



## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА. СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ СТРАТЕГИИ КОНТРОЛЯ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ, БЛОКОВ И СИСТЕМ

Станислав Гафт  
lines@ostec-group.ru

---

А теперь повернись и ступай навстречу ко всем тем, кто думает, будто ты знаешь всё. Убеди себя в их правоте – ибо все мы знаем всё, просто надо поверить.  
Верь.

Пауло Коэльо

Многообразие существующих автоматических систем для инспекции и контроля порождает две мысли:

- Для обеспечения качества и надёжности выпускаемых изделий, снижения трудоёмкости ремонтов в процессе производства необходимо организовать тотальный контроль на всех стадиях технологического процесса для диагностики и локализации максимального количества дефектов сколь можно близко к местам их потенциального возникновения.
- Системы инспекции и контроля при массовом производстве или выпуске больших партий изделий вовсе не нужны, если печатный узел спроектирован с учётом всех технологических норм, и параметры технологического процесса выверены, отлажены и неукоснительно соблюдаются.

Обсуждению основных принципов выбора стратегии контроля посвящена серия публикаций в нашем бюллетене. Современные средства автоматической инспекции и контроля стоят недёшево. Стоимость инвестиций, как правило, закладывается в себестоимость выпускаемой продукции, повышая, в конечном итоге, её стоимость и снижая конкурентоспособность изделий на рынке. Но если не использовать средства инспекции и контроля в процессе производства, а контролировать только готовые изделия, придётся смириться с высокими затратами на проведение ремонтов, связанных с повторной разборкой/сборкой и трудностью диагностики и локализации дефектов. Такой подход к выбору стратегии контроля применялся производителе-

лями в Юго-Восточной Азии при массовом выпуске недорогих одноплатных изделий: электронных часов, элементов детских игрушек. Производитель в этом случае мирился с тем, что на выходном контроле 5...10% изделий выбраковывались. Ремонт, как правило, не производился, так как его стоимость даже при низких зарплатах персонала в Юго-Восточной Азии была выше стоимости изделий. Кроме того, качество и надёжность изделий, изготовленных по указанной технологии, предполагали значительное количество ранних отказов в гарантийный период. Но это не очень смущало продавцов таких товаров, так как потребитель, купивший, скажем, проводной телефон за 2...3\$, был психологически готов к низкому качеству товаров, купленных по чрезвычайно низким ценам, и редко обращался с вопросами их ремонта или замены.

Постоянно возрастающие требования рынка к новым изделиям (функциональность, снижение массогабаритных показателей, надёжность, дизайн) заставляют разработчиков, как правило, усложнять схемотехнические решения. При необходимости снижения габаритов и веса указанные причины приводят к увеличению плотности расположения компонентов в печатных узлах и применению интегральных микросхем с минимальными размерами корпусов при большом количестве выводов и малым их шагом. Печатные узлы становятся всё более технологически сложными. В настоящее время никому не придёт в голову вручную собирать печатные узлы мобильных телефонов или

ноутбуков; для этого будет использоваться современное сверхпроизводительное автоматическое сборочное оборудование. Технологический процесс при массовом производстве должен быть отлажен до мелочей, в противном случае уровень дефектных изделий и затраты на их ремонт могут кардинально повлиять на себестоимость выпускаемой продукции и конкурентоспособность её на рынке.

Почему же ведущие мировые производители при всех указанных выше условиях (увеличение инвестиций, усложнение технологической подготовки производства) широко применяют различные системы контроля на всех стадиях технологического процесса сборки печатных узлов? Причин несколько, разберём их по порядку.

## 1. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВЫБРАННОЙ СТРАТЕГИИ КОНТРОЛЯ

- Выход годных изделий. Обычно говорят о количестве годных изделий в процентах. Определяет качество существующей на производстве технологии и качество проведения технологической подготовки производства на конкретное изделие (печатный узел).
  - Для крупносерийного производства чаще применяется “Выход годных (изделий) с первого прохода”. Измеряется в середине обработки большой партии.
  - Для мелкосерийного производства этот показатель может говорить о необходимости увеличения партии запуска для получения на выходе требуемого количества годных изделий.
- Уровень дефектности. Обычно определяют уровень дефектности по конкретным технологическим операциям, для того чтобы на основе анализа дефектов и обработки статистических данных определить причину и место их наиболее вероятного возникновения. Измеряется в количестве дефектных изделий на миллион, ppm (Parts Per Million). Для крупно- и среднесерийного производства замеры проводятся в середине обработки большой партии.
- Скорость реакции на отклонения.
  - Этот критерий чрезвычайно важен для массового производства – чем быстрее будет остановлен процесс при обнаружении отклонений, тем меньше дефектных изделий будет смонтировано, соответственно тем меньше будут затраты на ремонт.
  - Для мелкосерийного производства гораздо важнее сам факт диагностики и локализации максимального количества потенциальных дефектов и необходимые для этого трудозатраты.
- Коэффициент тестового покрытия. Определяет тестопригодность изделия (печатного узла). Как правило, применяется для оценки качества функционирования программы для автоматического тестового оборудования. В значительной степени зависит от соблюдения схмотехником и конструктором принятых правил и ограничений при проектировании печатного узла. Может применяться для оценки функционирования всех применяемых программно-аппаратных комплексов, используемых при производстве конкретного изделия.
- Время восстановления изделия (печатного узла). Среднее время (с учётом квалификации задействованного персонала



Рис. 1 Тотальный визуальный контроль печатных узлов после пайки. Широко распространённый в начале века в Китае метод, основанный на низкой заработной плате персонала

– трудоёмкость), необходимое для диагностики, локализации дефекта и проведения ремонта. Позволяет оценить затраты на проведение ремонтов в процессе производства на основании статистики трудоёмкости проведения ремонтов. Данный критерий дает возможность принимать экономически обоснованное решение о необходимости совершенствования существующих тестовых программ для конкретного изделия и стратегии контроля в целом.

## 2. КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Даже в условиях массового производства при отлаженной устоявшейся технологии и выверенных параметрах технологического процесса для каждого изделия невозможно застраховаться от отклонений.

Пример 1. Вследствие естественного износа/искривления штока установочной головки сборочного автомата смещение при установке чип-компонентов увеличилось на 200 мкм. Если в этот момент собираются печатные узлы с компонентами 01005 (размеры 400 x 200 мкм), указанное отклонение обеспечит систематический дефект. Вопрос состоит в том, когда такой дефект будет обнаружен, сколько дефектных изделий будет изготовлено до момента признания данного дефекта систематическим (и произойдет остановки процесса), и какова будет цена восстановления дефектных изделий. Можно применять технологию, широко используемую ранее в Китае (рис. 1), когда после каждой сборочной линии 5-10 человек проводили визуальный контроль. Такой метод, безусловно, обеспечивает высокую занятость населения, но не гарантирует высокое качество контроля и быструю реакцию на отклонения.

Как результат – значительное количество дефектов (по статистике 5...10%), пропущенных на следующий этап производства

и большое время реакции (15...45 минут). Представим себе, что на линии с производительностью 100 000 компонентов в час 10% чип-резисторов были установлены с указанными отклонениями. В течение 30 минут (до остановки процесса) было установлено 5 000 компонентов (с отклонениями). Потери будут складываться из следующих составляющих:

и большое время реакции (15...45 минут). Представим себе, что на линии с производительностью 100 000 компонентов в час 10% чип-резисторов были установлены с указанными отклонениями. В течение 30 минут (до остановки процесса) было установлено 5 000 компонентов (с отклонениями). Потери будут складываться из следующих составляющих:

**Технологический процесс при массовом производстве должен быть отлажен до мелочей, в противном случае уровень дефектных изделий и затраты на их ремонт могут кардинально повлиять на себестоимость выпускаемой продукции и конкурентоспособность её на рынке**

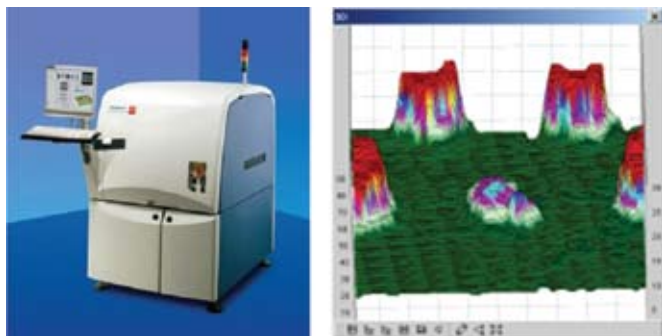


Рис. 2 Система АОИ контроля качества нанесения паяльной пасты обеспечивает надёжный контроль положения, высоты и объёма каждого столбика, предупреждая появление технологических дефектов собранных печатных узлов



Рис. 3 Система автоматического внутрисхемного и функционального контроля с "летающими" щупами SPEA 4040 гарантирует надёжную диагностику и точную локализацию дефектов за счёт измерения параметров каждого компонента печатного узла

- дополнительная трудоёмкость ремонта;
- простой линии после остановки (анализ причин возникновения дефекта, ремонт, калибровка);
- повторный запуск партии.

А если эта же головка устанавливала микросхемы в корпусе QFP с шагом 0,5 мм (ширина вывода 200 мкм) – необходимо учитывать также и стоимость компонентов, повреждённых при ремонте, и вероятность повреждения печатной платы (отслоение

контактных площадок при перегреве), и необходимость выбраковки всего печатного узла по этой причине.

### 3. ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ДЕФЕКТЫ

Пример 2. А каковы результаты монтажа компонентов с шириной вывода 400 мкм (например, чип-компоненты в корпусе 0201)? Они будут смещены относительно контактных площадок печатной платы на ~50%. В соответствии с IPC-A-610D максимальное допустимое боковое смещение вывода компонента от края контактной площадки печатной платы для классов 1, 2 составляет 50%, а для класса 3 – 25%. При этом торцевое смещение не допускается.

Необходимо отметить, что при указанных условиях (неисправность оборудования, создающего дополнительное смещение компонента относительно контактных площадок в 200 мкм) количество паяных соединений с отклонениями после пайки будет значительным. При этом электрический контакт для большого количества паяных соединений, скорее всего, будет нормальным. Но надёжность паяных соединений указанных компонентов будет ниже расчётного (запланированного) уровня. Кроме того, изменение расстояний между компонентами может изменить расчётные значения пробивных напряжений в высоковольтных цепях и взаимное влияние в высокочастотных. В результате может значительно ухудшиться повторяемость технических характеристик выпускаемых печатных узлов и, как следствие, потребуются непредсказуемые затраты на их наладку и регулировку.

Пример 3. Как определить соответствие (или не соответствие) изделия (полуфабриката) заявленным требованиям? Определение наличия или отсутствия в том числе и потенциальных дефектов, путём сравнения с соответствующими нормами, стандартами и рекомендациями. Например, для операции нанесения паяльной пасты рекомендуемый коэффициент заполнения контактных площадок пастой составляет не менее 70%.

Величину максимального отклонения объёма пасты в столбиках рекомендовать сложнее, так как она зависит, в том числе и

Контроль качества нанесения припойной пасты  
Symbion P36



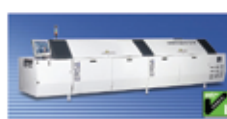
Автомат трафаретной печати DEK Horizon 03i

Контроль качества установки компонентов  
Vantage S22

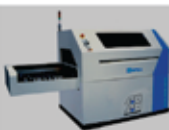


Сборочный автомат Samsung SM421

Контроль качества монтажа и пайки компонентов  
Vantage S22



Система конвекционного оплавления ERZA Hotflow 2-14



Электрический контроль SPEA FP 4040

Технологический процесс

Система рентгеновской инспекции GE Phoenix Micromex



Рис. 4 Использование автоматического тестового оборудования в технологическом процессе сборки печатных узлов – залог качества и надёжности выпускаемой продукции при минимальных затратах на проведение ремонта в процессе производства



Рис. 5 Системы рентгеновской инспекции (слева) в настоящий момент являются одним из наиболее эффективных средств контроля качества паяных соединений (в центре) и внутреннего состояния электронных компонентов (справа)

от толщины трафарета (а ведь можно применить и рельефный трафарет). Однако если оценивать максимально допустимое отклонение количества паяльной пасты в столбике от расчётного при производстве сложных печатных узлов для ответственных изделий, вряд ли кто-либо из опытных технологов утвердит отклонение более 30%. Давайте представим реальный современный сложный печатный узел, на который устанавливаются микросхемы в корпусах  $\mu$ BGA с общим количеством шариковых выводов около 10 тысяч и шагом 0,5 мм.

Совершенно очевидно, что гораздо выгоднее предупредить дефект, проведя контроль качества нанесения паяльной пасты (рис. 2), чем в дальнейшем проводить трудоёмкий ремонт с риском повреждения дорогостоящего компонента и всего печатного узла в целом.

Пример 4. На предприятие поставлена партия многослойных керамических конденсаторов с отклонениями (допуск по номиналу вместо 10% составляет 30%). В данном случае опасность состоит в диагностике дефекта указанного типа – он может быть не выявлен в процессе производства вообще (и проявится у потребителя в процессе эксплуатации), либо не выявлен на этапе проведения приёмо-сдаточных испытаний приборов и/или систем. Данный дефект потребует дополнительных затрат на проведение ремонтов, только в первом случае эти затраты будут, по крайней мере, на порядок выше, так как будут включать командировочные расходы. Эффективным средством диагностики и локализации дефектов подобного типа является система внутрисхемного и функционального контроля (рис. 3).

По указанным причинам все ведущие производители печатных узлов, как правило, широко используют системы автоматического контроля в технологическом процессе (рис. 4).

#### 4. СКРЫТЫЕ ДЕФЕКТЫ

Пример 5. При броске питающего напряжения температура в зоне оплавления изменилась на 20оС. Указанное изменение параметра процесса может повлечь за собой весьма серьёзные последствия:

- снижение качества паяных соединений;
- выход из строя электронных компонентов, чувствительных к температуре.

Для предупреждения прохождения печатных узлов, оплавившихся по несоответствующему температурному профилю, необходимо:

- остановить процесс настолько быстро, насколько это возможно;
- скорректировать параметры процесса и запустить его с ис-

- пользованием существующей на производстве процедуры;
- выявить все печатные узлы, оплавленные по некорректному профилю;
- провести диагностику качества паяных соединений и сохранности электронных компонентов;
- на основании данных исследований принять решение о дальнейшей судьбе печатных узлов;
- разработать и внедрить корректирующие и предупреждающие

действия, предотвращающие возникновение указанной ситуации (например, установка системы бесперебойного питания). Наиболее распространённым и эффективным средством диагностики “скрытых” дефектов – качества паяных соединений и внутреннего состояния интегральных микросхем – являются

системы рентгеновского контроля (рис. 5). Указанная ситуация (изменение температуры в зоне оплавления) может случиться и без броска питающего напряжения. Часто в конце обработки большой партии печатных узлов начинают заканчиваться компоненты в питателях. Собранные печатные узлы накапливаются на месте визуального контроля и доустановки перед печью оплавления. Начинается поиск недостающих компонентов, включая проверку емкостей, куда сборочные автоматы сбрасывают элементы, забракованные системой технического зрения.

После нахождения и ручной установки недостающих компонентов оператор может запустить печатные узлы на оплавление с малыми промежутками. При этом, особенно в случае многослойных печатных плат с большим количеством экранных и сигнальных слоёв, возможна перегрузка печи, и, соответственно, невозможность реализовать заданный профиль оплавления.

Как отмечалось выше, главным является скорость реакции, подобное отклонение необходимо обнаружить как можно быстрее. Ведь оператор может “не заметить” отклонения процесса. Идеальный выход – система прослеживаемости параметров технологического процесса, когда для каждого печатного узла известно о параметрах температурного профиля и об отсутствии отклонений в реальном масштабе времени во время оплавления.

Однако наиболее популярным средством объективного контроля качества паяных соединений и внутреннего состояния электронных компонентов является система рентгеновской инспекции. Именно по этой причине на большинстве ведущих европейских предприятий установлена специальная процедура контроля качества методом рентгеновской инспекции, включая:

- обязательный сплошной (100%) контроль качества паяных соединений под корпусами электронных компонентов;



- обязательный контроль сигнальных печатных узлов (первые собранные в партии). Программа контроля включает наиболее критичные к образованию пустот паяные соединения (определяется на этапе технологической подготовки производства при отладке параметров температурного профиля);
- обязательный контроль 2% собранных печатных узлов (но не менее 10 штук) из каждой партии.

Экономический эффект от применения систем рентгеновской инспекции заключён в снижении затрат на проведение ремонтов в процессе производства (контроль качества монтажа и паяных соединений) и в гарантийный период, когда стоимость проведения ремонта растёт, по крайней мере, на порядок.

## 5. НЕОБХОДИМОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ ЗАРПЛАТ ПЕРСОНАЛА СБОРОЧНЫХ ПРОИЗВОДСТВ – СТИМУЛ ДЛЯ МАКСИМАЛЬНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ И КОНТРОЛЯ

Прошли времена, когда зарплата в 50-100\$ была голубой мечтой для китайских рабочих. В настоящее время для того, чтобы удержать квалифицированного оператора бывает недостаточно и 500\$. Аналогичная картина наблюдается и в России. Не имеет смысла тратить деньги и время, чтобы через 1,5-3 года потерять квалифицированных сотрудников. Но ведь фонд зарплаты является одной из основных статей расхода, который, в том числе в значительной мере определяет себестоимость продукции и продажную цену. При повышении зарплаты персоналу, казалось бы, компанию ждёт крах из-за необходимости установки высокой неконкурентоспособной цены на выпускаемую продукцию, снижения объёмов и прибыли. Современный подход заключается в максимальной автоматизации всех производственных процессов. В этом случае удаётся снизить численность персонала, повысить производительность труда и увеличить зарплату необходимым высококвалифицированным сотрудникам. Кроме того, при построении современного эффективного производства рабочие и ИТР становятся патриотами своего завода: даже значительной прибавкой к зарплате их переманить удаётся далеко не всегда.

## 6. ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА СТРАТЕГИИ КОНТРОЛЯ ПРИ МЕЛКОСЕРИЙНОМ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Экономическую эффективность применения автоматического тестового оборудования при средне и крупносерийном производстве оценить несложно. Приведём пример.

В программу производства включено изделие (печатный узел) со следующими характеристиками:

- количество компонентов – 500;
- количество точек пайки – 2000;
- плановая производительность – 800 печатных узлов в смену (100 ПУ в час);
- планируемый уровень дефектности (в пересчёте на паяные соединения) – 100ppm;
- Стоимость нормо-часа (с накладными расходами) – 20\$.

Количество паяных соединений в час:  $100 \cdot 2000 = 200\ 000$ .

Из них потенциально дефектных:  $200\ 000 \cdot 100 / 1\ 000\ 000 = 20$ .

Количество печатных узлов с потенциальными дефектами: 20%.

Время восстановления указанного печатного узла без использования автоматического тестового оборудования (усреднённые данные опроса): 5 часов.

Трудоёмкость восстановления дефектных печатных узлов в месяц (при двухсменном режиме работы):  $800 \cdot 0,2 \cdot 5 \cdot 2 = 1600$  нормо-часов.

Стоимость проведения ремонтов в год:  $1600 \cdot 12 \cdot 20 = 384\ 000$ \$. При мелкосерийном производстве экономическая эффективность применения систем контроля обосновывается, как правило, следующими причинами:

- необходимостью обеспечения высокого качества и надёжности выпускаемой продукции;
- высокой стоимостью проведения ремонтов в процессе производства. Представим себе расчёт стоимости проведения ремонта в процессе испытаний прибора или системы, когда потребуются дополнительная разборка/сборка, диагностика без средств автоматизации и локализации дефекта, повторные испытания;
- высокой ценой отказа в процессе эксплуатации;
- высокой стоимостью проведения ремонтов у потребителя;
- снижением репутации изготовителя.

## 7. НЕОБХОДИМОСТЬ ПОСТОЯННОЙ ПОДДЕРЖКИ ВЫСОКОЙ РЕПУТАЦИИ ПРОИЗВОДИТЕЛЯ

Если установленный на предприятии типовой технологический процесс не обеспечивает, например, регулярный контроль качества паяных соединений, можно прогнозировать увеличенное количество отказов в гарантийный период. При этом стоимость проведения ремонтов значительно возрастёт с учётом выездов специалистов к заказчику, по крайней мере, на порядок. Кроме того, при увеличении количества отказов изделий у потребителя будет снижаться конкурентоспособность продукции и репутация компании-производителя. Указанные обстоятельства, кроме увеличения затрат на проведение гарантийных ремонтов, могут привести к снижению спроса на продукцию компании-производителя и падение объёмов продаж, что, в свою очередь, снизит рентабельности производства, а в худшем случае приведет к банкротству.

Ухудшение репутации компании-производителя – серьёзная проблема, которая может привести к потере новых выгодных заказов. При этом гарантировано и снижение стоимости торговой марки.

## 8. ВЫВОДЫ

1. Для каждого предприятия в соответствии с характером, областью применения, серийностью и объёмом выпускаемой продукции должна быть разработана оптимальная стратегия контроля, направленная на снижение затрат в процессе производства, снижение себестоимости при повышении уровня качества и надёжности выпускаемой продукции.
2. Для массового производства, безусловно, необходима квалификация поставщика и входной контроль компонентов комплектующих и материалов, так как использование, например, компонентов с отклонениями может привести к резкому повышению трудоёмкости ремонтов в процессе производства и снижению качества и надёжности выпускаемой продукции.
3. Необходима квалификация поставщика и входной контроль печатных плат, так как использование их в производстве с отклонениями (например, по короблению) неизбежно приведёт к увеличению количества технологических дефектов (и, соответственно, к увеличению стоимости ремонтов в процессе производства и гарантийный период).
4. Для обеспечения качества печатных плат для ответственных изделий в целом ряде случаев необходимо собственное производство печатных плат, способное обеспечить контролируемый процесс, качество и надёжность выпускаемой продукции. ■