



И.А. Лёзин, С.А. Кирьяков

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМА ИМИТАЦИИ ОТЖИГА ПРИ ОБУЧЕНИИ СЕТИ ТСК

(Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика  
С.П. Королева (национальный исследовательский университет))

Алгоритм имитации отжига – общий алгоритмический метод решения задачи глобальной оптимизации, особенно дискретной и комбинаторной оптимизации.

Алгоритм основывается на имитации физического процесса, который происходит при кристаллизации вещества, в том числе при отжиге металлов. Предполагается, что атомы уже выстроились в кристаллическую решётку, но ещё допустимы переходы отдельных атомов из одной ячейки в другую. Предполагается, что процесс протекает при постепенно понижающейся температуре. Переход атома из одной ячейки в другую происходит с некоторой вероятностью, причём вероятность уменьшается с понижением температуры. Устойчивая кристаллическая решётка соответствует минимуму энергии атомов, поэтому атом либо переходит в состояние с меньшим уровнем энергии, либо остаётся на месте.

Новые коэффициенты сети  $X'$  получаются на основе текущих коэффициентов  $X$  следующим образом. К каждому коэффициенту  $x_j$  применяется оператор  $A$ , который случайным образом модифицирует соответствующий коэффициент. Коэффициенты  $X$  становится  $X'$  с вероятностью  $P(X, X')$ .

$$P(X, X') = \begin{cases} 1 & F(X') - F(X) < 0 \\ \exp\left(-\frac{F(X') - F(X)}{t_i}\right) & F(X') - F(X) \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$F(X) = \sum (y_j - y'_j)^2, \quad (2)$$

где  $y$  – выход нейронной сети,  $y'$  – контрольные значения.

На каждой итерации происходит понижение температуры.

$$t_i = T \cdot \exp(-a \cdot i^b), \quad a > 0, \quad 0 < b \leq 1, \quad (3)$$

где  $T$  – стартовая температура.

Новые коэффициенты  $X'$  рассчитываются по формуле:

$$x'_j = \operatorname{sgn}\left(a - \frac{1}{2}\right) \cdot x_j \cdot k \cdot \frac{t_i}{T}, \quad (4)$$

где  $a$  – равномерно распределённая на отрезке  $[0, 1]$  случайная величина.

Результаты обучения сети ТСК с разными алгебрами с помощью алгоритма имитации отжига представлены на рисунках далее:

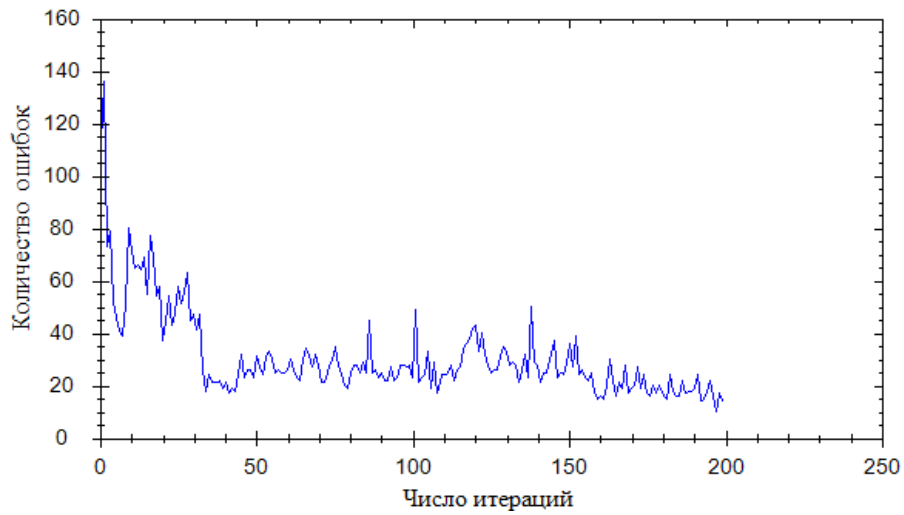


Рис. 1. ТСК сеть на основе операций арифметического сложения и произведения

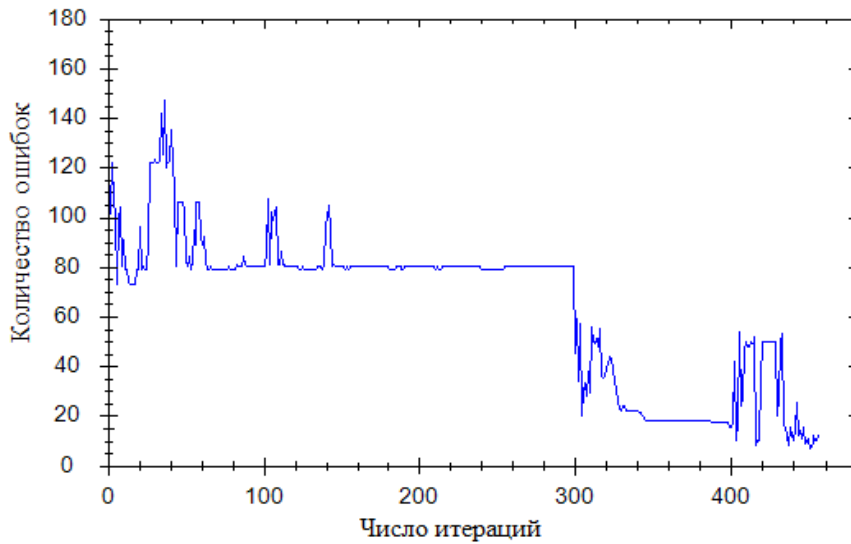


Рис. 2. ТСК сеть на основе алгебры Гёделя

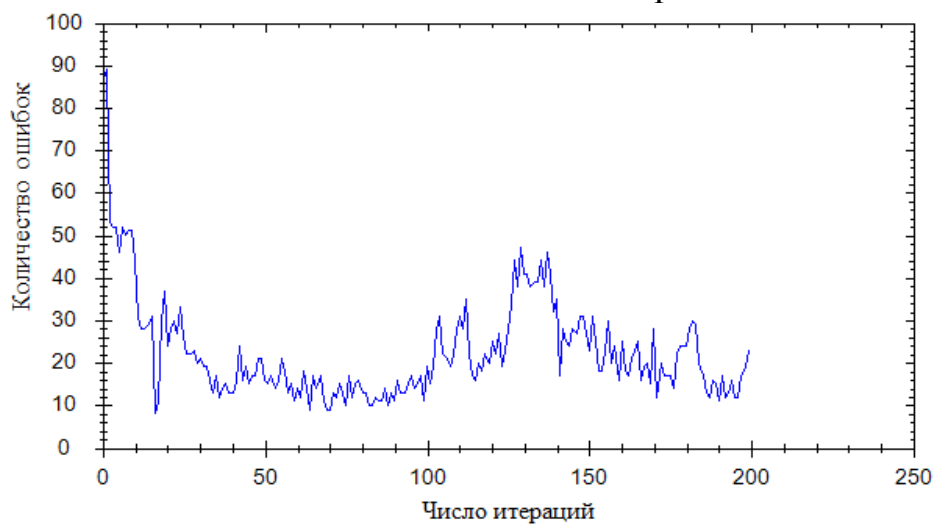


Рис. 3. ТСК сеть на основе алгебры Гогена

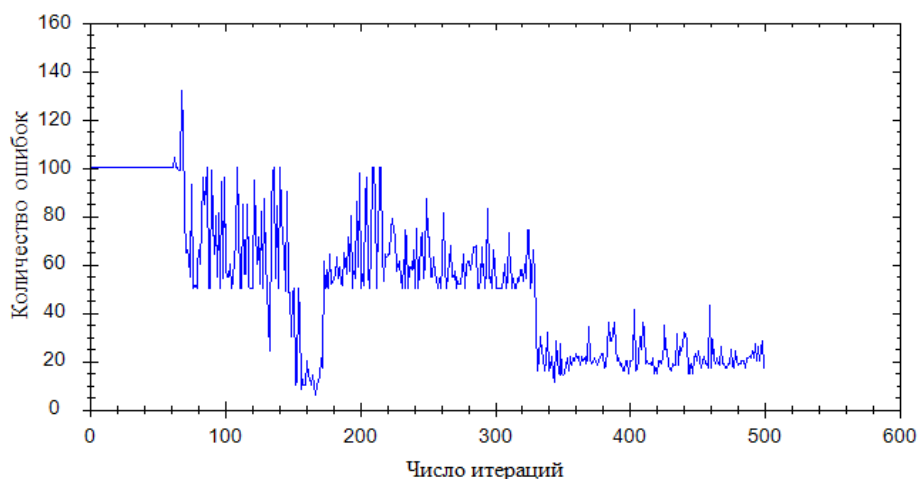


Рис. 4. ТСК сеть на основе алгебры Лукашевича

### Литература

- 1 Алгоритм имитации отжига [Электронный ресурс]. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм\\_имитации\\_отжига](https://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_имитации_отжига).
- 2 Метод имитации отжига [Электронный ресурс]. – URL: <http://habrahabr.ru/post/112189/>.
- 3 Введение в оптимизацию. Имитация отжига [Электронный ресурс]. – URL: <http://habrahabr.ru/post/209610/>.
- 4 Нейронные сети для обработки информации [Электронный ресурс]. – URL: [http://stu.scask.ru/book\\_ns.php?id=29](http://stu.scask.ru/book_ns.php?id=29).

И.А. Лёзин, М.А. Болотов

### ВЫЧИСЛЕНИЕ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛА МЕЖДУ ЦЕНТРАМИ ДВУХ ОТВЕРСТИЙ

(Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика  
С.П. Королева (национальный исследовательский университет))

Для простоты вычислений ограничимся рассмотрением координат вычисляемых точек на плоскости. Как показано на рисунке 1, даны три точки  $t_0$ ,  $t_1$  и  $t_2$ . Каждая из них характеризуется двумя функциями плотности вероятности их координат  $f(x)$  и  $f(y)$ , которые в рамках данной задачи принимаются независимыми.

Угол между прямыми  $t_0t_1$  и  $t_0t_2$  равен разности углов между соответствующими прямыми и осью абсцисс. Если положить, что указанные углы являются случайными величинами  $A_1$  и  $A_2$ , распределенными по некоторым законам, то искомый угол является случайной величиной вида:

$$A = A_1 - A_2. \quad (1)$$