

УДК 621.396.69

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.53.2.013](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.53.2.013)

Модифицированный алгоритм имитации отжига для задачи диагностики отказов аналоговых радиоэлектронных устройств

С.У. Увайсов, В.В. Черноверская✉, Нгуен Дык Хай, Во Тхе Хай, Фам Суан Хань

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация

Резюме. В статье приведены результаты исследования, в ходе которого был разработан новый метод автоматизированной диагностики функциональных узлов радиоэлектронных устройств с целью выявления в них параметрических отказов компонентов, обрывов электрических соединений, обнаружения коротких замыканий. Актуальность исследования обусловлена постоянно возрастающей сложностью современной электроники, когда традиционные методы диагностики не обеспечивают необходимой точности и оперативности диагностических процедур, что ведет к росту отказов аппаратуры при эксплуатации и увеличению затрат на ее обслуживание и ремонт. В основе предложенного метода лежит широко известный алгоритм имитации отжига, который был адаптирован под решение задач диагностики неисправностей радиоэлектронных устройств. Цель – предложить новый метод диагностики отказов радиоэлектронной аппаратуры, основанный на модифицированном алгоритме имитации отжига, нацеленном на повышение достоверности идентификации неисправностей, возникающих в узлах и модулях при эксплуатации современной электроники, а также повысить степень автоматизации диагностических процедур. Физические и модельные эксперименты, проведенные в ходе исследования, показали, что предложенный метод на основе модифицированного алгоритма эффективно определяет ряд отказов, включая сложные случаи последовательных отказов, идентифицировать которые традиционными методами не было возможности. Кроме этого, предложенный подход требует меньших временных затрат на анализ и дает возможность повысить достоверность диагностики исследуемых узлов и модулей электронной аппаратуры. Полученные результаты подтверждают перспективность применения метода в задачах технической диагностики, в том числе его дальнейшую интеграцию в автоматизированные системы контроля радиоэлектронной аппаратуры.

Ключевые слова: радиоэлектронное устройство, диагностика отказов, неисправность, алгоритм имитации отжига, оптимальное решение, экстремум функции, механизм генерации решений, цепь Маркова.

Для цитирования: Увайсов С.У., Черноверская В.В., Нгуен Дык Хай, Во Тхе Хай, Фам Суан Хань. Модифицированный алгоритм имитации отжига для задачи диагностики отказов аналоговых радиоэлектронных устройств. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2188> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.53.2.013

A modified algorithm for simulated annealing for the task of diagnosing failures of analog electronic devices

S.U. Uvaysov, V.V. Chernoverskaya✉, Nguyen Duc Hai, Vo The Hai, Pham Xuan Hanh

MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation

Abstract. The article presents the results of a study that developed a new method for automated diagnostics of functional components of electronic devices in order to identify parametric component failures, electrical failures, and short circuit detection. The relevance of the study is due to the ever-

increasing complexity of modern electronics, when traditional diagnostic methods do not provide the necessary accuracy and efficiency of diagnostic procedures, which leads to an increase in equipment failures during operation and an increase in the cost of its maintenance and repair. The proposed method is based on a well-known algorithm for simulated annealing, which has been adapted to solve the problems of troubleshooting electronic devices. Objective: to propose a new method for diagnosing failures of electronic equipment based on a modified algorithm for simulated annealing, aimed at increasing the reliability of identification of faults occurring in nodes and modules during the operation of modern electronics, as well as to increase the degree of automation of diagnostic procedures. Physical and model experiments conducted during the study showed that the proposed method based on a modified algorithm effectively detects a number of failures, including complex cases of sequential failures that could not be identified using traditional methods. In addition, the proposed approach requires less time for analysis and makes it possible to increase the reliability of diagnostics of the studied nodes and modules of electronic equipment. The results obtained confirm the promising application of the method in the tasks of technical diagnostics, including its further integration into automated control systems of electronic equipment.

Keywords: electronic device, fault diagnosis, malfunction, annealing simulation algorithm, optimal solution, function extremum, solution generation mechanism, Markov chain.

For citation: Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Nguyen Duc Hui, Vo The Hai, Pham Xuan Hanh. A modified algorithm for simulated annealing for the task of diagnosing failures of analog electronic devices. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(2). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2188> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.53.2.013

Введение

Вопросы идентификации технического состояния радиоэлектронного устройства (РЭУ), обеспечения его эксплуатационной надежности, прогнозирования остаточного ресурса всегда были актуальными задачами для разработчиков и проектировщиков в процессе создания и внедрения новых РЭУ. Эти вопросы планомерно прорабатывались на всех этапах жизненного цикла РЭУ, начиная от зарождения идеи нового устройства и заканчивая выводом его из эксплуатации. Эти вопросы не потеряли своей актуальности и в наши дни, поскольку постоянное усложнение радиоэлектронной аппаратуры, как в плане расширения функционала, так и в конструктивной реализации, требует совершенствования существующих и разработки новых технологических процессов производства, что, в свою очередь, требует новых методов и методик испытаний, контроля параметров и выходных характеристик, диагностики технического состояния РЭУ. Скрытые отказы трудно диагностировать и прогнозировать, даже используя хорошо зарекомендовавшие себя традиционные методы диагностики. Поэтому разработчики ищут новые методы, которые позволят сочетать известные подходы с технологиями искусственных нейронных сетей, методами многокритериальной оптимизации, автоматизацией процессов, чтобы повысить разрешающую способность диагностических процедур, достоверность получаемых результатов и сократить временные затраты на диагностику [1, 2].

Одним из таких подходов, является применение модифицированного алгоритма имитации отжига, призванного, с одной стороны, повысить результативность диагностирования неисправностей РЭУ, а с другой – продемонстрировать междисциплинарный подход к разработке новых методов диагностики и контроля. В статье приводится оценка эффективности модифицированного алгоритма по сравнению с традиционными методами.

Алгоритм имитации отжига был предложен в 1983 году Киркпатриком, Гелаттом и Веччи. Он моделирует нагрев и постепенное охлаждение материала до устойчивого

состояния с минимальным значением энергии. Из достоинств алгоритма выделяют возможность нахождения глобального минимума целевой функции, не «застывая» при этом в локальных экстремумах [3]. Исследованию этого метода посвящено множество работ российских и зарубежных ученых. Например, в [4] показано, что версия сверхбыстрого отжига сходится значительно быстрее других реализаций, поэтому в практических задачах ее применение наиболее целесообразно. В целом алгоритм предполагает сочетание процедур случайного поиска и направленного улучшения, что дает возможность применять его при решении нелинейных и многомодальных задач, к которым относятся задачи диагностики и идентификации технического состояния узлов и модулей радиоэлектронных устройств. Однако, применение данного алгоритма в радиоэлектронике требует учета ее специфики и дополнительной адаптации, а именно – переопределения целевой функции под электрические характеристики компонентов схемы и оптимизации скорости работы алгоритма для режима реального времени

Материалы и методы

Особенности применения алгоритма имитации отжига для диагностики отказов РЭУ. Неисправности аналоговых радиоэлектронных устройств (АРЭУ) можно разделить на 2 типа: неисправность, связанная с параметрическим отказом и неисправность, возникшая вследствие катастрофического отказа аппаратуры. Параметрический отказ – это отказ, при котором параметр электронного компонента отклоняется от номинального значения и выходит за допустимый диапазон [5]. Например, для резисторов аналоговых РЭУ это значение составляет $\pm 5\%$. Катастрофический отказ возникает при обрыве или коротком замыкании электрорадиоэлемента. Компонент, в котором присутствует обрыв, моделируется в схеме с высоким значением сопротивления, порядка 10^9 Ом. Короткое замыкание компонента моделируется в диагностируемой схеме малым значением сопротивления (0,01 Ом). Катастрофический отказ может проявляться двумя разновидностями неисправностей: независимый отказ (без «эффекта домино») и зависимый отказ, влекущий за собой выход из строя соседних компонентов электрической цепи (с «эффектом домино») [6]. Известно, что отказы радиоэлектронной аппаратуры могут иметь разные причины возникновения. Существуют конструктивные, производственные и эксплуатационные отказы. Конструктивные отказы возникают вследствие нарушения установленных норм и правил конструирования радиоаппаратуры. Производственные отказы вызываются нарушениями технологических процессов изготовления (или ремонта) этой аппаратуры, а эксплуатационные – нарушениями установленных правил или условий эксплуатации.

В статье приведены результаты разработки модифицированного алгоритма имитации отжига, адаптированного для задачи диагностики неисправностей аналоговых РЭУ. Объектом исследования выбрана схема двухкаскадного усилителя с внесенной неисправностью (Рисунок 1). Задача заключалась в идентификации этой неисправности на основе применения алгоритма имитации отжига. Для реализации такого алгоритма необходимо было разработать механизм генерации новых решений. Для этого анализировались типовые отказы РЭУ. Для схемы устройства (Рисунок 1) было выявлено, что часть из них обладает «эффектом домино» (т. е. представляет собой зависимый отказ).

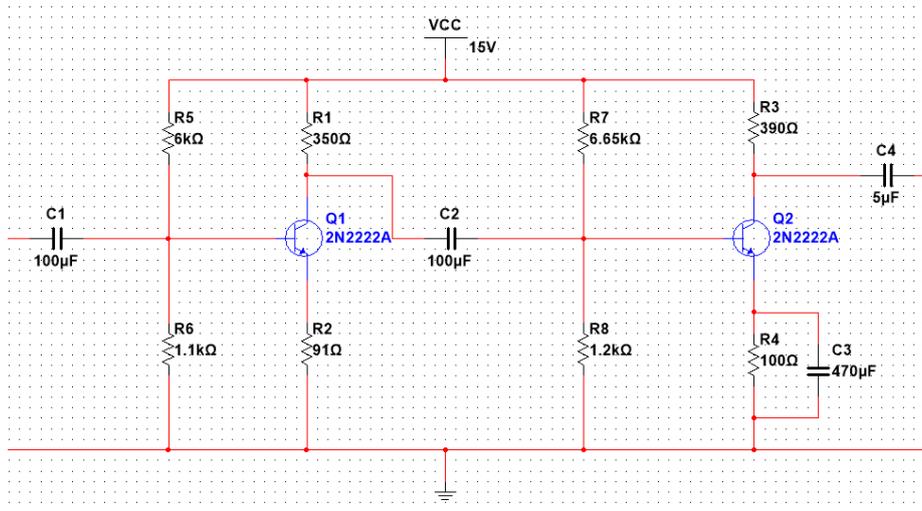


Рисунок 1 – Схема электрическая принципиальная аналогового РЭУ
Figure 1 – Electrical schematic diagram of an analog radio electronic device

Например, резистор в цепи коллектора и резистор в цепи эмиттера связаны электрической цепью транзистора, поэтому, когда один из них выходит из строя вследствие катастрофического отказа, то два других компонента также перестают функционировать. В ходе схемотехнического моделирования были выявлены пять типовых отказов, наиболее часто возникающие в аналоговых РЭУ при эксплуатации:

- 1) параметрический отказ резистора;
- 2) короткое замыкание резистора коллектора → короткое замыкание транзистора → обрыв резистора эмиттера;
- 3) короткое замыкание резистора эмиттера → короткое замыкание транзистора → обрыв резистора коллектора;
- 4) короткое замыкание транзистора → обрыв коллектора → обрыв эмиттера;
- 5) короткое замыкание резистора смещения.

На Рисунке 2 представлена схема, демонстрирующая зависимые отказы, возникающие в РЭУ и обладающие «эффектом домино».

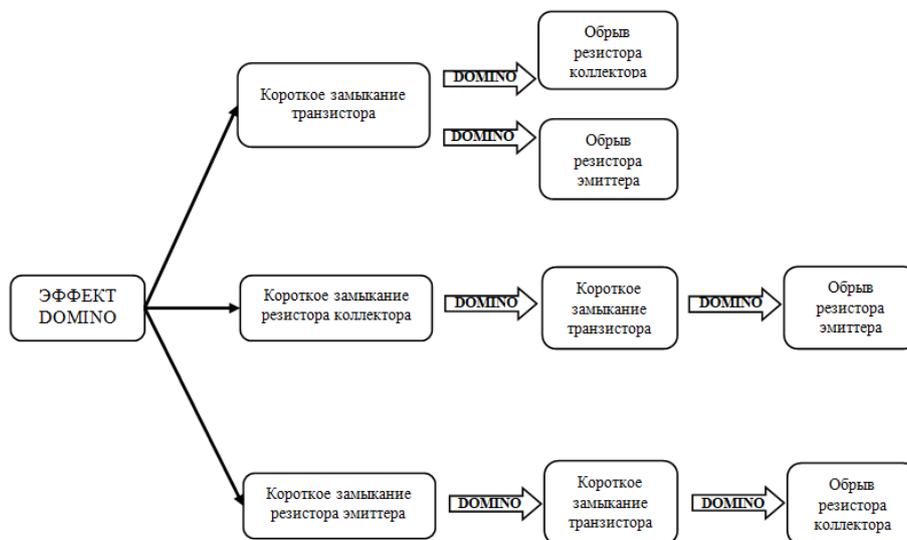


Рисунок 2 – Отказы РЭУ с «эффектом домино»
Figure 2 – Failures of an electronic device with a "domino effect"

Решению задачи идентификации технического состояния радиоэлектронных устройств посвящено множество научных трудов российских и зарубежных ученых. Математический аппарат идентификации тесно связан с решением задач оптимизации [7]. Алгоритм имитации отжига является одним из алгоритмов глобальной оптимизации и применяется в различных областях научных исследований. В [8] отмечены его положительные стороны – простота реализации и универсальность, а также проанализированы недостатки, среди которых необходимость многократных тестов для верного подбора параметров алгоритма и значительные временные затраты на выполнение (в вычислительном эксперименте на обработку 1000 точек исходных данных потребовалось 4,5 мин).

На Рисунке 3 приведена общая схема работы алгоритма. Сначала задают исходные параметры алгоритма. На первых итерациях шаг поиска достаточно большой, что позволяет исследовать все пространство решений. Из лучшего решения текущей итерации случайным образом генерируются новые решения, для которых вычисляются значения целевой функции. Из полученной совокупности выбирается оптимальный вариант для новой итерации, т. е. «снижается температура». На новой итерации значение целевой функции может оказаться хуже, чем для предыдущей, но, с учетом заданной в параметрах алгоритма вероятности принятия худшего решения, такое решение может быть выбрано за оптимальное, особенно на ранних этапах работы алгоритма, что дает возможность осуществлять поиск на всей допустимой области, не ограничиваясь текущим оптимальным решением и не «застревая» в локальном минимуме. Заключительный этап работы алгоритма выполняется с малым шагом, и вероятность того, что алгоритм примет худшее решение, очень мала. Это обеспечивает схождение алгоритма к глобальному минимуму целевой функции. На Рисунке 4 представлена структурная схема процесса диагностики отказов аналогового РЭУ с использованием алгоритма имитации отжига.

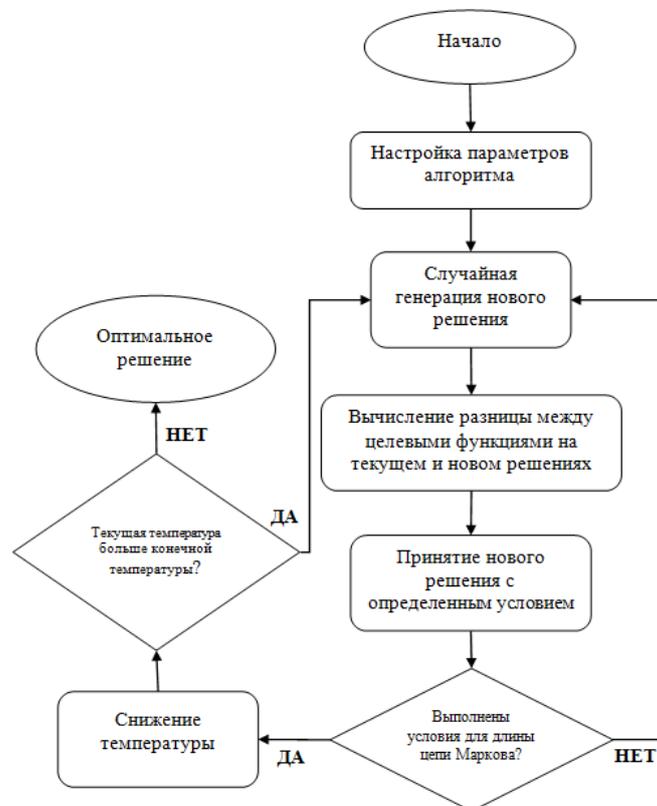


Рисунок 3 – Общая схема алгоритма имитации отжига
 Figure 3 – General scheme of the annealing simulation algorithm

Она включает адаптацию алгоритма под задачи диагностирования электронного средства, проведение физического эксперимента по измерению выходных характеристик устройства и математическое моделирование для проведения численных экспериментов. Моделирование осуществлялось в среде Simulink. Этот инструмент активно используется инженерами-разработчиками при исследовании различных физических процессов, протекающих в проектируемом объекте. Функционал Simulink позволяет построить достаточно точную модель процесса или объекта и получить визуальную интерпретацию результатов моделирования [9, 10]. По данным, полученным в ходе физического эксперимента, описывается целевая функция системы («температура», применительно к алгоритму имитации отжига), рассчитывается ее начальное значение.

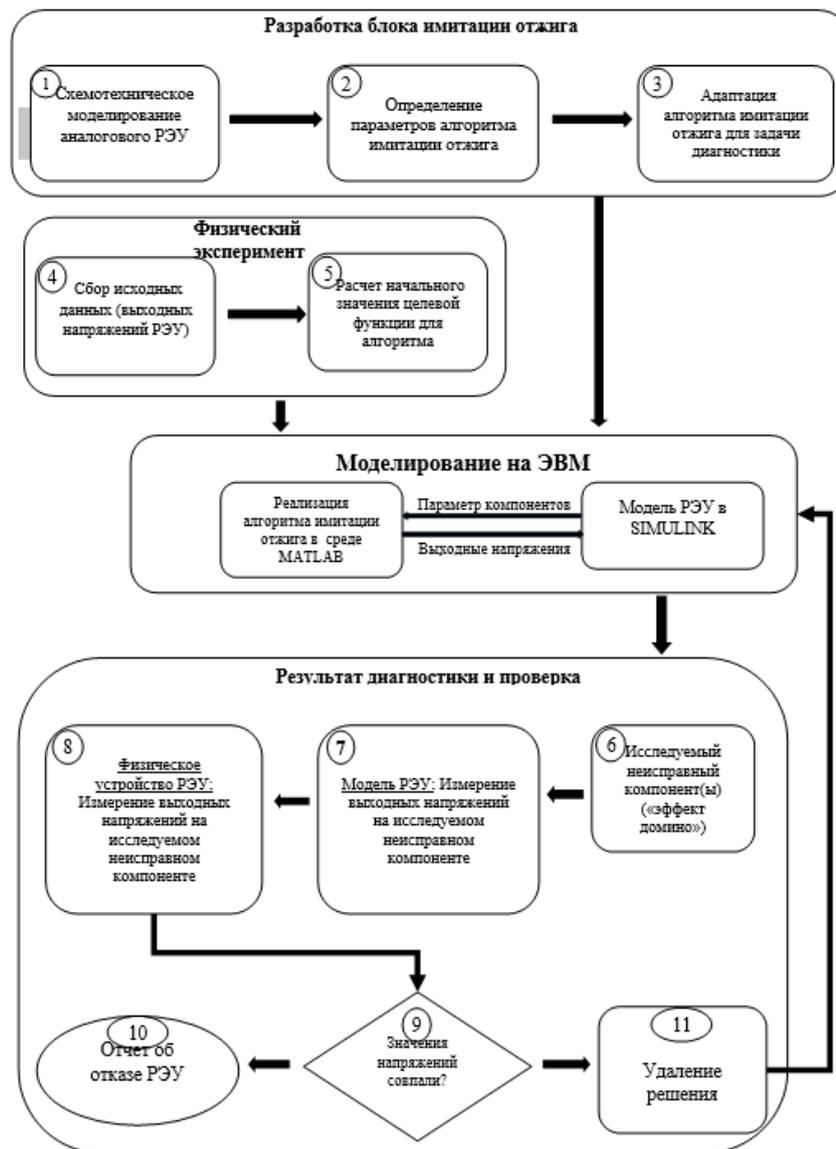


Рисунок 4 – Структурная схема диагностики аналогового РЭУ методом имитации отжига
 Figure 4 – Block diagram of analog REU diagnostics by simulated annealing

Результаты работы алгоритма проверяются по сформированной базе экспериментальных данных, оценивается точность результатов. В заключение формируется отчет о выявленном дефекте и техническом состоянии диагностируемого РЭУ.

Моделирование РЭУ. Для моделирования неисправностей 1-го, 2-го, 3-го и 4-го типа исходная электрическая схема РЭУ была модифицирована: в ней конденсатор $C2$ шунтирован с помощью ключа $K1$ (Рисунок 5). Когда ключ закрыт, постоянный ток протекает по схеме, а на выходе снимаются значения постоянного выходного напряжения, которые являются функцией входных постоянных напряжений. Чтобы обеспечить защищенность транзисторов в процессе диагностики, напряжение источника питания снижено с 15 до 5 В.

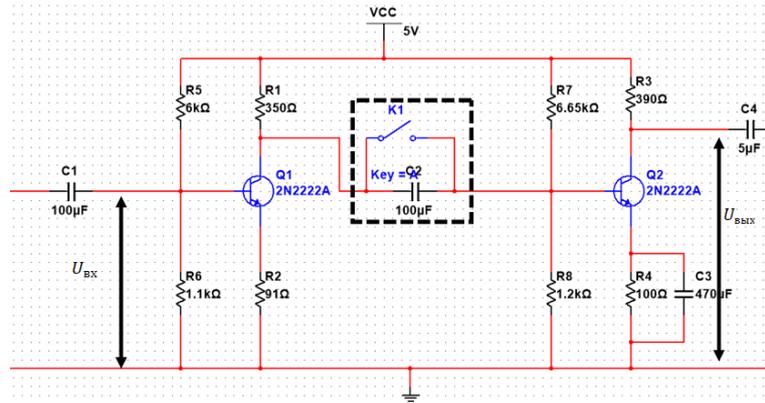


Рисунок 5 – Электрическая схема РЭУ для диагностики типовых отказов 1-го, 2-го, 3-го и 4-го типа

Figure 5 – Electrical diagram of an electronic device for diagnosing typical failures of the 1st, 2nd, 3rd and 4th types

На основе электрической схемы была создана расчетная модель в среде Simulink (Рисунок 6). На ней алгоритм имитации отжига, реализованный в среде Matlab, будет обрабатывать поиск отказов в РЭУ.

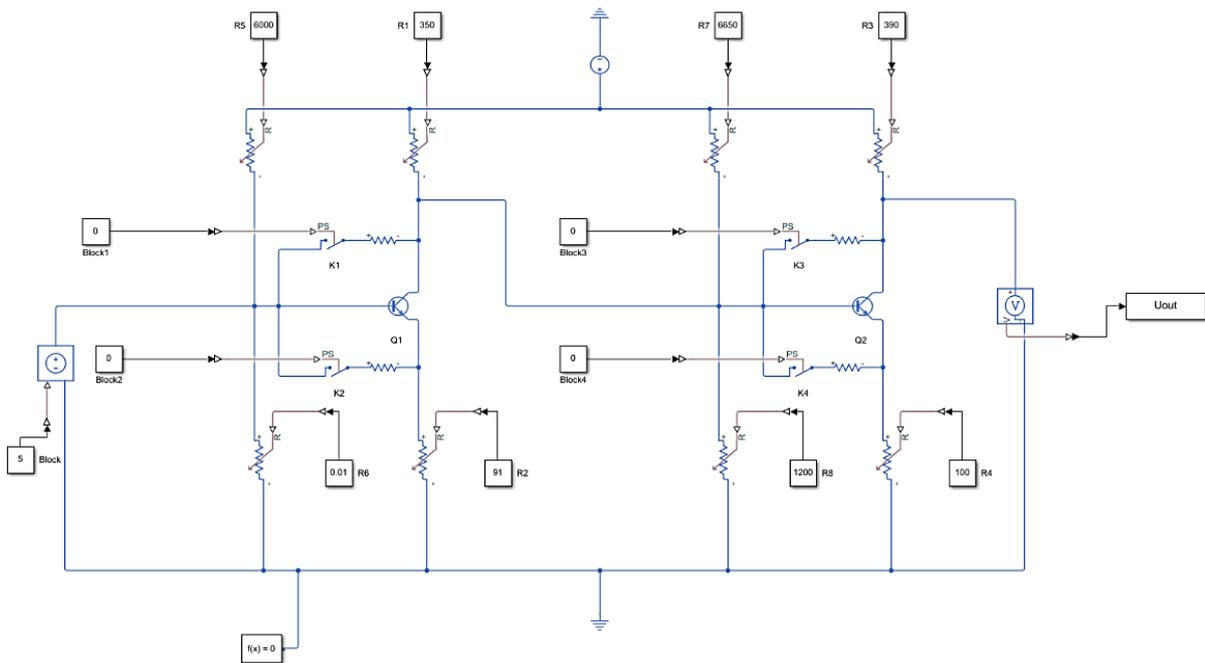


Рисунок 6 – Модель РЭУ, созданная в пакете Simulink для диагностики типовых отказов 1-го, 2-го, 3-го и 4-го типа

Figure 6 – A model of an electronic device created in the Simulink package for diagnosing typical failures of the 1st, 2nd, 3rd and 4th types

Для исследования отказа 5-го типа (короткое замыкание резистора смещения) в модель добавлены резисторы $R9$ и $R10$ (Рисунок 7).

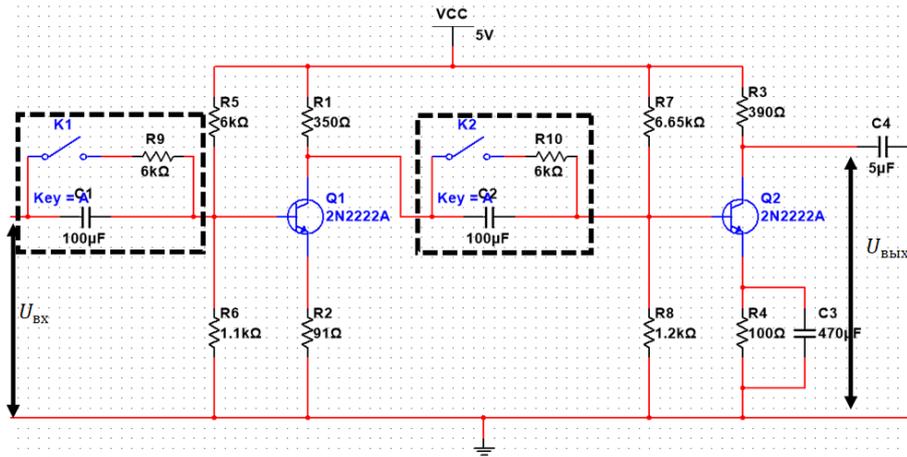


Рисунок 7 – Электрическая схема РЭУ для диагностики отказа 5-го типа
Figure 7 – Electrical diagram of an electronic device for diagnosing type 5 failure

Если ток в цепи постоянный, то резистор смещения не оказывает влияния на ток, и обнаружить его неисправность не представляется возможным, поскольку она не отразится на значении выходного напряжения. Когда ключи закрыты, ток будет проходить через резисторы $R9$ и $R10$, и согласно теории цепей, в это время все резисторы в цепи воздействуют на выходное напряжение устройства. Как и ранее, напряжение источника питания снижено с 15 до 5 В.

На Рисунке 8 представлена расчетная модель РЭУ, созданная в пакете Simulink.

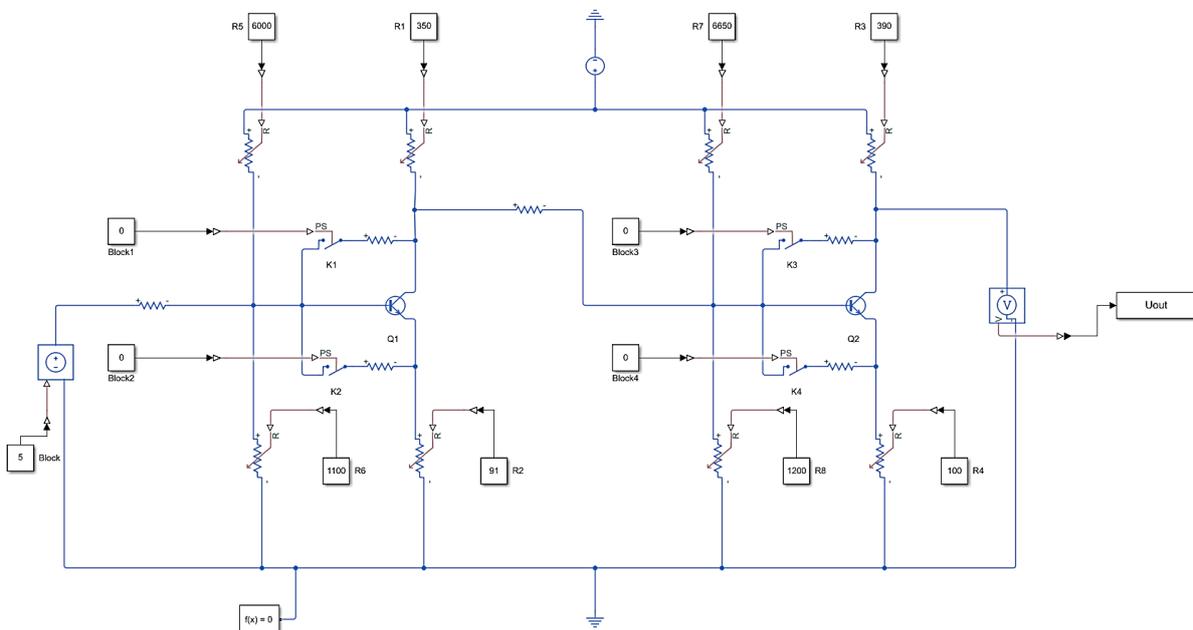


Рисунок 8 – Модель РЭУ в пакете Simulink для диагностики отказа 5-го типа
Figure 8 – Model of an electronic device in the Simulink package for type 5 fault diagnosis

Определение параметров алгоритма имитации отжига.

1) Понятие «конечная температура» в представленном исследовании – это значение целевой функции, соответствующее глобальному минимуму, при достижении

которого алгоритм остановит процесс поиска. Чем оно меньше, тем точнее результаты исследования, но сходимость алгоритма в этом случае будет дольше. Для определения этого параметра была проведена серия вычислительных экспериментов, результаты которого для каждого вида диагностируемого отказа приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Значение целевой функции («конечной температуры») для различных типов отказов
Table 1 – The value of the target function ("end temperature") for various types of failures

Вид отказа РЭУ	Отказ 1-го типа	Отказ 2-го типа	Отказ 3-го типа	Отказ 4-го типа	Отказ 5-го типа
Значение целевой функции	10^{-10}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-4}

2) «длина цепи Маркова» – это количество новых решений, созданных на основе текущего лучшего решения, которое позволяет проводить поиск в разных направлениях и тщательно исследовать пространство решений. В представленном исследовании значение этого параметра было выбрано равным 10 для всех типов отказов, что позволило получить результаты диагностики с необходимой точностью в 95 %.

3) «начальное решение» – это состояние РЭУ, при котором параметры всех компонентов равны номинальным значениям.

Количество электрорадиоэлементов в устройстве велико, но неисправным в определенный момент времени, как правило, оказывается один конкретный компонент. Моделируя его отказ в модифицированной схеме, получают численные значения параметра неисправного компонента. Это значение вместе со значениями параметров других компонентов схемы формируют вектор «идеальных значений», на который будет ориентироваться алгоритм при поиске неисправности реального РЭУ. Например, вектор «идеальных» значений для резисторов $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8$ имеет вид:

$$R_{\text{ном}} = [350 \ 91 \ 390 \ 100 \ 6000 \ 1100 \ 6650 \ 1200].$$

Чтобы промоделировать «идеальное» состояние транзисторов, в модели РЭУ, созданной в Simulink ключи, имитирующие короткое замыкание транзисторов, открыты (Рисунок 9). Здесь i – номер транзистора.

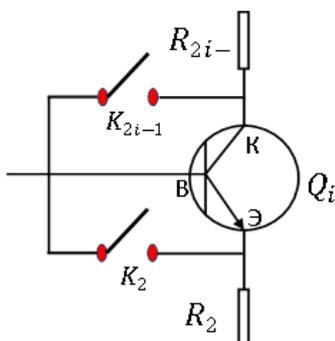


Рисунок 9 – Состояние ключей K для исправного состояния транзистора
Figure 9 – The state of the K keys for the transistor in good condition

4) Схема понижения температуры аналитически может быть представлена в виде:

$$T_{k+1} = 0,9 \cdot T_k. \tag{1}$$

Для каждой следующей итерации $k + 1$ после прохода очередной цепи Маркова температура алгоритма монотонно снижается. Вероятность принятия худшего решения с каждой итерацией также будет уменьшаться, а на заключительных этапах работы алгоритма станет фактически равна нулю.

5) Целевая функция будет определяться значениями выходных напряжений, полученных в ходе моделирования и физических экспериментов РЭУ:

$$F = \sum_{i=1}^n \Delta U^2 = \sum_{i=1}^n (U_{\text{выход_модели}}(q) - U_{\text{выход_реального_РЭУ}}(q))^2, \quad (2)$$

где n – количество постоянных входных напряжений РЭУ, q – состояние РЭУ (решение алгоритма имитации отжига), $U_{\text{выход_модели}}$ – выходное напряжение модели РЭУ в пакете Simulink, $U_{\text{выход_реального_РЭУ}}$ – выходное напряжение РЭУ.

На Рисунке 10 показаны графики зависимости выходных напряжений, полученные в ходе модельного и физического эксперимента РЭУ. В процессе поиска квазиоптимального решения состояние модели будет постоянно меняться до тех пор, пока графики не совпадут. В этот момент целевая функция достигнет минимума, а состояние модели будет идентично состоянию реального РЭУ.

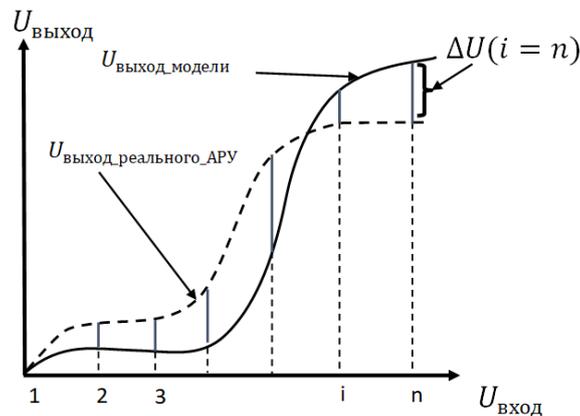


Рисунок 10 – Графики выходных напряжений для модели и реального РЭУ
 Figure 10 – Graphs of output voltages for a model and a real radio electronic device

Для обеспечения безопасной работы транзисторов постоянное входное напряжение выбрано в диапазоне от 0 до 5 В, с шагом 0,5 В, что обеспечивает необходимую точность результатов и допустимую вычислительную трудоемкость решения.

б) Допуски и предельные значения сопротивлений резисторов

Согласно технической документации, для исправного резистора допуск на значение сопротивления может изменяться в пределах $\pm 5\%$ от номинального значения. Отказ 1-го типа, как правило, характеризуется значением сопротивления, схожим с номинальным значением резистора. Поэтому для идентификации такой неисправности задается диапазон значений, формируемый на основе метода статистических испытаний Монте-Карло. Значение сопротивления неисправного резистора будет лежать в этом диапазоне. Так, результаты моделирования, позволили определить следующие диапазоны значений для резисторов схемы:

$$10 \leq R_1 \leq 1000; 10 \leq R_2 \leq 500; 10 \leq R_3 \leq 1000; 10 \leq R_4 \leq 1000; 1000 \leq R_5 \leq 12000; 100 \leq R_6 \leq 2200; 1000 \leq R_7 \leq 13000; 1000 \leq R_8 \leq 2400.$$

7) Механизм генерации новых решений (новых состояний РЭУ) основан на случайном выборе, что дает возможность алгоритму охватить пять типовых отказов РЭУ. Аналитически генерация нового решения может быть представлена в виде:

$$G = \left[\begin{array}{l} \text{механизм генерации новых решений для типового отказа 1} \\ \left\{ \begin{array}{l} i = \text{randi}(\text{число транзисторов}) \\ R(2i - 1) = 0,01 \\ \text{block}(2i - 1) = 1, \text{block}(2i) = 1 \\ R(2i) = 10^9 \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} i = \text{randi}(\text{число транзисторов}) \\ R(2i) = 0,01 \\ \text{block}(2i - 1) = 1, \text{block}(2i) = 1 \\ R(2i - 1) = 10^9 \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} i = \text{randi}(\text{число транзисторов}) \\ R(2i) = 10^9 \\ \text{block}(2i - 1) = 1, \text{block}(2i) = 1 \\ R(2i - 1) = 10^9 \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} m = \text{число транзистров} \\ n = \text{число резисторов} \\ i = \text{randi}(2 \cdot m + 1, n) \\ R(i) = 0,01 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (3)$$

В (3) представлен механизм генерации новых решений. Каждое уравнение описывает конкретный тип отказа РЭУ.

Например, когда два значения блоков равны «1», это имитирует короткое замыкание транзистора. Резисторы с индексом $2i - 1$ являются резисторами коллектора. Резисторы с индексом $2i$ являются резисторами эмиттера. Резисторы с индексом более $2m + 1$ являются резисторами смещения. Реальное значение сопротивления резисторов, которые имеют короткое замыкание или обрыв, неизвестно, поэтому моделируются значения с вышеуказанными случаями: $R = 0,01$ Ом и $R = 10^9$ Ом соответственно. Это допущение может показать, что состояние модели не полностью совпадает с состоянием реального РЭУ, но дает возможность диагностировать, какие резисторы имеют короткое замыкание, а какие – обрыв, поскольку в этом случае целевая функция достигает значения, близкого к глобальному минимуму.

Механизм генерации новых решений для случая параметрического отказа можно представить в виде:

$$R_{\text{новый}}(i) = R_{\text{луч.тек}}(i) + \alpha(i) \cdot (-1+2 \cdot \text{rand}(1)), \quad (4)$$

где α – шаг поиска. Этот параметр будет постепенно уменьшаться в ходе работы алгоритма по мере уменьшения целевой функции (снижения температуры). Как правило, резисторы с параметрическим отказом обычно имеют сопротивления, не сильно отклоняющиеся от номинального значения, поэтому данный параметр выбран равным номинальному значению резистора. Случайным образом генерируются новые значения сопротивления $R_{\text{новый}}(i)$ от наилучших текущих значений сопротивления $R_{\text{луч.тек}}(i)$. Затем случайно выбирается один резистор.

Модификация алгоритма имитации отжига для задачи диагностики радиоэлектронных устройств. Эксперименты, проводимые в ходе исследования, показали, что применение классического алгоритма имитации отжига к задаче диагностики отказов аналоговых РЭУ позволяет найти множество состояний устройства,

в которых целевая функция практически достигает своего экстремума (глобального минимума), т. е. часть отказов становится неразличима. Такая ситуация возникает ввиду того, что параметры компонентов могут случайным образом изменяться в процессе функционирования и смещать выходные характеристики, зачастую компенсирующие друг друга и формирующие значение целевой функции, соответствующее глобальному минимуму. Возникает неопределенность в интерпретации результатов и идентификации дефекта. Чтобы исключить подобные ситуации и иметь возможность однозначно интерпретировать полученные результаты, было решено воспользоваться гипотезой Ли, согласно которой в каждый, сколь угодно малый интервал времени может возникнуть только один отказ устройства, а вероятность одновременного возникновения двух или более отказов практически равна нулю [10]. Это позволило разработать модификацию алгоритма имитации отжига, адаптированную к задачам диагностики дефектов РЭУ. В дальнейшем исследование строилось на допущении, что в РЭУ присутствует только один неисправный компонент или один последовательный отказ («эффект домино»).

Схема модифицированного алгоритма приведена на Рисунке 11.

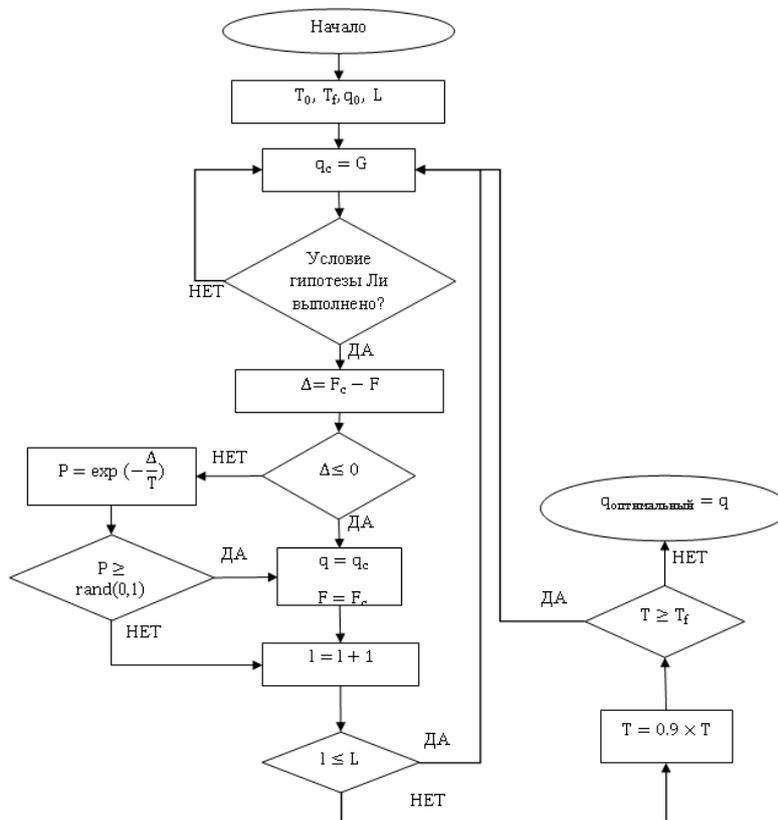


Рисунок 11 – Блок-схема модифицированного алгоритма имитации отжига для задачи диагностики отказов РЭУ

Figure 11 – Block diagram of a modified algorithm for simulated annealing for the task of diagnosing failures of an electronic device

На Рисунке 11 T_0 – начальная температура; T_f – конечная температура; q_0 – начальное решение (номинальное состояние АРУ); L – длина цепи Маркова; q_c – новое решение (новое состояние РЭУ); G – механизм генерации нового решения; F – целевая функция на текущем решении; F_c – целевая функция на новом решении; P – вероятность принятия хуже решения; l – номер итерации в цепи Маркова; q_{best} – лучшее текущее решение; $q_{оптимальный}$ – оптимальное решение (состояние реального РЭУ).

Таблица 2 – Экспериментальные значения выходного напряжения U_{out} для различных типов отказов

Table 2 – Experimental values of the U_{out} output voltage for various types of failures

	Отказ 1-го типа	Отказ 2-го типа	Отказ 3-го типа	Отказ 4-го типа	Отказ 5-го типа
Входное напряжение, В	Выходное напряжение, В				
0	2,1486	2,1056	5,0000	5,0000	3,2888
0,5	2,1476	2,2060	4,9872	4,9872	3,2888
1	2,0158	2,3067	3,5335	3,5324	3,2888
1,5	1,8484	2,4075	1,7189	1,6888	3,2888
2	1,6788	2,5084	1,3102	1,3199	3,2888
2,5	1,5099	2,6095	1,5914	1,6077	3,2888
3	1,4885	2,7106	1,8826	1,9052	3,2888
3,5	1,5964	2,8118	2,1771	2,2059	3,2888
4	1,7107	2,9131	2,4735	2,5083	3,2888
4,5	1,8273	3,0144	2,7715	2,8116	3,2888
5	1,9453	3,1158	3,0703	3,1156	3,2888

На Рисунке 12 приведены графики изменения выходного напряжения U_{out} для исправного состояния РЭУ и в случае с моделируемым типовым отказом.

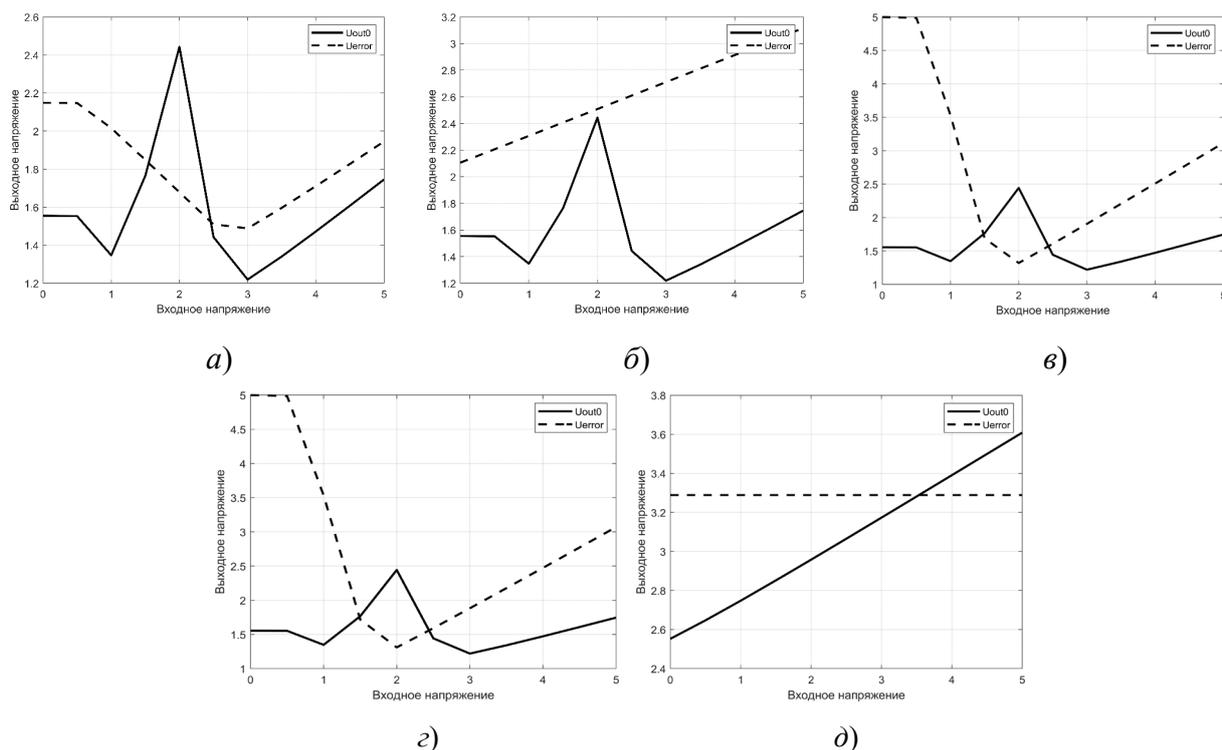


Рисунок 12 – Графики зависимости выходного напряжения РЭУ от входного напряжения для исправного состояния устройства (сплошная линия) и в случае с моделируемым отказом (пунктирная линия): а – отказ 1-го типа; б – отказ 2-го типа; в – отказ 3-го типа; г – отказ 4-го типа; д – отказ 5-го типа

Figure 12 – Graphs of the dependence of the output voltage of an electronic device on the input voltage for the serviceable state of the device (solid line) and in the case of a simulated failure (dotted line): a – type 1 failure; b – type 2 failure; c – type 3 failure; d – type 4 failure; e – type 5 failure

Расчет начального значения функции (начальной температуры алгоритма). Далее, на основе результатов проведенных экспериментов необходимо было определить начальное значение функции (начальную температуру алгоритма). Чтобы исследовать все пространство значений целевой функции, в начале работы алгоритм допускает принятие худшего решения, причем вероятность этого события близка к «1», т. е. $P = e^{-\frac{(F_c - F)}{T}}$, поэтому $T = \frac{-(F_c - F)}{\ln(0,99)}$. Чтобы это условие выполнялось из исходного решения создавались 100 новых решений, выполнялись положительные переходы (где значение целевой функций больше, чем на предыдущем шаге), для которых вычислялись новые значения целевой функции. Начальное значение выбиралось равным среднему значению при положительных переходах. В Таблице 3 приведены начальные значения функции для каждого типового отказа.

Таблица 3 – Начальное значение функции (начальная температура) для разных типов отказов
Table 3 – The initial value of the function (initial temperature) for different types of failures

Тип отказа	Отказ 1-го типа	Отказ 2-го типа	Отказ 3-го типа	Отказ 4-го типа	Отказ 5-го типа
Начальное значение функции (начальная температура)	2916	3450	3026	3465	3450

Результаты и обсуждение

Апробация модифицированного алгоритма имитации отжига для диагностики типовых отказов РЭУ. На Рисунке 13 представлены результаты работы алгоритма при диагностике отказа 1-го типа.

```

Число итераций: g= 2950
Число цепей Маркова: k= 295
Значение глобального минимума целевой функции: F_минимум= 0.00073783
В представленном АРУ возникает ТИПОВОЙ ОТКАЗ 1
R_оптимальный = [ 101.69656    91.147059    395.97988    102.54127    5867.9982    1111.3356    6908.5392    1217.1881 ]
Elapsed time is 5388.536810 seconds.
    
```

Рисунок 13 – Результат работы алгоритма при диагностике отказа 1-го типа
Figure 13 – The result of the algorithm in the diagnosis of type 1 failure

Номинальное значение сопротивления резисторов задается вектором $R_{ном} = [350 \ 91 \ 390 \ 100 \ 6000 \ 1100 \ 6650 \ 1200]$, а значения сопротивления, которые диагностировал алгоритм, равны соответственно $R_{оптим} = [101 \ 91 \ 395 \ 102 \ 5867 \ 1111 \ 6908 \ 1217]$, из чего можно заключить, что у компонента R_1 присутствует параметрический отказ, поскольку значение его сопротивления существенно выходит за границы допустимого диапазона ($R_1 = 101$ Ом при $R_{1ном} = 350$ Ом). На Рисунке 14 представлен график сходимости целевой функции к оптимальному значению, а на Рисунке 15 – результат проверки корректности алгоритма (значение напряжения на резисторе R_1 , как для модели, созданной в пакете Simulink, так и реального РЭУ совпадают при изменении входного напряжения).

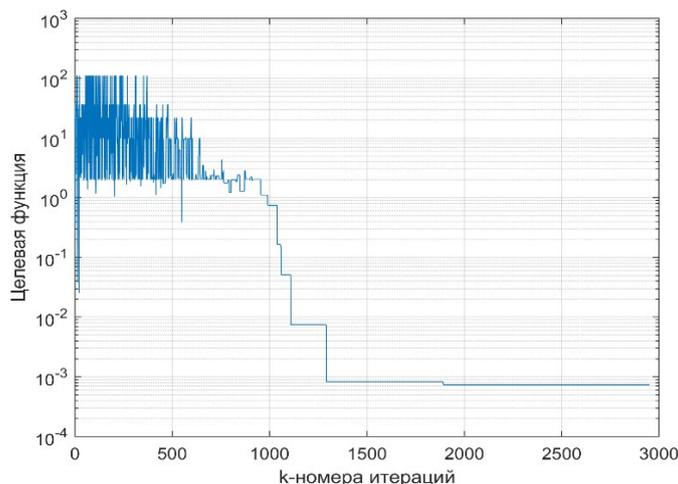


Рисунок 14 – График сходимости целевой функции к оптимальному значению
Figure 14 – Graph of convergence of the objective function to the optimal value

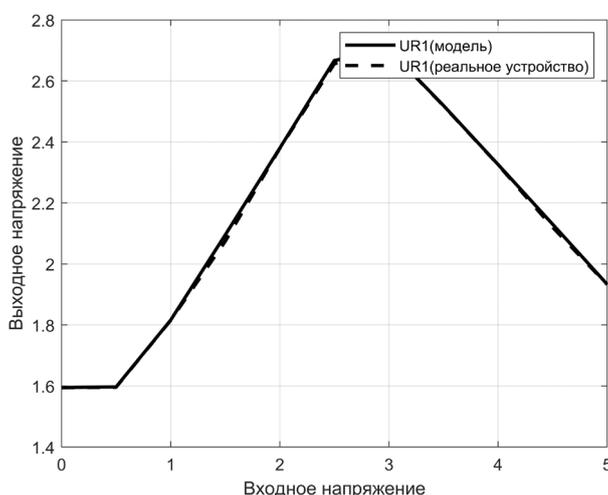


Рисунок 15 – Графики изменения напряжений на резисторе R₁ для модели (сплошная линия) и реального РЭУ (пунктирная линия)
Figure 15 – Graphs of voltage changes across resistor R₁ for a model (solid line) and a real radio electronic device (dotted line)

Аналогичные исследования были проведены для других типовых отказов. На Рисунках 16–18 представлены результаты диагностики отказа 2-го типа.

```

Число итераций: g= 1630
Число цепей Маркова: k= 163
Значение глобального минимума целевой функции: F_минимум= 7.6476e-09
В представленном АРУ возникает ТИПОВОЙ ОТКАЗ 2
R_оптимальный = [ 0.01 1000000000 390 100 6000 1100 6650 1200 ]
Elapsed time is 2982.712457 seconds.
    
```

Рисунок 16 – Результат работы алгоритма при диагностике отказа 2-го типа
Figure 16 – The result of the algorithm in the diagnosis of type 2 failure

Вектор значений сопротивлений по результатам работы алгоритма равен $R_{\text{оптим}} = [0,01 \ 10^9 \ 390 \ 100 \ 6000 \ 1100 \ 6650 \ 1200]$, из чего следует, что присутствует короткое замыкание резистора R₁ и обрыв R₂. Поскольку это последовательный отказ,

то на транзисторе Q_1 фиксируется короткое замыкание. На Рисунке 17 показан график сходимости целевой функции к оптимальному минимуму, а на Рисунке 18 – результат проверки корректности работы алгоритма для отказа 2-го типа.

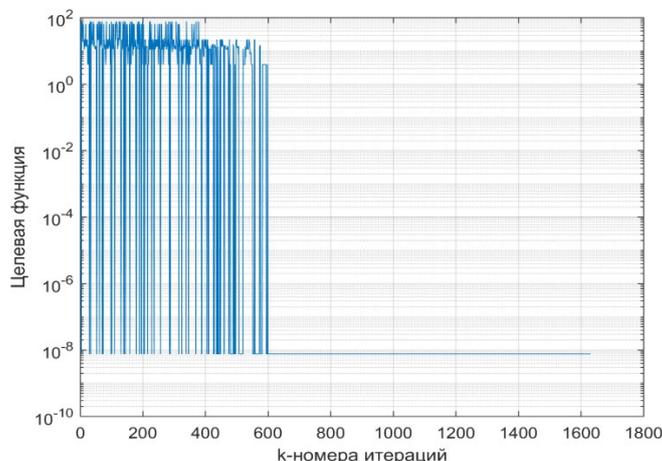


Рисунок 17 – График сходимости целевой функции к оптимальному минимуму при диагностике отказа 2-го типа

Figure 17 – Graph of convergence of the objective function to the optimal minimum in the diagnosis of type 2 failure

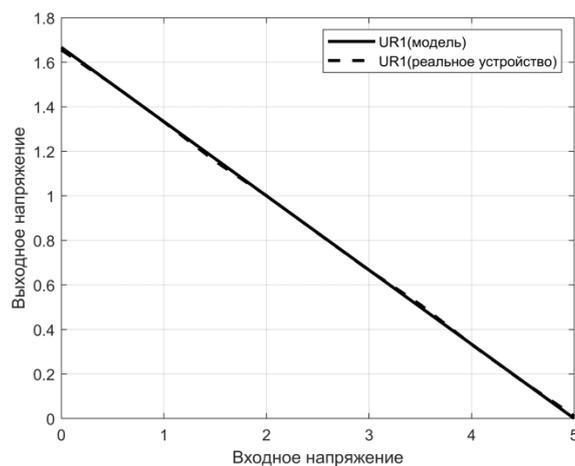


Рисунок 18 – Графики изменения напряжений для модели (сплошная линия) и реального РЭУ (пунктирная линия) при диагностировании отказа 2-го типа

Figure 18 – Graphs of voltage changes for a model (solid line) and a real radio-electronic device (dotted line) during the diagnosis of type 2 failure

На Рисунках 19–21 приведены результаты диагностики отказа 3-го типа.

```

Число итераций: g= 1640
Число цепей Маркова: k= 164
Значение глобального минимума целевой функции: F_минимум= 9.5213e-09
В представленном АРУ возникает ТИПОВОЙ ОТКАЗ 3
R_оптимальный = [ 1000000000 0.01 390 100 6000 1100 6650 1200 ]
Elapsed time is 3063.837559 seconds.
fx >>
<
Workspace
    
```

Рисунок 19 – Результат работы алгоритма при диагностике отказа 3-го типа

Figure 19 – The result of the algorithm in the diagnosis of type 3 failure

Вектор значений сопротивлений по результатам работы алгоритма равен $R_{\text{оптим}} = [10^9 \ 0,01 \ 390 \ 100 \ 6000 \ 1100 \ 6650 \ 1200]$, т. е. на резисторе R_1 присутствует обрыв, а на R_2 короткое замыкание. Поскольку это последовательный отказ, то на транзисторе Q_1 также короткое замыкание. На Рисунке 20 представлен график сходимости целевой функции, а на Рисунке 21 – результат проверки корректности работы алгоритма для отказа 3-го типа.

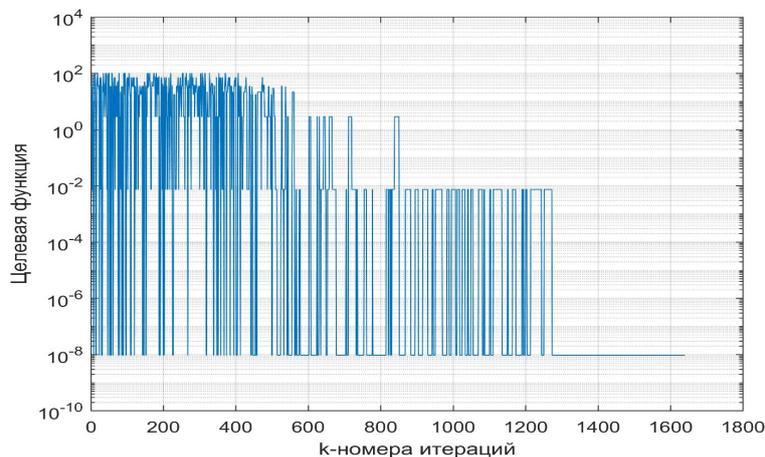


Рисунок 20 – График сходимости целевой функции к оптимальному значению при диагностике отказа 3-го типа

Figure 20 – Graph of the convergence of the objective function to the optimal value in the diagnosis of type 3 failure

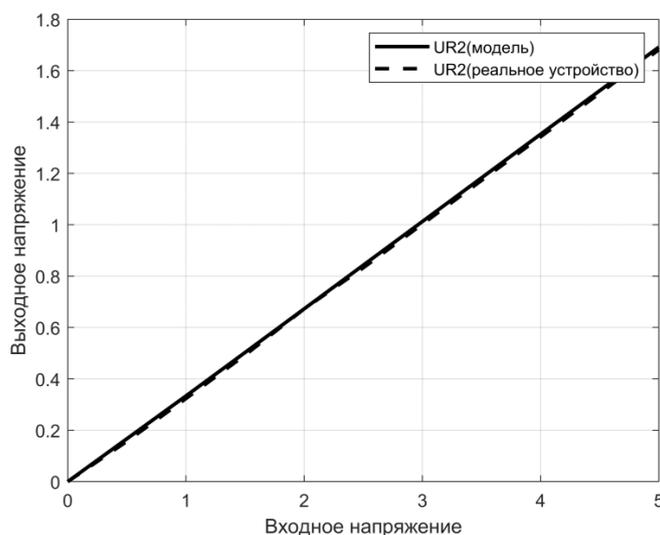


Рисунок 21 – Графики изменения напряжений для модели (сплошная линия) и реального РЭУ (пунктирная линия) при диагностировании отказа 3-го типа

Figure 21 – Graphs of voltage changes for a model (solid line) and a real radio-electronic device (dotted line) during diagnosis of type 3 failure

На Рисунках 22–24 приведены результаты диагностирования отказа 4-го типа. Вектор значений сопротивлений по результатам работы алгоритма равен $R_{\text{оптим}} = [10^9 \ 10^9 \ 390 \ 100 \ 6000 \ 1100 \ 6650 \ 1200]$, т. е. присутствует обрыв на R_1 и R_2 . Так как это последовательный отказ, то на транзисторе Q_1 имеется короткое замыкание.

```
>> hammutieu
Число итераций: g= 1650
Число цепей Маркова: k= 165
Значение глобального минимума целевой функции: F_минимум= 7.6345e-09
В представленном РЭУ возникает ТИПОВОЙ ОТКАЗ 4
R_оптимальный = [ 1000000000 1000000000 390 100 6000 1100 6650 1200 ]
Elapsed time is 2959.294657 seconds.
fx >>
<
Workspace
```

Рисунок 22 – Результат диагностики отказа 4-го типа
 Figure 22 – Diagnostic result of type 4 failure

На Рисунке 23 – график сходимости целевой функции к оптимальному минимуму, а на Рисунке 24 – результат проверки корректности работы алгоритма для отказа 4-го типа.

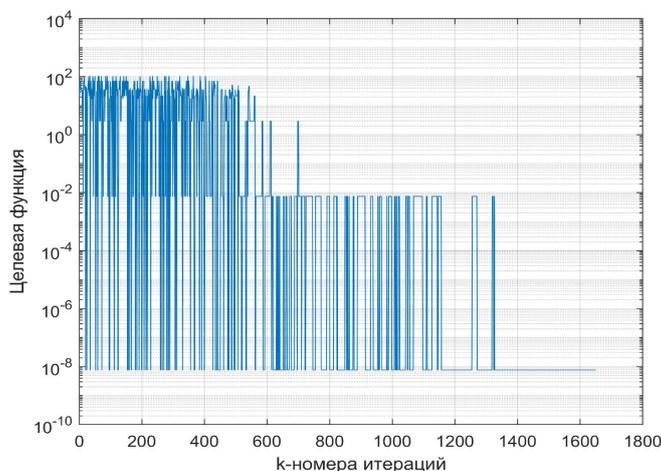


Рисунок 23 – График сходимости целевой функции к оптимальному минимуму при диагностике отказа 4-го типа
 Figure 23 – Graph of convergence of the objective function to the optimal minimum in the diagnosis of type 4 failure

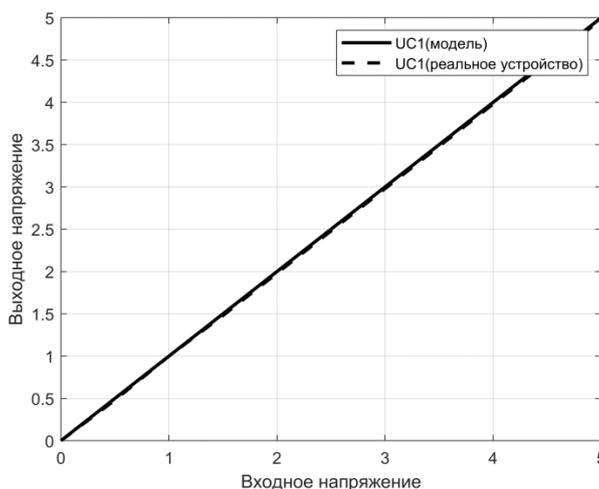


Рисунок 24 – Графики напряжений коллектора Q_1 для модели (сплошная линия) и реального РЭУ (пунктирная линия) при диагностировании отказа 4-го типа
 Figure 24 – Voltage graphs of collector Q_1 for a model (solid line) and a real radio-electronic device (dotted line) during diagnosis of type 4 failure

На Рисунках 25–27 представлены результаты диагностики отказа 5-го типа.

```

Число итераций: q= 1650
Число цепей Маркова: k= 165
Значение глобального минимума целевой функции: F_минимум= 2.6749e-09
В представленном АРУ возникает ТИПОВОЙ ОТКАЗ 5
R_оптимальный = [ 350 91 390 100 0.01 1100 6650 1200 ]
Elapsed time is 2882.882946 seconds.
fx >>
<
Workspace
    
```

Рисунок 25 – Результат диагностики отказа 5-го типа
Figure 25 – Diagnostic result of type 5 failure

Вектор значений сопротивлений по результатам работы алгоритма, равен $R_{\text{оптим}} = [350 \ 91 \ 390 \ 100 \ 0.01 \ 1100 \ 6650 \ 1200]$, что говорит о наличии короткого замыкания на резисторе R_5 . На Рисунке 27 представлена сходимость целевой функции ко квазиоптимальному минимуму. На Рисунке 28 представлена проверка совпадения напряжений на R_5 на модели в пакете Simulink и на реальном устройстве при изменении входного напряжения.

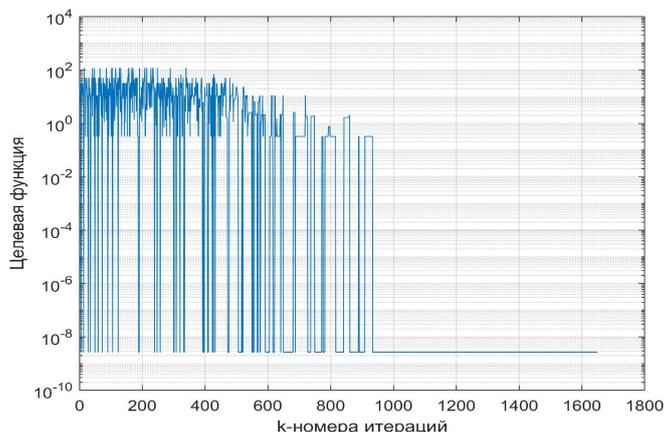


Рисунок 26 – График сходимости целевой функции при диагностике отказа 5-го типа
Figure 26 – Graph of convergence of the objective function in the diagnosis of type 5 failure

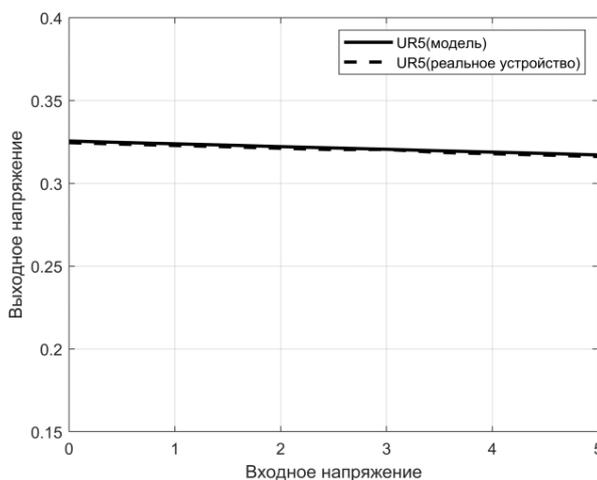


Рисунок 27 – Графики изменения напряжений на R_5 для модели (сплошная линия) и реального РЭУ (пунктирная линия) при диагностировании отказа 5-го типа
Figure 27 – Graphs of voltage changes on R_5 for a model (solid line) and a real radio-electronic device (dotted line) during diagnosis of type 5 failure

По результатам проведенных экспериментов, можно сделать вывод об эффективности предложенного метода для задачи идентификации отказов РЭУ. Основанный на модифицированном алгоритме, он позволяет определять сложные случаи последовательных отказов, идентифицировать которые традиционными методами не было возможности.

Заключение

Метод диагностики отказов аналоговых РЭУ, основанный на модифицированном алгоритме имитации отжига, показал свою эффективность при выявлении и идентификации неисправностей, возникающих в электрической схеме РЭУ. Благодаря этому, процесс обнаружения потенциальных отказов становится более простым и результативным, что способствует повышению производительности и точности технической диагностики, и, как следствие, увеличению срока службы радиоэлектронного средства. Дальнейшие исследования в этой области будут направлены на выявление более сложных отказов РЭУ, имеющих сочетанный характер и кратное проявление. Это, в свою очередь, позволит расширить возможности и круг задач, решаемых методами технической диагностики в области идентификации дефектов и неисправностей радиоэлектронных средств, а также сформировать научную и методическую базу для дальнейшего развития и совершенствования этих методов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Увайсов С.У., Черноверская В.В., Нгуен Дык Хай, Во Тхе Хай, Фам Суан Хань. Применение метода отжига в задаче диагностики электрических дефектов аналоговых схем радиоэлектронных устройств. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(4). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.47.4.022>
 Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Nguyen Duc Hai, Vo The Hai, Pham Xuan Hanh. Application of the annealing method in the task of diagnosing electrical defects in analog circuits of radioelectronic devices. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(4). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.47.4.022>
2. Нгуен Д.Х. Диагностирование неисправностей аналоговых радиоэлектронных устройств методом отжига. *Мехатроника, автоматика и робототехника*. 2024;(13):172–174. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2024-13-172-174>
 Nguyen D.H. Diagnosis of faults in analog radio electronic devices by simulated annealing method. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*. 2024;(13):172–174. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2024-13-172-174>
3. Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P. Optimization by Simulated Annealing. *Science*. 1983;220(4598):671–680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
4. Лопатин А.С. Метод отжига. *Стохастическая оптимизация в информатике*. 2005;1:133–149.
5. Zhang D., Liu Y., M'Hallah R., Leung S.C.H. A simulated annealing with a new neighborhood structure based algorithm for high school timetabling problems. *European Journal of Operational Research*. 2010;203(3):550–558. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.09.014>
6. Bandler J.W., Salama A.E. Fault diagnosis of analog circuits. *Proceedings of the IEEE*. 1985;73(8):1279–1325. <https://doi.org/10.1109/PROC.1985.13281>
7. Поляк Б.Т. *Введение в оптимизацию*. Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы; 1983. 384 с.

8. Коптяев Д.С. Использование алгоритма имитации отжига в задачах поиска. В сборнике: *Конкурентоспособность территорий: Материалы XXIII Всероссийского экономического форума молодых ученых и студентов: Часть 3, 27–30 апреля 2020 года, Екатеринбург, Россия*. Екатеринбург: Уральский государственный экономический университет; 2020. С. 76–78.
9. Колесникова А.Г., Матвеев В.В. Использование компьютерного моделирования в среде Matlab/Simulink в рамках инженерного образовательного курса. *Известия Тульского государственного университета. Педагогика*. 2024;(4):39–45.
Kolesnikova A.G., Matveev V.V. Use of computer modeling in Matlab/Simulink environment within the framework of engineering education course. *News of the Tula State University. Pedagogics*. 2024;(4):39–45. (In Russ.).
10. Илюшин М.В., Кирюшин Д.Д. Имитационное моделирование радиоканала передачи цифрового сигнала в Matlab Simulink. В сборнике: *Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2024: Сборник трудов VII Международного научно-технического форума: Том 1, 04–06 марта 2024 года, Рязань, Россия*. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина; 2024. С. 60–63.
Ilyushin M.V., Kiryushin D.D. Simulation modeling of a digital signal transmission radio channel in Matlab Simulink. In: *Sovremennye tekhnologii v nauke i obrazovanii – STNO-2024: Sbornik trudov VII Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma: Volume 1, 04–06 March 2024, Ryazan, Russia*. Ryazan: Ryazan State Radio Engineering University; 2024. P. 60–63. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Увайсов Сайгид Увайсович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

e-mail: uvajsov@mirea.ru

ORCID: [0000-0003-1943-6819](https://orcid.org/0000-0003-1943-6819)

Saygid U. Uvaysov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Electronics and Computer Science, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Черноверская Виктория Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

e-mail: chernoverskaya@mirea.ru

ORCID: [0009-0009-6311-7648](https://orcid.org/0009-0009-6311-7648)

Victoria V. Chernoverskaya, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Electronics and Computer Science, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Нгуен Дык Хай, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

e-mail: duchai09011997@gmail.com

Nguyen Duc Hai, Postgraduate at the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Electronics and Computer Science, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Во Тхе Хай, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.
e-mail: thehai.ttrd@gmail.com

Vo The Hai, Postgraduate at the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Electronics and Computer Science, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Фам Суан Хань, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.
e-mail: phamxuanhanh161@gmail.com

Pham Xuan Hanh, Postgraduate at the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Electronics and Computer Science, MIREA – Russian Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 18.01.2026; одобрена после рецензирования 17.02.2026; принята к публикации 27.02.2026.

The article was submitted 18.01.2026; approved after reviewing 17.02.2026; accepted for publication 27.02.2026.