

Так же в диапазоне 140 В – 150 В наблюдается переходный цвет, бело-желтый и бело-оранжевый. Такой переход происходит из-за частичного горения натрия.

Далее было поставлено более высокое напряжение 170 В – 190 В при высоких температурных показателях наблюдалось стабильное ярко-рыжее горение, при котором может произойти плавление электрода.

Так же во время проведения эксперимента был проснят диапазон температуры, при которой происходит стабильное горение. В диапазоне 29-30 С при всех напряжениях в диапазоне 100 В – 190В было установлено стабильное горение только при 100 В и в диапазоне высоких напряжениях. Так называемого «переходного» пламени не наблюдалось.

«Переходное» пламя стало наблюдаться в диапазоне с 38,22 и выше температурах. Так же бело-желтый и бело-рыжий цвет пламени наблюдается только начиная с напряжения 140 В – 190 В. Рыжий цвет в «переходном» пламени сопутствует горению титана, из которого сделан катод.

В заключении следует отметить, что высокотемпературная плазма в наши дни очень мало изучена. Параметрические зависимости относительно горения плазмы практически не представлены ни в одной научной статье. Для более понятного графика зависимости требуется большое количество точек. В ходе дальнейших экспериментов будет уточнен диапазон промежуточных точек.

Помимо уточнения диапазона промежуточных точек будут приготовлены растворы разных концентраций электролита: 1%, 2.5%, 7,5% и 10%. Для данных растворов будет проснята проводимость на кондуктометре. Далее будут проведены ряды экспериментов для получения параметрической зависимости и изображения ее на трехмерном графике для высокой наглядности.

В дальнейшем мы планируем изучить влияние цвета пламени на изменение структуры поверхности обрабатываемого материала, а также проснять диапазон цвета пламени, который происходит во время проведения ЭПО. Снятие диапазона цвета пламени планируется с помощью технического цифрового USB микроскопа, который позволяет в большом приближении с частотой кадров 3 сек. проснять изменения цвета пламени.

#### Литература.

1. Aliofkhae M., Rouhaghdam A. S., Gupta P. Nano-fabrication by cathodic plasma electrolysis // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 2011. Т. 36. № 3. С. 174–190.
2. Yerokhin A. L. и др. Plasma electrolysis for surface engineering. , 1999. 73–93 с.
3. T. Abdul Kareem & A. Anu Kaliani. Glow discharge plasma electrolysis for nanoparticles synthesis

### МЕТОД ИМИТАЦИИ ОТЖИГА В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ АНАЛОГОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Нгуен Д. Х., Фам С. Х., Увайсов С.У., Черновверская В.В.

РТУ МИРЭА

+7 (915) 998-75-04, duchai09011997@gmail.com

В статье рассмотрены результаты исследования по применению оптимизационного метода имитации отжига в задаче диагностики электрических параметров и идентификации неисправностей радиоэлектронных устройств.

Ключевые слова: оптимизация, метод отжига, моделирование температура, целевая функция, состояние, условие равновесия.

Method of simulated annealing in optimization problems. Nguyen D. H., Pham S. H., Uvaysov S.U., Chernoverskaya V.V. RTU MIREA

The article considers the results of a study on the application of the optimization method of simulated annealing in the task of diagnosing electrical parameters and identifying malfunctions of radioelectronic devices.

Keywords: optimization, annealing method, temperature modeling, objective function, state, equilibrium condition.

#### Введение

Метод имитации отжига (SA), известный, как алгоритм Метрополиса, относится к стохастическим оптимизационным алгоритмам и позволяет найти глобальный экстремум исследуемой функции, которая в общем случае не является гладкой. Он применяется в случаях, где невозможно использовать другие оптимизационные методы (например, методы спуска) из-за большой вероятности «застревания» решения в локальном экстремуме. Метод имитации отжига получил свое название, исходя

из аналогии с физическим процессом отжига металла, при котором происходит его нагревание и контролируемое охлаждение. При повышении температуры идет процесс интенсивного поглощения, молекулы материала потребляют большое количество энергии нагрева, что позволяет им свободно перемещаться. Затем запускается процесс медленного охлаждения, молекулы постепенно лишаются полученной энергии, что дает возможность сформировать кристаллическую структуру, более стабильную, чем исходная. Идея использовать имитацию процесса отжига металла при решении оптимизационных задач была предложена в 1983 году С. Киркпатриком, К.Д. Гелаттом и М.П. Векк (решение задачи размещения и задачи глобальной маршрутизации). Данная статья посвящена вопросам применения метода имитации отжига в задаче диагностики неисправностей аналоговых схем радиоэлектронных устройств (РЭУ) и нахождению неисправных элементов по значениям их параметров.

### Постановка проблемы

Для экспериментальной проверки возможности применения метода имитации отжига в задаче диагностики неисправностей РЭУ в среде NI Multisim была разработана аналоговая схема усилителя, представленная на рис. 1.

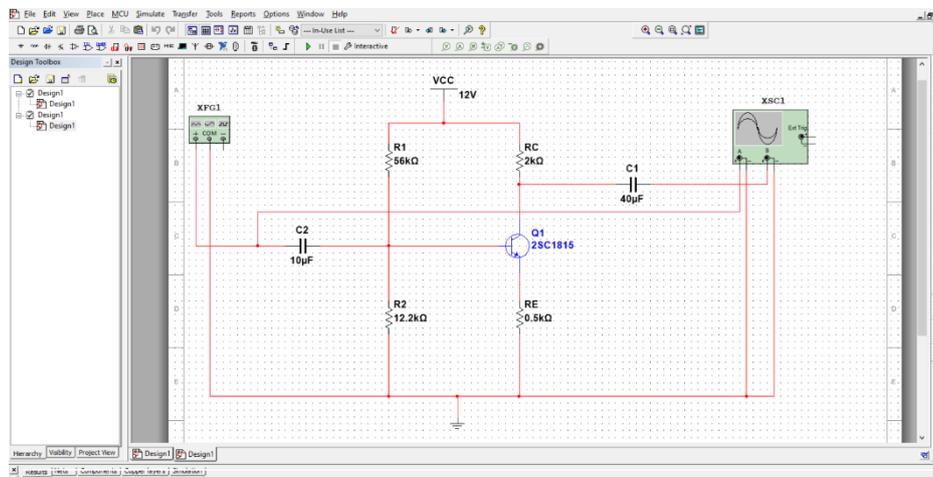


Рисунок 1 – Модель усилителя, созданного в среде NI Multisim

В ходе схемотехнического моделирования была получена зависимость выходного напряжения от входного напряжения усилителя.

Задача состояла в определении численных значений параметров неисправных радиоэлементов усилителя.

Метод имитации отжига относится к задачам нахождения глобального минимума целевой функции (рис. 2). Поскольку любую оптимизационную задачу путем эквивалентных математических преобразований можно преобразовать к задаче на поиск минимума, то данный метод нашел широкое применение в решении различных производственных, организационных и экономических задач.

Здесь  $F(x)$  – целевая функция,  $x \in X$

где  $x$  – текущее состояние системы,

$X$  – множество всех состояний.

Процесс поиска оптимального решения показан на рис. 2.

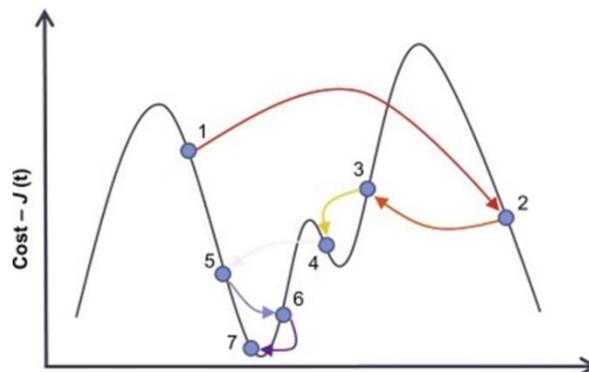


Рисунок 2 – Процесс поиска оптимального решения

В начальный момент времени энергия системы велика из-за больших значений параметра  $T$  и поиск осуществляется во всей области существования целевой функции  $F(x)$ . Шаг приближения к оптимальному решению на начальном этапе (точки 1,2,3) тоже большой, а численные значения целевой функции могут существенно отличаться. По мере снижения параметра  $T$  («остывания» системы) поиск решения сужается и осуществляется в ограниченной области существования целевой функции (точки 4,5,6). На заключительном этапе работы метода область поиска находится в окрестности некоторой текущей точки, характеризующейся самым низким значением параметра  $T$ . Если переход в очередную точку не дает значительного изменения целевой функции и не превышает заранее заданной погрешности вычисления, оптимальное решение считается найденным и алгоритм останавливается (точка 7).

На рисунке 3 представлена блок-схема алгоритма метода имитации отжига при диагностике неисправностей радиоэлектронных устройств.

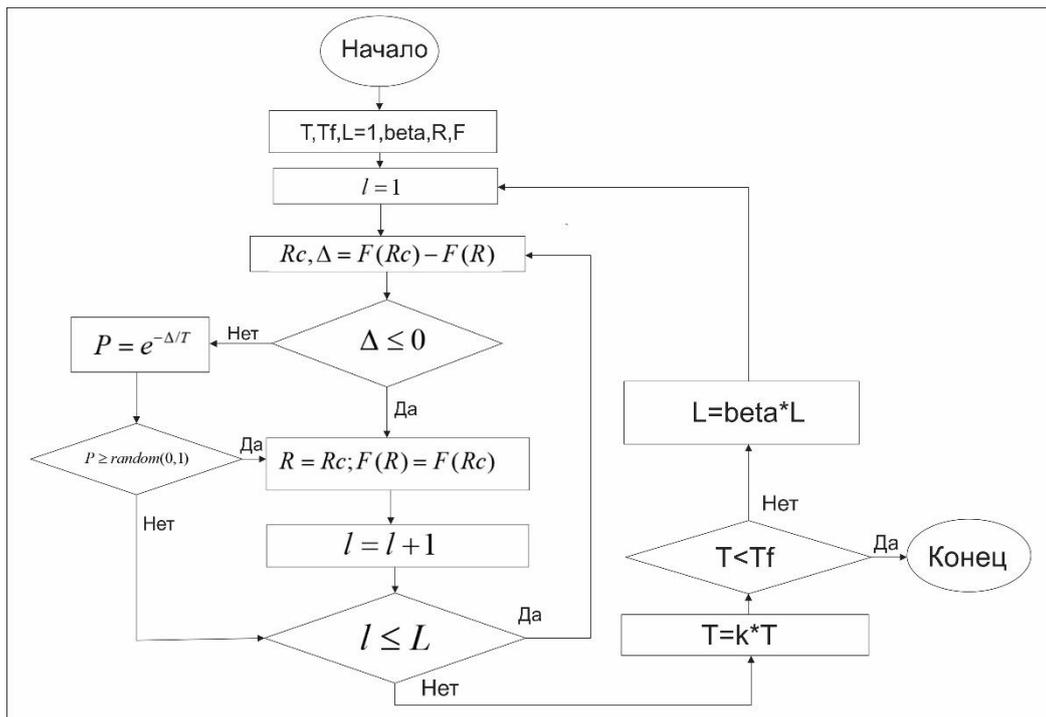


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма метода отжига

Алгоритм метода имитации отжига включает 6 шагов.

Шаг 1: Случайным образом генерируется начальное значение параметра  $T_0$ . В методе с этим параметром ассоциируется не реальная температура технологического процесса, а некоторый управляющий параметр, который может характеризовать, например, скорость выполнения алгоритма или вероятность перехода в соседнее состояние (причем переход может осуществляться как в направлении улучшения значения целевой функции, так и в сторону его ухудшения) и др. Далее генерируется терминальное значение параметра  $T_f$ , условие равновесия на первой итерации  $L_1$  внутреннего цикла, коэффициент вероятности перехода в новое состояние с худшим значением целевой функции  $\beta$ . В данном исследовании начальное состояние системы – это начальные значения параметров радиоэлементов  $R_0$ , для которого рассчитывается значение целевой функции  $F_0$ .

Шаг 2: Генерируется константа счета первой итерации внутреннего цикла  $l=1$ .

Шаг 3: Генерируется пространство соседних состояний в окрестности текущего состояния.

Шаг 4: В пространстве соседних состояний случайным образом выбирается очередное состояние, которое назначается текущим. Рассчитывается значение целевой функции в текущем состоянии и разница предыдущего и текущего значения целевой функции. Если текущее значение целевой функции меньше или равно предыдущему значению, то новое состояние назначается текущим, и алгоритм повторяется. Если наоборот, текущее значение целевой функции хуже предыдущего, то

переход в новое состояние осуществляется с учетом вероятности такого перехода, которая определяется по формуле:

$$P = \exp(-\Delta F_i / T_i)$$

При этом, если вероятность больше случайного числа, лежащего в интервале (0...1), то переход в новое состояние разрешается, в противном случае переход запрещен и текущее состояние остается прежним.

Шаг 5: Инкремент константы счета  $l$  внутреннего цикла. Если константа счета  $l$  меньше или равна условию равновесия  $L$ , то осуществляется возврат к шагу 4, в противном случае - переход к шагу 6.

Шаг 6: Снижение текущего значения параметра  $T$  по заранее определенной схеме. Если  $T > T_f$  то с учетом вероятности перехода вернуться к шагу 2. Если  $T \leq T_f$ , то срабатывает условие останова алгоритма, а текущее состояние признается оптимальным решением.

В исследовании по диагностированию неисправностей электрической схемы РЭУ с помощью метода имитации отжига необходимо определить следующие параметры:

Начальное значение управляющего параметра  $T_0$ . Сначала выбирается очень высокое начальное значение, затем для него, используя метод Монте-Карло, генерируется 10000 соседних состояний. Далее выбираются положительные переходы, когда значение целевой функции в соседнем состоянии больше ее значения в текущем состоянии, после чего вычисляется среднее значение вероятности перехода в соседнее состояние. В начале работы алгоритма для исключения «застревания» целевой функции в локальных минимумах, вероятность перехода в худшее состояние д.б. высокой, на уровне 0,99. Если оно меньше 0,99, то необходимо увеличить начальное значение управляющего параметра  $T_0$ . Если же вероятность перехода в худшее состояние больше 0,99, то значение управляющего параметра  $T_0$  необходимо уменьшить.

Окончательное значение параметра  $T_f$  - это условие останова алгоритма. Алгоритм отжига останавливается, когда значение параметра  $T$  меньше значения  $T_f$ . В идеале оно должно быть в окрестности точки  $T=0$ .

Начальное состояние – это состояние, в котором радиоэлементы обладают идеальными значениями параметров

Функция снижения значения управляющего параметра  $T$  определяется из соотношения:

$$T_{k+1} = \alpha T_k,$$

где  $\alpha \in [0,77...0,99]$

Целевая функция представляет собой зависимость выходного напряжения схемы  $U_{вых}$  от входного напряжения  $U_{вх}$ , т.е.  $U_{вых} = F(U_{вх})$

Для нахождения значений параметров неисправных резисторов, необходимо вычислить разницу между значением напряжения на выходе исправного РЭУ  $U_{вых}$  и значением напряжения на выходе неисправного устройства  $U_{ошиб}$ , а далее определить такие сопротивления, чтобы разница между этими значениями стремилась к нулю, т.е.:

$$\lim(U_{вых} - U_{ошиб}) = 0$$

Эта разница является целевой функцией исследования и определяется из соотношения:

$$F = \sum_{U_{вх}=1}^n |U_{вых} - U_{ошиб}|$$

где  $U_{вых}$  - выходное напряжение исправного РЭУ в каждом текущем состоянии и соседнем состоянии;

$U_{вх}$  - входное напряжение,  $U_{вх} \in [1, n] В$ ;

$U_{ошиб}$  - выходное напряжение неисправного РЭУ

$$U_{вых} = \frac{\beta \cdot R_c \cdot U_{вх}}{\beta \cdot \frac{U_T}{I_c} + (\beta + 1) \cdot R_e}$$

$$I_c = \left( \frac{R_2 \cdot U_{cc}}{R_1 + R_2} - 0.7 \right) \cdot \frac{1}{R_e}$$

Функция генерации соседнего состояния:

Функция плотности вероятности при нормальном распределении задается следующим образом:

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

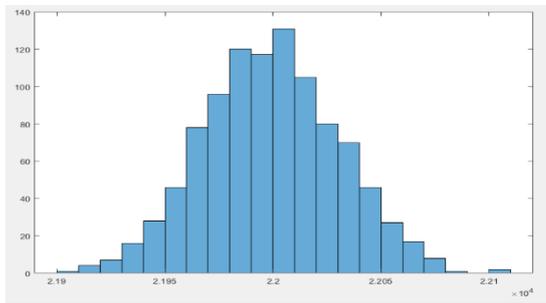
где  $x$  - соседнее состояние

$\mu$  - среднее значение (в нашем случае равно текущему состоянию)

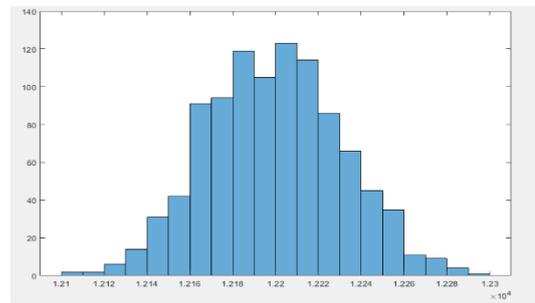
$\sigma$  - среднеквадратическое отклонение, в нашем случае оно равно  $\sqrt{T}$

$\sigma^2 = T$  – дисперсия распределения.

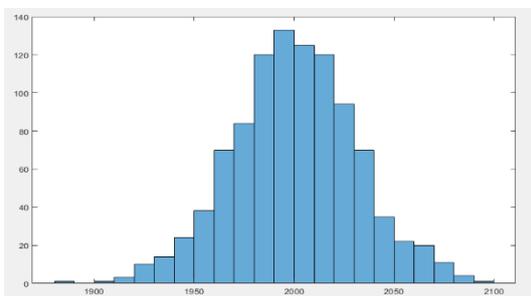
Используя метод Монте – Карло, было сгенерировано 10000 вариантов соседних состояний, из которых на каждой итерации случайным образом выбирается одно.



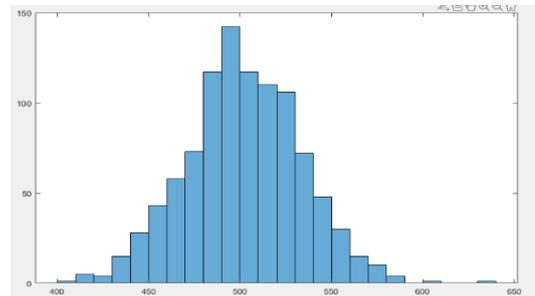
а) Пространство окрестных состояний для R1  
состояний для R2



б) Пространство окрестных



в) Пространство окрестных состояний для R3  
состояний для Re



г) Пространство окрестных

В начале работы алгоритма имитации отжига значение среднеквадратического отклонения достаточно большое, а пространство соседних состояний определяется на всей области существования целевой функции. Вероятность перехода в состояние, где значение целевой функции будет хуже текущего значения, весьма велика и в пределе равна «1». Это позволяет избежать застревания ЦФ в локальных минимумах. Постепенно значение среднеквадратического отклонения уменьшается, а вместе с ним сокращается и область исследования целевой функции. Вероятность перехода в состояние с худшим значением целевой функции стремится к нулю, и алгоритм сходится к оптимальному решению.

Условие равновесия – это количество итераций внутреннего цикла для конкретного значения управляющего параметра  $T$ , т.е. количество выборок соседних состояний. Оно определяется по следующей формуле:

$$L_{k+1} = \beta \cdot L_k$$

$$T_{k+1} = \alpha T_k \Rightarrow T_f = \alpha^{n-1} T_1 \Rightarrow n-1 = \frac{\ln \frac{T_f}{T_1}}{\ln \alpha}$$

$$L_{k+1} = \text{beta} \cdot L_k \Rightarrow L_f = \text{beta}^{n-1} \cdot L_1 \Rightarrow \text{beta} = \sqrt[n-1]{\frac{L_f}{L_1}}$$

$$L_f = c |V_R|, 1 \leq c \leq 4.6$$

$$L_1 = 1$$

где:  $T_1$  - начальное значение параметра T;

$T_f$  - окончательное значение параметра T;

n - количество итераций внешнего цикла алгоритма;

$L_1$  - условие равновесия первого внутреннего цикла алгоритма;

$L_f$  - условие равновесия последнего внутреннего цикла алгоритма;

$|V_R|$  - количество соседних состояний в пространстве решений.

#### Заключение

Метод имитации отжига имеет ряд преимуществ перед другими алгоритмами оптимизации, позволяя найти глобальный экстремум и избежать застревания в локальных экстремумах функции. Скоростью работы алгоритма имитации отжига можно управлять с помощью настройки его управляющих параметров. Чем дольше время работы алгоритма (сходимость), тем точнее будет полученное решение, но тем больше вычислительных ресурсов потребуется для расчета.

#### Литература

1. Лопатин А.С. Метод отжига, учеб. пособие. – Санкт-Петербургский государственный университет, 2005. – 17 с.
2. Dr. Masoud Y. Simulated annealing, presentation. –Iran university, 2009. – 71с.
3. Kirkpatrick S., Gelati Jr. C. D., and Vecchio M. P. Optimization by Simulated Annealing // Science. 220. 1983. P. 671-680.
4. Asphalt, B. & Trajan, M. F. P. R. E. [1979]. Alinea-time algorithm for testing the truth of certain quantified Boolean formulas, Information Processing Letters 8(3).
5. Attaullah, M. [2004]. An efficient simple cooling schedule for simulated annealing, 3045: 396–404.
- [4] Bertsimas, D. & Tzatzikis, J. [1993]. Simulated annealing, Statistical Science 8: 10–15.
6. Cerny, V. [1982]. A thermodynamical approach to the travelling salesman problem: An efficient simulation algorithm, Comenius University.
7. Cerny, V. [1985]. Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: an efficient simulation algorithm, Journal of Optimization Theory and Applications 45(1).
8. Cook, S. A. [1971]. The complexity of theorem proving procedures, Proceedings on the third annual ACM symposium on theory of computing.
9. Crescenzi, P. & Kanin, V. [1998]. How to find the best approximation results - a follow-up to Garey and Johnson, ACM SIGACT News 29(4): 90–97.
10. Dowling, W. F. & Gallie, J. H. [1984]. Linear-time algorithms for testing the satisfiability of propositional horn formulae, Journal of Logic Programming 1(3): 267–284.

#### СИСТЕМА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ ЗДАНИЙ

Фимин Д.И., Иванов И.А.  
РТУ МИРЭА  
lopuhov-dimal@mail.ru

Статья посвящена обзору проблем обеспечения качества воздухопроницаемости (обеспечение правильного функционирования контролируемого движения воздуха за счет системы вентиляции, и снижения неконтролируемого движения воздуха через материалы и элементы конструкций зданий), метода оценки воздухопроницаемости помещений и ограждающих конструкций, разработке метода оценки воздухопроницаемости зданий.