

# АЛГОРИТМ РЕАЛИЗАЦИИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ НА БАЗЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА

Косырев А. В.<sup>1</sup>

DOI:10.21681/3034-4050-2025-6-78-87

**Ключевые слова:** диагностика, отказы, достоверность, усталостные разрушения.

## Аннотация

**Целью статьи** является предложение по повышению оперативности и достоверности диагностирования за счет внедрения компьютерной диагностики на базе микроконтроллеров.

**Методы исследования** заключаются в применении комплексного подхода, сочетающего теоретический анализ, обработку данных, которые позволили разработать универсальный алгоритм диагностики аппаратуры, реализованной с применением микроконтроллеров.

**Результатами исследования** является разработка алгоритма диагностирования техники связи и автоматизированных систем управления, реализуемого на базе микроконтроллерных платформ и учитывающего воздействие внешних дестабилизирующих факторов, включая ударные нагрузки, вибрационные воздействия и термоциклирование. Научно-практическая значимость работы подтверждается предложением архитектурных решений системы диагностики, обеспечивающих сокращение временных затрат на локализацию отказов в сложных многокомпонентных схемах, а также ретроспективный анализ условий эксплуатации аппаратуры для установления причинно-следственных связей при поиске отказов. Дополнительным результатом исследования является выполненный сравнительный анализ архитектурных подходов к реализации диагностической системы, определяющий критериальные основы выбора оптимальной конфигурации в зависимости от конкретных условий применения.

**Научная новизна** работы заключается в том, что в отличии от существующих алгоритмов диагностирования учтены внешние дестабилизирующие факторы: термоциклирование, удары и вибрация.

## Введение

Основной задачей ремонта техники связи и автоматизированных систем управления (ТС и АСУ) при возникновении отказов, получении боевых повреждений или дефектов по причине эксплуатационных отказов является восстановление работоспособности в требуемые сроки [1;2]. Одним из эффективных путей решения является оснащение ТС и АСУ встроенными системами диагностики. Использование микроконтроллеров (МК) [3] для этих целей открывает новые возможности благодаря их гибкости, производительности и доступности, повышению оперативности диагностирования за счет внедрения компьютерной диагностики проводимых измерений, при этом повышается достоверность определения отказавших элементов в результате множественных отказов.

Данный подход позволяет автоматизировать процесс поиска отказов, сократить время на восстановление и минимизировать влияние человеческого фактора.

## Постановка задачи

Современная РЭА характеризуется высокой сложностью, минимизацией компонентов по ГОСТ<sup>2</sup> и требованиям к повышенной надежности [4]. По априорным оценкам принято считать 80 % от среднего времени восстановления образца ТС и АСУ отводится на диагностирование [5]. Традиционные методы и способы диагностирования реализованы на базе проведения измерений параметров и поиска места отказа ручными приборами измерения. При этом намечена тенденция снижения уровня квалификации персонала ремонтного органа. Это влияет на достоверность

1 Косырев Александр Вячеславович, адъюнкт кафедры технического обеспечения связи и автоматизации Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: sashka13rup@mail.ru

2 ГОСТ 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 40 с.

и оперативность выявления отказавших элементов. Соответственно требуется внедрить методы, диагностирования, дистанционного контроля и мониторинга без физического контакта с объектом контроля.

### **Деградационные процессы и воздействие дестабилизирующих факторов на ТС и АСУ**

Ниже представлен анализ деградационных факторов, снижающих надежность и ресурс радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Проанализированы физико-химические основы процессов коррозии, механизмов ударного и вибрационного воздействий, а также термоциклирования. Описаны последствия данных воздействий для электронных компонентов, печатных плат и соединений.

Таким образом при эксплуатации ТС в ходе ведения боевых действий на нее воздействуют следующие дестабилизирующие факторы (табл. 1).

Наиболее серьезное повреждение наносит КЗ, что служит дальнейшей причиной выхода из строя не только самого SMD-компонента [6], но и группы элементов и микросхем в его цепи. Основными причины отказов ТС и АСУ, не получившей боевые повреждения или эксплуатационные отказы представлены в таблице 2, а также увеличение вероятности отказов таблица 3.

Таким образом, удары, вибрация, повышенная температура и термоциклирование значительно сокращают ресурс аппаратуры и приводят к ее выходу из строя<sup>3</sup>. Указанные факторы инициируют комплекс взаимосвязанных деградационных процессов, носящих

<sup>3</sup> Процесс проектирования и сборки SMT BGA: дефекты BGA и случаи анализа отказов // RT на русском. – 2025 URL: <https://www.ugpcb.com/ru/news/pcb-tech/bga-defect-and-failure-analysis> (дата обращения: 29.08.2025).

ГОСТ МЭК 60068-2-82-2017 Испытания на воздействие внешних факторов. Испытание XW: Методы испытания усов в электронных и электротехнических компонентах – М.: Стандартинформ, 2014. – 23 с.

ГОСТ 30630.2.1-2013 Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на устойчивость к воздействию температуры – М.: Стандартинформ, 2017. – 25 с.

Таблица 1.

#### *Воздействие дестабилизирующих факторов на РЭА*

№ п/п	Воздействие и дестабилизирующие факторы	Тип повреждения	Примечание
1.	Осколочное поражение	КЗ и обрыв	Наиболее серьезное повреждение наносит КЗ, что служит дальнейшей причиной выхода из строя не только данного элемента, но и группы элементов и микросхем в его цепи.
2.	Ударная волна или удар	Обрыв	
3.	Вибрация	Обрыв	
4.	Повышенная температура	КЗ и обрыв	
5.	Деградация элементной базы	КЗ и обрыв	
6.	Высокие уровни мощности	КЗ и обрыв	
7.	Влага	КЗ затем обрыв	
8.	Радиационное воздействие	КЗ затем обрыв	

Таблица 2.

#### *Основные причины отказов РЭА без учета влияния боевых действий*

№ п/п	Воздействие и дестабилизирующие факторы	Доля отказов (%)	Основные причины
1.	Разрушение паянного соединения	40–60	Термоциклирование, вибрация, коррозия
2.	Механические повреждения	15–25	Перегибы плат, ударные нагрузки.
3.	Электрические перегрузки	10–20	ESD (статическое электричество), перегрев.
4.	Дефекты материалов	5–15	Некачественные компоненты, расслоение корпуса
5.	Влажность/коррозия	5–10	Отсутствие или разрушение компаунда, защитного слоя лака.

Таблица 3.

## Влияние условий эксплуатации

№ п/п	Условия	Рост вероятности отказов на %	Основные причины
1.	Высокая температура	30–50	Деградация паянных соединений.
2.	Вибрация	20–40	Трещины в BGA/QFN.
3.	Влажность	15–30	Коррозия контактов.
4.	ESD воздействие	10–25	Пробои полупроводников.

кумулятивный и часто синергетический характер. Циклические механические и термические напряжения активируют механизмы усталостного разрушения в наиболее уязвимых элементах конструкции, таких как паяные соединения и межслойные переходы. Параллельно происходит термическое старение полимерных материалов и окисление контактных поверхностей, что приводит к неизбежному изменению их электрофизических свойств. Совокупное воздействие этих процессов ведет к прогрессирующему деградации функциональных параметров РЭА. Следовательно, учет данных воздействий на этапах проектирования, моделирования и испытаний является императивом для обеспечения заданного уровня надежности и долговечности изделий в условиях реальной эксплуатации.

### Коррозия

В микроэлектронике наиболее критичными являются виды локальной коррозии:

**Электрохимическая коррозия:** протекает в присутствии электролита (например, влаги, содержащей ионы хлора, серы) и требует наличия анодных и катодных участков на поверхности проводника. Анодные участки растворяются, что приводит к истончению и разрыву токопроводящих дорожек, выводов компонентов и контактов разъемов.

**Гальваническая коррозия:** усиленная форма электрохимической коррозии, возникающая при контакте двух разнородных металлов с различными электрохимическими потенциалами в электролитической среде. Например, пара алюминий-медь в условиях повышенной влажности образует гальванический элемент, где менее благородный алюминий подвергается ускоренному анодному растворению.

**Миграция серебра и олова:** специфический для электроники процесс, при котором ионы металла ( $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Sn}^{2+}$ ) под действием

постоянного электрического поля и в присутствии влаги мигрируют через диэлектрик, формируя дендритные мостики. Это приводит к снижению поверхностного сопротивления изоляции, утечкам тока и коротким замыканиям.

**Последствия:** ухудшение электрических параметров (сопротивление, импеданс), обрывы проводников, короткие замыкания, повышение уровня шумов, полный отказ функциональных узлов.

### Термоциклирование

Термоциклирование — это процесс циклического изменения температуры РЭА, вызванный как внешними климатическими условиями, так и внутренним тепловыделением при включении/выключении аппаратуры (рис. 1).

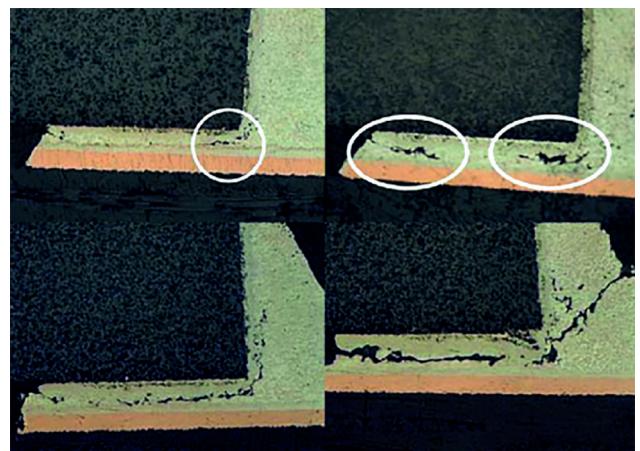


Рис. 1. Растрескивание, термоциклирование

Надежность РЭА при термоциклировании определяется не абсолютными значениями температуры, а размахом цикла ( $\Delta T$ ), скоростью изменения температуры и количеством циклов.

Основные механизмы повреждений:

**Термическая усталость:** возникает из-за несоответствия коэффициентов теплового

расширения (КТР) разнородных материалов, соединенных в конструкции. При каждом цикле нагрева и охлаждения в паяных соединениях, под кристаллом и в многослойных структурах возникают циклические механические напряжения, приводящие к образованию и росту трещин.

**Деградация материалов:** постоянные температурные циклы могут вызывать рекристаллизацию припоев, старение полимерных материалов (основания печатных плат, герметики), что приводит к изменению их механических и электрических свойств.

**Отказ межкомпонентных соединений:** наиболее уязвимыми являются паяные соединения массивных компонентов (BGA, QFN), где разница коэффициента теплового расширения печатной платы и компонента максимальна. Трещины, растущие от края к центру, в конечном итоге приводят к потере электрического контакта.

#### Вибрационные и ударные воздействия на радиоэлектронную аппаратуру

Вибрации и удары (рис. 2) представляют собой класс механических воздействий, инициирующих динамические процессы в конструкциях радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

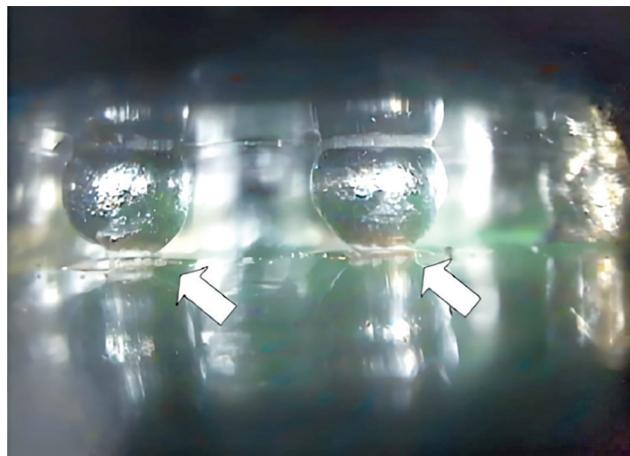


Рис. 2. Обрыв контактах шаров под воздействием вибрации или удара

Несмотря на общую физическую природу, эти воздействия различаются по временным и спектральным характеристикам, что обуславливает различные механизмы деградации и отказов.

Ударное воздействие (механический удар) – это кратковременное приложение к конструкции РЭА значительной механической нагрузки,

характеризующейся высоким уровнем ускорения и малой длительностью импульса (единицы-десятки миллисекунд). Удар приводит к возникновению в конструкции инерционных сил, пропорциональных массе элементов и приложенному ускорению (согласно второму закону Ньютона,  $F = m \cdot a$ ).

Основные механизмы повреждений:

**Пластическая деформация:** возникновение необратимых смещений в механических креплениях, корпусах компонентов.

**Отказ паяных соединений:** образование трещин в местах пайки BGA- и CSP-компонентов, выводных компонентов из-за хрупкого разрушения припоя или отрыва контактных площадок.

**Разрушение хрупких материалов:** распространение керамических корпусов компонентов, кристаллов интегральных схем.

**Мгновенные нарушения контакта:** отрыв токопроводящих контактов между компонентами и токопроводящими дорожками платы.

Вибрация – это механическое колебательное движение, передающееся на РЭА при ее работе в условиях воздействия внешних источников (двигатели, турбины, транспортные средства) или от внутренних источников (вентиляторы, вибрационные двигатели). Вибрация характеризуется частотным спектром, амплитудой и ускорением.

Основные механизмы повреждений:

**Усталостное разрушение:** циклические напряжения, вызванные вибрацией, приводят к накоплению повреждений и образованию трещин в паяных соединениях, проводниках печатных плат и выводах компонентов. Этот процесс является кумулятивным и зависит от числа циклов нагружения.

**Резонанс:** при совпадении частоты вынуждающей вибрации с собственной частотой колебаний печатной платы или элемента РЭА происходит резкое увеличение амплитуды колебаний, что многократно усиливает динамические нагрузки и ускоряет усталостное разрушение.

**Аbrasивный износ:** постепенное разрушение поверхностей в разъемах и механических соединениях при их микросмещениях друг относительно друга (фretting-коррозия).

Ниже представлены математические модели деградационных процессов и дестабилизирующих факторов влияющих на надежность РЭА (табл. 4).

Таблица 4.  
Математические модели

Экспоненциальное распределение	Постоянная интенсивность отказов	$P(t) = e^{-\lambda t}$	$P(t)$ – вероятность безотказной работы, $t$ – время, $\lambda$ – интенсивность отказов.
Вейбулловское распределение	Интенсивность отказов изменяется во времени	$P(t) = e^{-(t/\eta)^\beta}$	$\eta$ – параметр масштаба (характеризующий срок службы), $\beta$ – параметр формы (определяет характер изменения интенсивности отказов).
Логнормальное распределение	Накопление повреждений (например, деградация диэлектрика).	$P(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}$	$\mu$ – среднее значение логарифма времени до отказа, $\sigma$ – стандартное отклонение.
Формула Ариониса	Температурная модель	$\lambda(T) = \lambda_0 \cdot \exp\left[\frac{E_a}{k_B}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right]$	$\lambda(T)$ – при температуре $T$ (в кельвинах), $\lambda_0$ – при эталонной температуре $T_0$ (в кельвинах), $E_a$ – энергия активации (эВ), $k_B = 8.617 \times 10^{-5}$ эВ/К – постоянная Больцмана
Для электронных компонентов эмпирическое правило	Температурная модель	$\lambda(T+10) = 2 \cdot \lambda(T)$	Повышение температуры на каждые $10^\circ\text{C}$ удваивает интенсивность отказов
Модель Пекерта	Температура и влажность	$\lambda(T, RH) = \lambda_0 \cdot \exp\left[\frac{E_a}{k_B}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right) + B \cdot (RH - RH_0)\right]$	$RH$ – относительная влажность (%) $RH_0$ – эталонная влажность (%), $B$ – коэффициент влажности (определяется экспериментально) $B = 0.05 \dots 0.12$ для печатных плат
Модель Коэна-Мэтсона	Температура, влажность и вибрация	$\lambda = \lambda_0 \cdot \exp\left[\frac{E_a}{k_B}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \cdot \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^n \cdot \left(\frac{G}{G_0}\right)^m$	$n$ – показатель степени для влажности (обычно 2–4) $G$ – уровень вибрации (г), $G_0$ – эталонный уровень вибрации (г) $m$ – показатель степени для вибрации (обычно 1.5–3)
Степенной закон	Вибрация	$\lambda_{vib} = \lambda_0 \cdot \left(\frac{G}{G_0}\right)^m \cdot f^{0.5}$	$f$ – частота вибрации (Гц).
Степенной закон Коффина-Мэнсона	Термоциклирование	$N_f = C \cdot (\Delta T)^{-\gamma}$	$N_f$ – число циклов до отказа, $\gamma \approx 4 \dots 6$ для паяных соединений, $\Delta T$ – перепад температур, $C$ – константа материала определяется экспериментально.
	-для керамических компонентов	$N_f = C \cdot (\Delta T)^{-\gamma} \cdot d^{-\beta} \cdot f^{-\alpha}$	$\gamma$ – температурный показатель (для керамики 1.5–2.5), $d$ – толщина компонента, мм, $\beta$ – геометрический показатель (обычно 0.3–0.7), $f$ – частота циклов, циклы/час, $\alpha$ – частотный коэффициент (обычно 0.1–0.3)
Модель Дилона Товрена	Коррозия	$\lambda_{corr} = A \cdot e^{B \cdot RH} \cdot t^n$	$A$ – базовая скорость коррозии при $RH=0\%$ , $B$ – коэффициент чувствительности к влажности, $n$ – показатель степени (характеризует нелинейность процесса)

### Методика диагностирования техники связи и автоматизированных систем управления при возникновении отказов с применением микроконтроллера

Рассмотрим предлагаемый структурированный алгоритм диагностирования, предназначенный для реализации на базе микроконтроллерной платформе (рис. 4).

Его особенностью является внедрение в аппаратуру возможности компьютерной диагностики, путем проведения измерений в контрольных точках и обработки данных МК, что позволит реализовать учет, регистрация и вывод кодов отказов, получение статистических данных по образцам, а также их наработке и характере оказанного влияния дестабилизирующих факторов. Наряду с измерением параметров в контрольных точках реализуются возможность регистрации удара выше установленного порога, а за счет применения датчиков удара способного регистрировать многократно повторяющиеся удары с меньшей пиковой нагрузкой реализовать измерение вибрации и ее длительность.

Так же проводится измерение температуры и ее цикличность, что в совокупности дает возможность реализовать расчет интенсивности отказов с учетом негативных факторов.

Проблемные вопросы решаемые при применении МК и реализации компьютерной диагностики: образец РЭА позволяет выдать информацию о избыточной нагрузке при его эксплуатации и наработке. Что при диагностировании послужит дополнительной информацией для установления диагноза и сокращении времени диагностирования. Микроконтроллеры, установленные в аппартикуру, зачастую используют свой программно-аппаратный ресурс не в полном объеме и что составляет от 30–50 %. В свою очередь задействование не используемого ресурса позволит реализовать компьютерную диагностику.

В процессе проектирования системы диагностики ключевым этапом является определение количества контролируемых параметров и точек измерения, а также расчет необходимого числа портов МК для их обработки. На основе этих данных принимается решение

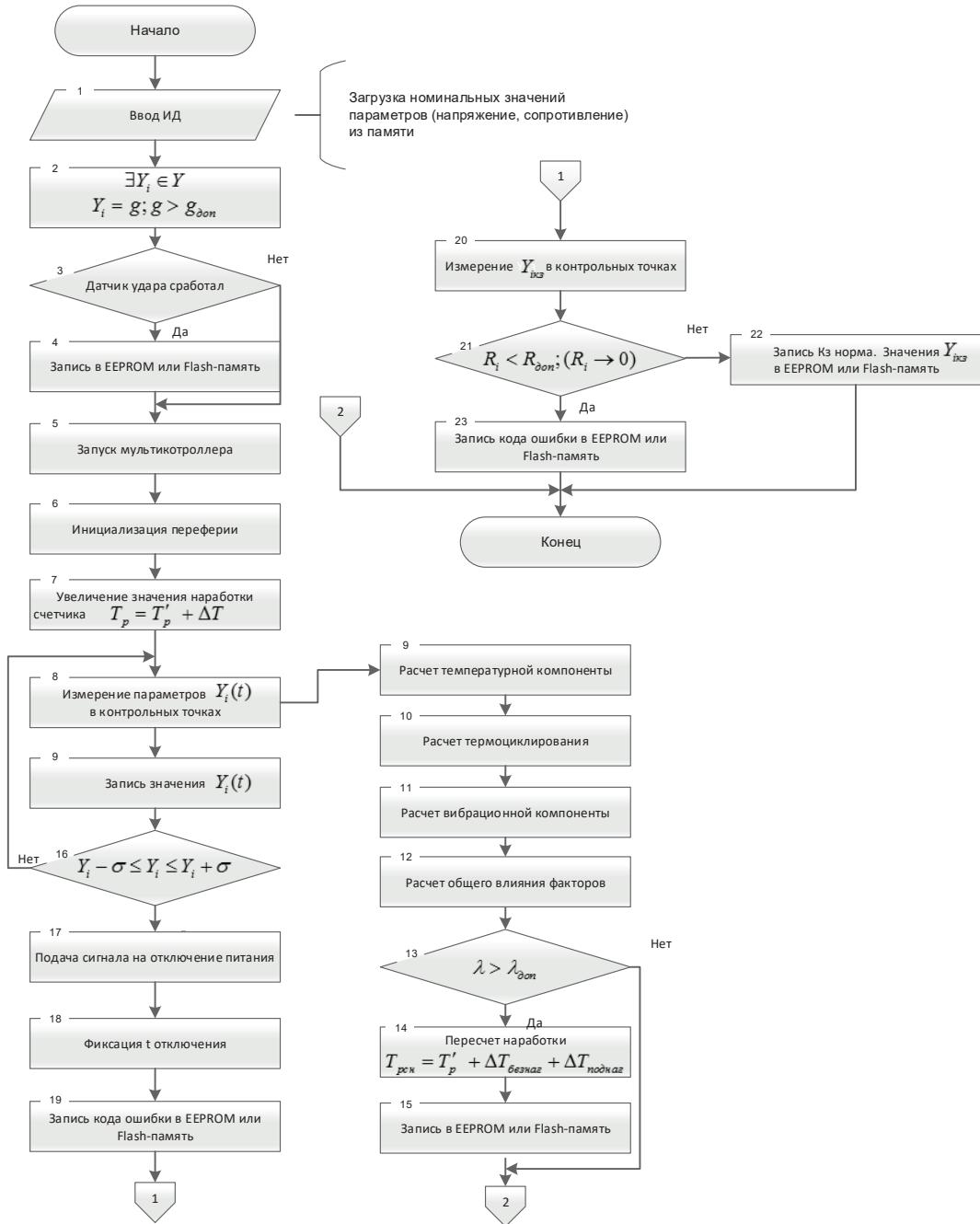


Рис. 4 Блок-схема алгоритма

о выборе одной из следующих архитектурных схем:

### 1. Централизованная диагностика с выделенным микроконтроллером.

В данной конфигурации функции сбора, анализа и хранения диагностических данных возлагаются на специализированный МК, выполняющий исключительно задачи мониторинга.

Преимущества: унификация архитектуры, позволяющая разрабатывать диагностическую

подсистему независимо от основной аппаратной платформы. Заранее определенные диагностические возможности, упрощающие интеграцию на этапе проектирования.

Недостатки: увеличение массогабаритных показателей системы из-за дополнительных компонентов. Повышенное энергопотребление и стоимость реализации, обусловленные необходимостью применения дополнительных радиоэлектронных компонентов.

## 2. Распределенная диагностика без дополнительного микроконтроллера.

В данной схеме диагностические функции распределяются между несколькими МК, уже входящими в состав аппаратуры. Каждый контроллер обеспечивает мониторинг выделенного набора параметров, а также взаимодействие с подсистемой хранения данных.

Преимущества: оптимизация использования вычислительных ресурсов, существующих МК. Снижение массогабаритных показателей системы. Возможность идентификации отказа всего функционального модуля при отсутствии диагностических данных от соответствующего МК.

Недостатки: необходимость индивидуальной адаптации диагностического функционала под конкретную аппаратную конфигурацию.

## 3. Гибридная распределенная диагностика с дополнительным микроконтроллером.

Данный подход применяется при недостаточности вычислительных ресурсов штатных МК. В этом случае в систему вводится дополнительный контроллер, компенсирующий дефицит производительности.

Преимущества: максимальная загрузка имеющихся аппаратных ресурсов. Сбалансированные показатели стоимости и энергопотребления по сравнению с централизованной схемой. Сохранение работоспособности основного функционала при отказе дополнительного МК.

Недостатки: усложнение архитектуры системы за счет необходимости организации взаимодействия между МК.

### Сравнительный анализ архитектурных подходов к аппаратной реализации компьютерной диагностики

В таблицах 5, 6, 7 представлен более детальный сравнительный анализ архитектурных подходов в интересах реализации компьютерной диагностики с учетом различных критериев оценки преимуществ и недостатков каждой архитектуры, что позволяет сделать выбор более гибким.

Представленный анализ демонстрирует, что ни одна из архитектур не является универсально оптимальной, а их эффективность существенно зависит от конкретных условий применения. Таким образом, итоговый выбор архитектурного решения должен основываться на взвешенном компромиссе между ключевыми требованиями проекта.

При реализации, централизованной диагностика с выделенным микроконтроллером функции сбора, обработки и хранения диагностических данных выполняются отдельным специализированным МК, не задействованным в основном функционале системы.

При реализации, распределённой диагностики без дополнительного МК, диагностические функции распределяются между существующими МК системы, каждый из которых отвечает за мониторинг определенных параметров.

Централизованная диагностика с выделенным микроконтроллером

Таблица 5.

Критерий	Преимущества (+)	Недостатки (-)
Унификация	Стандартизованный подход, независимый от основной аппаратуры	Требует дополнительного МК, увеличивая стоимость и сложность системы
Масштабируемость	Легко адаптируется под новые задачи без изменения основной платформы	Ограниченнная гибкость при изменении диагностируемых параметров
Энергопотребление	–	Высокое энергопотребление из-за дополнительного активного устройства
Надежность	Отказ основного МК не влияет на диагностику	Выход из строя диагностического МК приводит к потере всех диагностических данных*
Габариты и стоимость	–	Увеличение массы, размеров и стоимости системы

*Распределенная диагностика без дополнительного микроконтроллера*

*Таблица 6.*

Критерий	Преимущества (+)	Недостатки (-)
Ресурс эффективность	Полное использование вычислительных мощностей имеющихся МК	Повышенная нагрузка на основные МК, возможны задержки в работе
Габариты и стоимость	Минимальные дополнительные аппаратные затраты	–
Надежность	Отказ одного МК позволяет локализовать неисправность в конкретном модуле	Потеря диагностических данных при отказе МК
Гибкость	–	Требует индивидуальной настройки для каждого аппаратного модуля
Энергопотребление	Оптимизировано за счет отсутствия дополнительных компонентов	–

*Распределенная диагностика с дополнительным микроконтроллером*

*Таблица 7.*

Критерий	Преимущества (+)	Недостатки (-)
Баланс ресурсов	Оптимальное распределение нагрузки между основными и диагностическим МК	Усложнение архитектуры из-за необходимости меж контроллерного взаимодействия
Надежность	Сохранение работоспособности при отказе дополнительного МК	Частичная потеря диагностических возможностей в случае его отказа
Гибкость	Возможность расширения диагностируемых параметров без пере-проектирования основной системы	Требует тщательного планирования ресурсов
Габариты и стоимость	Меньше, чем у полностью централизованного подхода, но выше, чем у распределенного	–
Энергопотребление	Среднее между централизованным и распределенным вариантами	–

При реализации гибридной распределенная диагностика с дополнительным МК при недостаточности ресурсов основных МК в систему вводится дополнительный контроллер, частично берущий на себя диагностические функции.

#### **Выводы и рекомендации по выбору архитектуры**

Централизованная схема целесообразна в системах с жесткими требованиями к унификации и независимости диагностики.

Распределенный подход оптимален для компактных и энергоэффективных решений,

где допустима интеграция диагностики в основные МК.

Гибридная архитектура представляет собой компромиссный вариант, подходящий для систем с переменной нагрузкой, где важно сохранить баланс между надежностью и затратами ресурсов.

Таким образом, выбор оптимальной архитектуры диагностической системы определяется требованиями к надежности, ресурс эффективности и масштабируемости конкретного применения. Централизованный подход обеспечивает унификацию, но увеличивает

затраты, тогда как распределенные схемы позволяют оптимизировать использование ресурсов, однако требуют более сложного проектирования. Гибридная конфигурация представляет собой компромиссное решение, сочетающее преимущества обоих подходов.

### Выводы

Предложенный алгоритм диагностирования позволяет повысить достоверность контроля, сократить время поиска отказа, минимизировать риски возникновения ошибок.

Научная новизна исследования заключается в том, что в алгоритме учтены внешние дестабилизирующие факторы: термоциклизирование, удары и вибрация.

Практическая значимость алгоритма заключается в том, что он позволяет сократить время диагностирования при поиске отказов в сложных многокомпонентных схемах и реализовать более гибкую систему мониторинга

и контроля, а также предоставляет достоверную информацию об условиях, в которых эксплуатировался образец. В рамках диагностирования и ремонта важным преимуществом является получение достоверной информации об оказанном воздействии дестабилизирующих факторов, что обеспечивает установление причинно-следственных связей при поиске места отказов и соответственно обеспечивает сокращение времени диагностирования и ремонта.

Разработанный алгоритм адресован специалистам проектно-конструкторских подразделений и обладает значимым прикладным потенциалом в рамках проектирования новых образцов ТС и АСУ, а также технической модернизации уже введенных в эксплуатацию. Его применение позволяет оптимизировать процедуры диагностирования и повысить общую надежность.

### Литература

1. Косырев, А. В. Модель возникновения отказов и боевых повреждений военной техники связи / А. В. Косырев // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. – 2025. – № 696. – С. 132–147. – EDN LYVLJX.
2. Косырев, А. В. Анализ исходных данных для построения математической модели диагностирования военной техники связи при возникновении отказов / А. В. Косырев // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды IX Межвузовской научно-практической конференции: Сборник материалов, Санкт-Петербург, 17 мая 2024 года. – Санкт-Петербург: Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, 2024. – С. 81–85. – EDN ZKMBBE.
3. Семенов, С. С. Протоколы обмена данными между микроконтроллерами, применяемые в радиоэлектронной аппаратуре / С. С. Семенов, А. В. Косырев, А. А. Крачков // Техника средств связи. – 2024. – № 4(168). – С. 84–93. – DOI 10.24412/2782-2141-2024-4-84-93. – EDN IVPCIV.
4. Головин А. Г., Алисевич Е. А., Гусев А. П., Дорошенко Г. П., Морозов А. В., Фатьянова Е. А. Основы надежности средств связи и автоматизации: Учебник. – СПб.: ВАС, 2019. – с. 168.
5. Мегера, Ю. А. Концепция развития системы ремонта техники связи и автоматизированных систем управления / Ю. А. Мегера // Техника средств связи. – 2022. – № 2(158). – С. 69–76. – EDN ZANSSU.
6. Семенов, С. С. Анализ надежности SMD-компонентов при воздействии дестабилизирующих факторов окружающей среды / С. С. Семенов, А. В. Косырев, А. А. Крачков // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях: Труды X Межвузовской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 16 мая 2025 года. – Санкт-Петербург: Федеральное Государственное Казенное Военное Образовательное Учреждение Высшего Образования «Военная Академия Связи Имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного» Министерства Обороны Российской Федерации, 2025. – С. 238–241. – EDN TBISBS.

## ALGORITHM FOR THE IMPLEMENTATION OF COMPUTER DIAGNOSTICS OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT BASED ON A MICROCONTROLLER

*Kosyrev A. V.<sup>4</sup>*

**Keywords:** diagnostics, failures, reliability, fatigue failures.

<sup>4</sup> Robert V. Yarovoy, Researcher of the Research Center of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E mail: nadzar@yandex.ru

**Abstract**

**The article aims to propose** to increase the efficiency and reliability of diagnostics through the introduction of computer diagnostics based on microcontrollers.

**The research methods** consist in the application of an integrated approach that combines theoretical analysis and data processing, which made it possible to develop a universal algorithm for diagnosing equipment implemented using microcontrollers.

**The results of the study** are the development of an algorithm for diagnosing communication equipment and automated control systems, implemented on the basis of microcontroller platforms and considering the impact of external destabilizing factors, including shock loads, vibration effects and thermal cycling. The scientific and practical significance of the work is confirmed by the proposal of architectural solutions for the diagnostic system, which reduces the time spent on the localization of failures in complex multicomponent circuits, as well as retrospective analysis of equipment operating conditions to establish cause-and-effect relationships in the search for failures. An additional result of the study is the comparative analysis of architectural approaches to the implementation of the diagnostic system, which determines the criteria for choosing the optimal configuration depending on the specific conditions of application.

**The scientific novelty** of the work lies in the fact that, in contrast to the existing diagnostic algorithms, external destabilizing factors are taken into account: thermal cycling, shocks and vibration.

**References**

1. Kosyrev, A. V. Model' vozniknenija otkazov i boevyh povrezhdenij voennoj tekhniki svjazi / A. V. Kosyrev // Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F.Mozhajskogo. – 2025. – № 696. – S. 132–147. – EDN LYVLJX.
2. Kosyrev, A. V. Analiz ishodnyh dannyh dlja postroenija matematicheskoy modeli diagnostirovaniya voennoj tekhniki svjazi pri vozniknenii otkazov / A. V. Kosyrev // Problemy tehnicheskogo obespechenija vojsk v sovremenennyh uslovijah: Trudy IX Mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii: Sbornik materialov, Sankt-Peterburg, 17 maja 2024 goda. – Sankt-Peterburg: Voennaja akademija svjazi im. Marshala Sovetskogo Sojuza S. M. Budennogo, 2024. – S. 81–85. – EDN ZKMBBE.
3. Semenov, S. S. Protokoly obmena dannymi mezhdu mikrokontrollerami, primenjaemye v radioelektronnoj apparature / S. S. Semenov, A. V. Kosyrev, A. A. Krachkov // Tehnika sredstv svjazi. – 2024. – № 4(168). – S. 84–93. – DOI 10.24412/2782-2141-2024-4-84-93. – EDN IVPICV.
4. Golovin A. G., Alisevich E. A., Gusev A. P., Doroshenko G. P., Morozov A. V., Fat'janova E. A. Osnovy nadezhnosti sredstv svjazi i avtomatizacii: Uchebnik. – SPb.: VAS, 2019. – s. 168.
5. Megera, Ju. A. Koncepcija razvitija sistemy remonta tekhniki svjazi i avtomatizirovannyh sistem upravlenija / Ju. A. Megera // Tehnika sredstv svjazi. – 2022. – № 2(158). – S. 69–76. – EDN ZANSSU.
6. Semenov, S. S. Analiz nadezhnosti SMD-komponentov pri vozdejstvii destabilizirujushhih faktorov okruzhajushhej sredy / S. S. Semenov, A. V. Kosyrev, A. A. Krachkov // Problemy tehnicheskogo obespechenija vojsk v sovremenennyh uslovijah : Trudy X Mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Sankt-Peterburg, 16 maja 2025 goda. – Sankt-Peterburg: Federal'noe Gosudarstvennoe Kazennoe Voennoe Obrazovatel'noe Uchrezhdenie Vysshego Obrazovaniya «Voennaja Akademija Svjazi Imeni Marshala Sovetskogo Sojuza S. M. Budennogo» Ministerstva Oborony Rossiskoj Federacii, 2025. – S. 238–241. – EDN TBISBS.

