Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта

Часть 21. Применение вихретокового частотного метода в автоматизированной инспекции качества покрытий ИЭТ

Афян АРУТЮН,
техник лаборатории, АО «ЦКБ «Дейтон»,
Дарья ДОРМИДОШИНА,
технический директор, АО «ЦКБ «Дейтон»,
Юрий ЕВСТИФЕЕВ,
к.т.н., с.н.с., профессор, АО «ЦКБ «Дейтон»,
Валерий КЛЮЧНИКОВ,
генеральный директор, АО «Завод «Марс»,
Евгений КЛЮЧНИКОВ,
заместитель главного конструктора,
АО «ЦКБ «Дейтон»,
Даниил РОМАНОВ,
инженер лаборатории, АО «ЦКБ «Дейтон»,
Юрий РУБЦОВ,
генеральный директор–
главный конструктор, АО «ЦКБ «Дейтон»

В отечественном производстве изделий электронной техники (ИЭТ) с автоматизированным программно-аппаратным комплексом (АПАК) визуального поиска дефектов применяют систему компьютерного зрения (КЗ) с технологией искусственного интеллекта для разных изделий ИЭТ: корпусов микросхем, пластин для производства микросхем, печатных плат и т.д. (см. ЭК №№2–12, 2025 г., 1–3, 5–10, 2026 г.). При таком подходе растет производительность труда и выход годных изделий, повышается репутация предприятия. В этой части статьи описан метод автоматизированной инспекции качества изделий (АИКИ) с использованием вихретокового частотного метода, который обнаруживает поверхностные и подповерхностные дефекты и отличается от амплитудного метода дополнительной возможностью оценки твердости и фазового состава металлов, а также более глубокой инспекцией подповерхностных дефектов. В описанных результатах исследовались металлостеклянные корпуса микросхем с золотым покрытием на никелевым промежуточным слое и на медном основании выводной рамки. Эти результаты явились основой для создания устройства, которое стало ключевым компонентом в составе АПАК на предприятии-изготовителе ИЭТ.

Введение

Нанесение покрытий является критически важным процессом обработки поверхности ИЭТ. Поскольку качество покрытия напрямую влияет на эксплуатационные характеристики ИЭТ, эффективное и точное обнаружение его поверхностных и подповерхностных дефектов является важнейшим методом обеспечения качества изделий.

В описанных результатах исследований автоматизированной инспекции качества изделий в составе АПАК для определения толщины покрытий ИЭТ и обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов применяется вихретоковой частотный метод (ВТЧМ), определенный в [1–2]. Описания определяемых дефектов покрытий ИЭТ представлены в [3]. Для исследований применялись металлостеклянные корпуса для микросхем с золотым покрытием на никелевым промежуточным слое и на медном основании выводной рамки.

Авторы статьи последовательно рассматривают результаты исследования и применения методов инспекции качества ИЭТ, к которым относятся:

- амплитудный метод, основанный на измерениях амплитуды сигнала преобразователя, – устройства, предназначенного для создания вихревых токов в проводящих слоях металлов покрытий и основания ИЭТ [4];
- фазовый метод, основанный на измерениях фазы сигнала преобразователя;
- амплитудно-фазовый метод, основанный на измерениях проекции вектора амплитуды преобразователя на направление отстройки;
- многочастотный метод вихретоковой инспекции, который основан на анализе и синтезе сигналов вихретокового преобразователя, обусловленных взаимодействием электромагнитного поля (ЭМП) разной частоты с элементами ИЭТ;
- переменно-частотный метод вихретоковой инспекции, основанный на анализе и синтезе амплитуды и частоты сигнала преобразователя при постоянном за счет изменения частоты заданном значении обобщенного параметра;
- импульсный метод, который основан на измерениях амплитуды и длительности сигнала преобразователя импульсной формы, об-

условленного взаимодействием нестационарного ЭМП с элементами ИЭТ;
- абсолютный метод, основанный на измерениях сигнала преобразователя, на который воздействует абсолютное значение контролируемого параметра;
- модуляционный метод, который основан на анализе сигнала преобразователя, модулируемого в результате перемещении преобразователя и ИЭТ;
- дифференциальный метод, который основан на измерениях сигнала преобразователя, обусловленного приращением контролируемого параметра;
- спектральный метод, основанный на измерениях спектрального состава сигнала преобразователя.

При этом использованная в исследованиях отстройка определяет подавление влияния на результаты контроля за изменением мешающего параметра. Направление отстройки на комплексной плоскости преобразователя является нормальным к годографу напряжения, вызванному изменением мешающего параметра. Комплексная плоскость вихретокового преобразователя – это плоскость с двумя ортогональными координатными осями, по одной из которых откладываются действительные составляющие электродвижущей силы (ЭДС), напряжения или комплексного сопротивления преобразователя, а по другой – мнимая часть. В проводимых исследованиях такое разделение на реальную и мнимую части позволяет использовать отстройку. Это дает возможность расположить комплексную плоскость так, чтобы мешающий фактор (например, вибрация ленты конвейера или изменение зазора) ушел целиком в мнимую часть, а полезный остался в активной.

Используемый в исследованиях годограф представляет собой геометрическое место концов вектора ЭДС или напряжения на комплексной плоскости преобразователя, полученное в результате изменения частоты, удельной электрической проводимости σ, относительной магнитной проницаемости, размеров участка инспекции поверхности ИЭТ, размеров преобразователя, других влияющих факторов или образованных из них обобщенных переменных величин.

Описанные в настоящей статье результаты исследования и применения частотного метода вихретоковой инспекции основаны на измерениях частоты сигнала параметрического вихретокового преобразователя.

Математические зависимости для использования вихретокового частотного метода

АПАК с ВТЧМ генерирует высокочастотное ЭМП с помощью генерирующего устройства высокой частоты (ГУВЧ), которое создает вихревые токи в проводящих слоях металлов покрытий [2] и основания ИЭТ, с изменяемой частотой сгенерированного сигнала. Вихревые токи высокой частоты затухают у поверхности (они выталкиваются к поверхности ИЭТ) и позволяют инспектировать поверхностные дефекты, токи низкой частоты проникают под поверхность ИЭТ и позволяют выявлять скрытые (подповерхностные) дефекты, определять толщину покрытий и внутреннюю структуру ИЭТ.

Расстояние от поверхности ИЭТ до слоя, в котором плотность вихревых токов в e (равное 2,7183) раз меньше, чем на поверхности, обозначается как δ. Эта глубина зависит от частоты возбуждающего тока, удельной электропроводности и магнитной проницаемости материала и представлена как (1):

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu}}, \quad (1)$$

где: δ – глубина проникновения ЭМП; f – частота возбуждающего ЭМП (в нашем случае тока); σ – удельная электропроводность; μ – магнитная проницаемость.

Удельная электропроводность и ее значение при измерении толщины покрытий показана при описании вихретокового амплитудного метода в [4].

С увеличением частоты σ золотого покрытия уменьшается. На высоких частотах проявляется поверхностный эффект (образование скин-слоя), из-за которого переменный ток протекает не по всему объему проводника, а прижимается к его поверхности. При этом толщина скин-слоя может быть соизмеримой с микрошероховатостями золотого покрытия. Ток преодолевает относительно больший путь, огибая неровности, что резко снижает σ. Золотые покрытия наносятся методом гальваники, из-за чего они могут содержать примеси или микропоры. На высоких частотах, когда весь ток сосредоточен в тонком поверхностном слое, дефекты структуры продолжают снижать σ.

Поскольку второе покрытие – никель, является барьерным слоем и ферромагнетиком, его магнитная проницаемость при воздействии ЭМП высокая. Из-за этого скин-слой в никеле сжимается в разы быстрее, чем в золоте. С ростом частоты ток вытесняется на поверхность никелевого покрытия. Эти физические особенности металлов покрытий ИЭТ учтены в математической модели.

Таким образом, глубина проникновения ЭМП в толщу металла ИЭТ с никелевым и золотым покрытием обратно пропорциональна квадратному корню из частоты возбуждающего ЭМП, а также сумм удельной электропроводности и магнитной проницаемости покрытий, как показано в (2):

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot (\sigma 1 + \sigma 2) \cdot (\mu 1 + \mu 2)}}, \quad (2)$$

где: σ1 – удельная электропроводность золотого покрытия; σ2 – удельная электропроводность никелевого покрытия; μ1 – магнитная проницаемость золотого покрытия; μ2 – магнитная проницаемость никелевого покрытия

Частота генерации ЭМП определяется выражением (3):

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{C \cdot L_s}}, \quad (3)$$

где: C – емкость ГУВЧ, LS – суммарная индуктивность ГУВЧ, которая определяется как (4):

$$L_s = L_0 + L_{пр}(d_з), \quad (4)$$

где: L_0 – индуктивность передающей катушки; $L_{пр}(d_з)$ – индуктивность, образованная ИЭТ при воздействии ЭМП.

В расчете $L_{пр}(d_з)$ применяются результаты исследований основоположников теории вихретокового неразрушающего контроля А. Л. Дорофеева и В. С. Соболева для передающей катушки над проводящей поверхностью покрытий ИЭТ. Выражение для расчета имеет вид интеграла. В подынтегральное выражение входят функции Бесселя, являющиеся каноническими решениями дифференциального уравнения (5):

$$L_{пр}(d_з) = -(\mu 1 + \mu 2) \cdot \pi \cdot R \cdot N^2 \int_0^\infty \varphi(\lambda) \cdot e^{-2\lambda h} J^2(\lambda R)\, d\lambda, \quad (5)$$

где: R – радиус катушки; N – число витков катушки; h – зазор между катушкой и поверхностью ИЭТ; J – функция Бесселя первого рода первого порядка; φ(λ) – функция влияния, зависящая от частоты, удельной электропроводности и магнитной проницаемости.

Описанные математические зависимости заложены в основу разработки и применения ВТЧМ в АПАК.

Описание разработанных устройств вихретокового частотного метода

Для решения задачи был разработан АПАК, позволяющий проводить послойный анализ покрытий ИЭТ путем генерации ЭМП, проникающего в ИЭТ, и регистрации отраженного ЭМП. Для этого над поверхностью ИЭТ бы установлен преобразователь, состоящий из отдельных передающей и приемной катушек. Измерение проводилось локально во внутренней части корпуса, область инспекции – площадка под кристалл в корпусе для микросхемы (рис. 1). Передающая и приемная катушки показаны на рис. 2.

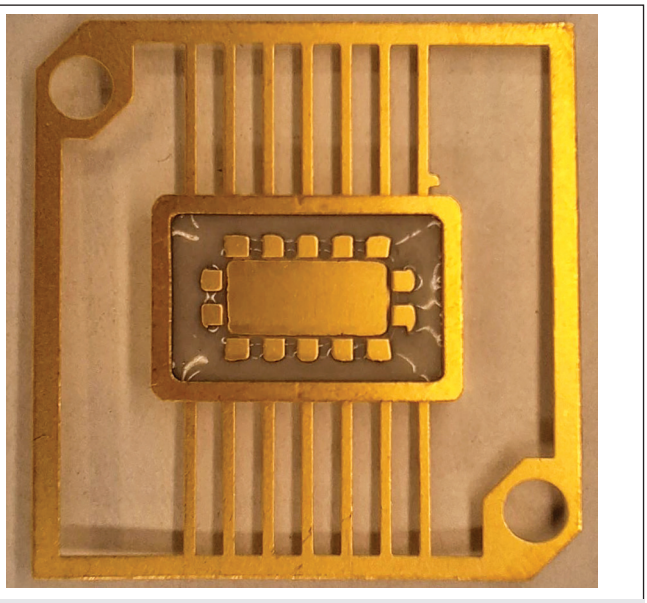


Рис. 1. Корпус для микросхемы с инспектируемой площадкой под кристалл

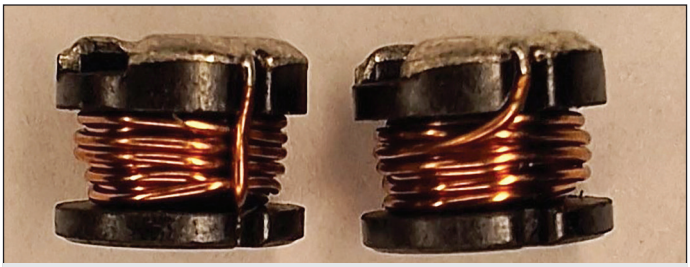


Рис. 2. Передающая и приемная катушки для ВТЧМ в АПАК

Поскольку глубина проникновения ЭМП зависит от его частоты (чем она выше, тем меньше глубина проникновения), через преобразователь на площадку корпуса подается последовательность волн с возрастающей частотой, что позволяет получить информацию о дефектах на разных глубинах в одной и той же области инспекции. В исходном варианте инспекция проводилась в диапазоне частот 0,1–10 МГц.

Анализ данных о частотной зависимости импеданса, полученных на конкретном участке, выполняется с помощью модели, описывающей взаимодействие ЭМП с исследуемыми материалами покрытий. При этом используются определения импеданса из описания вихретокового амплитудного метода в [4].

В результате анализа определяются положения границ покрытий, а также электромагнитные параметры (электропроводность и магнитная проницаемость) каждого покрытия. Если положение границ покрытий позволяет непосредственно определить толщину покрытия и наличие в нем расслоений, то электромагнитные параметры тесно коррелируют со степенью истощения защитных элементов покрытий, что дает возможность оценить остаточный ресурс покрытий, подвергавшихся воздействию условий изготовления и применения микросхем.

Такой АПАК и соответствующая методика позволяют проводить инспекцию трехмерных дефектов, то есть объектов, а не просто одномерных слоев покрытий. И это оказалось достаточно сложной задачей. Первоначальные исследования показали, что подповерхностный дефект влияет на величину и форму отраженного ЭМП аналогично тому, как на него влияет снижение σ внутреннего слоя, расположенного на той же глубине, что и дефект.

Для проведения инспекции вихретоковый преобразователь перемещался вдоль площадки с помощью манипулятора. Инспекция проводились с шагом около 2,5 мм вдоль линии пайки, что составляет половину диаметра передающей катушки. Сочетание геометрии передающей катушки и выбранного диапазона частот обеспечило глубину контроля 4 мм.

Процедура инспекции включает следующие этапы.

1). Калибровка системы. На этом подготовительном этапе выполняются три измерения с частотным сканированием при двух значениях зазора (расстояния между преобразователем и контролируемой поверхностью) на двух эталонных однородных образцах с известной σ. Полученные калибровочные данные используются для нормализации проведения инспекции.
2). Инспекция вдоль площадки с шагом 1 мм (по одному действию с частотным сканированием в каждом участке).
3). Проверка стабильности (повторное измерение первого эталонного образца с разверткой по частоте) проводится для подтверждения достоверности серии данных, полученных после последней калибровки.
4). Если результаты проверки стабильные, то все полученные данные, относящиеся к проведению инспекции, нормализуются с использованием результатов последней калибровки. В ходе этой операции данные преобразуются в нормализованные данные импеданса. Они являются физически более обоснованной величиной, чем другие, поскольку не зависят от величины зазора и характеристик АПАК, влияющих на ЭМП. Поскольку эта величина, по сути, сохраняет зависимость только от свойств исследуемого материала, она предоставляет входные данные для последующего анализа на основе упомянутых математических моделей.

Целью анализа кривых нормализованного импеданса в зависимости от частоты, полученных на каждом участке площадки под кристалл в корпусе, является обнаружение и количественная характеристика ее потенциально дефектных участков. Анализ включает в себя следующие три этапа: исследования площадки на основе математической модели; обнаружение дефектов; классификация дефектов.

Для исследования на основе математической модели на каждом участке площадки используется модель взаимодействия между АПАК и изучаемой площадкой. Результатом анализа являются значения σ и положения границ плоских однородных слоев, описывающих структуру исследуемых покрытий. При анализе учитывается геометрия и структура площадки. Исследуемая площадка представлена двумя слоями покрытия на медном основании выводной рамки. Модель учитывает внутреннюю структуру конструкции площадки. Исследования площадки на основе математической модели позволяет одновременно реконструировать связку возможных дефектов в слоях золотого и никелевого покрытий и оценить их толщину.

Анализ данных, полученных в результате проведения инспекции

Обнаружение дефектов осуществляется путем анализа значений σ. Дефект выявляется в том случае, если оценочная σ слоя с дефектом оказывается пониженной. Качественный анализ профилей оценочной σ в разных условиях показывает, что дефекты проще всего обнаружить по наличию локальных занижений на общих профилях σ. Этот подход применим лишь к таким геометрическим конфигурациям, при которых влияние границ площадки на вихретоковый сигнал остается незначительным. Для обнаружения подповерхностных дефектов в ситуациях, когда в пределах границы площадки имеются разные геометрические особенности (например, шероховатости, не являющиеся браком), были разработаны более специализированные алгоритмы.

В корпусах без дефектов площадок оценочные значения практически идентичны и стабильны. При этом стабильность оценочных значений σ в качественном (бездефектном) основании является благоприятным условием для решения задач инспекции, направленных на выявление значимых с диагностической точки зрения отклонений.

Отсутствие дефектов покрытий и основания приводит к увеличению σ золотого слоя; это объясняется тем, что σ золота несколько выше σ

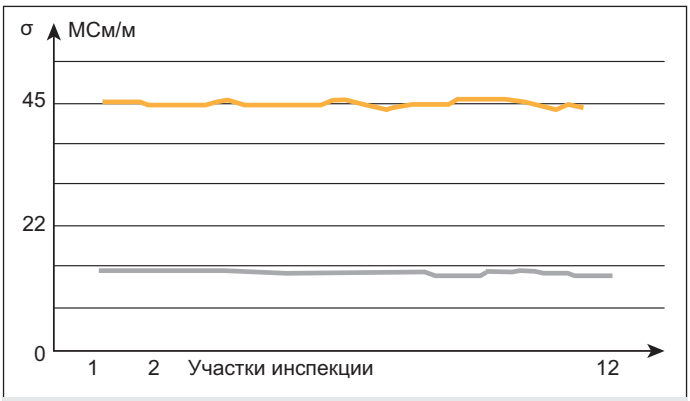


Рис. 3. Кривая σ качественного покрытия

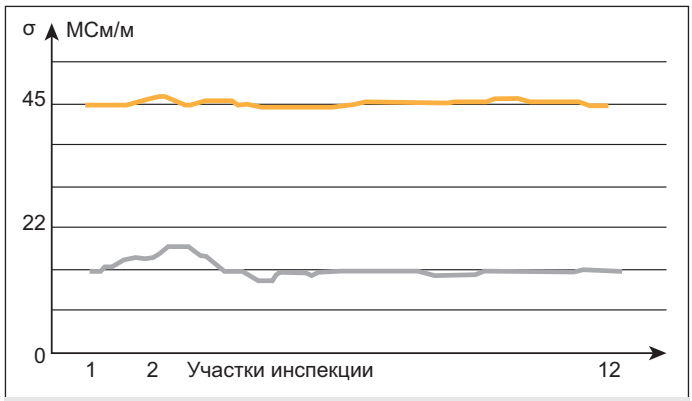


Рис. 4. Кривая σ покрытия с дефектом в никелевом слое

никеля. Было отмечено, что степень такого изменения может варьироваться при переходе от одного участка инспекции к другому. На текущий момент взаимосвязь между условиями нанесения покрытий и изменением оценочной σ в отсутствие дефектов детально не изучена. К числу возможных причин можно отнести детальное изучение величин адгезии и когезии, условий покрытий. На рис. 3, где представлено качественное покрытие площадки, разность σ между слоями не является значительной. На рис. 4 разность σ между двумя слоями позволяет четко определить наличие дефекта на втором и третьем участках. Желтым цветом отмечено золотое покрытие, а серым – никелевое.

Дефект проявляется в виде локального изменения значений σ, которое может сопровождаться изменением как абсолютных величин проводимости слоев σ покрытий, так и разности между ними, что обусловлено свойствами металлов. Для обнаружения таких изменений АПАК анализирует общие закономерности распределения σ вдоль линии контроля. По таким закономерностям осуществляется классификация дефектов.

Значения отклонений σ усредняются с весовыми коэффициентами, пропорциональными интенсивности вихревых токов на соответствующей глубине. Для упрощения и повышения практической применимости подхода каждый дефектный участок характеризуется определенным значением σ, положением и размерами.

Выводы

Эффективность ВТЧМ была оценена на образцах ИЭТ – металлостеклянных корпусах для микросхем с золотым покрытием на никелевым промежуточным слое и на медном основании выводной рамки, которые впоследствии подверглись тщательному изучению и инспекции другими методами: вихретокового амплитудного [4]; магнитной индукции [5] и рентгенофлуоресцентного анализа [6]. Анализ данных проводился с помощью автоматизированной процедуры, использующей пороговые значения для выявления изменений на расчетных профилях σ. При этом использовались особенности профилей σ от сигналов, указывающих на реальные дефекты покрытий, исследованные в [7]. Для решения этой задачи были разработаны специальные алгоритмы, прошедшие проверку на основе полученного массива имеющихся данных. Производительность на АПАК конвейерного типа с одновременной оптической инспекцией семью камерами и ГУВЧ получена для одного ИЭТ 3 секунды/1200 ИЭТ в час. Все значимые дефекты были четко выявлены. Установлены ограничения инспекции, проявляющиеся в виде сферических пор менее 1 мкм в диаметре, которые определяются как дефекты, но не являются браком.

Чтобы в полной мере использовать преимущества ВТЧМ, эффективность которого уже подтверждена на практике, начата разработка АПАК с ВТЧМ и внедрение в составе АИКИ предприятия-изготовителя ИЭТ. Цель состоит в обеспечении автоматизированного контроля крупных партий ИЭТ путем интеграции технологии ВТЧМ в автоматизированную систему, построенную на базе роботов.

Надежность ИЭТ зависит от соблюдения строгих требований к качеству изготовления, а также от совершенства методов инспекции качества, применяемых предприятиями. Для контроля качества ИЭТ были проведены настоящие исследования, разработан и проверен на практике АПАК с технологией ВТЧМ. В таком АПАК используются также оптическая инспекция на базе КЗ, технологии ИИ – машинное обучение и нейронные сети. Разработка продемонстрировала высокую чувствительность к дефектам и способность количественно определять их размеры. Высокая эффективность наблюдалась даже в тех случаях, когда геометрические особенности участков, например границы, оказывали значительное влияние на вихретоковой сигнал; эта проблема была решена за счет оптимизации процедур анализа данных, основанных на использовании математических моделей.

Литература

1. ГОСТ Р 55611-2013 Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения. М. Стандартинформ. 2019.
2. ГОСТ Р ИСО 15549-2009 Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый. Основные положения. М. Стандартинформ. 2019.
3. Дарья Дормидошина, Юрий Евстифеев, Валерий Ключников, Евгений Ключников, Юрий Рубцов, Юрий Юдахин. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта. Часть 14. Методы инспекции покрытий поверхностей изделий электронной техники // Электронные компоненты. №3. 2026.
4. Дарья Дормидошина, Юрий Евстифеев, Валерий Ключников, Евгений Ключников, Даниил Романов, Юрий Рубцов. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта. Часть 20. Применение вихретокового амплитудного метода в автоматизированной инспекции качества ИЭТ // Электронные компоненты. №10. 2026.
5. Дарья Дормидошина, Юрий Евстифеев, Валерий Ключников, Евгений Ключников, Юрий Рубцов. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта. Часть 19. Применение метода магнитной индукции для автоматизированной инспекции качества покрытий изделий электронной техники // Электронные компоненты. №9. 2026.
6. Дарья Дормидошина, Юрий Евстифеев, Валерий Ключников, Евгений Ключников, Юрий Рубцов. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта. Часть 18. Организационная система автоматизированной инспекции качества покрытий изделий электронной техники золотом и никелем методом рентгенофлуоресцентного анализа // Электронные компоненты. №8. 2026.
7. Дарья Дормидошина, Юрий Евстифеев, Валерий Ключников, Евгений Ключников, Юрий Рубцов, Юрий Юдахин. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта. Часть 13. Развитие автоматизированных систем оптической инспекции качества покрытия поверхностей изделий // Электронные компоненты. №2. 2026.