

УДК 621.396.69

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.47.4.022](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.47.4.022)

Применение метода отжига в задаче диагностики электрических дефектов аналоговых схем 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. Совершенствование методов диагностики неисправностей радиоэлектронных устройств остается актуальной и своевременной задачей на современном этапе развития этого класса технических средств. Электрическая схема, реализующая функционал электронного средства, зачастую содержит элементы, параметры которых отличаются от номинальных значений ввиду особенностей технологического процесса их производства. Это, в свою очередь, может привести к изменению выходных характеристик устройства, состоянию неисправности или отказа электронного средства. В статье приведены результаты исследования по диагностированию электрических дефектов аналоговых схем радиоэлектронных устройств на основе модифицированного алгоритма имитации отжига. Проанализированы сложности применения классической схемы алгоритма и невозможность однозначной идентификации дефектов электрорадиоэлементов. Предложена доработанная схема алгоритма, позволяющая решить оптимизационную задачу по поиску глобального экстремума целевой функции для задачи диагностики электронной компонентной базы. Показано, что для эффективной работы алгоритма необходимо правильно настроить его параметры и исследовать все возможные варианты генерации соседних решений и механизмов снижения температуры, чтобы выбрать наилучший вариант реализации. Алгоритм имитации отжига имеет ряд достоинств перед другими алгоритмами оптимизации. Время работы алгоритма можно контролировать с помощью графика охлаждения. При этом допускается резкое завершение работы алгоритма за счет изменения параметра конечной температуры. Всегда существует решение, независимо от того, сколько времени прошло в процессе поиска. Эта гибкость объясняет широкую популярность алгоритма имитации отжига в различных сферах научных исследований и решении прикладных задач.

Ключевые слова: алгоритм имитации отжига, оптимальное решение, радиоэлектронное устройство, диагностирование дефектов, электрорадиоэлемент, глобальный минимум, локальный минимум, механизм генерации соседних решений, длина цепи Маркова, схема понижения температуры.

Для цитирования: 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). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1618> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.47.4.022

Application of the annealing method in the task of diagnosing electrical defects in analog circuits of radioelectronic 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: Improving the methods of troubleshooting electronic devices remains an urgent and timely task at the current stage of development of this class of technical means. An electrical circuit that implements

the functionality of an electronic device often contains elements whose parameters differ from the nominal values due to the peculiarities of the technological process of their production. This, in turn, may lead to a change in the output characteristics of the device, a malfunction or failure of an electronic device.

The article presents the results of a study on the diagnosis of electrical defects in analog circuits of radioelectronic devices based on a modified algorithm for simulated annealing. The difficulties of applying the classical scheme of the algorithm and the impossibility of unambiguous identification of defects in electrical and radio elements are analyzed. A modified algorithm scheme is proposed that allows solving the optimization problem of finding the global extremum of the objective function for the problem of diagnosing the electronic component base. It is shown that for the algorithm to work effectively, it is necessary to correctly adjust its parameters and explore all possible options for generating neighboring solutions and temperature reduction mechanisms in order to choose the best implementation option. The annealing simulation algorithm has a number of advantages over other optimization algorithms. The operating time of the simulated annealing algorithm can be controlled using a cooling schedule. At the same time, an abrupt shutdown of the algorithm is allowed due to a change in the final temperature parameter. There is always a solution, no matter how much time has passed in the search process. This flexibility explains the widespread popularity of the annealing simulation algorithm in various fields of scientific research and applied problem solving.

Keywords: annealing simulation algorithm, optimal solution, radioelectronic device, defect diagnosis, electric radio element, global minimum, local minimum, mechanism for generating neighboring solutions, Markov chain length, temperature reduction scheme.

For citation: Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V., Nguyen Duc Hui, Vo The Hai, Xuan Thanh Pham. 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.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1618> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.47.4.022

Введение

Метод имитации отжига, относящийся к методам глобальной оптимизации, нашел широкое применение при решении исследовательских задач в различных областях профессиональной деятельности человека. Разработанный в 1950-х годах, он активно используется и в настоящее время [1–4]. Интерес к нему начался с работ Киркпатрика [1] и Черни [5]. Физический процесс отжига широко известен в физике конденсированных сред как тепловой процесс для достижения низкоэнергетического состояния твердого вещества. В середине прошлого века Метрополис с соавторами представил метод, в дальнейшем получивший известность как алгоритм Метрополиса, для моделирования состояний атомов при определенной температуре вещества. Киркпатрик и его коллеги показали, что моделирование процесса отжига металла, предложенного Метрополисом и его коллегами, может быть использовано для решения задач оптимизации, где целевая функция минимизируется в соответствии с энергией состояний твердого вещества. Они заменили энергию на целевую функцию, а состояние физической системы на решение задачи минимизации. Представленный алгоритм обладал хорошей сходимостью к глобальному минимуму с заданной вероятностью, оказался достаточно прост в реализации и показал хорошую производительность. Суть алгоритма заключается в следующем.

Из исходного состояния x система переходит к новому состоянию y в результате случайных возмущений. Для нового установившегося состояния системы вычисляется значение функции $F(y)$. Если изменение $F_{xy} = F_y - F_x$ указывает на уменьшение значения функции, то новое состояние принимается. В случае увеличения значения $F(y)$ новое

состояние принимается с вероятностью $\exp(-\frac{F_{xy}}{T})$, где T – параметр управления, соответствующий температуре при естественном отжиге металлов. Повторяя этот процесс много раз, Метрополис с коллегами продемонстрировали, что равновесное распределение (распределение Больцмана) частиц через определенное время достигает оптимальной температуры. Предложенный Метрополисом подход представил механизм решения оптимизационной задачи, позволяющий избежать «застревания» функции в локальных минимумах при поиске глобального экстремума. Это достигалось тем, что в процессе решения кроме точек, уменьшающих значение функции, принимались точки, увеличивающие ее значение. Второе допускалось с определенными ограничениями на основе критерия случайного принятия, что позволило полностью исследовать пространство решений и в итоге – достичь глобального минимума исследуемой функции. В Таблице 1 представлено сравнение реального процесса отжига металла и решения оптимизационной задачи, основанной на этом методе [5–7].

Таблица 1 – Соответствие параметров физического процесса отжига металла решению оптимизационной задачи

Table 1 – Correspondence of the parameters of the physical metal annealing process to the solution of the optimization problem

№ п/п	Исследуемый процесс	Физический процесс отжига металла	Решение оптимизационной задачи методом отжига
1		Энергия атомов металла	Целевая функция
2		Состояние атомов	Решение
3		Переход атомов	Генерация решения
4		Устойчивое состояние кристаллической решетки	Оптимальное решение
5		Температура	Параметр управления
6		Равновесие	Длина цепи Маркова

С момента первого опубликования работы Киркпатрика и его коллег было проведено множество исследований по моделированию и применению метода отжига в различных научных исследованиях [8–11]. В представленной статье приведены результаты исследования по применению метода отжига в задаче диагностики электрических дефектов радиоэлектронных устройств (РЭУ).

Применение алгоритма имитации отжига в задаче диагностики электрических дефектов РЭУ

Применение алгоритма имитации отжига в задаче диагностики электрических дефектов аналоговых схем РЭУ предполагает рассмотрение случая непрерывной оптимизации. Если в РЭУ отдельные элементы, установленные в ходе технологического процесса, имеют производственный дефект, не выявленный на этапе входного контроля, то значения параметров этих элементов в ходе эксплуатации РЭУ будут отличаться от образцовых (номинальных) значений. Задача диагностики в данном случае – идентифицировать элементы с дефектами и определить значения их параметров. В исследовании необходимо решить экстремальную задачу нахождение минимума целевой функции. Целевая функция в данном случае интерпретирует значения параметров

дефектных элементов РЭУ. Решение задачи, поставленной в исследовании, является весьма своевременным и актуальным, поскольку позволяет повысить эксплуатационные и надежность характеристики разрабатываемых устройств.

Классическая схема алгоритма имитации отжига

На Рисунке 1 визуализирован процесс поиска минимума целевой функции на основе метода имитации отжига. Решение находится на 10-м шаге работы алгоритма. В начале алгоритма энергия системы высокая, благодаря высокой температуре, поэтому поиск в пространстве решений выполняется с большими шагами. На шаге 4 алгоритм попадает в локальный минимум, но благодаря возможности перейти к решению с худшими значениями параметров (с определенной вероятностью), алгоритм переходит к решению 5. Далее энергия системы постепенно уменьшается из-за снижения температуры, поэтому алгоритм исследует пространство решений с меньшим значением шага, а вероятность принятия худшего решения уменьшается, приближаясь к 0 в конце работы алгоритма. В результате находится решение в виде глобального экстремума целевой функции.

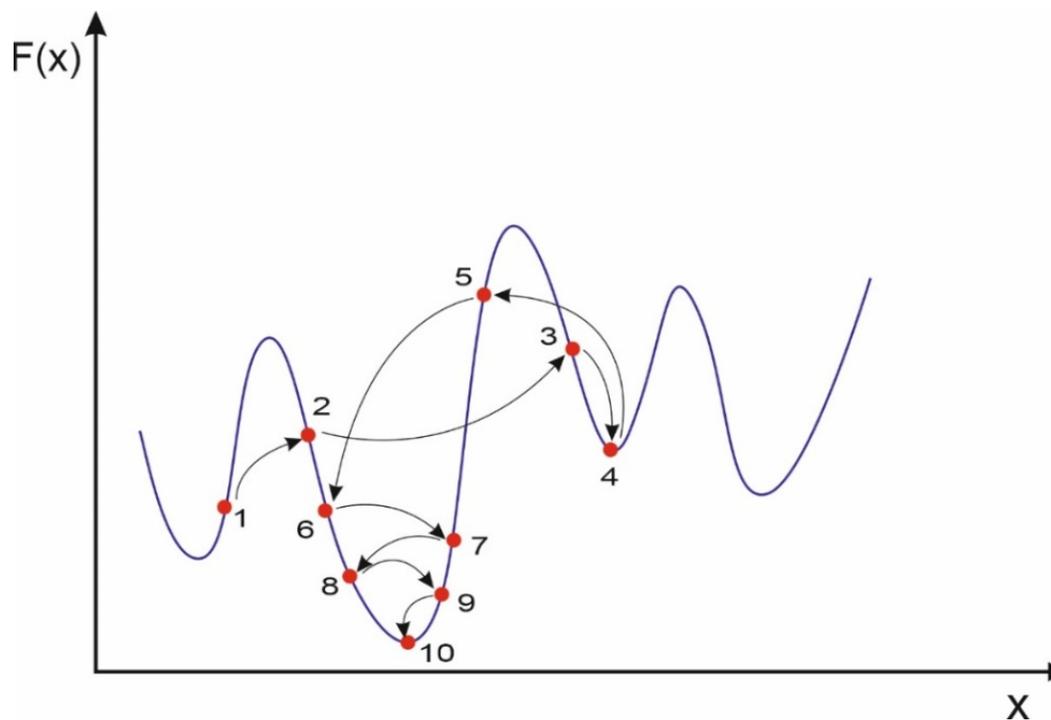


Рисунок 1 – Процесс поиска оптимального решения
 Figure 1 – The process of finding the optimal solution

На Рисунке 2 показана схема алгоритма имитации отжига.

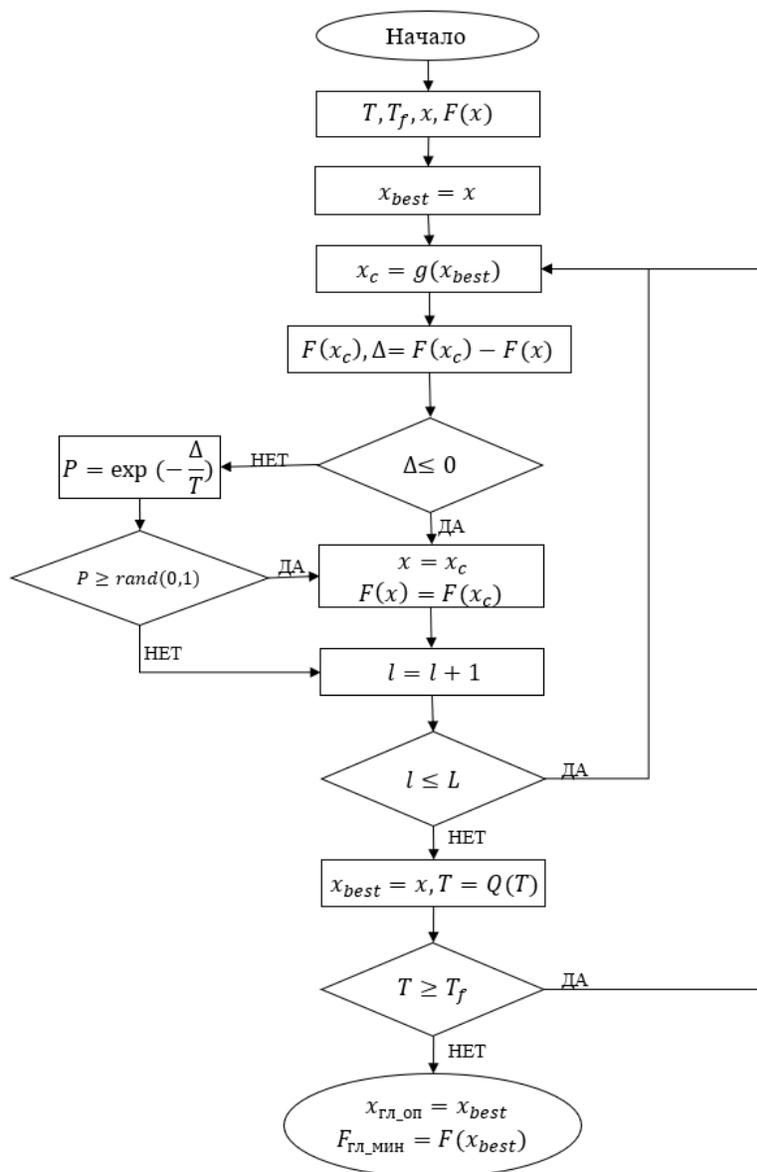


Рисунок 2 – Схема алгоритма имитации отжига
 Figure 2 – The classical scheme of the annealing simulation algorithm

Параметры алгоритма: T – температура, T_f – окончательная температура, x – текущее решение алгоритма, $F(x)$ – значение целевой функции для решения x , x_{best} – текущее лучшее решение после выполнения каждой цепи Маркова, x_c – соседнее решение, создаваемое на каждой итерации цепи Маркова, $g(x_{best})$ – механизм генерации соседнего решения x_c из x_{best} , $F(x_c)$ – значение целевой функции на соседнем решении x_c , Δ – разница значений целевой функции между соседним решением x_c и текущим решением x , $P = \exp(-\frac{\Delta}{T})$ – вероятность принятия худшего решения в случае $\Delta > 0$, $rand(0,1)$ – случайное вещественное число на интервале $(0,1)$, L – длина цепи Маркова, $Q(T)$ – функция понижения

температуры, $F(x_{best})$ – значение целевой функции на решении x_{best} , $x_{гл_оп}$ – глобальное оптимальное решение, $F_{гл_мин}$ – глобальный минимум целевой функции.

Алгоритм реализуется за 6 шагов.

Шаг 1: Задать начальную температуру T , конечную температуру T_f (условия для завершения алгоритма), начальное решение x и значения целевой функции на начальном решении $F(x)$

Шаг 2: Установка $x_{best} = x$

Шаг 3: Генерация $g(x_{best})$ соседнего решения x_c для решения x_{best} . Цепь Маркова порождает L соседних решений для решения x_{best} . Эти L значений сравниваются между собой на каждой итерации цепи Маркова. В результате получается новое решение, которое становится x_{best} для следующей цепи Маркова.

Шаг 4: Вычисление значения целевой функции $F(x_c)$ на соседнем решении x_c , которое было только что создано. Затем вычисляется разница значений целевой функции на соседнем решении и текущем решении $\Delta = F(x_c) - F(x)$.

Шаг 5:

Шаг 5.1: Если $\Delta \leq 0$, лучшим признается соседнее решение x_c . Текущее решение заменяется соседним решением, а значение целевой функции на текущем решении заменяется значением целевой функции на соседнем решении.

Шаг 5.2: Если $\Delta > 0$, вычисляется вероятность принятия худшего решения по формуле: $P = \exp(-\frac{\Delta}{T})$. Если $P \geq rand(0,1)$, где $rand(0,1)$ – случайное вещественное число в интервале $(0,1)$ с равномерным распределением, то соседнее решение принимается. Если $P < rand(0,1)$, то соседнее решение отклоняется и текущее решение остается неизменным.

Шаг 5.3: Установка $l = l + 1$ и проверка критерия завершения цепи Маркова. Если $l \leq L$, то возврат к шагу 3. В противном случае цепь Маркова завершается и переход к шагу 6.

Шаг 6: Инициализация нового текущего решения x , установка $x_{best} = x$. Генерация соседнего решения $g(x_{best})$: L соседних решений для решения x_{best} . Снижение температуры в соответствии с функциональной зависимостью $T = Q(T)$, сравнение текущей температуры T с конечной температурой T_f . Если $T \geq T_f$, то возврат к шагу 3. В противном случае алгоритм завершается, оптимальное решение найдено.

Настройка параметров алгоритма имитации отжига

При использовании алгоритма имитации отжига для решения конкретных исследовательских задач необходимо настроить его параметры, поскольку значения этих параметров будут различаться для разных задач.

1) Начальная температура

Температура в алгоритме имитации отжига – это параметр, контролирующий скорость выполнения алгоритма и вероятность принятия худшего решения. Обычно это значение высокое, так что на начальных этапах вероятность принятия худшего решения практически равна единице. Есть два способа определить начальную температуру:

Вариант 1. Для определения начальной температуры применяется метод прогнозирования. Сначала выбирается очень высокая начальная температура. Затем случайным образом генерируется несколько соседних решений для начального состояния.

Выбираются положительные переходы, при которых значение целевой функции для соседнего решения больше, чем для текущего. Затем вычисляется среднее значение вероятности принятия худшего решения для положительных переходов. На начальном этапе, чтобы избежать застревания в локальных минимумах, вероятность принятия худшего решения должна быть высокой (0,99). Среднее значение вероятности принятия худшего решения должно быть приблизительно равно 0,99. Если оно меньше 0,99, то необходимо увеличить начальную температуру, в противном случае (больше 0,99), нужно снизить начальную температуру до уровня, когда среднее значение вероятности принятия худшего решения не станет равным 0,99.

Вариант 2. Случайно выполняются несколько переходов из начального решения. Выбираются положительные переходы. Начальная температура равна среднему значению всех температур T_i в положительных переходах. Каждая температура в положительных переходах вычисляется по формуле:

$$T_i = \frac{-\Delta_i}{\ln(P_0)},$$

где Δ_i – разница между целевой функцией при начальном решении и целевой функцией на i -м соседнем решении. $P_0 \in (0,9; 0,99)$, тогда начальная температура выражается по формуле:

$$T = \sum_1^n \frac{T_i}{n}.$$

2) Окончательная температура

Окончательная температура – это условие останова алгоритма. Алгоритм имитации отжига останавливается, когда значение температуры меньше окончательной температуры (должна быть приблизительно равна нулю). Если на очередной итерации алгоритма при уменьшении окончательной температуры целевая функция не уменьшается, то решение найдено. Когда температура текущего состояния приближается к значению окончательной температуры, вероятность принятия худшего решения стремится к нулю. Таким образом, алгоритм сойдется к глобально оптимальной точке.

3) Длина цепи Маркова

Этот параметр задает число соседних решений для текущего лучшего решения x_{best} , которое необходимо генерировать и проверять. Это внутренний цикл алгоритма имитации отжига. Он соответствует числу переходов атомов металла с одинаковой температурой при физическом отжиге металла. Чем больше это число, тем лучше получается оптимальное решение, но тем больше вычислительных ресурсов требуется для реализации алгоритма. Длина цепи Маркова зависит от количества переменных задачи и размерности задачи и выбирается исследователем, исходя из опыта, после нескольких запусков алгоритма.

4) Схема понижения температуры

На практике применяется несколько схем охлаждения:

– схема Больцмана:

$$T(k) = \frac{T_0}{\ln(k+1)};$$

– схема Коши:

$$T(k) = \frac{T_0}{k};$$

– схема тушения:

$$T(k+1) = \alpha T(k), \alpha \in (0,77; 0,99);$$

– линейная схема:

$$T(k) = T_0 - (k - 1)\beta;$$

– экспоненциальная схема:

$$T(k) = \frac{T_0}{\exp(k-1)},$$

где k – номер итерации внешнего цикла, T_0 – начальная температура.

На Рисунке 3 приведены графики различных схем охлаждения. Число итераций для всех экспериментов равно 260. Из графиков видно, что экспоненциальная схема приводит к самому быстрому понижению температуры, а больцмановская схема приводит к самому медленному понижению температуры.

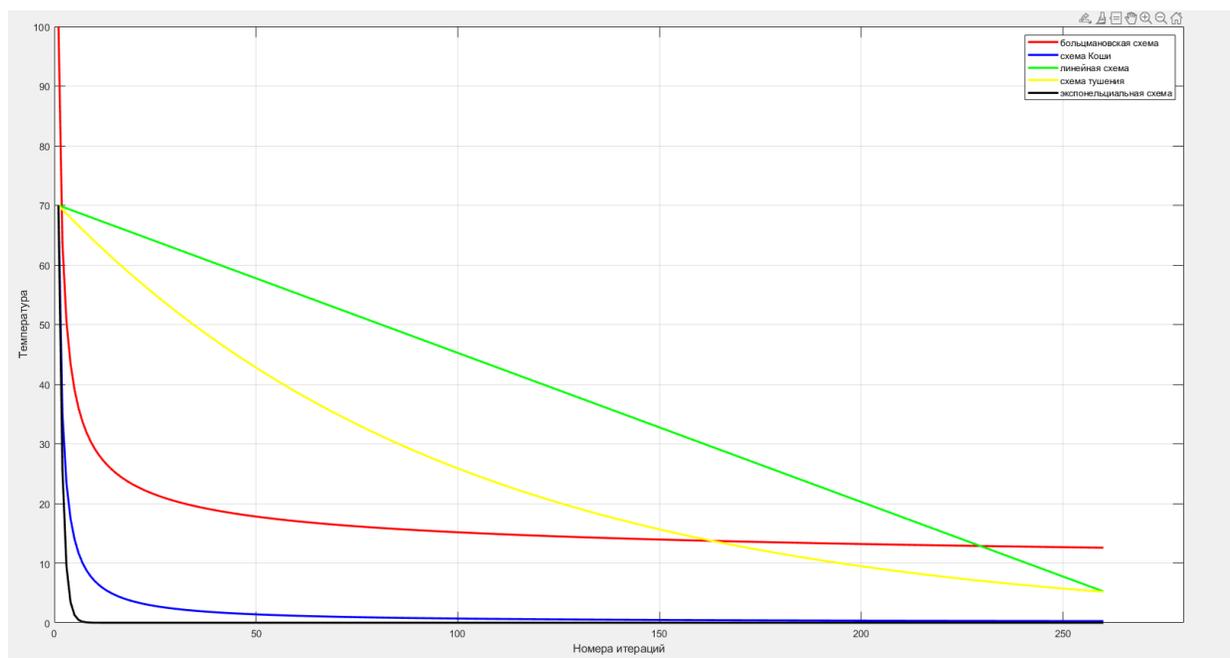


Рисунок 3 – Графики различных схем охлаждения
 Figure 3 – Graphs of various cooling schemes

5) Механизм генерации соседних решений

Для применения метода отжига в задаче оптимизации непрерывной функции необходимо выбрать механизм генерации соседних решений для обеспечения сходимости алгоритма к глобальному оптимальному решению. На практике применяется несколько способов:

а) механизм вращения

$$x_{k+1} = x_k + \alpha \frac{1}{n\|x_k\|_2} x_k R_r,$$

где x – вектор, координаты которого являются переменными целевой функции, α – параметр вращения, который уменьшается после каждой итерации по формуле:

$$\alpha_{k+1} = 0,99\alpha_k,$$

начальное значение α выбирается, исходя из специфики решаемой задачи, n – количество переменных целевой функции, $\|x\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}$ – Эвклидова норма вектора x , координатами которого являются x_i , R_r – случайная матрица, элементы которой равномерно распределены в диапазоне $[-1;1]$. Ниже приведен пример матрицы R_r с $n = 4$.

$$R_r = \begin{bmatrix} 0,6294 & 0,2647 & 0,9150 & 0,9143 \\ 0,8116 & -0,8049 & 0,9298 & -0,0292 \\ -0,7460 & -0,4430 & -0,6848 & 0,6006 \\ 0,8268 & 0,0938 & 0,9412 & -0,7162 \end{bmatrix}.$$

Все координаты вектора обновляют свое значение на каждой итерации цепи Маркова. Коэффициент α уменьшается для каждой цепи Маркова. Это означает, что шаг поиска в пространстве соседних решений будет постепенно уменьшаться по мере завершения алгоритма.

б) механизм оси

$$x_{k+1} = x_k + \delta x_k R_a,$$

где δ – параметр оси, который уменьшается после каждой итерации по формуле: $\delta_{k+1} = 0,99\delta_k$. Его начальное значение выбирается, исходя из специфики решаемой задачи. R_a – случайная диагональная матрица, элементы которой подчиняются распределению Гаусса со средним значением, равным нулю и среднеквадратическим отклонением, равным единице. Только одна случайная позиция имеет ненулевое значение. Ниже приведен пример случайной матрицы R_a с $n = 4$.

$$R_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1,2075 \end{bmatrix}.$$

Функция плотности распределения Гаусса задается следующим образом:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2},$$

где μ – среднее значение, σ – среднеквадратическое отклонение.

В данном случае только одна координата вектора изменяет свое значение на новой итерации цепи Маркова. Коэффициент δ уменьшается перед началом каждой новой цепи Маркова, следовательно, шаг поиска в пространстве соседних решений будет постепенно уменьшаться.

Оба способа в начале работы алгоритма предполагают установку достаточно больших значений параметров, чтобы алгоритм мог исследовать решения с большими шагами и предварительно проверять все пространство решений. По мере приближения к оптимальному решению они постепенно уменьшаются до 0. В этом случае шаг алгоритма значительно уменьшается, что позволяет алгоритму избежать выхода из глобального минимума.

На Рисунках 4, 5 представлены результаты сгенерированных соседних решений для текущего лучшего решения $x_k = (5000, 5000)$ с параметрами $\alpha = 1000$, $\delta = 1$.

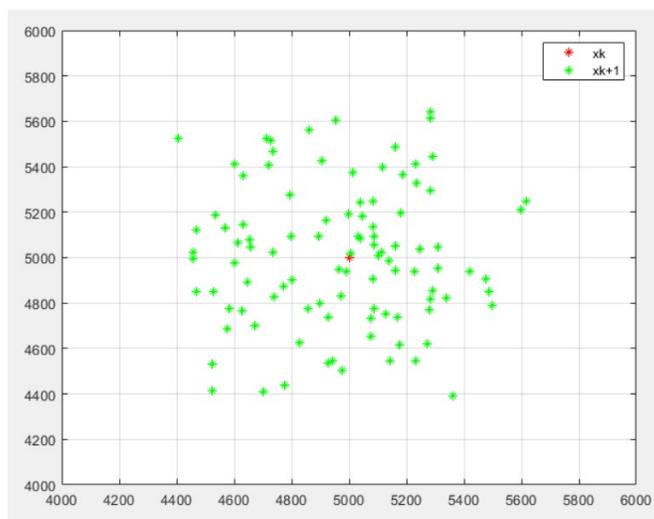


Рисунок 4 – Соседние решения механизма вращения
 Figure 4 – Adjacent solutions of the rotation mechanism

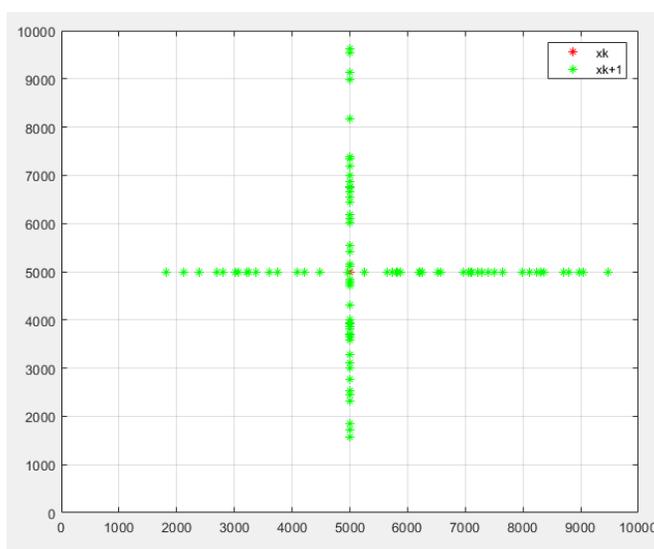


Рисунок 5 – Соседние решения механизма оси
 Figure 5 – Adjacent solutions of the axis mechanism

Для применения метода отжига в любой оптимизационной задаче необходимо определить все вышеперечисленные параметры.

Применение метода имитации отжига в задаче диагностики электрических дефектов аналоговых РЭУ

Для исследования возможности применения метода отжига при диагностировании электрических дефектов аналоговых РЭС в среде схемотехнического моделирования NI Multisim была разработана схема РЭУ для исправного состояния, представленная на Рисунке 6. Задача состоит в нахождении дефектных радиоэлементов и численных значений их параметров при работе схемы [12].

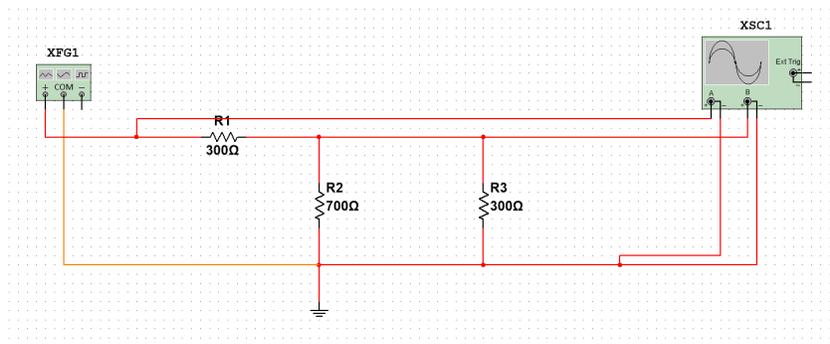


Рисунок 6 – Модель электрической схемы в среде NI Multisim
Figure 6 – A model of an electrical circuit in a NI Multisim environment

В исправном состоянии элементы схемы имеют идеальные значения параметров. Если входное напряжение задается гармоническим колебанием $U_{вх}(t) = 10\sin(2\pi t)$ (Рисунок 7, красный график), то выходное напряжение идеальной линейной схемы будет иметь те же фазу и частоту, но меньшую амплитуду сигнала (Рисунок 7, синий график).

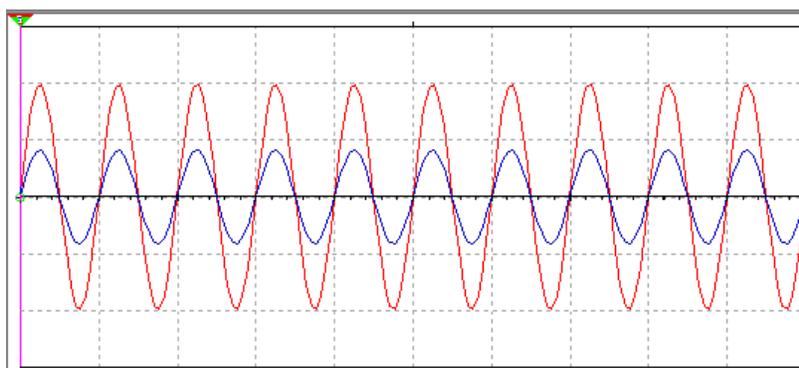


Рисунок 7 – Графики входного $U_{вх}(t)$ и выходного $U_{вых}(t)$ напряжения исправного РЭУ
Figure 7 – Graphs of the input voltage $U_{in}(t)$ and output voltage $U_{out}(t)$ of a serviceable electronic device

Далее для проведения исследования из графика выбираются значения выходного напряжения исправной схемы РЭУ с шагом 0,05 мс. Результаты представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Выходное напряжение исправной схемы РЭУ
Table 2 – Output voltage of a serviceable circuit of an electronic device

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7
$t, \text{мс}$	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
$U_{\text{вых_расч}}, \text{В}$	0	1,272	2,420	3,331	3,916	4,117	3,916
№ п/п	8	9	10	11	12	13	14
$t, \text{мс}$	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
$U_{\text{вых_расч}}, \text{В}$	3,331	2,420	1,272	0	-1,272	-2,420	-3,331
№ п/п	15	16	17	18	19	20	21
$t, \text{мс}$	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$U_{\text{вых_расч}}, \text{В}$	-3,916	-4,117	-3,916	-3,331	-2,420	-1,272	0

В эксплуатируемых электрических схемах РЭУ, для которых характерен разброс параметров электрорадиоэлементов (ЭРЭ), значения напряжения на выходе устройства будут отличаться от идеальных. Инженеру-исследователю необходимо выявить такие элементы и определить значения их параметров, поскольку они могут иметь дефект и влиять на режимы работы устройства в целом и его эксплуатационные характеристики. В Таблице 3 приведены результаты измерений выходного напряжения реальной электрической схемы РЭУ с учетом разбросов параметров ЭРЭ, смоделированных в среде NI Multisim.

Таблица 3 – Выходное напряжение реальной схемы РЭУ
Table 3 – Output voltage of the real circuit of an electronic device

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7
t , мс	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30
$U_{\text{вых_ошиб}}$, В	0	2,093	3,982	5,480	6,443	6,774	6,443
№ п/п	8	9	10	11	12	13	14
t , мс	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
$U_{\text{вых_ошиб}}$, В	5,480	3,982	2,093	0	-2,093	-3,981	-5,480
№ п/п	15	16	17	18	19	20	21
t , мс	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
$U_{\text{вых_ошиб}}$, В	-6,442	-6,774	-6,442	-5,480	-3,985	-2,093	0

Проанализировав результаты измерений, представленные в Таблицах 2 и 3, можно сделать вывод о существенной разнице между значениями выходного напряжения схемы для исправного (идеального) состояния и реального состояния, для которого характерен разброс параметров ЭРЭ (Рисунок 8). Когда значение параметра ЭРЭ приближается к пороговому (диагностируется дефект), график выходного напряжения электрической схемы РЭУ приближается к графику выходного напряжения реальной схемы. Далее необходимо определить целевую функцию и начальное решение для алгоритма.

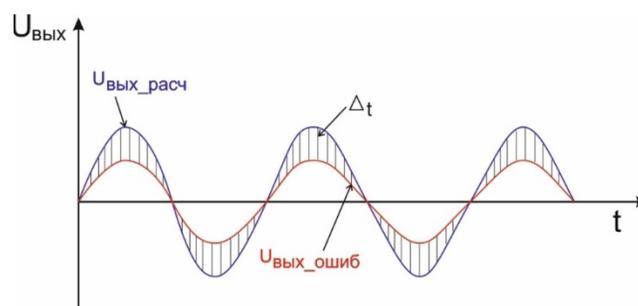


Рисунок 8 – Графики выходного напряжения схемы РЭУ для идеального состояния и состояния с разбросами параметров (дефектами) ЭРЭ

Figure 8 – Graphs of the output voltage of the electronic device circuit for an ideal state and a state with parameter variations (defects) of electric radio elements

В представленном исследовании было решено определить целевую функцию как разницу между расчетным значением выходного напряжения схемы $U_{\text{вых_расч}}$ и значением выходного напряжения $U_{\text{вых_ошиб}}$ реальной схемы РЭУ. Теоретически глобальный минимум целевой функции равен нулю. Алгоритм обеспечивает схождение целевой функции к

значению, приближенно равному нулю. Это значение можно считать глобальным минимумом целевой функции.

Обозначим через Δ_t разницу между значениями напряжения двух графиков в момент времени t . Целевая функция будет определяться по формуле:

$$F(x) = \sum_{t=0}^T \Delta_t = \sum_{t=0}^T |U_{\text{вых_расч}}(x) - U_{\text{вых_ошиб}}|,$$

где $x = (R_1, R_2, R_3)$, T – время.

В динамике зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых_расч}}$ от сопротивления резисторов определяется по формуле:

$$U_{\text{вых_расч}}(x) = U_{\text{вх}}(t) \left(1 - \frac{R_1}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}}\right),$$

где $U_{\text{вх}}(t) = 10 \sin(2\pi t)$ – входное напряжение, $U_{\text{вых_ошиб}}$ – выходное напряжение реальной схемы РЭУ согласно Таблице 3.

Задача диагностики электрических дефектов аналоговых РЭУ преобразуется в задачу минимизации непрерывной целевой функции $F(x)$. Необходимо найти вектор $x^* = (R_1, R_2, R_3)$ такой, что:

$$F(x^*) \leq F(x), \forall x \in S, S \subset R^n.$$

В качестве начального выбирается решение, в котором ЭРЭ имеют идеальные значения параметров (исправное состояние). Далее настраивают параметры алгоритма имитации отжига:

1) начальная температура T_0 :

$T_0 = 1700$ в случае применения механизма вращения;

$T_0 = 1300$ в случае применения механизма оси;

2) конечная температура T_f :

$T_f = 10^{-20}$ и для механизма вращения, и для механизма оси;

3) длина цепи Маркова L :

Эмпирически после нескольких запусков алгоритма выбирается значение $L = 100$;

4) схема понижения температуры:

Для сравнения двух механизмов генерации соседних решений сначала используется схема тушения, затем все схемы;

5) механизм генерации соседних решений:

– механизм вращения: $\alpha = 1000$;

– механизм оси: $\delta = 1$.

В случае применения схемы алгоритма имитации отжига, приведенной на Рисунке 2 (классическая схема), были получены следующие результаты:

– при механизме вращения глобальный минимум $F_{\min}(x) = 2,7816 \times 10^{-5}$;

– при механизме оси глобальный минимум $F_{\min}(x) = 1,4776 \times 10^{-5}$.

На Рисунке 9 показан процесс сходимости к глобальному минимуму целевой функции для механизмов вращения и оси, при использовании для снижения температуры схемы тушения. График синего цвета соответствует механизму вращения, график красного цвета – механизму оси. Оба механизма обеспечивают схождение целевой функции к глобальному минимуму.

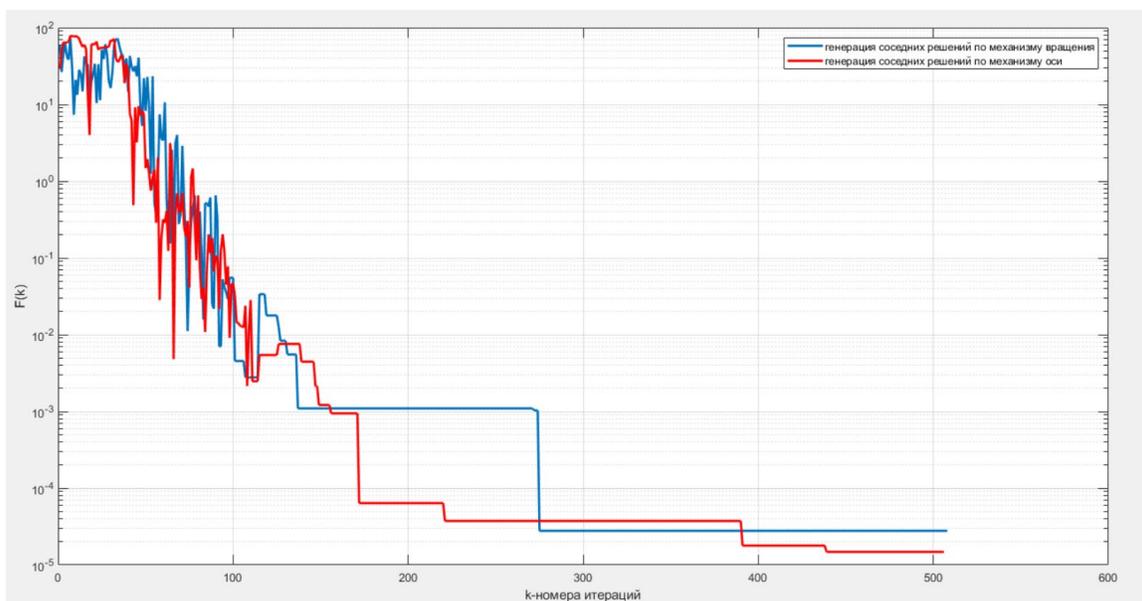


Рисунок 9 – Процесс сходимости целевой функции
 Figure 9 – The convergence process of the objective function

В ходе исследования было выявлено, что при каждом запуске алгоритма получаются разные глобальные оптимальные решения, при этом глобальный минимум целевой функции остается неизменным. Это происходит из-за того, что значения сопротивлений резисторов увеличиваются или уменьшаются с одинаковым коэффициентом, а выходное напряжение не изменяется. На основе проведенных исследований пришли к выводу, что данная схема алгоритма имитации отжига не позволяет диагностировать электрические дефекты в аналоговых схемах РЭУ и нуждается в модификации и доработке.

Гипотеза Ли [11] доказала: вероятность того, что все элементы в устройстве дефектны одновременно, крайне низкая. Поэтому в исследовании рассматривался случай, когда в РЭУ дефектен только один ЭРЭ. Был установлен допуск для каждого ЭРЭ схемы, и если значение параметра элемента находится в своем допуске, то этот элемент считается исправным: $R_1 \in [290, 310]$, $R_2 \in [690, 710]$, $R_3 \in [290, 310]$, (идеальные значения сопротивления соответственно составляют $R_1 = 300$, $R_2 = 700$, $R_3 = 300$). Ввиду того, что только один элемент схемы является дефектным, вектор $x = (R_1, R_2, R_3)$, созданный случайным образом, должен удовлетворять условию: одна координата находится вне допуска, все остальные случаи исключаются. Была разработана модификация алгоритма имитации отжига, позволяющая диагностировать электрические дефекты схем РЭУ, представленная на Рисунке 10.

В проводимом эксперименте было решено, что дефектом обладает резистор R_2 . Механизм оси – это механизм генерации соседних решений, при котором новое решение отличается только одной координатой от предыдущего решения. Следовательно, если после завершения первой цепи Маркова текущее лучшее решение $x_{best} = (R_1, R_2, R_3)$ имеет координату R_3 , выходящую за пределы допуска, то в последующих итерациях каждой цепи Маркова все соседние решения будут иметь координату R_3 вне допуска, а R_1 и R_2 всегда будут оставаться в пределах допуска. Таким образом, по завершении алгоритма R_2 не

сможет приблизиться к своему ошибочному значению. Это означает, что механизм оси не гарантирует возможности обнаружить дефект в устройстве.

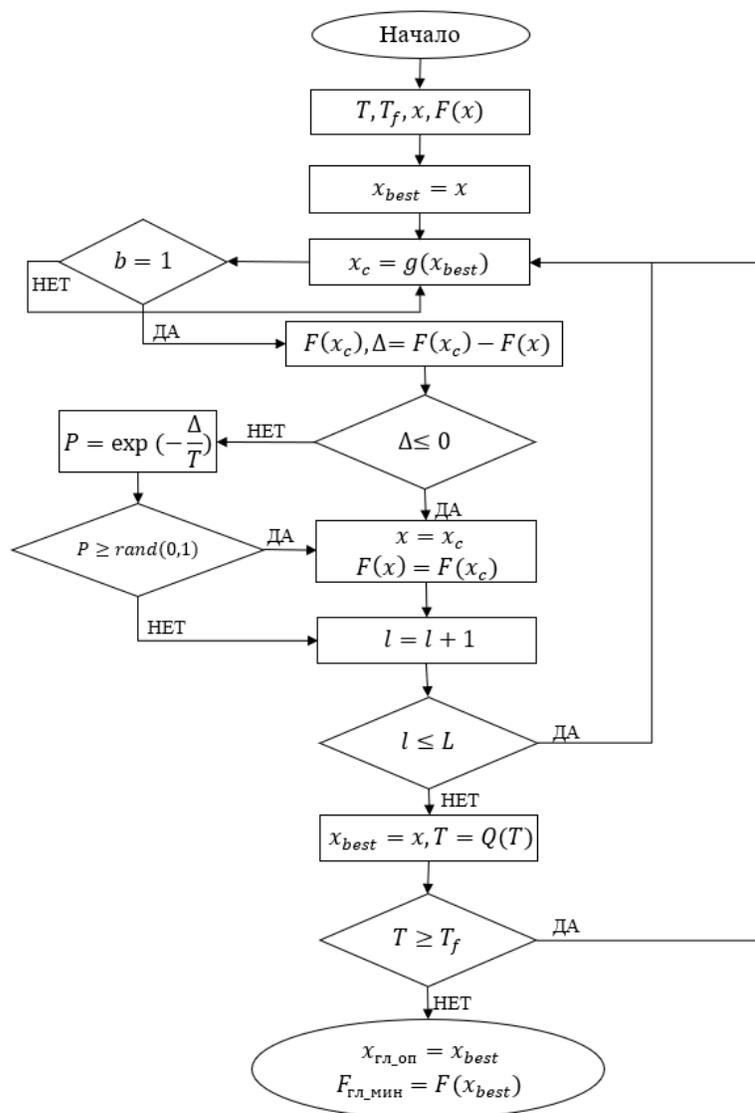


Рисунок 10 – Модифицированная схема алгоритма имитации отжига
 Figure 10 – Modified scheme of the annealing simulation algorithm

Используя механизм вращения, механизм снижения температуры в виде схемы тушения и начальную температуру $T_0 = 700$, получили процесс сходимости целевой функции к глобальному минимуму, как показано на Рисунке 11. На Рисунке 12 показаны результаты диагностики электрических дефектов алгоритмом отжига при схеме тушения. Значения сопротивлений равны $R_1 = 102, R_2 = 707, R_8 = 308$. Поскольку R_1 выходит за пределы допуска, дефектным элементом является R_1 и его сопротивление составляет $R_1 = 102 \pm 10$ Ом. Глобальный минимум целевой функции составляет $2,2003 \times 10^{-5}$ после выполнения 478 итераций цепи Маркова.

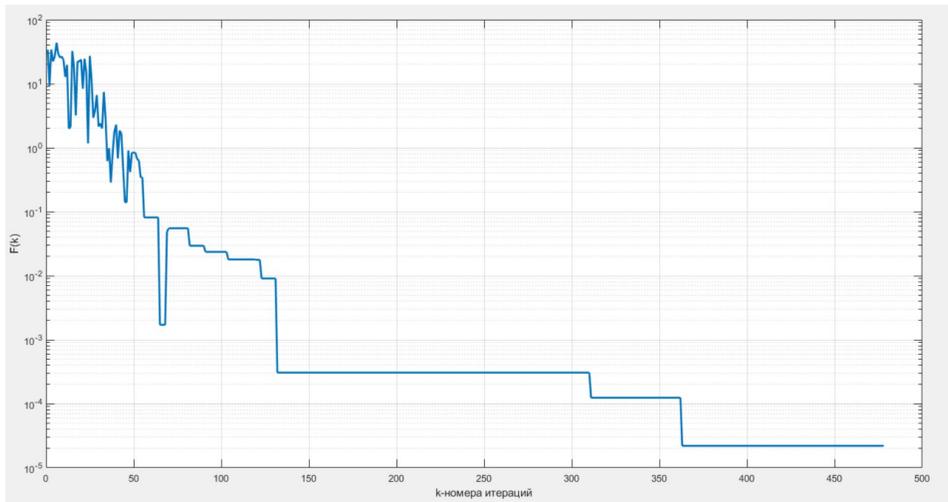


Рисунок 11 – Процесс сходимости целевой функции при использовании схемы тушения
 Figure 11 – The convergence process of the objective function when using the quenching scheme

```

При схеме тушения:
Число итераций: k= 478
Значение глобального минимума целевой функции: F_min= 2.2003e-05
Значение оптимального решения: x_best= 102.1891      707.1661      308.0899
fx >>
Workspace
Name ^ Value
alpha 8.1964
b      1
    
```

Рисунок 12 – Результат диагностирования электрических дефектов алгоритмом отжига при схеме тушения
 Figure 12 – The result of the diagnosis of electrical defects by the annealing algorithm in the extinguishing scheme

Используя экспоненциальную схему, получаем процесс сходимости алгоритма, как показано на Рисунке 13.

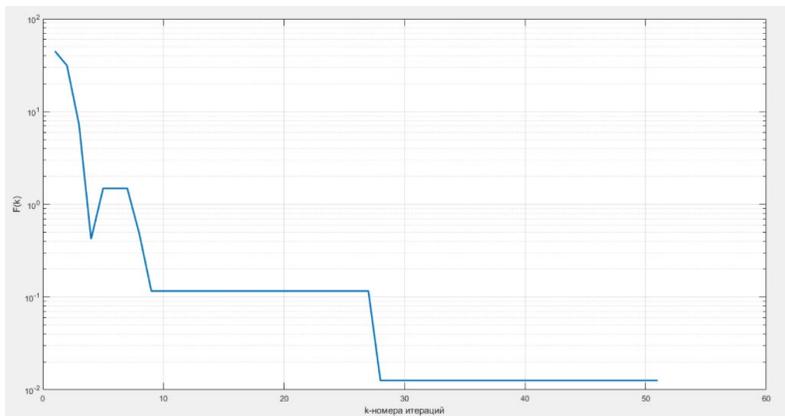


Рисунок 13 – Процесс сходимости целевой функции при экспоненциальной схеме
 Figure 13 – The convergence process of the objective function in an exponential scheme

На Рисунке 14 приведены результаты работы модифицированного алгоритма имитации отжига для задачи диагностики электрических дефектов ЭРЭ аналоговых схем РЭУ. Дефектным элементом является резистор R_1 , значение его сопротивления составляет $R_1 = 101 \pm 10$ Ом. Глобальный минимум целевой функции равен 0,0126 после выполнения 51 итерации цепи Маркова.

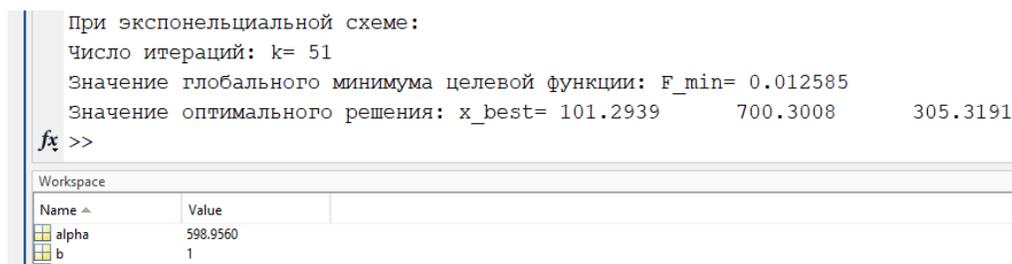


Рисунок 14 – Результат диагностики электрических дефектов аналоговых схем РЭУ алгоритмом имитации отжига при экспоненциальной схеме

Figure 14 – The result of the diagnosis of electrical defects in analog circuits of radioelectronic devices using an algorithm for simulated annealing with an exponential circuit

С использованием механизма вращения обе схемы охлаждения диагностируют, что $R_1 \approx 100 \pm 10$ Ом является сопротивлением дефектного резистора.

В ходе исследования также было выявлено, что применение для снижения температуры Больцмановской схемы и схемы Коши требует большого числа итераций алгоритма, что нерационально с точки зрения затрат времени и вычислительных ресурсов ЭВМ. В свою очередь, линейная схема алгоритма не позволяет алгоритму сойтись к глобальному оптимальному решению.

Заключение

В статье приведены результаты исследования по диагностированию электрических дефектов аналоговых схем РЭУ на основе модифицированного алгоритма имитации отжига.

В классической реализации алгоритма заложена вероятность принятия худшего решения для того, чтобы «выскакивать» из локальных оптимумов и искать лучшие решения в других областях пространства поиска. Это позволяет проводить более широкий поиск глобального оптимального решения, т. е. на начальных стадиях работы алгоритма (когда значение температуры весьма высоко) худшее решение может быть принято, но на следующих итерациях (когда значение температуры уменьшается) вероятность принятия такого решения стремится к нулю.

Проанализированы сложности применения классической схемы алгоритма для задач диагностики радиоэлектронных устройств и, как следствие, невозможность однозначной идентификации дефектов ЭРЭ. Предложена доработанная схема алгоритма, позволяющая учесть выявленные недостатки традиционной схемы и решить оптимизационную задачу по поиску глобального экстремума целевой функции. При этом важно правильно настроить его параметры и исследовать все возможные варианты генерации соседних решений, что позволит сделать работу алгоритма более эффективной и сократить время на нахождение оптимального решения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. 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>
2. Zhang D., Liu Y., M'Hallah R., Leung S.C.H. A simulated annealing with a new neighborhood structure base 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>
3. Geng X., Chen Z., Yang W., Shi D., Zhao K. Solving the traveling salesman problem based on an adaptive simulated annealing algorithm with greedy search. *Applied Soft Computing*. 2011;11(4):3680–3689. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.01.039>
4. Lo C.-C., Hsu C.-C. An annealing framework with learning memory. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*. 1998;28(5):648–661. <https://doi.org/10.1109/3468.709611>
5. Černý V. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 1985;45(1):41–51. <https://doi.org/10.1007/BF00940812>
6. Eglese R.W. Simulated Annealing: A tool for Operational Research. *European Journal of Operational Research*. 1990;46(3):271–281. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90001-R](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90001-R)
7. Metropolis N., Rosenbluth A.W., Rosenbluth M.N., Teller A.H., Teller E. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *Journal of Chemical Physics*. 1953;21(6):1087–1092. <https://doi.org/10.1063/1.1699114>
8. Gendreau M., Hertz A., Laporte G. A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem. *Management Science*. 1994;40(10):1276–1290. <https://doi.org/10.1287/mnsc.40.10.1276>
9. Onwubolu G., Davendra D. Scheduling flow shops using differential evolution algorithm. *European Journal of Operational Research*. 2006;171(2):674–692. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.08.043>
10. Baraglia R., Hidalgo J.I., Perego R. A hybrid heuristic for the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2001;5(6):613–622. <https://doi.org/10.1109/4235.974843>
11. Glover F. Artificial Intelligence, Heuristic Frameworks and Tabu Search. *Managerial and Decision Economics*. 1990;11(5):365–375. <https://doi.org/10.1002/mde.4090110512>
12. Бэндлер Дж.У., Салама А.Э. Диагностика неисправностей в аналоговых цепях. *Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике*. 1985;73(8):35–87 (На англ.).
Bandler J.W., Salama A.E. Troubleshooting in analog circuits. *Proceedings of the Institute of Electrical and Radio Electronics Engineers*. 1985;73(8):35–87.

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 – **Saygid U. Uvaysov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Production of Radioelectronic Devices of the Institute of Radio Electronics and Computer Science, MIREA – Russian

Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.
e-mail: uvajsov@mirea.ru
ORCID: [0000-0003-1943-6819](https://orcid.org/0000-0003-1943-6819)

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)

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

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

Фам Суан Хань, аспирант кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Института радиоэлектроники и информатики, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Российская Федерация.

Technological University, Moscow, the Russian Federation.

Victoria V. Chernoverskaya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor 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.

Nguyen Duc Hai, graduate student 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.

Vo The Hai, graduate student 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.

Pham Xuan Hanh, graduate student 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.

Статья поступила в редакцию 24.10.2024; одобрена после рецензирования 14.11.2024; принята к публикации 25.11.2024.

The article was submitted 24.10.2024; approved after reviewing 14.11.2024; accepted for publication 25.11.2024.