

РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ: ОТ МЕХАНИЧЕСКОЙ ДО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ

Кондрашов Даниил Евгеньевич

Аспирант, Сургутский государственный университет
danil.jwx@yandex.ru

RETROSPECTIVE ANALYSIS OF DIAGNOSTIC METHODS FOR PRINTED CIRCUIT BOARDS: FROM MECHANICAL TO INTELLECTUAL

D. Kondrashov

Summary. Printed circuit boards are of particular interest because it is this component that ensures the operability of various electronic systems. At the same time, one of the most pressing issues in recent years has been the diagnosis of printed circuit boards. Recently, significant changes have been observed related to the improvement of methods and technologies in the performance of these tasks. The main purpose of the presented article is to perform an analysis regarding the dynamics and composition of changes in the diagnostic methods of printed circuit boards. The author sets the task of a comprehensive assessment of this issue, considering the evolution of the development of these methods from mechanical to intellectual. The results of the presented study confirm the expediency of switching to intelligent tools and the impossibility of using constructive diagnostic methods in modern conditions. The author pays special attention to the issue of designing intelligent support systems and decision-making within the framework of the initial task. The materials of the work can be useful for modern developers specializing in improving the quality and effectiveness of diagnostic methods for printed circuit boards.

Keywords: diagnostics, printed circuit board, electronic system, technical diagnostics, artificial intelligence, machine learning.

Аннотация. Печатные платы представляют особый интерес ввиду того, что именно данным компонентом обеспечивается работоспособность различных электронных систем. При этом одним из наиболее актуальных вопросов на протяжении последних лет остается диагностика печатных плат. В течение последнего времени наблюдаются значительные изменения, связанные с совершенствованием методики и технологий при выполнении данных задач. Основной целью представленной статьи является выполнение анализа относительно динамики и состава изменения методов диагностики печатных плат. Автором поставлена задача комплексной оценки данного вопроса, рассматривая эволюцию развития данных методов от механических до интеллектуальных. Результаты представленного исследования подтверждают целесообразность перехода на интеллектуальные инструменты и невозможность использования конструктивных методов диагностики в современных условиях. Автором уделено особое внимание к вопросу проектирования интеллектуальных систем поддержки и принятия решений в рамках исходной задачи. Материалы работы могут быть полезны для современных разработчиков, специализирующихся на повышении качества и эффективности методов диагностики печатных плат.

Ключевые слова: диагностика, печатная плата, электронная система, техническая диагностика, искусственный интеллект, машинное обучение.

Введение

Печатные платы (от англ. Printed Circuit Boards, PCB) являются неотъемлемой частью современных электрических средств (далее — ЭС). Именно они обеспечивают компактное и надежное соединение электронных компонентов, что позволяет создавать сложные устройства с высокой функциональностью на минимальной площади [1]. Использование печатных плат позволяет значительно повысить надежность и долговечность электрических систем благодаря высокой точности их изготовления и минимизации ручного монтажа, что снижает вероятность человеческих ошибок.

Одним из ключевых преимуществ печатных плат является их универсальность и способность интегрировать в себя различные электронные компоненты,

от простых резисторов и конденсаторов до сложных микропроцессоров и микроконтроллеров. Это позволяет разработчикам создавать как простые бытовые устройства, так и сложные системы, такие как компьютеры, медицинское оборудование и авиационные системы [2]. Важной особенностью печатных плат является их способность обеспечивать уменьшение габаритов, что особенно актуально в современных условиях стремительного развития технологий и уменьшения размеров электронных устройств.

При этом играет важнейшую роль в обеспечении надежности и функциональности электрических систем играет диагностика печатных плат. Своевременное выявление и устранение неисправностей на этапе производства или эксплуатации позволяет значительно снизить затраты на ремонт и обслуживание, а также повысить

общую надежность ЭС. Диагностика печатных плат включает в себя различные методы, такие как визуальный осмотр, использование тестеров и специализированных диагностических станций, а также применение автоматических систем тестирования, которые позволяют проверять функциональность и целостность электрических соединений с высокой точностью. В рамках работы планируется проведение комплексного анализа, включая такие вопросы, как радиоэлектронные средства и техническая диагностика, современные подходы к системной интеграции и поддержке принятия решений, машинное обучение в диагностике, а также оценка существующих подходов и инструментов.

Результаты и обсуждение

Радиоэлектронные средства являются основой современных технологий и повсеместно используются в различных отраслях, включая связь, оборону, медицину, транспорт, бытовую электронику и иные актуальные направления в 2024 году. Их значимость обусловлена способностью обеспечивать передачу, прием и обработку информации на больших расстояниях и с высокой скоростью. В условиях стремительного технологического прогресса и роста объема данных, роль ЭС продолжает возрастать, делая их незаменимыми элементами в построении эффективных и надежных систем.

Так, актуальность вопроса технической диагностики радиоэлектронных средств обусловлена необходимостью поддержания их высокой надежности и работоспособности. Сложность и многофункциональность современных ЭС требуют регулярного мониторинга и диагностики для своевременного выявления, и устранения неисправностей [3]. Техническая диагностика позволяет предотвратить потенциальные сбои и отказы оборудования, что особенно важно в критически значимых приложениях, таких как авиационная и космическая техника, системы безопасности и медицинское оборудование. Техническая диагностика ЭС включает в себя комплекс методов и средств, направленных на оценку состояния и работоспособности электронных компонентов и систем. Это могут быть как простые тестеры и осциллографы, так и сложные автоматизированные системы тестирования, способные выполнять комплексный анализ параметров и характеристик устройств.

В условиях интенсивной эксплуатации и воздействия неблагоприятных внешних факторов, таких как вибрации, температурные перепады и электромагнитные помехи, регулярная диагностика ЭС становится критически важной. Она не только способствует увеличению срока службы оборудования, но и повышает общую надежность и безопасность систем, в которых они используются. Так, развитие и совершенствование методов технической диагностики ЭС является важной задачей для

обеспечения устойчивого и эффективного функционирования современных технологических систем.

Механические методы диагностики печатных плат играют важную роль в обеспечении надежности и долговечности электронных устройств [4]. Они позволяют выявлять дефекты, которые могут возникать из-за механических нагрузок, температурных изменений и других воздействий, оказывающих влияние на целостность и работоспособность плат. Одними из наиболее эффективных методов являются вибрационный анализ, акустическая эмиссия и термография. Вибрационный анализ, появившийся в период 1950–1960 годов, используется для определения устойчивости печатных плат к механическим колебаниям и вибрациям, которым они подвергаются в процессе эксплуатации. Этот метод позволяет выявить слабые места в конструкции платы, такие как недостаточная прочность пайки или монтажных соединений. Вибрационные испытания проводят с использованием специальных стендов, на которых плата подвергается контролируемому колебанию. Анализируя реакцию платы на вибрацию, можно выявить потенциальные точки отказа и предотвратить их разрушение в реальных условиях эксплуатации.

Термография, получившая свое активное развитие в 1960–1970 годах, является методом диагностики, использующим инфракрасное излучение для измерения температурного поля на поверхности печатной платы. Изменения температуры могут указывать на наличие дефектов, таких как короткие замыкания, плохие контакты или перегрев компонентов. Тепловизоры позволяют визуализировать распределение температуры и выявлять аномальные зоны, где могут происходить отказные процессы [5]. Термография эффективна для мониторинга теплового состояния платы в реальном времени, что позволяет оперативно реагировать на выявленные проблемы и принимать меры для их устранения.

Акустическая эмиссия, представляя один из более новых механических методов от 1970–1980 годов, представляет собой метод диагностики, основанный на регистрации высокочастотных звуковых волн, которые возникают при образовании микротрещин и других дефектов в материале печатной платы. Этот метод позволяет обнаруживать начальные стадии разрушения и проводить профилактическое обслуживание, предотвращая серьезные поломки. Специальные датчики улавливают акустические сигналы, и по их характеристикам можно определить местоположение и природу дефектов. Акустическая эмиссия особенно эффективна для обнаружения дефектов в местах пайки и соединений, которые трудно выявить другими методами.

Несмотря на эффективность механических методов диагностики печатных плат, наблюдается ряд недостатков

ков, которые ограничивают их применение в современных условиях. Во-первых, эти методы требуют значительных временных и финансовых затрат на установку оборудования и проведение испытаний. Процесс диагностики может быть трудоемким и требовать высококвалифицированного персонала для интерпретации данных, что увеличивает общие расходы на техническое обслуживание. Во-вторых, механические методы диагностики часто обладают ограниченной чувствительностью и разрешающей способностью. Например, вибрационный анализ и акустическая эмиссия могут не выявлять мелкие дефекты или скрытые повреждения, которые могут стать причиной отказов в будущем. Термография, хотя и эффективна для выявления тепловых аномалий, не всегда способна точно определить причину перегрева, что может затруднить диагностику и устранение проблем. Более того, такие методы могут быть менее эффективны для диагностики сложных многоуровневых печатных плат с плотной компоновкой компонентов.

В связи с этими недостатками в 2024 году возрастает необходимость перехода на технологии искусственного интеллекта (далее — ИИ) и машинного обучения (далее — МО) для диагностики печатных плат. ИИ может значительно улучшить процесс диагностики за счет системной интеграции и системы поддержки принятия решений (далее — СППР). МО позволяет обрабатывать большие объемы данных, получаемых с различных датчиков и тестеров, выявлять скрытые зависимости и паттерны, которые могут указывать на потенциальные дефекты [6]. Интеграция ИИ в диагностические системы позволяет автоматизировать процесс анализа данных, сокращая время диагностики и снижая требования к квалификации обслуживающего персонала. ИИ-алгоритмы могут обучаться на основе исторических данных и на-

капливать знания о типичных дефектах и их признаках, что повышает точность и достоверность диагностики. Это также позволяет предсказывать отказы и проводить профилактическое обслуживание до возникновения серьезных проблем.

Поддержка принятия решений на основе ИИ и МО, в частности, позволяет операторам получать рекомендации по оптимальным действиям для устранения выявленных дефектов, что ускоряет процесс ремонта и снижает риск ошибок [7]. Системы, оснащенные ИИ, могут интегрироваться с другими компонентами производственного процесса, обеспечивая более эффективное управление ресурсами и оптимизацию производственных операций. Как видно, переход на технологии искусственного интеллекта в диагностике печатных плат является актуальной задачей, позволяющей преодолеть ограничения традиционных методов и значительно повысить эффективность и надежность электронных систем.

Системы поддержки принятия решений на основе машинного обучения в задаче диагностики печатных плат работают по принципу анализа больших объемов данных, собранных с различных диагностических устройств и сенсоров. Эти системы используют алгоритмы машинного обучения для выявления скрытых паттернов и аномалий, которые могут указывать на потенциальные дефекты или неисправности в печатных платах. Процесс начинается с предварительной обработки данных, которая включает сбор, очистку и нормализацию данных. Данные могут поступать из различных источников, таких как вибрационные анализаторы, инфракрасные камеры для термографии, и устройства акустической эмиссии. Затем данные метятся и разбиваются на тренировочные

Таблица 1.

Алгоритмы машинного обучения в задаче диагностики

№	Алгоритм	Преимущества	Недостатки
1	Q-обучение	Адаптивность: эффективно обучается в различных средах, адаптируясь к изменениям Простота: Алгоритм прост в реализации и применим к различным задачам управления и оптимизации Высокая точность: Q-обучение показывает высокую точность и устойчивость к переобучению	Проблемы с масштабируемостью: Q-обучение может столкнуться с проблемами в высокоразмерных пространствах состояний и действий. Необходимость в длительном обучении: для достижения хорошей производительности может потребоваться значительное количество итераций
2	Random Forest	Информативность: Модель предоставляет оценку важности признаков, что полезно для интерпретации результатов	Вычислительная сложность: Обучение большого числа деревьев может быть вычислительно затратным Чувствительность к гиперпараметрам: Производительность модели может зависеть от выбора гиперпараметров, таких как количество деревьев и глубина деревьев
3	XGBoost	Эффективность: Алгоритм оптимизирован для высокой производительности и эффективного использования памяти и ресурсов	Сложность настройки: Настройка гиперпараметров может быть сложной и требовать значительных усилий Вычислительные ресурсы: Обучение XGBoost может быть ресурсозатратным, особенно на больших наборах данных

и тестовые выборки [8]. На этапе обучения модель машинного обучения обучается на размеченных данных, чтобы распознавать типичные дефекты и их признаки. Это может включать использование различных алгоритмов, таких как случайные леса (Random Forest), градиентный бустинг (XGBoost), Q-обучение, а также различные нейронные сети (FCNN, CNN, RNN), которые способны выявлять сложные и нелинейные зависимости между признаками данных. После обучения модель проверяется и валидируется на тестовых данных, чтобы оценить ее точность и надежность. На этом этапе разрабатываемая модель также должна оптимизироваться для улучшения ее производительности.

Ключевыми вопросами при проектировании СППР для решения исходных задач по диагностике печатных плат является выбор алгоритма обучения и типа искусственной нейронной сети. В табл. 1 представлены результаты анализа и систематизации по алгоритмам машинного обучения применительно к данной задаче.

Результаты анализа свидетельствуют о том, что каждый из данных алгоритмов применим к решению исходной задачи по диагностике печатных плат. Однако наиболее эффективным станет использование Q-обучения ввиду возможности беспрепятственного обучения в различных средах, а также высокой точности результатов.

Последующим вопросом в проектировании СППР для диагностики печатных плат является выбор типа искусственной нейронной сети. В табл. 2 представлены результаты анализа и систематизации по видам искусственных нейронных сетей применительно к исходной задаче.

В результате анализа можно однозначно определить наиболее эффективную сеть, которой является FCNN. Основными преимуществами данной сети является

универсальность, а также возможность обработки различных типов данных, что особенно актуально в комплексной диагностике печатных плат, включая анализ изображений и числовых зависимостей [9]. При этом проблема переобучения решается за счет дополнительных методов.

После выбора алгоритма, сети и ее обучения происходит интеграция в СППР. В режиме реального времени данные, полученные с диагностических устройств, анализируются обученной моделью. Модель автоматически идентифицирует аномалии и потенциальные дефекты, выдавая предупреждения и рекомендации операторам. Операторы могут использовать эти рекомендации для быстрой диагностики и принятия решений по ремонту или замене дефектных компонентов [10]. Система также накапливает новые данные для дальнейшего обучения и улучшения модели, обеспечивая ее адаптацию к изменяющимся условиям и новым типам дефектов. Как видно, системы поддержки принятия решений на основе машинного обучения повышают точность и эффективность диагностики печатных плат, позволяя быстро выявлять и устранять неисправности, минимизируя простой и затраты на обслуживание.

Заключение

Разработка систем поддержки принятия решений для диагностики печатных плат представляет собой важное направление в области технической диагностики и обеспечения надежности радиоэлектронных средств. Актуальность данного направления обусловлена необходимостью точного и своевременного выявления неисправностей, что напрямую влияет на безопасность и эффективность работы различных устройств.

Механические методы диагностики, такие как вибрационный анализ, акустическая эмиссия и термография,

Таблица 2.

Использование сетей в задаче диагностики

№	Сеть	Преимущества	Недостатки
1	FCNN	Универсальность: FCNN могут применяться к различным типам данных и задач Простота: они относительно просты в проектировании и обучении по сравнению с другими типами нейронных сетей	Склонность к переобучению: FCNN могут переобучаться на ограниченных данных, что требует тщательной регуляризации
2	CNN	Эффективность в обработке изображений: CNN превосходно справляются с задачами анализа изображений и видео Меньшее количество параметров: благодаря использованию сверточных слоев требуют меньше параметров, чем полносвязные сети	Сложность: Проектирование и обучение CNN могут быть сложными и требовать значительных вычислительных ресурсов Неприменимость к другим типам данных: CNN менее эффективны для задач, не связанных с анализом изображений
3	RNN	Учет временных зависимостей: RNN способны моделировать данные, где важна временная последовательность событий Применимость к различным задачам: они могут быть использованы для анализа временных рядов, предсказания последовательностей и других задач, связанных с временными данными	Проблемы с градиентом: RNN могут сталкиваться с проблемами затухания и взрыва градиентов, что затрудняет обучение на длинных последовательностях Вычислительная сложность: Обучение RNN может быть вычислительно затратным и требовать больших объемов данных и ресурсов

исторически играли ключевую роль в обнаружении дефектов. Эти методы, появившиеся и активно используемые с конца XX века, обеспечивают физическое тестирование плат и выявление аномалий. Однако данные методы имеют существенные недостатки — высокая стоимость оборудования, ограниченные возможности в обнаружении внутренних дефектов и зависимость результатов от человеческого фактора. Эти методы также требуют значительного времени и ресурсов для проведения полноценного анализа, что ограничивает их эффективность в условиях массового производства и эксплуатации.

Современные подходы с использованием машинного обучения и искусственных нейронных сетей предлагают решение этих проблем. Технологии искусственного интеллекта позволяют автоматизировать процесс диагностики, снижая влияние человеческого фактора и повышая точность и скорость анализа. Системы, основанные на алгоритмах машинного обучения, демонстрируют высокую эффективность в задачах классификации и регрессии, необходимых для оценки состояния печатных плат. Данные алгоритмы способны обрабатывать большие объемы данных, выявлять сложные зависимости и прогнозировать вероятные неисправности.

В результате анализа определено, что наиболее эффективными инструментами для реализации СППР при-

менительно к исходной задаче является Q-обучение, а также сеть FCNN. При этом необходимо подчеркнуть, что итоговый выбор зависит от индивидуальных особенностей и требований к системе. Автором определены инструменты, наиболее применимые для комплексных СППР, выявляющих дефекты любых типов. Однако для частных случаев возможно использование иных инструментов. В связи с этим важно подчеркнуть, что представленные материалы могут стать основой для последующих исследований, посвященных проектированию СППР для диагностики печатных плат, обеспечивающих, в свою очередь, возможность комплексной оценки и выявления дефектов.

В заключение важно отметить, что интеграция технологий ИИ и машинного обучения в процессы диагностики печатных плат представляет собой значительный шаг вперед по сравнению с традиционными механическими методами. СППР, основанные на МО, обеспечивают более высокую точность, скорость и эффективность диагностики, что существенно повышает надежность и долговечность радиоэлектронных устройств. Таким образом, переход к использованию ИИ и машинного обучения в диагностике ПП является не только актуальным, но и необходимым для современных промышленных и исследовательских процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Складнова М.С. Методы контроля печатных плат // *Colloquium-journal*. 2019. №25 (49). С. 45–46.
2. Мамчур М.О., Нарожнов В.В. Исследование механических колебаний многослойных печатных плат // *Известия КБНЦ РАН*. 2019. №6 (92). С. 95–101.
3. Yao C., Elaine N., Wang S.X. An automated and mobile magnetoresistive biosensor system for early hepatocellular carcinoma diagnosis. *Biosensors and Bioelectronics*. Volume 202. 2022.
4. Аль-Араджи З.Х. Методика оценки усталостного ресурса печатной платы с использованием принципа линейных накопленных повреждений при различных граничных условиях // *Вестник ВГТУ*. 2021. №3. С. 114–120.
5. Mahapatra S., Kumari R., Chandra P. Printed circuit boards: system automation and alternative matrix for biosensing. *Trends in Biotechnology*. Volume 42, Issue 5. 2024. P. 591–611.
6. Ромашенко М.А., Васильченко Д.В., Пухов Д.А. Использование нейросетевых алгоритмов для визуального контроля топологии печатных плат // *Вестник ВГТУ*. 2022. №3. С. 78–82.
7. Li Y., Zhang R., Li S., Liu Z., Zhang J., Fu Y. Progress in wearable acoustical sensors for diagnostic applications. *Biosensors and Bioelectronics*. Volume 237. 2023.
8. Ciszewski P., Sochacki M., Stęplewski W., Kościelski M., Arażna A., Janeczek K. A comparative analysis of printed circuit drying methods for the reliability of assembly process. *Microelectronics Reliability*. Volume 129. 2022.
9. Ромашенко М.А., Васильченко Д.В., Неклюдов А.Л., Рожненко С.Н., Колбая К.Ч. Методика сбора и оценки диагностических сигналов при анализе воздействия ЭМП на электронные средства // *Вестник ВГТУ*. 2020. №6. С. 98–101.
10. Изосимова Т.А., Максимова М.В., Михайлова О.В. Разработка автоматизированной системы управления диагностикой печатных плат на основе машинного зрения // *Вестник НГИЭИ*. 2018. №1 (80). С. 7–18.

© Кондрашов Даниил Евгеньевич (danil.jwx@yandex.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»