

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

Часть 20. Применение вихретокового амплитудного метода в автоматизированной инспекции качества ИЭТ

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, 5–9, 2026 г.). При таком подходе растет производительность труда и выход годных изделий, повышается репутация предприятия. В этой части статьи описан метод автоматизированной инспекции качества ИЭТ с использованием вихретокового амплитудного метода, позволяющего определять толщину покрытий изделий, обнаруживать поверхностные и подповерхностные дефекты.

Введение

В [1] представлены методы и результаты исследований развития технологий инспекции покрытий поверхностей изделий электронной техники, приведено описание дефектов покрытий. В продолжение этой работы в этом исследовании мы развиваем метод автоматизированной инспекции качества ИЭТ с использованием вихретокового амплитудного метода, позволяющего определять толщину покрытий ИЭТ, обнаруживать поверхностные и подповерхностные дефекты.

Вихретоковый контроль – один из электромагнитных методов неразрушающего контроля для токопроводящих материалов. В дефектоскопии метод вихревых токов применяется для индикации и оценки поверхностных и подповерхностных дефектов. Метод позволяет измерить толщину покрытий или слоев, определить электрическую проводимость и магнитную проницаемость материала, оценить металлургические, механические и другие свойства изделия. Особенность вихретокового метода в том, что контроль можно проводить без прямого контакта преобразователя с объектом. Основоположником вихретокового метода контроля является немецкий ученый Фридрих Фёрстер (Friedrich Förster), который также впервые ввел термин «дефектоскоп». Этот немецкий ученый, профессор, крупный специалист в области электромагнитной дефектоскопии, стал основателем немецкой компании Institut Dr. Förster

(Ройтлинген). Работу над электромагнитными методами контроля он начал в 1937 г. и уже в 1948 г. основал компанию, существующую до сих пор. В течение 1950-х гг. был разработан научный фундамент электромагнитных методов контроля. За это в 1957 г. доктор Фридрих Фёрстер был награжден Премией Виктора де Фореста. В 1963 г. первое устройство измерения магнитного поля фирмы Förster было установлено на спутник. С таким зондом спутник Mariner II исследовал магнитное поле Венеры. Затем последовали другие измерительные устройства в многочисленных проектах исследования космоса.

Развитие вихретоковой дефектоскопии тесно связано с развитием электроники, так как эффективность вихретоковых приборов напрямую зависит от производительности используемых в них электронных компонентов. Так, технология прошла путь от простейших дефектоскопов со звуковой индикацией до приборов, применяющих микропроцессорные технологии, что вывело ее на совершенно новый качественный уровень. Появилась возможность реализации многоканальных систем, запись и удобная интерпретация данных, а также возможность использования математических аппаратов, расширяющих возможности этого метода. Вихретоковый метод основан на анализе электромагнитного поля вихревых токов, или токов Фуко, наведенных в объекте контроля при помощи преобразователя. Вихревые токи создаются в объекте контроля за счет катушки индуктивности, входящей в состав преобразователя, через которую проходит переменный электрический ток, создающий переменное электромагнит-

ное поле в области преобразователя. При прохождении этого поля через токопроводящий материал в нем появляется ЭДС по закону электромагнитной индукции (1):

$$E = -d\Phi/dt. \quad (1)$$

Под действием электродвижущей силы в объекте возникают замкнутые индукционные токи, мгновенное значение которых так же является переменным. При контроле анализируется именно поле этих переменных токов.

Виды вихретоковых преобразователей

Вихретоковые преобразователи (ВТП) по способу измерения электромагнитных полей классифицируются на параметрические и трансформаторные. В параметрических всего одна обмотка, которая выполняет функции возбуждения и измерения одновременно. Данные контроля получают, измеряя комплексное сопротивление ВТП. В трансформаторных преобразователях не менее двух обмоток, одна из которых генератор, а другая используется для измерения параметров. В зависимости от способа соединения обмоток, ВТП делятся на абсолютные и дифференциальные. В абсолютных ВТП выходной сигнал представляет собой абсолютное значение параметров объекта контроля. Дифференциальными ВТП принято называть преобразователи, у которых не менее двух измерительных обмоток, включенных встречно. Эти ВТП измеряют разницу показаний измерительных обмоток, что дает более точные результаты. Вихретоковый прибор измеряет амплитудное значение напряжения на измерительной обмотке или фазовые приращения. При анализе данных от протяженного дефекта типа «трещина» учитывается, что глубина дефекта влияет на амплитудное значение, а раскрытие дефекта – на фазовые сдвиги.

Основные преимущества метода

1. Высокая скорость контроля.

Электромагнитные поля распространяются с субсветовыми скоростями, что позволяет очень быстро осуществлять вихретоковый контроль. На практике можно говорить о скоростях до 10 м/с, од-

нако скорость ограничивается быстродействием прибора и в каждом конкретном случае она индивидуальна.

2. Отсутствие необходимости в непосредственном контакте.

Несмотря на то, что в воздухе электромагнитное поле затухает, имеется возможность осуществлять контроль с зазором – через изоляционное покрытие, покрытие краской и т. д. Кроме того, важным преимуществом является отсутствие необходимости в контактной жидкости и подготовке поверхности.

3. Независимость от погодных условий.

Вихретоковый контроль можно проводить при любой погоде. В отличие от капиллярного контроля, осадки не являются помехой.

4. Представление результатов контроля.

Основная часть

Современное конвейерное производство металлокерамических корпусов требует тщательной инспекции качества при поиске поверхностных дефектов. На рис. 1 показан снимок экрана программы, определяющей в разных ракурсах на семи камерах дефекты поочередно на каждом корпусе при продвижении конвейерной ленты. В верхней части экрана – семь снимков корпуса с каждой камеры. Красным цветом выделен дефект. Привязка к координатам позволяет оценить размеры дефекта. К сохраненным данным удобно возвращаться спустя время для анализа развития дефекта и контроля оператором над работой линии.

В наших исследованиях применялись корпуса для микросхем с золотым покрытием на никелевом промежуточном слое и на медном основании выводной рамки, также использовался вихретоковой амплитудный метод в АПАК для определения толщины покрытий ИЭТ, обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов.

Принцип работы вихретокового амплитудного метода основан на генерации высокочастотного электромагнитного поля ВТП, которое создает вихревые токи в проводящих слоях металлов покрытий [2] и основания ИЭТ, как показано на рис. 2. Плотность вихревых токов зависит от расстояния между ВТП, поверхностями inspectируемых ИЭТ и толщиной покрытий [3]. Эти вихревые токи вызывают изменение электромагнитного поля, окружающего ВТП.

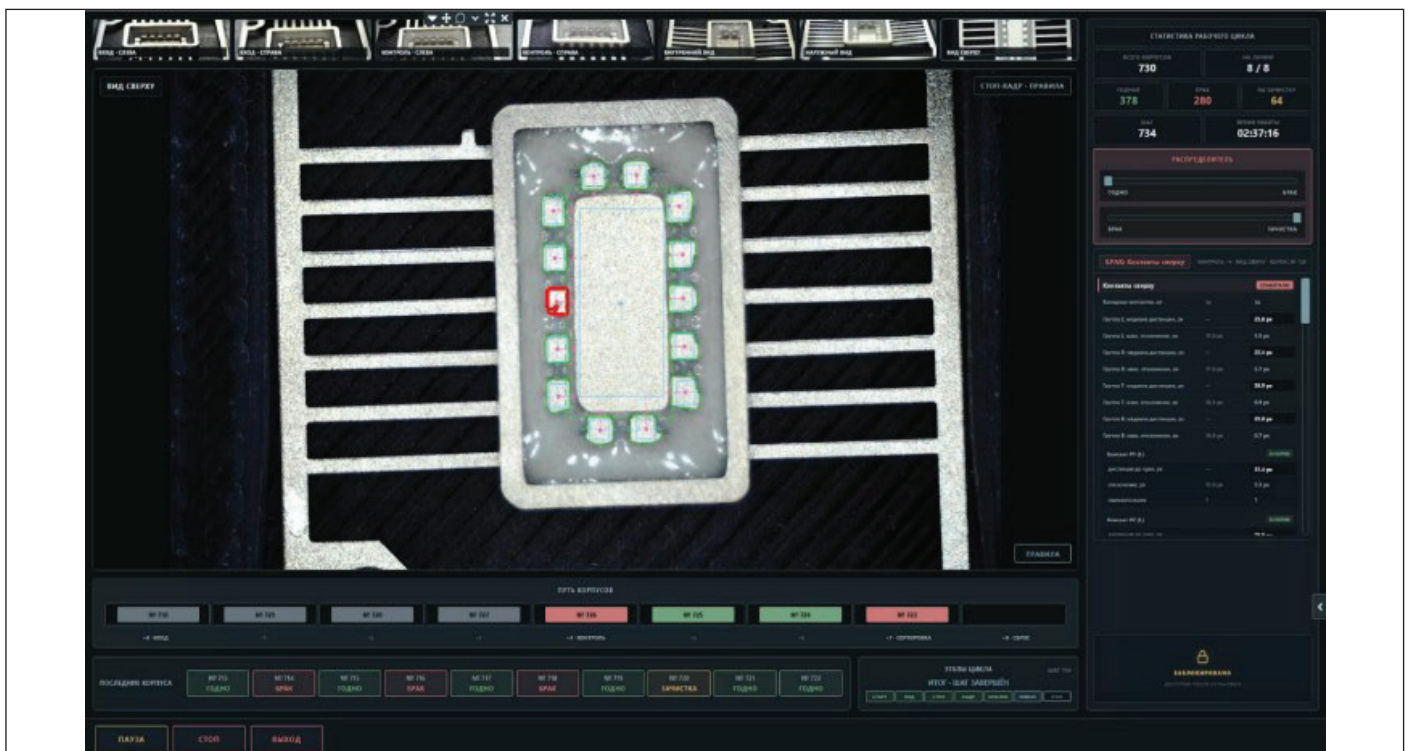


Рис. 1. Снимок с экрана программы, определяющей дефекты

ВТП является частью автоколебательного контура, эквивалентная схема которого показана на рис. 3.

Выходной сигнал ВТП характеризуется резонансной частотой f [4], определяемой как (2):

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{CL}} \quad (2)$$

где: C и L – емкость и индуктивность ВТП.

Емкость ВТП определяется следующим образом (3):

$$C = \frac{C1 \cdot C2}{C1 + C2} \quad (3)$$

Емкость ВТП – это электрическая емкость, которая образуется между витками катушки $C1$, а также между витками и элементами конструкции (каркасом, экраном, конструктивными элементами устройства) $C2$. Это нежелательная паразитная емкость, которая существенно влияет на особенности применения метода.

Параметром, определяющим выходной сигнал, также является обозначенная на рис. 2 индуктивность ВТП, зависящая от толщины d покрытия ИЭТ.

Неопределенности выявления качества покрытий ИЭТ вихретоковым методом

При проведении инспекции качества покрытий ИЭТ с использованием вихретокового амплитудного метода учитываются составляющие, которые могут влиять на точность, полноту и однозначность результатов инспекции.

Они делятся на следующие группы:

- геометрические: кривизна и шероховатость поверхности покрытия ИЭТ, ее наклон, загрязнения на ней, краевой эффект;
- технологические: влияние температуры, внешних электромагнитных полей;
- электромагнитные: удельная электропроводность σ металлов.

Факторы, влияющие на неопределенность результатов инспекции, подробно представлены в [5].

Практика показывает, что значение σ и его изменение вдоль поверхности вносят наибольший вклад в неопределенность результатов инспекции. Для изучения их влияния использовался анализ для комплексных значений.

Изменение электромагнитного поля, окружающего ВТП, влияет на его импеданс. Величина импеданса позволяет определить уровень

качества не только микросварки [6], но и построения наборов калибровочных значений для расчета толщины покрытия ИЭТ. Импеданс ВТП представляет собой комплексное значение, определяемое по формулам (4–5):

$$\bar{Z} = r + Xl, \quad (4)$$

$$Xl = 2\pi fL, \quad (5)$$

где r – омическое сопротивление; Xl – индуктивное сопротивление.

При измерении d на покрытиях с разными значениями σ происходит мультипликативное изменение f , которое компенсировалось путем калибровки значений ВТП на непокрытом основном металле или на покрытом основном металле с известной толщиной d . Такая калибровка выполнялась в небольшом диапазоне d . При этом определено, что калибровку не всегда можно выполнить в случаях, когда:

- σ значительно изменяется на поверхности основного металла;
- ИЭТ имеет разную температуру на поверхности.

В этих случаях необходимо подавить влияние σ путем реализации более сложной структуры ВТП, обладающей функциональной избыточностью. Предлагается использовать более точный трехкатушечный ВТП электромагнитного поля.

Выходной сигнал ВТП является однопараметрическим; при этом на него влияют d и σ . В таких случаях мы предлагаем использовать трехкатушечный (ВТП-3) высокочастотный ВТП, структурная схема которого показана на рис. 4.

МК генерирует возбуждающий сигнал заданной частоты. Подвергнувшееся преобразованию ЦАП и усилению U_1 возбуждающее напряжение подается на возбуждающую катушку L_1 , где создает магнитное поле, которое взаимодействует с металлами покрытий инспектируемого ИЭТ. Результирующее магнитное поле, полученное при взаимодействиях магнитного поля возбуждающей катушки и поля вихревых токов в основном металле ИЭТ, улавливается измерительной катушкой L_3 . Компенсирующая катушка L_2 регистрирует магнитное поле L_1 , но не улавливает магнитное поле вихревых токов. L_2 и L_3 соединены последовательно в противоположном направлении, благодаря чему компенсируется постоянная составляющая сигнала L_3 . Сигнал на выходе L_3 соответствует суммарному напряжению L_1 и L_2 . Это напряжение подается на усилитель суммарного напряжения U_2 , после чего сигнал поступает в АЦП. Сигнал АЦП передается в МК для дальнейшей обработки. Выходной сигнал представляет собой комплексное значение, содержащее два независимых параметрических сигнала: f_1 и f_2 – составляющие напряжения ВТП-3.

Описание метода проведения инспекции

Параметрами измерения являются d и σ . Программное обеспечение АПАК генерирует градуировочную кривую с большим количеством градуировочных точек. Это число, сопоставимое с разрешением инспекции, позволяет исключить неподходящие интерполяционные функции. Для одного основного металла проводится градуировка на нескольких эталонных основных металлах с известным значением σ .

Характеристика градуировки представляется веерообразной сеткой на плоскости. Сетка утолщается в направлении d и истончается в направлении σ , как показано на рис. 5.

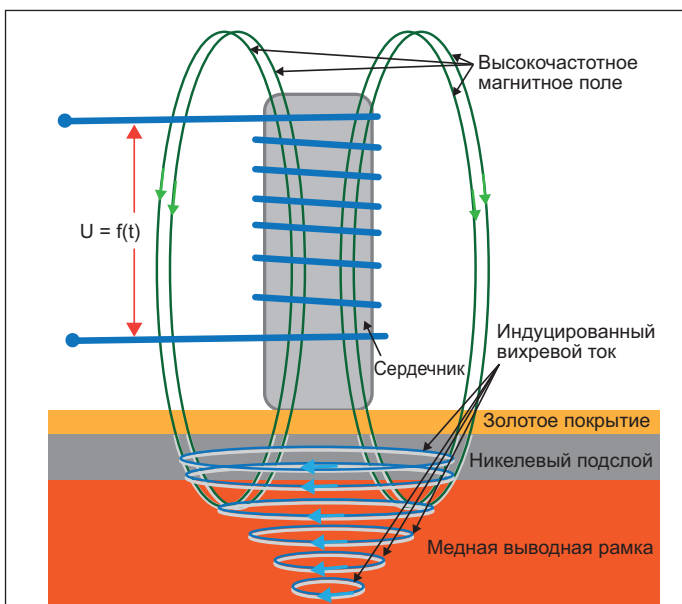


Рис. 2. Принцип действия вихретокового амплитудного метода

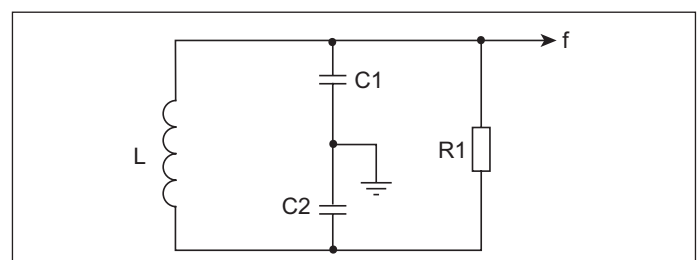


Рис. 3. Эквивалентная схема ВТП

Задача метода – определить участок сетки, который соответствует точке сигнала, полученного во время инспекции. Для эффективной работы исследуемого метода в условиях большого набора точек градуировки необходима проверка попадания значений в многоугольник – веерообразную сетку.

В связи с большим количеством участков градуировочной характеристики вычисление проводилось методом «половинного участка» при следующих условиях:

- если условие выполняется для $d = 0$, сигнал относится к верхней половине сетки. В этом случае для следующей итерации выбираются точки из верхней половины сетки ($d = d_{\max}/4$ и $d = d_{\max}/2$);
- если условие выполняется для усредненного значения d , сигнал относится к нижней половине сетки. В этом случае для следующей итерации выбираются точки из нижней половины сетки ($d = 3d_{\max}/4$ и $d = d_{\max}$);
- если условие не выполняется ни для $d = 0$, ни для $d = d_{\max}/2$, сигнал либо относится к одному из экстраполируемых участков, либо находится вне сетки. В этом случае проверяется принадлежность сигнала к одному из экстраполируемых участков сетки;
- если условие не выполняется ни для одного из интерполируемых участков характеристики градуировки, сигнал находится за пределами сетки («мертвая зона»). В этом случае проверяется принадлежность сигнала к «мертвым зонам»;
- если условие не выполняется ни для одной из «мертвых зон» метода, сигнал считается ошибочным и не подлежит дальнейшей обработке.

Сигнал может относиться только к одному из сегментов сетки; после определения сегмента необходимо перейти к следующей итерации. На следующем шаге рассматриваемая половина значений, и принадлежность сигнала к одному из сегментов (составляющих четверть сетки) проверяется по аналогии с предыдущей итерацией. Заметим, что маловероятна ситуация, при которой сигнал не попадает ни в одну из четвертей. Результатом вычислений на данном этапе метода градуировки является определение точек, соответствующих сигналу (d ; σ). При этом возможна дополнительная оптимизация метода: исключение из проверки тех значений, которые существенно отличаются от величины, определенной на предыдущих этапах.

Толщина покрытия определяется по линии градуировочной характеристики. При этом количество линий характеристики может оказаться в несколько раз меньше числа значений d в рабочем диапазоне АПАК. В процессе измерения толщины необходимо применять накопление и усреднение результатов расчета величины d .

В исследованиях использовались ИЭТ с плоской поверхностью. Если инспекция проводилась на поверхности ИЭТ с вогнутой поверхностью, показания d уменьшались. При малых значениях d (менее 0,01 мкм) результаты становились отрицательными. Однако подобные ситуации предусматривались и не были причинами сбоев АПАК. Для этого градуировочная характеристика экстраполируется в областях $\sigma > \sigma_{\max}$, $\sigma < 0$ и $d < 0$ с использованием эмпирически подобранных полиномиальных функций экстраполяции.

Испытания описанного метода проводились с использованием конечно-элементной модели. Испытания состояли из двух этапов: на первом этапе выполнялась градуировка ВТП-3. Для этого применялась модель основного металла со значениями σ , соответствующими фактическим показателям основного металла, применявшимся при градуировке. Значения σ для градуировочных образцов основного металла были подобраны так, чтобы они располагались последовательно в логарифмическом масштабе. Значения d задавались вблизи тестовых величин. Поскольку метод обладает высокой точностью вычислений, градуировка модели проводилась с шагом 0,01 мкм, что значительно превышает требования для практического применения. Данные, полученные в ходе калибровки модели, были загружены в программу, реализующую описанный выше метод.

На втором этапе проводилось тестирование модели ВТП-3. Для этого использовались образцы ИЭТ, в которых значения σ изменялись равномерно в логарифмическом масштабе с малым шагом.

Результаты показали отклонение величины d минимальным вблизи градуировочных точек. Результаты испытаний исследуемого метода показали существенное снижение отклонения d при изменении σ примерно на два порядка.

Выводы

Автоматизированная инспекция качества ИЭТ вихретоковым амплитудным методом позволяет определять толщину покрытий изделий, обнаруживать поверхностные и подповерхностные дефекты. В описанных результатах исследовались корпуса для микросхем с золотым покрытием на никелевом промежуточном слое и на медных основаниях выводных рамок. Применение вихретокового амплитудного метода в автоматизированных системах инспекции качества ИЭТ отличается высокой скоростью проведения инспекции и отсутствием необходимости в контакте с исследуемой поверхностью изделий, что исключает повреждения и сохраняет целостность ИЭТ.

Перечислим основные преимущества метода.

1. Высокая скорость инспекции. Электромагнитные поля распространяются с высокой скоростью, что позволяет быстро получить результаты с помощью вихретокового амплитудного метода. На практике можно говорить о скоростях до 0,1 м/с. Однако скорость ограничивается формой и размерами ИЭТ, и в каждом конкретном случае она индивидуальна.
2. Отсутствие необходимости в непосредственном контакте с поверхностью ИЭТ. Возможно проведение контроля с зором. Важным преимуществом является отсутствие необходимости в контактной жидкости и подготовке поверхности.
3. Высокая точность метода. Погрешность инспекции толщины покрытий составляет 0,01 мкм.
4. АПАК позволяет сохранять объективные данные контроля с четкой привязкой к ИЭТ и их координатам, что позволяет оценить размеры дефекта. К сохраненным данным удобно возвращаться спустя время для анализа причин возникновения дефектов.

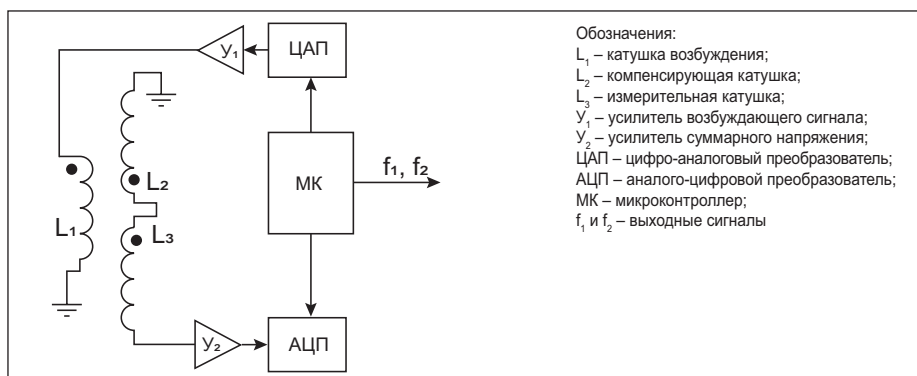


Рис. 4. Структурная схема ВТП-3.

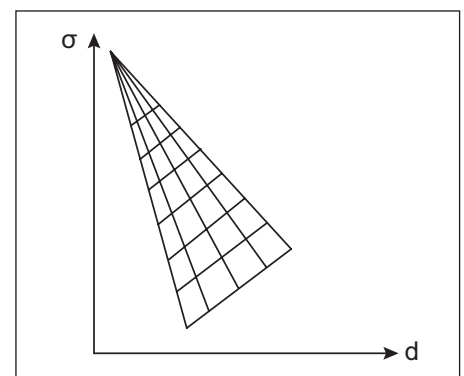


Рис. 5. Характеристика градуировки

5. АПАК в перспективе дает возможность работать в режиме 24/7 под контролем оператора конвейера.

У рассмотренного метода имеются следующие недостатки.

1. Ограниченная глубина инспекции. Метод предназначен для индикации и оценки поверхностных и подповерхностных дефектов. Глубина контроля зависит от исследуемого материала, установленных параметров контроля и рассчитывается в каждом конкретном случае.
2. Возможное искажение одного измеряемого параметра другим. При недостаточной предварительно проведенной исследовательской работе возможна неправильная интерпретация результатов контроля. АПАК имеет ряд математических алгоритмов, позволяющих отстроиться от мешающих параметров.
3. Инспектируются только токопроводящие материалы. Метод основан на распространении электромагнитной энергии в объекте контроля (ИЭТ), а значит, непроводящие материалы в составе не пригодны для вихретоковой инспекции.

Проведенные исследования позволили оценить составляющую неопределенности измерений, обусловленную применением метода определения d и правильностью выбора значений параметров градуировочных материалов основания. К факторам, которые могут существенно влиять на результаты измерения исследуемым методом, относятся форма, размер inspectируемого ИЭТ и шероховатость поверхности.

Вихретоковая инспекция активно развивается, постепенно вытесняя другие методы, которые предназначены для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов. Метод наукоемкий, требует предварительных теоретических расчетов и экспериментальной базы перед применением, но корректно используемая технология выгоднее экономически и по временным затратам в сравнении с конкурирующими технологиями, как показано в [7]. ■

Литература

1. 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.
2. ГОСТ Р 55611-2013 Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения. М. Стандартинформ. 2019.
3. ГОСТ Р ИСО 15549-2009 Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый. Основные положения. М. Стандартинформ. 2019.
4. Xianbing Liang, Chaojie Xu, Xi Zhang. A Review of Eddy Current In-Line Inspection Technology for Oil and Gas Pipelines. Processes 2026. 14 (2). 247 // <https://doi.org/10.3390/pr14020247>.
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, Юрий Рубцов, Илья Графов, Сергей Старостин. Разработка и внедрение АПАК для поиска дефектов изделий микроэлектроники с помощью искусственного интеллекта. Часть 5. Обнаружение дефектов микросварки в контактах элементов ЭКБ с помощью электромагнитных устройств // Электронные компоненты. №6. 2025.
7. 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.