.4 ]
	Разделение отпечатка паяльной пасты на контактных площадках. Не соответствует NASA-STD-8739.2 [ 8.7.4.f ], [ 12.6.1.a.6 ]

Сбор, классификация и анализ статистических данных по обнаруженным на операции выходного функционального контроля дефектам (столбец “До начала внедрения систем инспекции и контроля” таблица 7) выявили наиболее значимый тип – увеличенное количество пустот в паяных соединениях (рис.13). Наиболее эффективное средство диагностики и локализации дефектов указанного типа – рентгеновская инспекция. Приведенная диаграмма (рис.13) наглядно демонстрирует снижение количества дефектов, связанных с пустотами в паяных соединениях после внедрения системы рентгеновской инспекции. В соответствии с предложенным алгоритмом, принятые преобразования по диагностике и локализации указанного типа дефектов можно считать удовлетворительными.

Вторым по значимости типом дефекта является “неточное совмещение вывода компонента с контактными площадками” (строка 3 в таблице 7 и рис.13). Наиболее эффективным средством диагностики и локализации дефектов указанного типа является автоматическая оптическая инспекция. При этом выбираемые системы АОИ должны легко настраиваться на работу в соответствии с требованиями соответствующих стандартов (таблица 8). Только в этом случае возможно выполнение контроля качества выпускаемой продукции на соответствие её требованиям нормативной документации.

После внедрения системы АОИ контроля качества монтажа и паяных соединений количество дефектов изделий, связанных со смещением выводов компонентов относительно контактных площадок на печатной плате, значительно сократилось (таблица 7 и рис. 13). В соответствии с предложенным алгоритмом (рис.12), принятые преобразования по диагностике и локализации указанного типа дефектов можно считать удовлетворительными.

Следующим по значимости типом дефекта является “установлен несоответствующий компонент” (строка 3 в таблице 7 и рис.13). Наиболее вероятными причинами установки несоответствующего компонента могут быть:

- ошибка оператора при снаряжении питателя;
- дефектный компонент (брак производителя);
- повреждение компонента в процессе изготовления (технологический дефект).

Наиболее эффективным средством диагностики и локализации дефектов указанного типа является автоматический внутрисхемный контроль. Учитывая высокую плотность монтажа выпускаемых изделий и большую их номенклатуру, в качестве средства для проведения автоматического внутрисхемного электрического контроля была выбрана система SPEA4060 (рис.14).

После внедрения системы автоматического внутрисхемного контроля SPEA 4060 количество дефектов изделий, связанных с установкой несоответствующего компонента значительно сократилось (таблица 7 и рис. 13). В соответствии с предложенным



**Таблица 10** Диагностика и локализация дефектов качества нанесения паяльной пасты в соответствии с критериями приёмки NASA-STD-8739.2

Тип дефекта по классификации NASA-STD-8739.2	Фотография дефекта	Объёмная модель, отражающая результат работы системы АОИ SymbionP36
Образование мостиков – индикатор некорректных параметров процесса нанесения паяльной пасты. Не соответствует NASA-STD-8739.2 [ 8.7.4.f ], [ 12.6.1.a.1]		
Неудовлетворительное количество паяльной пасты. Не соответствует NASA-STD-8739.2 [ 8.7.4.f ], [ 12.6.1.a.6 ]		
Неудовлетворительное совмещение трафарета с контактными площадками. Смещение отпечатка более, чем на 25% расстояния между контактными площадками. Не соответствует NASA-STD-8739.2 [ 12.6.1.a.5 ]		

алгоритмом (рис. 12), принятые преобразования по диагностике и локализации указанного типа дефектов можно считать удовлетворительными.

Следующим по значимости типом дефекта является “Недостаточный объём припоя в паяных соединениях” (строка 4 в таблице 7 и рис. 13). Наиболее вероятными причинами неудовлетворительного количества припоя могут быть:

- некорректные размеры контактных площадок (ошибка конструктора);
- некорректные размеры апертур (ошибка конструктора);
- неудовлетворительное качество трафарета (дефект производителя трафарета);
- неудовлетворительное качество паяльной пасты (дефект поставщика и/или производителя);
- неудовлетворительное качество подготовки паяльной пасты к работе (технологический дефект);
- некорректные параметры настройки устройства трафаретной печати (скорость перемещения и/или усилие прижима ракеля);
- коробление печатной платы.

Ошибки конструкторов должны быть выявлены на этапах приёмки конструкторской документации, технологической подготовки производства и изготовления опытных образцов – до постановки изделия на серийное производство. Качество трафарета, паяльной пасты и печатных плат должно контролироваться при входном контроле.

Качество нанесения паяльной пасты для различных областей применения регламентируется соответствующими стандартами (таблица 9).

Наиболее эффективным средством инспекции качества нанесения паяльной пасты являются современные системы АОИ, обеспечивающие контроль положения (2D контроль) и объёма (2D+3D контроль) для столбика (отпечатка) на каждой контактной площадке печатной платы (таблица 10).

После внедрения системы АОИ контроля качества нанесения паяльной пасты (рис. 14) количество дефектов изделий, свя-

занных с неудовлетворительным количеством припоя в паяных соединениях, значительно сократилось (таблица 7 и рис. 13). В соответствии с предложенным алгоритмом (рис. 12), принятые преобразования по диагностике и локализации указанного типа дефектов можно считать удовлетворительными.

Указанная последовательность действий (рис. 12) повторяется до тех пор, пока не будет достигнут требуемый уровень качества (дефектности изделий при приёмке).

Необходимо отметить, что требуемый результат был достигнут для конкретного изделия в конкретной партии. Для современного электронного производства последовательность операций, описанных предложенным алгоритмом (рис. 12) выполняется permanently: только в этом случае могут быть гарантированы условия непрерывного контроля технических характеристик выпускаемых изделий, параметров технологических процессов и их постоянных улучшений.

Необходимо отметить ещё один очень важный момент: цель была достигнута по критерию максимального количества дефектов при приёмке (1000 ppm). При этом внедрение систем автоматической инспекции и контроля не уменьшили количества дефектов, а резко снизили стоимость проведения ремонтов за счёт быстрой диагностики и точной локализации. При этом численность персонала, необходимого для выполнения ремонтов в процессе производства сократить не удастся. Сократится количество высококвалифицированных специалистов, способных заниматься диагностикой дефектов в отсутствие современного автоматического инспекционного и контрольно-измерительного оборудования. Но при выходе из строя любой из применяемых единиц контрольно-измерительного или инспекционного оборудования количество дефектных изделий и трудоёмкость ремонта автоматически возрастёт. Для снижения количества дефектов необходимо определение, устранение и предупреждение причин их возникновения. ■■

*Продолжение в следующем номере*