

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ НА НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО ИЗДЕЛИЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

А. А. Адамова¹, А. И. Чен², А. В. Апатенко³, К. В. Селиванов⁴

^{1, 2, 3, 4} Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

¹ arinaadamova75@gmail.com, ² chen3sasha@mail.ru, ³ lexap731@gmail.com, ⁴ selivanov_kv@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматриваются методы и стратегии улучшения технологичности изделий специальной техники. *Материалы и методы.* Анализируются ключевые аспекты проектирования и производства, включая выбор компонентов, механический монтаж, автоматизацию операций контроля и настройки, а также применение прогрессивных методов формообразования. Особое внимание уделяется совершенствованию характеристик изделия для повышения эффективности, снижения затрат и улучшения качества конечного продукта. *Результаты и выводы.* Результаты исследования подчеркивают важность интеграции современных технологий и подходов для достижения конкурентоспособности на рынке.

Ключевые слова: технологичность изделий, специальная техника, методы проектирования, производственные стратегии, выбор компонентов, механический монтаж, автоматизация контроля, настройка операций, прогрессивные методы формообразования, качество конечного продукта, современные технологии

Для цитирования: Адамова А. А., Чен А. И., Апатенко А. В., Селиванов К. В. Анализ влияния технологичности на надежность и качество изделий специальной техники // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 3. С. 91–100. doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-9

ANALYSIS OF THE IMPACT OF MANUFACTURABILITY ON THE RELIABILITY AND QUALITY OF SPECIAL EQUIPMENT PRODUCTS

A.A. Adamova¹, A.I. Chen², A.V. Apatenko³, K.V. Selivanov⁴

^{1, 2, 3, 4} Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹ arinaadamova75@gmail.com, ² chen3sasha@mail.ru, ³ lexap731@gmail.com, ⁴ selivanov_kv@mail.ru

Abstract. *Background.* The paper discusses methods and strategies for improving the manufacturability of special equipment products. *Materials and methods.* Key aspects of design and production are analyzed, including component selection, mechanical installation, automation of control and adjustment operations, as well as the use of advanced shaping methods. Special attention is paid to improving product characteristics to increase efficiency, reduce costs and improve the quality of the final product. *Results and conclusions.* The results of the study emphasize the importance of integrating modern technologies and approaches to achieve market competitiveness.

Keywords: processability of products, special equipment, design methods, production strategies, component selection, mechanical installation, automation of control, adjustment of operations, advanced shaping methods, quality of the final product, modern technologies

For citation: Adamova A.A., Chen A.I., Apatenko A.V., Selivanov K.V. Analysis of the impact of manufacturability on the reliability and quality of special equipment products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(3):91–100. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-3-9

Введение

В условиях быстрого технологического прогресса и глобальной конкуренции производители сталкиваются с необходимостью постоянного улучшения характеристик своей продукции. Одним из ключевых факторов, определяющих конкурентоспособность производства, является технологичность конструкции изделия.

Технологичность как важный показатель отражает совокупность свойств, которые определяют пригодность конструкции для эффективного изготовления, сборки, контроля, эксплуатации и утилизации при минимальных затратах. Высокий уровень технологичности способствует снижению себестоимости, повышению производительности, уменьшению вероятности брака и, как следствие, улучшению качества и надежности изделий [1–3].

Проблема повышения технологичности особенно актуальна в контексте разработки и производства специальной техники, функционирующей в условиях высоких нагрузок, повышенной ответственности и ограниченных ресурсов. Эта задача приобретает особое значение в условиях специальной военной операции (СВО), где устойчивость и надежность техники напрямую влияют на эффективность выполнения боевых задач [4, 5].

Вопрос технологичности становится особенно важным в аспекте логистики и полевого ремонта: чем выше технологичность, тем проще и быстрее можно восстановить технику, что снижает потери и увеличивает боеспособность. Таким образом, технологичность выступает ключевым фактором, влияющим на устойчивость систем жизнеобеспечения, связи и навигации на поле боя [4, 6].

В ходе Второй мировой войны одним из самых успешных образцов специальной техники стал танк Т-34, который продемонстрировал выдающиеся характеристики технологичности. Разработанный в конце 1930-х гг. Т-34 стал символом советской бронетанковой мощи и сыграл ключевую роль в ходе Великой Отечественной войны.

Технологичность танка Т-34 проявлялась в его конструктивных особенностях, которые обеспечивали высокую надежность и боевую эффективность. Одним из значительных факторов, способствовавших его успеху, было улучшение проектирования, что позволило создать танк с мощным вооружением, хорошей броневой защитой и высокой маневренностью. Кроме того, танк Т-34 отличался высокой производственной технологичностью, что позволяло быстро наращивать его выпуск. Это стало возможным благодаря использованию новых методов формообразования и механизации процессов сборки, что в свою очередь способствовало снижению затрат на производство и повышению качества конечного продукта [7, 8].

Несмотря на существующее количество исследований, в современной научной и практической среде сохраняется потребность в более гибких и адаптивных методах оценки технологичности, которые учитывают многофакторную специфику изделий и условия их применения [5, 6, 9].

Цель данной работы заключается в выявлении и формализации эффективных стратегий оценки и повышения коэффициента технологичности, что обеспечит улучшение качественных характеристик и надежности изделий, включая специальную технику, в условиях современных вызовов и ограничений [1, 4].

Анализ технологичности и методы обработки изделий

Коэффициент технологичности представляет собой показатель, который отражает уровень удобства и экономичности производства изделия, включая печатные платы (ПП). Он демонстрирует, насколько легко, быстро и недорого можно изготовить, протестировать и собрать печатную плату без ущерба для качества [10].

Определение коэффициента технологичности осуществляется с учетом множества факторов, включая производственные затраты, количество операций и сложность сборки. Вопросам автоматизации управления технологичностью посвящен целый ряд работ [6, 7, 10–14].

На основании системного анализа выделяют четыре основных класса методов управления технологичностью изделий:

- методы разработки общих рекомендаций и требований;
- методы качественной оценки на основе анализа конструктивных особенностей;
- методы количественной оценки, включающие расчет коэффициентов;
- комплексные методы, которые объединяют качественные и количественные подходы (рис. 1).



Рис. 1. Классификация методов управления технологичностью

Метод экспертной панели предполагает пошаговое формирование группы специалистов, оценку значимости показателей и расчет весов коэффициентов. Ключевые этапы включают:

- отбор экспертов по опыту, образованию и публикациям;
- проведение тестирования на профессиональную пригодность;
- составление панели и анкетирование по шкале от 0 до 10;
- формирование матрицы парных сравнений и расчет весов;
- вычисление интегрального коэффициента технологичности как взвешенной суммы частных показателей.

В анкетах экспертной панели специалисты оценивают актуальность учета определенного параметра на текущий момент. В качестве параметров были выбраны базовые показатели технологичности для электронных устройств в соответствии с ОСТ 4ГО.091.219-81 (табл. 1).

Таблица 1

Базовые показатели технологичности

Базовый показатель технологичности	Обозначение и формула показателя технологичности	Весовой коэффициент φ_i
1. Коэффициент использования микросхем и микросборок в блоке	$K_{имс} = N_{мс} / N_{ЭРЭ}$, где $N_{мс}$ – общее количество микросхем и микросборок; $N_{ЭРЭ}$ – общее количество электронных радиоэлементов (ЭРЭ)	1,0
2. Коэффициент автоматизации и механизации монтажа изделия	$K_{ам} = N_{ам} / N_m$, где $N_{ам}$ – количество монтажных соединений, осуществляемых механическим способом; N_m – общее количество монтажных соединений	1,0
3. Коэффициент автоматизации и механизации подготовки ЭРЭ к монтажу	$K_{мп\ ЭРЭ} = N_{мп\ ЭРЭ} / N_{ЭРЭ}$, где $N_{мп\ ЭРЭ}$ – количество ЭРЭ, подготовка которых к монтажу осуществляется механизированным способом	0,75
4. Коэффициент автоматизации и механизации операций контроля и настройки	$K_{мкн} = N_{мкн} / N_{кн}$, где $N_{мкн}$ – количество операций контроля и настройки, осуществляемых автоматизированным способом; $N_{кн}$ – общее количество операций контроля и настройки	0,5
5. Коэффициент повторяемости ЭРЭ	$K_{п\ ЭРЭ} = 1 - N_{т\ ЭРЭ} / N_{ЭРЭ}$, где $N_{т\ ЭРЭ}$ – общее количество типоразмеров ЭРЭ в изделии	0,31
6. Коэффициент применяемости ЭРЭ	$K_{пр\ ЭРЭ} = 1 - N_{тор\ ЭРЭ} / N_{т\ ЭРЭ}$, где $N_{тор\ ЭРЭ}$ – количество типоразмеров, оригинальных ЭРЭ в изделии	0,187
7. Коэффициент прогрессивности формообразования деталей	$K_{ф} = D_{пр} / D$, где $D_{пр}$ – количество деталей, изготовленных прогрессивными методами формообразования; D – общее количество деталей	0,11

Комплексный показатель технологичности конструкции изделия на основе базовых вычисляется следующим образом [1, 2, 4, 15]:

$$K = \sum_{i=1}^7 (K_i \varphi_i) / \sum_{i=1}^7 \varphi_i.$$

Для оценки и обеспечения технологичности конструкций изделий, включая печатные платы, применяются следующие государственные стандарты (ГОСТы):

- ГОСТ 14.201–83. Обеспечение технологичности конструкции изделий. Общие требования.

Этот стандарт устанавливает основные положения, систему показателей и последовательность работ по обеспечению технологичности конструкций изделий;

- ГОСТ Р 71362–2024. Система технологической подготовки производства. Организация работ по оценке технологичности конструкции изделия.

Стандарт определяет общие требования к организации работ по оценке и методам расчета технологичности изделия на всех стадиях его разработки и производства;

- ГОСТ Р 53432–2009. Платы печатные. Общие технические требования к производству.

Этот стандарт устанавливает требования к техническому уровню производства печатных плат и вводит понятие коэффициента технического уровня (КТУ) предприятия, определяющего категорию производства.

Расчет коэффициента технологичности комплексным методом

Для демонстрации практического применения концепции коэффициента технологичности в данной работе будет проанализировано устройство «Включение освещения при приближении к объекту» (рис. 2). В рамках исследования была создана 3D-модель, которая позволяет наглядно представить конструкцию и функциональные элементы устройства. Также была проведена трассировка, что дало возможность выявить основные факторы, влияющие на эффективность работы устройства. Результаты трассировки продемонстрировали, как различные компоненты взаимодействуют между собой и как их расположение может сказаться на общем коэффициенте технологичности. 3D-модель и результаты трассировки были разработаны с использованием САПР Altium Designer (рис. 3).

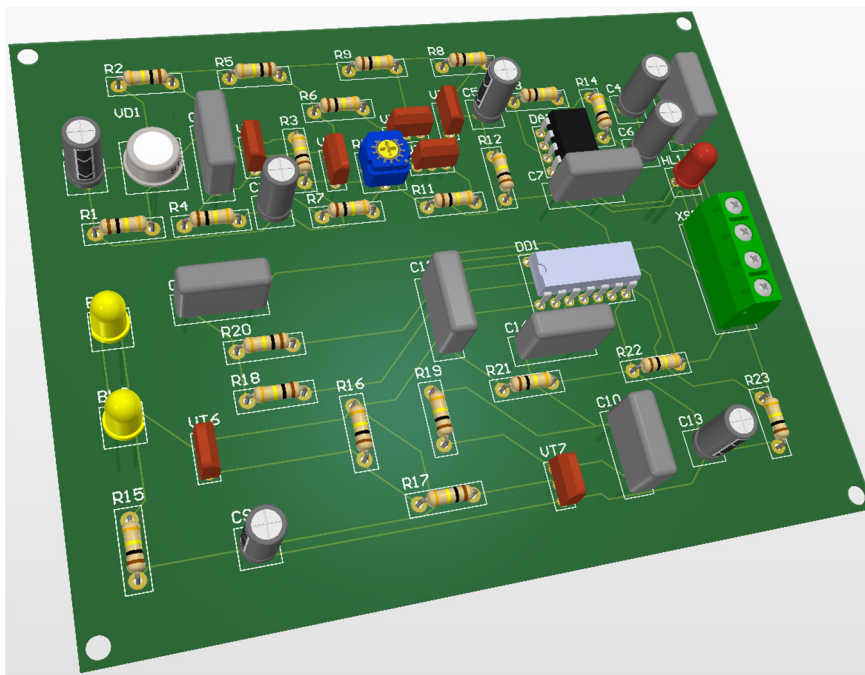


Рис. 2. 3D-вид устройства «Включение освещения при приближении к объекту»

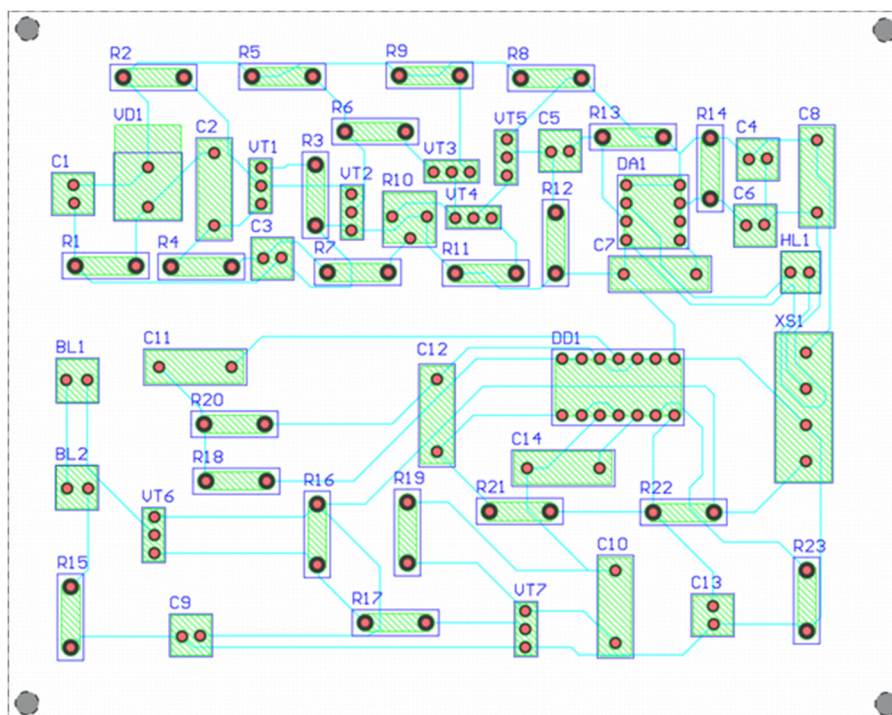


Рис. 3. Трассировка печатной платы устройства «Включение освещения при приближении к объекту»

В данной работе применялся исключительно монтаж компонентов по технологии ТНТ (Through-hole Technology) с односторонней трассировкой. Предполагается, что пайка выполняется вручную, как и установка компонентов. В процессе контроля и настройки выделяются следующие операции: оптический контроль, электрическое тестирование, проверка на короткое замыкание и обрыв, калибровка, а также настройка программного обеспечения. Корпус устройства состоит из таких элементов, как основа, крышка, крепежные детали, оптические компоненты, датчик и изоляционные элементы.

Основа корпуса изготавливается традиционными методами, такими как механическая обработка или сборка из отдельных частей. Крышка создается из отдельных листов материала, которые склеиваются или соединяются другим способом. Крепежные элементы представляют собой стандартные компоненты, которые приобретаются отдельно, как и датчик. Оптические компоненты могут быть изготовлены с использованием различных технологий, включая оптическую обработку. Изоляционные элементы выполнены из резины или других материалов, не требующих сложных методов формообразования [25]. На основе этих данных был рассчитан коэффициент технологичности:

$$K_{имс} = H_{мс} / H_{ЭРЭ} = 2/51 = 0,04;$$

$$K_{ам} = H_{ам} / H_{м} = 4/99 = 0,04;$$

$$K_{мп\ ЭРЭ} = H_{мп\ ЭРЭ} / H_{ЭРЭ} = 0/51 = 0;$$

$$K_{мкн} = H_{мкн} / H_{кн} = 0/5 = 0;$$

$$K_{п\ ЭРЭ} = 1 - H_{т\ ЭРЭ} / H_{ЭРЭ} = 1 - 10/51 = 0,8;$$

$$K_{пр\ ЭРЭ} = 1 - H_{тор\ ЭРЭ} / H_{т\ ЭРЭ} = 1 - 2/10 = 0,8;$$

$$K_{\phi} = D_{пр} / D = 0/6 = 0;$$

$$K = \sum_{i=1}^7 (K_i \cdot \phi_i) / \sum_{i=1}^7 \phi_i = (0,04 \cdot 1 + 0,04 \cdot 1 + 0 \cdot 0,75 + 0 \cdot 0,5 + 0,8 \cdot 0,31 + 0,8 \cdot 0,187 + 0 \cdot 0,11) / (1 + 1 + 0,75 + 0,5 + 0,31 + 0,187 + 0,11) = 0,12.$$

Пересчет коэффициента технологичности, произведя некоторые изменения

Далее были внесены изменения в изделие и пересмотрены условия его производства (рис. 4–6).

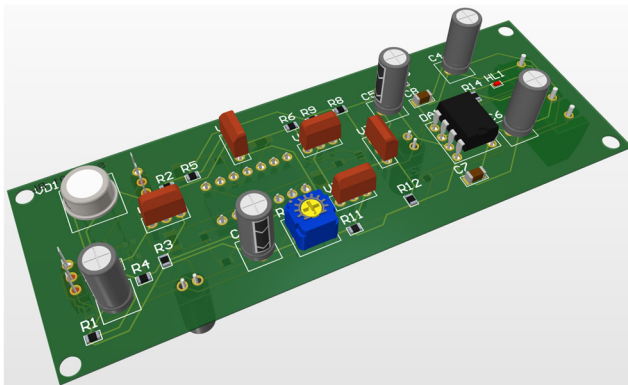


Рис. 4. 3D-вид устройства «Включение освещения при приближении к объекту» сверху с учетом изменений

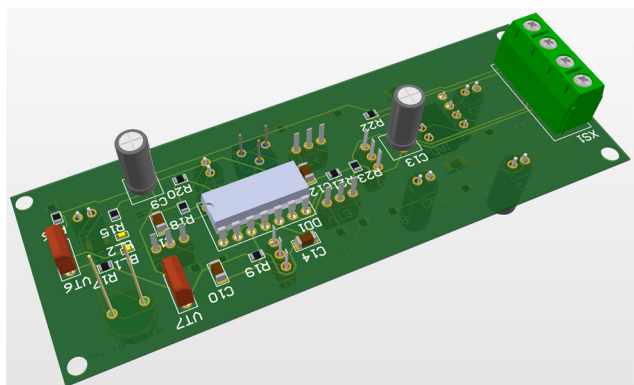


Рис. 5. 3D-вид устройства «Включение освещения при приближении к объекту» снизу с учетом изменений

Некоторые компоненты были заменены на SMD (Surface-Mount Device), а трассировка и монтаж осуществлены с обеих сторон печатной платы. Процессы пайки, установки нескольких компонентов, а также операции контроля и настройки были автоматизированы [7, 12–14]. Основа корпуса и крышка изготовлены с применением 3D-печати. Крепежные и оптические элементы выполнены методом литья [8, 16–25]. На основании этих данных был рассчитан обновленный коэффициент технологичности:

$$K_{имс} = H_{мс} / H_{ЭРЭ} = 2/51 = 0,04;$$

$$K_{ам} = H_{ам} / H_{м} = 30/99 = 0,3;$$

$$K_{\text{мп ЭРЭ}} = H_{\text{мп ЭРЭ}} / H_{\text{ЭРЭ}} = 29/51 = 0,57;$$

$$K_{\text{мкн}} = H_{\text{мкн}} / H_{\text{кн}} = 5/5 = 1;$$

$$K_{\text{п ЭРЭ}} = 1 - H_{\text{т ЭРЭ}} / H_{\text{ЭРЭ}} = 1 - 10/51 = 0,8;$$

$$K_{\text{пр ЭРЭ}} = 1 - H_{\text{тор ЭРЭ}} / H_{\text{т ЭРЭ}} = 1 - 2/10 = 0,8;$$

$$K_{\text{ф}} = D_{\text{пр}} / D = 4/6 = 0,67;$$

$$K = \sum_{i=1}^7 (K_i \cdot \varphi_i) / \sum_{i=1}^7 \varphi_i = (0,04 \cdot 1 + 0,3 \cdot 1 + 0,57 \cdot 0,75 + 1 \cdot 0,5 + 0,8 \cdot 0,31 + 0,8 \cdot 0,187 + 0,67 \cdot 0,11) / (1 + 1 + 0,75 + 0,5 + 0,31 + 0,187 + 0,11) = 0,45.$$

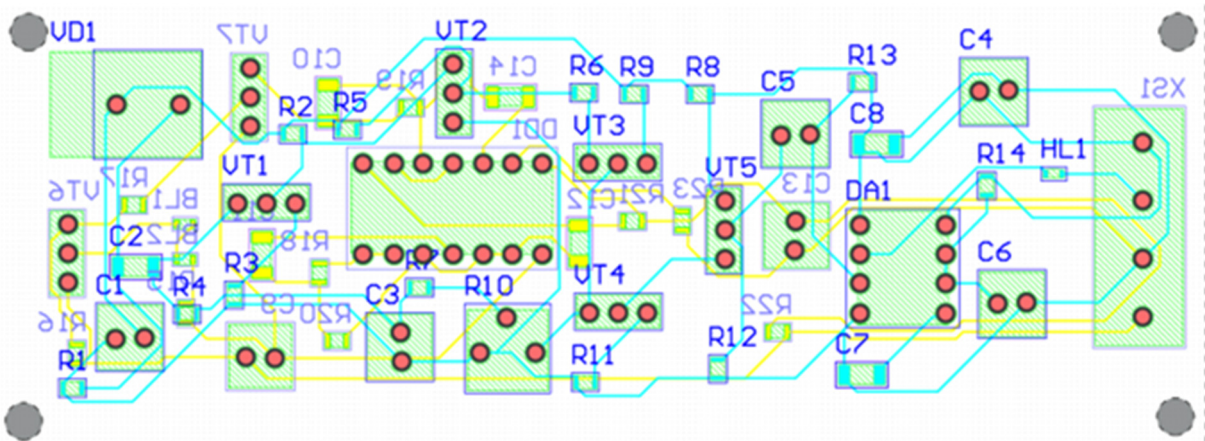


Рис. 6. Трассировка печатной платы устройства «Включение освещения при приближении к объекту» с учетом изменений

Использованы два подхода:

- до улучшений (ручная сборка, низкая автоматизация): $K = 0,12$.
- после улучшений (SMD, 3D-печать): $K = 0,45$.

С учетом незначительных улучшений удалось достичь более компактных размеров устройства, а также повысить коэффициент технологичности, показатели которого теперь соответствуют уровню опытного образца. Это подтверждает эффективность предложенной методики для оценки влияния инженерных решений на технологичность изделия [26, 27].

Заключение

Расчет коэффициента технологичности представляет собой важный этап в оценке эффективности разработки и производства изделия. Этот показатель позволяет не только определить степень сложности изделия, но и усовершенствовать его характеристики для достижения лучших результатов. Учитывая внесенные изменения в конструкцию и технологии производства, полученный коэффициент технологичности демонстрирует положительную динамику, что указывает на повышение эффективности и конкурентоспособности. В соответствии с проведенной работой были сформулированы следующие рекомендации по улучшению коэффициента технологичности:

- использовать преимущественно механический монтаж соединений, включая винты, гайки, шайбы и другие механические крепежные элементы для соединения компонентов и их крепления к корпусу; применять разъемы, обеспечивающие механический и электрический контакт, а также зажимы и клипсы для фиксации компонентов;
- при большом количестве компонентов оптимальным решением для замены будут микросхемы или микросборки, так как они представляют собой более сложные устройства, упрощающие проектирование и компоновку платы, а также увеличивающие функциональные возможности;
- следует выбирать SMD-компоненты, чипы и модули или пакеты с выводами, такие как QFP и BGA, поскольку они могут устанавливаться с помощью автоматизированных машин, что снижает вероятность ошибок, связанных с неправильной установкой компонентов;
- автоматизировать операции контроля и настройки электрических параметров для выявления дефектов на ранних стадиях и сокращения времени, необходимого для проверки и настройки;

– минимизировать разнообразие компонентов, так как это может усложнить процесс проектирования печатной платы;

– уменьшить количество оригинальных ЭРЭ в изделии, поскольку такие компоненты также усложняют проектирование из-за их уникальных размеров и форм;

– применять прогрессивные методы формообразования деталей, так как они обеспечивают более высокое качество и точность, сокращают время и затраты на производство и обладают достаточной гибкостью.

Таким образом, применение всех перечисленных рекомендаций позволит существенно повысить коэффициент технологичности, а также общую эффективность разработки и производства изделия, что приведет к созданию более качественного и надежного продукта, соответствующего современным стандартам.

Список литературы

1. Адамов А. П., Адамова А. А., Власов А. И. Дифференциальные коэффициенты оценки технологичности электронных средств и их применение при структурно-функциональном моделировании производственных систем // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2015. № 5. С. 109–123.
2. Адамова А. А., Адамов А. П., Шахнов В. А. Методика оценки технологичности электронных изделий на этапах проектирования и производства // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 2. С. 352–356.
3. Адамов А. П., Адамова А. А. Семантический анализ перспективных изделий микро- и нанoeлектроники с точки зрения увеличения ключевых показателей качества и технологичности // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 3. С. 94–101.
4. Адамов А. П., Адамова А. А., Темиров А. Т. Методика системного конструкторско-технологического проектирования изделий электронной техники с учетом требований концепции «Индустрия 4.0» // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 2. С. 310–317.
5. Адамова А. А. О проблеме коэффициентных методов оценки технологичности // Цифровая трансформация в энергетике : сб. тр. конф. Тамбов, 2025. С. 3–5.
6. Vlasov A. I., Shakhnov V. A. Visual methodology for the multi-factor assessment of industrial digital transformation components // Lecture Notes in Information Systems and Organisation. 2021. P. 57–65.
7. Селиванов К. В., Волков Г. А. Применение аддитивных технологий в производстве электронной аппаратуры // Датчики и системы. 2023. № 5. С. 27–34.
8. Перевертов В. П., Андрончев И. К., Юрков Н. К. Порошковые композиты и наноматериалы в гибких технологиях формообразования деталей // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 2. С. 85–95.
9. Власов А. И., Карпунин А. А., Курышев Р. Э. Визуальное моделирование smart-технологий проектного управления // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 1. С. 64–70.
10. Vlasov A. I., Berdyugina O. N., Krivoshein A. I. Technological platform for innovative social infrastructure development on basis of smart machines and principles of internet of things // Global Smart Industry Conference, GloSIC 2018 : proceedings. 2018. P. 8570062.
11. Власов А. И., Журавлева Л. В., Казаков В. В. Методы формализации когнитивной графики и визуальных моделей с использованием схем XML // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2021. № 1. С. 51–77.
12. Перевертов В. П., Кузин Н. А., Юрков Н. К. Классификации наноматериалов для традиционных и аддитивных технологий в системе транспортного машиностроения // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 70–77.
13. Власов А. И., Гараев А. В., Захарова В. О. [и др.]. Методика профилизации беспилотных летательных аппаратов на основе аддитивных технологий // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4. С. 95–110.
14. Захарова В. О., Селиванов К. В. Перспективы аддитивной профилизации беспилотных летательных аппаратов // Современные технологии научного приборостроения и информационно-измерительных систем : тр. Междунар. науч.-техн. конф. М., 2023. С. 139.
15. Каршов Р. С. Расчет коэффициента технологичности платы согласования // Проблемы современной науки и образования. 2018. № 6. С. 33–36.
16. Арабов Д. И., Верясова А. Ю., Гриднев В. Н. Комплексное макетирование узлов вычислительной техники с использованием инфраструктуры цифрового производства (FAB-LAB) в условиях сквозного обеспечения качества // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2016. Т. 1. С. 189–192.
17. Арабов Д. И., Власов А. И., Гриднев В. Н. [и др.]. FAB-LAB-технологии быстрого прототипирования изделий электронной техники // Современные научные исследования: методология, теория, практика : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск : Центр содействия развитию научных исследований, 2014. С. 162–179.

18. Vlasov A. I., Juravleva L. V., Ismagilov K. The Concept of Using Additive Technologies for Digital Prototyping of Assembly Devices // *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2373. P. 072035.
19. Sokolov Yu. A., Pavlushin N. V., Kondrat'ev S. Yu. New additive technologies based on ion beams // *Russian Engineering Research*. 2016. Vol. 12. P. 1012–1016.
20. Sleptsov V. V., Savkin A. V., Trunova E. A. [et al.]. Electrospray dispersion in nanopowder production for additive technologies // *Russian Engineering Research*. 2019. Vol. 39. P. 133–136.
21. Rossi S., Puglisi A., Benaglia M. Additive manufacturing technologies: 3d printing in organic synthesis // *Chem-CatChem*. 2018. Vol. 10. P. 1512–1525.
22. Ramji Pandey. Photopolymers in 3D printing applications // Arcada. Degree Thesis *Plastics Technology*. 2014. № 51.
23. Strielkowski W., Vlasov A., Selivanov K. [et al.]. Prospects and challenges of the machine learning and data-driven methods for the predictive analysis of power systems: a review // *Energies*. 2023. Vol. 16, № 10. P. 4025.
24. Echeistov V. V., Krivoshein A. I., Shakhnov V. A. [et al.]. An information system of predictive maintenance analytical support of industrial equipment // *Applied Engineering Science*. 2018. Vol. 16, № 4. P. 515–522.
25. Власов А. И., Григорьев П. В., Кривошеин А. И. Модель предиктивного обслуживания оборудования с применением беспроводных сенсорных сетей // *Надежность и качество сложных систем*. 2018. № 2. С. 26–35.
26. Адамова А. А. Экспертные методы управления технологичностью в приборостроении // *Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития* : сб. тр. IX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Тамбов, 2024. С. 127–129.
27. Адамова А. А. Интеллектуальные методы системного управления технологичностью // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2024. Т. 1. С. 120–127.

References

1. Adamov A.P., Adamova A.A., Vlasov A.I. Differential coefficients for evaluating the manufacturability of electronic devices and their application in structural and functional modeling of production systems. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Ser.: Priborostroyeniye = Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser.: Instrument Engineering*. 2015;(5):109–123. (In Russ.)
2. Adamova A.A., Adamov A.P., Shakhnov V.A. Methodology for assessing the manufacturability of electronic products at the design and production stages. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;(2):352–356. (In Russ.)
3. Adamov A.P., Adamova A.A. Semantic analysis of promising micro- and nanoelectronics products in terms of increasing key quality and manufacturability indicators. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(3):94–101. (In Russ.)
4. Adamov A.P., Adamova A.A., Temirov A.T. Methodology of system design and technological design of electronic equipment products taking into account the requirements of the concept "Industry 4.0". *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;2:310–317. (In Russ.)
5. Adamova A.A. On the problem of coefficient methods for assessing manufacturability. *Tsifrovaya transformatsiya v energetike: sb. tr. konf. = Digital transformation in the energy sector : proceedings of the conference*. Tambov, 2025:3–5. (In Russ.)
6. Vlasov A.I., Shakhnov V.A. Visual methodology for the multi-factor assessment of industrial digital transformation components. *Lecture Notes in Information Systems and Organisation*. 2021:57–65.
7. Selivanov K.V., Volkov G.A. Application of additive technologies in the manufacture of electronic equipment. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2023;(5):27–34. (In Russ.)
8. Perevertov V.P., Andronchev I.K., Yurkov N.K. Powder composites and nanomaterials in flexible technologies of forming parts. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(2):85–95. (In Russ.)
9. Vlasov A.I., Karpunin A.A., Kuryshv R.E. Visual modeling of smart project management technologies. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;1:64–70. (In Russ.)
10. Vlasov A.I., Berdyugina O.N., Krivoshein A.I. Technological platform for innovative social infrastructure development on basis of smart machines and principles of internet of things. *Global Smart Industry Conference, GloSIC 2018: proceedings*. 2018:8570062.
11. Vlasov A.I., Zhuravleva L.V., Kazakov V.V. Methods of formalization of cognitive graphics and visual models using XML schemas. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Ser.: Priborostroyeniye = Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser.: Instrument Engineering*. 2021;(1):51–77. (In Russ.)
12. Perevertov V.P., Kuzin N.A., Yurkov N.K. Classifications of nanomaterials for traditional and additive technologies in the system of transport engineering. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(2):70–77. (In Russ.)

13. Vlasov A.I., Garayev A.V., Zakharova V.O. et al. Methodology of profiling unmanned aerial vehicles based on additive technologies. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(4):95–110. (In Russ.)
14. Zakharova V.O., Selivanov K.V. Prospects of additive profiling of unmanned aerial vehicles. *Sovremennyye tekhnologii nauchnogo priborostroyeniya i informatsionno-izmeritel'nykh sistem: tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Modern technologies of scientific instrumentation and information and measuring systems : proceedings of the International scientific and technical conf.* Moscow, 2023:139. (In Russ.)
15. Karshov R.S. Calculation of the coefficient of manufacturability of the matching board. *Problemy sovremennoy nauki i obrazovaniya = Problems of modern science and education*. 2018;(6):33–36. (In Russ.)
16. Arabov D.I., Varyasova A.Yu., Gridnev V.N. Complex prototyping of computer technology nodes using the digital production infrastructure (FAB-LAB) in conditions of end-to-end quality assurance. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2016;1:189–192. (In Russ.)
17. Arabov D.I., Vlasov A.I., Gridnev V.N. et al. FAB-LAB technologies for rapid prototyping of electronic equipment products. *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya: metodologiya, teoriya, praktika: materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Modern scientific research: methodology, theory, practice : proceedings of the II International scientific and practical conference*. Novosibirsk: Tsentr sodeystviya razvitiyu nauchnykh issledovaniy, 2014:162–179. (In Russ.)
18. Vlasov A.I., Juravleva L.V., Ismagilov K. The Concept of Using Additive Technologies for Digital Prototyping of Assembly Devices. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022;2373:072035.
19. Sokolov Yu.A., Pavlushin N.V., Kondrat'ev S.Yu. New additive technologies based on ion beams. *Russian Engineering Research*. 2016;12:1012–1016.
20. Sleptsov V.V., Savkin A.V., Trunova E.A. et al. Electrosark dispersion in nanopowder production for additive technologies. *Russian Engineering Research*. 2019;39:133–136.
21. Rossi S., Puglisi A., Benaglia M. Additive manufacturing technologies: 3d printing in organic synthesis. *ChemCatChem*. 2018;10:1512–1525.
22. Ramji Pandey. Photopolymers in 3D printing applications. *Arcada. Degree Thesis Plastics Technology*. 2014;(51).
23. Strielkowski W., Vlasov A., Selivanov K. et al. Prospects and challenges of the machine learning and data-driven methods for the predictive analysis of power systems: a review. *Energies*. 2023;16(10):4025.
24. Echeistov V.V., Krivoshein A.I., Shakhnov V.A. et al. An information system of predictive maintenance analytical support of industrial equipment. *Applied Engineering Science*. 2018;16(4):515–522.
25. Vlasov A.I., Grigor'yev P.V., Krivoshein A.I. A model of predictive maintenance of equipment using wireless sensor networks. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(2):26–35. (In Russ.)
26. Adamova A.A. Expert methods of control of manufacturability in instrument engineering. *Radioelektronika. Problemy i perspektivy razvitiya: sb. tr. IX Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiyem = Radioelectronics. Problems and prospects of development : Proceedings of the IX All-Russian scientific and practical conference with international participation*. Tambov, 2024:127–129. (In Russ.)
27. Adamova A.A. Intelligent methods of system technology management. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2024;1:120–127. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Арина Александровна Адамова

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(национальный университет)
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1)
E-mail: arinaadamova75@gmail.com

Александра Ир-Мановна Чен

бакалавр,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1)
E-mail: chen3sasha@mail.ru

Arina A. Adamova

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department of design
and production technology of electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(build. 1, 5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Aleksandra Ir-M. Chen

Bachelor,
Bauman Moscow State Technical University
(build. 1, 5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Алексей Владимирович Апатенко

бакалавр,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1)
E-mail: lexar731@gmail.com

Кирилл Владимирович Селиванов

кандидат технических наук, доцент кафедры
проектирования и технологии производства
электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр.1)
E-mail: selivanov_kv@mail.ru

Aleksey V. Apatenko

Bachelor,
Bauman Moscow State Technical University
(build. 1, 5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Kirill V. Selivanov

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department of design
and production technology of electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(build. 1, 5 2-ya Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 17.04.2025

Поступила после рецензирования/Revised 15.05.2025

Принята к публикации/Accepted 18.06.2025