

Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" <http://mathmod.esrae.ru/>

URL статьи: mathmod.esrae.ru/55-237

Ссылка для цитирования этой статьи:

Тюлюкин В.А. Обзор различных аспектов разработки автономных устройств для настройки и проверки работоспособности промышленных электронных изделий // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2026. №1

УДК 681.518.5

DOI:10.24412/2541-9269-2026-1-38-43

ОБЗОР РАЗЛИЧНЫХ АСПЕКТОВ РАЗРАБОТКИ АВТОНОМНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ НАСТРОЙКИ И ПРОВЕРКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

В.А. Тюлюкин

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, Саратов, tulukinvaleriy@gmail.com

THE REVIEW OF VARIOUS ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS DEVICES FOR CONFIGURING AND TESTING THE PERFORMANCE OF INDUSTRIAL ELECTRONIC PRODUCTS

V.A. Tyulyukin

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
Russia, Saratov, tulukinvaleriy@gmail.com

Аннотация. Аналитический обзор стандартов и публикаций по разработке автономных устройств настройки, контроля и проверки промышленных электронных изделий. Актуальность связана с ростом их сложности. Приводятся литературные источники по пяти направлениям: проблематика отладки, методика испытаний, интерфейс, элементная база и архитектуры, примеры реализаций. Выявлены пробелы: преобладание качественной аргументации, слабый учёт коррелированных отказов и недостаточная связь техники с человеко-центрированными требованиями.

Ключевые слова: промышленная электроника, контрольно-настроечные устройства, методика испытаний, отладка цифровых систем, пользовательский интерфейс, ПЛИС.

Abstract. The article is an analytical review of the standards and publications on the development of autonomous devices for the setup, monitoring, and functional testing of industrial electronic products. The literature sources are presented across five areas: debugging challenges, testing methodology, user interface, component base and architectures, and examples of implementations. Identified gaps include the predominance of qualitative over quantitative reasoning, insufficient consideration of correlated failures, and a weak link between technical implementations

and human-centered requirements.

Keywords: industrial electronics, control and adjustment devices, testing methodology, digital systems debugging, user interface, FPGA.

Проблематика управления и отладки определяется сочетанием высокой функциональной сложности изделий, жёстких требований к надёжности и сокращающихся сроков вывода продукта на рынок. Принципиальную трудность представляет верификация совместного функционирования аппаратной и программной частей, поскольку источник наблюдаемого отказа априорно неочевиден. В работе [1] обосновывается роль прототипирования как средства ранней отладки цифровых систем и указывается на встроенные отладочные механизмы, прежде всего JTAG.

Аргументация [1] носит во многом качественный характер: автор не приводит количественных метрик трудозатрат или покрытия дефектов, позволяющих строго ранжировать сравниваемые стратегии. Кроме того, упоминание JTAG оставляет за рамками его нормативную основу. Этот пробел восполняет стандарт [2], регламентирующий архитектуру периферийного сканирования (boundary-scan) и тестовый порт доступа. Сопоставление [1] и [2] показывает, что трудности проектирования отладочной инфраструктуры в значительной мере уже стандартизованы: [2] задаёт унифицированный набор регистров и команд, обеспечивающий тестопригодность независимо от внутренней архитектуры изделия. Вместе с тем ориентация [2] исключительно на аппаратный уровень не решает обозначенную в [1] центральную проблему совместной отладки аппаратуры и ПО, что подтверждает взаимодополняющий характер источников.

Методика испытаний определяет последовательность, условия, способы и критерии проверки соответствия изделия требованиям по функциональности, надёжности и помехоустойчивости; от её полноты зависят достоверность результатов и риск пропуска критических дефектов.

В работе [3] изложена комплексная методика испытаний цифровых устройств в составе автоматизированных многоцелевых систем. Наибольший интерес представляет обоснование целесообразности объединения сигнатурного анализа с контролем числа единиц в бинарной последовательности: показано существование класса отказов, неразличимых по сигнатуре, но выявляемых при дополнительном контроле. Достоинство [3] - сочетание аналитического и имитационного методов: получены замкнутые выражения для вероятности пропуска отказа, верифицированные моделированием. Установлено, что максимум вероятности обнаружения достигается при числе единиц, близком к половине длины последовательности $\approx N/2$, однако даже в этом наихудшем случае комбинация методов существенно снижает вероятность пропуска по сравнению с одним сигнатурным анализом. Критическое ограничение - оценки получены в предположении равновероятности искажений; чувствительность результата к коррелированным или кратным ошибкам, типичным для реальных

интерфейсов, не исследуется.

Если [3] сосредоточено на повышении достоверности контроля, то в [4] решается смежная задача - автоматизация разработки тестовых программ, ручное создание которых является узким местом. Предложена специализированная САПР тестового ПО («SimTest»), реализующая переход от ручного задания воздействий к моделированию устройства на уровне его структурной схемы с автоматической генерацией входных воздействий и анализом реакций. Сопоставление [3] и [4] выявляет их комплементарность: [3] отвечает на вопрос, как оценивать результат теста, а [4] - как этот тест сформировать. Оба источника, однако, рассматривают испытания преимущественно на уровне отдельного устройства и лишь фрагментарно соотносят решения с признанными процессными моделями. Этот пробел восполняет стандарт [5], регламентирующий процессы тестирования программных и программно-аппаратных систем и задающий унифицированную терминологию и иерархию тестовых процессов, в рамках которой частные методики [3] и [4] обретают процессный контекст.

В работе [6] представлен структурированный подход к проектированию интерфейсов высокоавтоматизированных систем на примере управления воздушным движением. Принципиальное положение автора: корректно выбранный уровень автоматизации сам по себе не гарантирует надежного взаимодействия, если интерфейс не учитывает последствия проектных намерений. Предложенное решение для задачи эшелонирования воздушных судов включает ядро симулятора и модуль автономной автоматизации с итеративной верификацией интерфейса «человек–машина» при участии реальных операторов. Сильная сторона [6] - вовлечение конечных пользователей в цикл разработки; ограничение - узкая прикладная привязка, затрудняющая прямой перенос результатов на промышленную автоматику.

Более общий взгляд предлагает обзор [7], где методы оценки удобства промышленных интерфейсов разделены на субъективные и объективные. Субъективные методы фиксируют осознанные оценки пользователей посредством наблюдательных техник и стандартизованных опросников, но чувствительны к индивидуальным различиям. Объективные методы опираются на измеримые показатели - время выполнения задач, число ошибок, паттерны взаимодействия, а также физиологические сигналы, позволяющие регистрировать неосознаваемые реакции и поддерживать адаптивные интерфейсы. Ценность [7] - в систематизации инструментария, однако, данный обзор описателен и не предлагает критериев выбора метода под конкретную задачу.

Работа [8] переносит акцент с оценки готового интерфейса на его раннюю интеграцию в инженерный процесс. Авторы констатируют, что в промышленности интерфейсы по-прежнему разрабатываются поздно и фрагментарно, и предлагают расширить классическую мехатронную V-модель дополнительным слоем пользовательского интерфейса, опирающимся на три

взаимосвязанные модели - требований, установки и тестовую. Сопоставление трёх источников обнаруживает логическую последовательность: [8] обеспечивает раннее, формализованное и проверяемое включение интерфейса в разработку, методы [7] предоставляют инструментарий для верификации, предусмотренной тестовой моделью [8], а [6] даёт детально проработанный, но предметно-специфичный пример подобного цикла.

Объединяющим нормативным основанием выступает стандарт [9], формулирующий принципы человеко-центрированного проектирования интерактивных систем. Привлечение [9] показывает, что выводы [6]–[8] согласуются с общепризнанными требованиями (учёт контекста использования, итеративность, вовлечение пользователей), однако ни один источник не операционализирует эти принципы в виде проверяемых количественных критериев применительно к автономным контрольно-настроечным устройствам, что обозначает направление дальнейших исследований.

Развитие устройств управления и отладки тесно связано с выбором элементной базы и архитектур, определяющих вычислительные возможности, гибкость, массогабаритные характеристики и надёжность. Переход от дискретных компонентов к микроконтроллерам, ПЛИС и системам на кристалле сопровождался изменением подходов к организации интерфейсов и встроенных механизмов отладки.

Работа [10] посвящена многоинтерфейсной маршрутизирующей системе на базе ПЛИС для гетерогенных сетей сбора данных, объединяющих разнородные датчики и модули связи (RS-232, USB, Ethernet, радиоканал). Ключевой вклад - метод назначения «виртуальных» IP-адресов по типам портов и основанный на нём табличный алгоритм маршрутизации: каждому порту ставится в соответствие 32-разрядный виртуальный адрес, что унифицирует алгоритмы работы с любым интерфейсом. Достоинство решения - масштабируемость и аппаратное распараллеливание, естественное для ПЛИС; вместе с тем авторы не приводят данных о пропускной способности и задержках при предельной загрузке, что затрудняет объективную оценку производительности.

Работа [11] анализирует архитектуры контрольной аппаратуры для тестирования сверхвысокоскоростных интегральных схем, однако сопоставление вариантов носит преимущественно качественный характер. Архитектурные особенности обеих работ удобно рассматривать в с учетом спецификации [12], определяющей сетевой стандарт модульных измерительных приборов на базе локальной сети. Привлечение [12] позволяет соотнести решения [10] и [11] с отраслевым переходом от шинно-ориентированных платформ (GPIB, VXI, PXI) к сетевым и объясняет инженерную мотивацию унификации, заявленной в [10]. Ограничение [12] как источника - его нормативно-технический, а не исследовательский характер: спецификация фиксирует требования к интероперабельности, но не содержит сравнительной оценки эффективности архитектур, выполняемой работами [10]

и [11]. Дополнительный контекст даёт работа [15], где обобщается опыт построения модульных измерительных систем и подтверждается тенденция к программно-определяемой архитектуре приборов, что согласуется с унифицирующей логикой [10] и [12].

В литературе представлено значительное число примеров разработки родственных систем; большинство узкоспециализированы, однако накопленный опыт применим при создании универсального управляющего устройства. Так, в работе [13] описан компактный диагностический прибор для оперативной проверки и локализации неисправностей электроники на базе открытой платформы Arduino (Arduino Due, ядро ARM Cortex-M3). Диагностика опирается на метод дерева отказов: плата декомпозируется на функциональные модули, измеряемые сигналы сопоставляются с приоритетами и вероятностями отказов, после чего формируется упорядоченный список вероятно неисправных модулей. Решение демонстрирует разумный баланс портативности, функциональности и экономичности при приемлемой точности измерений. Очевидное ограничение - зависимость качества диагностики от полноты и достоверности априорно заданной модели отказов.

Работа [14] представляет универсальную интегрированную платформу тестирования встроенного ПО оборудования, ориентированную на масштабируемость и безкодирование тестов. Таким образом, в [13] и [14] показаны два противоположных проектных приоритета: [13] оптимизирует портативность и стоимость ценой узкой функциональности, тогда как [14] жертвует компактностью ради универсальности и масштабируемости. Примечательно, что обе реализации опираются на положения, теоретически обоснованные ранее: метод дерева отказов в [13] развивает идеи диагностической методики [3], а архитектура [14] воплощает сетевую парадигму [12] и принципы безкодированного тестирования, близкие [4]. Вместе с тем ни в [13], ни в [14] не уделяется внимания эргономике интерфейса оператора в той мере, в какой это рекомендуют [6]–[9].

Критическое сопоставление выявило ряд устойчивых пробелов: преобладание качественной аргументации над количественной (особенно в [1] и [11]), недостаточный учёт коррелированных и кратных отказов в моделях достоверности контроля [3], а также слабую связь технически ориентированных реализаций [10], [13], [14], [15] с человеко-центрированными требованиями [6]–[9]. Устранение этих пробелов - построение количественно верифицируемых критериев эффективности и комплексная интеграция метрологических, программно-процессных и эргономических аспектов в рамках единой архитектуры - представляется приоритетным направлением дальнейших исследований.

Литература

1. Иванников А. Д. Отладка проектов цифровых систем с использованием прототипирования // Инженерный вестник Дона. 2021. № 2 (74). URL:

- <https://cyberleninka.ru/article/n/otladka-proektov-tsifrovyyh-sistem-s-ispolzovanim-prototipirovaniya> (дата обращения: 20.12.2025).
2. IEEE Std 1149.1-2013. IEEE Standard for Test Access Port and Boundary-Scan Architecture. New York: IEEE, 2013. 444 p.
 3. Khusnutdinova E. M. [et al.]. Comprehensive Test Procedure for Digital Instruments and Devices of Automated Versatile Systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 915, no. 1. P. 012032.
 4. Melnik V. I. [et al.]. Methods of modeling of the test inputs for analysis the digital devices // 2014 International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA). IEEE, 2014. P. 112–113.
 5. ISO/IEC/IEEE 29119-2:2021. Software and systems engineering - Software testing - Part 2: Test processes. Geneva: ISO, 2021. 68 p.
 6. Frau G. User-interface design for highly automated systems: a structured approach // Proceedings of the 3rd International Conference on Application and Theory of Automation in Command and Control Systems. ACM, 2013. P. 148–151.
 7. Villani V. [et al.]. Survey on usability assessment for industrial user interfaces // IFAC-PapersOnLine. 2019. Vol. 52, no. 19. P. 25–30.
 8. Richter C., Reinhart G. Interdisciplinary and model-based development of user interfaces for production plants // 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. IEEE, 2014. P. 536–541.
 9. ISO 9241-210:2019. Ergonomics of human-system interaction - Part 210: Human-centred design for interactive systems. Geneva: ISO, 2019. 33 p.
 10. Chen Z., Li D. A Multiple Interfaces Routing System Embedded on FPGA // 2014 IEEE 17th International Conference on Computational Science and Engineering. IEEE, 2014. P. 1249–1255.
 11. Nikonov A. V. Analysis of architectures of control equipment designed for testing ultra-high-speed integrated circuits // 2014 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). IEEE, 2014. P. 1–4.
 12. LXI Consortium. LXI Device Specification 2022 (Revision 1.6). LXI Consortium, Inc., 2022. URL: <https://www.lxistandard.org> (дата обращения: 20.12.2025).
 13. Wu Y. [et al.]. Design of a Miniature Testing Equipment // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 252. P. 032074.
 14. Chen C. [et al.]. Design and Realization of Universal Integrated Testing Platform for Equipment-Embedded Software // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 635–637. P. 1175–1178.
 15. Zhang H. [et al.]. Development of an Automated Functional Test System for Electronic Modules // 2016 IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). IEEE, 2016. P. 245–249.