

УДК 004.8: 621.315.23

Бакасова А. Б.¹ bakasovaaina@mail.ru**Асан уулу Аскам**² asanaskat@gmail.com¹Институт машиноведения и автоматки (ИМА) Национальной академии наук Кыргызской Республики. Кыргызстан, Бишкек, проспект Чуй, 265²Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Кыргызстан, Бишкек, проспект Ч. Айтматова, 66

АДАПТИВНЫЙ НЕЙРО-НЕЧЕТКИЙ ПОДХОД ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

В работе разработан алгоритм прогнозирования динамики электростатического разряда (ЭСР) в контексте метода момента во временной области и использован для компьютерного моделирования электромагнитных процессов, связанных с электростатическим разрядом идеально проводящего вытянутого сфероида, расположенного вблизи заземленной идеально проводящей плоскости. Рассчитаны токи и поля ЭСР в ближней и дальней зонах, а также дан физический анализ зависимости переходного излучения от отдельных параметров модели. При компьютерном моделировании применяется метод конечных элементов (МКЭ) в гармоническом режиме времени, разработанный в программной среде FEMM.

Разработана эффективная модель адаптивной нейро-нечеткой системы вывода (ANFIS) для оценки электромагнитного поля ЭСР для двух случаев конфигурации, где по результатам требуется учитывать не только стандартные параметры, но и направление, и конфигурацию разряда. Результаты моделирования FEMM использованы для обучения ANFIS в программной среде MATLAB fuzzy.

Ключевые слова: электростатический разряд, электромагнитное поле, электромагнитная совместимость, электромагнитная обстановка, искусственный интеллект, нейронная сеть, метод конечных элементов, адаптивная нейро-нечеткая система вывода.

Введение

Использование МКЭ для решения дифференциальных уравнений Максвелла, описывающих задачу электромагнитного поля, всегда приводит к полезным выводам [1, 2]. Однако сложная геометрия сложных задач электромагнитного поля приводит к большому количеству узлов дискретизации и, следовательно, к огромным вычислительным усилиям. Таким образом, метод масштабирования результатов от одного случая конфигурации к другому может представлять интерес, если он требует меньшего вычислительного времени, чем дополнительный расчет МКЭ. Нечеткая логика, которая является областью исследований искусственного интеллекта (ИИ), кажется эффективным методом создания систем, способных изучать взаимосвязи и использовать эти знания для дальнейших вычислений. Искусственные нейронные сети также используются для оценки электромагнитного поля [3, 4]. В последние годы ANFIS успешно применялся для решения ряда инженерных задач.

В работе [5] представлена архитектура и процедура обучения этой системы нечетких помех, реализованной в рамках адаптивных сетей. Одним из приложений ANFIS является моделирование сложных нелинейных функций с помощью набора нечетких правил. Нейронная сеть и система нечеткой логики являются универсальными приближениями.

Формулировка задачи

Как известно, явления, происходящие в разрядном канале, зависят от формы тела, длины канала, напряженности поля в канале и состояния воздуха (влажность, наличие ионизирующих агентов и т.д.). Эти факторы в основном влияют на нелинейный характер изменения удельного сопротивления в зависимости от напряженности электрического поля в точке разрядного канала. Было предложено несколько феноменологических описаний изменения сопротивления канала разряда в зависимости от параметров модели во времени. Наиболее известные модели были построены Брагинским, Ромпе и Вейзелем,

Теплером, Реннингером, Месяцем [6-7]. Было показано, что модели Ромпе и Вейзеля [8] и Месяца [9] обеспечивают наиболее точную нестационарную обработку сопротивления канала разряда при малых длинах каналов и высоких напряжениях. Они также дают наиболее точное описание того, как форма и крутизна фронта волны разрядного тока изменяются с длиной разрядного канала [6].

В качестве физической модели ЭСР примем модель (предварительно заряженного) идеального проводника (сфероида) (рис. 1) [6]. Разрядка начнется, когда расстояние h уменьшится до определенного значения, и этот момент времени взять за $t = 0$.

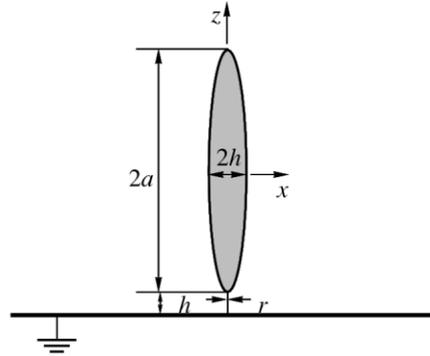


Рисунок 1– Физическая модель ЭСР: h – высота сфероида над разряжаемым объектом, a – высота сфероида, r – радиус сфероида, x – направление

Будем считать, что тело движется с такой малой скоростью, что распределение заряда по телу в момент $t = 0$ не зависит от скорости. Распределение определяет начальное состояние системы при $t = 0$.

Постановка задачи

В настоящем исследовании использована модель Ромпе-Вейзеля, и разработка алгоритма прогнозирования динамики ЭСР требует решить задачу в трех этапах:

1. Решение электростатической задачи, т.е. определение распределения плотности поверхностного заряда на теле для заданного расстояния между телом и плоскостью.
2. Моделирование канала разряда по закону Ома:

$$\vec{J}_{ch}(\vec{r}, t) = \sigma(\vec{r}, t) \vec{E}(\vec{r}, t), \quad (1)$$

где $\vec{J}_{ch}(\vec{r}, t)$ – плотность тока, $\vec{E}(\vec{r}, t)$ – полное электрическое поле, что учитывает как самоиндукцию канала, так и излучение от тела и плоскости, $\sigma(\vec{r}, t)$ – нелинейная проводимость, оказывающая влияние на электрическое поле в канале, которая должна быть получена из формулы Ромпе-Вейзеля (2):

$$R(t) = \frac{h}{\sqrt{2a_R \int_0^t I_{ch}^2(t') dt}}, \quad (2)$$

где $R(t)$ — сопротивление канала, Ом; h — длина канала, м; $I_{ch}(t)$ — ток канала, А; t — время, сек; $a_R = 1 \times 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ В}^2 \text{ с}^{-1}$ — эмпирическая константа [8].

Уравнение (2) предполагает, что плотность тока и, следовательно, поле однородны вдоль канала, что подтверждается моделированием. Распределение тока и заряда на теле во время разряда определяется методом моментов, т. е. интегральным уравнением, зависящим от времени. Стартовыми условиями являются начальное распределение заряда по поверхности тела и плоскости.

3. Оценка электрических и магнитных полей вокруг сфероида (физическая модель ЭСР) методом основанной на использовании адаптивной нейро-нечеткой системы вывода (ANFIS). На данном этапе две ANFIS системы обучаются с использованием алгоритма

гибридного обучения. Выходом первого ANFIS является напряженность электрического поля E , а выходом второй нейронной сети является магнитное поле B .

При моделировании ЭСР учитывается тот факт, что, с одной стороны, электрическое поле, создаваемое зарядами и токами на теле и плоскости, изменяет сопротивление разрядного канала, а также величину и временной характер разрядного канала тока, но, с другой стороны, наличие разрядного тока приводит к запаздывающим изменениям распределения заряда и тока на теле и плоскости. Электростатическая энергия, накопленная на теле, таким образом, частично преобразуется в лучистую энергию, а частично рассеивается в канале разряда и в областях с плохой проводимостью на теле и плоскости.

Электростатическая задача

Найдем распределение заряда на теле, которое предполагается заряженным трибоэлектрически. По мере приближения тела к плоскости общий заряд тела остается постоянным до тех пор, пока не начнется разряд, но потенциал тела меняется со временем, потому что меняется и емкость системы тело–плоскость. Распределение заряда на теле также зависит от времени. Как известно, заряд имеет тенденцию накапливаться в областях, ближайших к плоскости, особенно это заметно при малых h . При разряде передний фронт импульса тока определяется начальным распределением заряда, т.е. чем большая доля исходного заряда содержится в области накопления, тем большее количество заряда покинет тело на начальном этапе разряда. При решении электростатической задачи применяем подход, разработанный Поповиди-Заридзе [17]. Данный подход аппроксимирует неизвестный потенциал тела вращения суммой потенциалов, создаваемых расположением эквивалентных зарядов. Это могут быть точечные заряды, расположенные на оси тела, или их можно рассматривать как кольцевые заряды с центром на оси, в зависимости от формы тела. В любом случае эквивалентные сборки рассчитываются методом коллокации с учетом граничного условия.

Точность вычислений оценена двумя способами:

- а) путем нахождения невязки L_2 по граничному условию;
- б) путем сравнения с аналитическим решением для сферы над идеально проводящей плоскостью.

Емкость сферы вычисляется по формуле:

$$C = 4\pi\epsilon_0 \sinh(\mu) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{\sinh(\mu(n+1))}, \tag{3}$$

где $\mu = 0,5\ln(\chi + \sqrt{\chi^2 - 1})$, $\chi = \frac{h_0^2 - 2R^2}{2R^2}$, $h_0 = 2(h + R)$, R – радиус сферы, h – расстояние между сферой и плоскостью, ϵ_0 — электрическая постоянная [18].

В таблице 1 показаны результаты расчета, где сравниваются значения емкости, полученные методом эквивалентного заряда и по аналитической формуле для различных h . Это указывает на то, что в данном конкретном случае результаты метода эквивалентного заряда согласуются со значениями, рассчитанными аналитически.

Таблица 1

h, м	Емкость, пФ		Ошибка, %
	метод эквивалентного заряда	аналитическая формула (2)	
0.1×10^{-3}	612.18394	614.91047	0.443
0.1×10^{-2}	486.81822	487.02538	0.425×10^{-1}
0.1×10^{-1}	360.10294	360.13178	0.801×10^{-2}
0.1	239.66837	239.67225	0.162×10^{-2}
0.1×10^1	149.14125	149.14245	0.807×10^{-3}

0.1×10^1	116.40873	116.40971	0.772×10^{-3}
-------------------	-----------	-----------	------------------------

На рисунке 2 представлена зависимость емкости вытянутого сфероида в зависимости от расстояния от плоскости при длине большой и малой полуосей 31 и 5 см соответственно. Здесь емкость будет равна 13,549 пФ в пределе изолированного сфероида. Предположим, что сфероид имеет потенциал 10 кВ при $h = 1$ м. Если h уменьшить до 1,8 мм, тогда потенциал упадет до 7,3 кВ. При дальнейшем уменьшении h пробой будет происходить на воздухе при нормальных условиях.

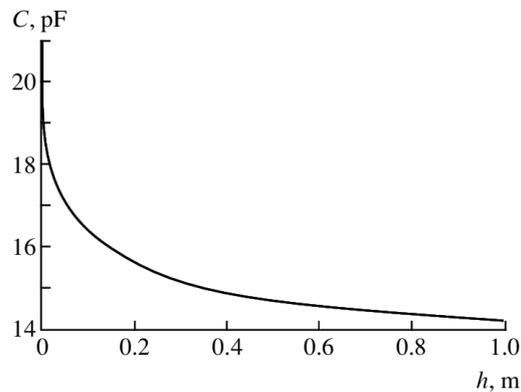


Рисунок 2– Емкость вытянутого сфероида в зависимости от расстояния от плоскости

На рисунке 3 показано типичное изменение плотности заряда на сфероиде в зависимости от расстояния вдоль его поверхности. При малых h накопление заряда делает электрическое поле сильно неоднородным по области разряда, поэтому требуется большая точность при расчете как стационарных, так и нестационарных полей [10].

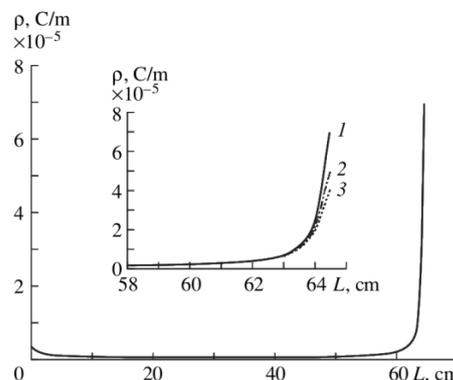


Рисунок 3 – Типичное изменение плотности заряда на сфероиде с расстоянием вдоль его поверхности при $U = 5$ кВ и $h = 0,82$ мм. На вставке показано такое же соотношение для нижней области сфероида при значениях $h = 0,82; 1,22; 1,63$ (мм)

Математическая модель электростатического разряда

Если структура, несущая заряд, распространяет поперечные электромагнитные волны (примерами являются коаксиальный кабель и двойная линия), разрядный ток может быть рассчитан в рамках теории линий передачи [10]. Однако это не относится к большинству практических структур, поэтому приходится иметь дело с краевыми задачами при вычислении полей и токов.

Предположим, что начальная плотность заряда $\rho_{нач}(\vec{r})$ известна для всех проводящих поверхностей. Плотность заряда в любой точке тела или плоскости и в любой момент разряда тогда разлагается как $\rho(\vec{r}, t) = \rho_{нач}(\vec{r}) + \rho_{возм}(\vec{r}, t)$, где $\rho_{возм}(\vec{r}, t)$ — зависящее от времени возмущения начальной плотности заряда. Плотность

поверхностного тока $\vec{J}(\vec{r}, t)$ связана с $\rho_{возм}(\vec{r}, t)$ уравнением неразрывности. Это также связывает плотность тока и заряда в канале разряда с поверхностными токами и зарядами в области разряда на теле.

Таким образом, процедура сводится к нахождению $\vec{J}(\vec{r}, t)$ областей разрядки и плотности тока $\vec{J}_{ch}(\vec{r}, t)$ в канале разряда, из которого плотности заряда, зависящие от времени, могут быть получены с помощью уравнения неразрывности.

Для двух плотностей тока математическая задача формулируется следующим образом:

— в предположении бесконечной проводимости $\vec{J}(\vec{r}, t)$ подчиняется интегральному уравнению

$$\vec{J}(\vec{r}, t) = 2n \times \vec{H}(\vec{r}, \vec{t}) + \frac{1}{2\pi} \left(n \times \int_S \left\{ \frac{\vec{J}(\vec{r}', \tau)}{R} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial \tau} \vec{J}(\vec{r}', \tau) \right\} \times \frac{\vec{R}}{R^2} \right) dS \quad (4)$$

$\vec{r} \in S$

где S — поверхности тела и его электрическое изображение, n — внешняя нормаль к поверхности, c — скорость света в свободном пространстве,

— в каждой точке канала разряда выполняется закон Ома

$$\vec{J}_{ch}(\vec{r}, t) = \sigma(\vec{r}, t) \cdot \vec{E}_{смам}(\vec{r}) + \vec{E}_{возм}^{\rightarrow ch}(\vec{r}, t) + \vec{E}_{возм}^{\rightarrow b}(\vec{r}, t) \quad (5)$$

$\vec{r} \in V_{ch}$

— перед разрядкой

$$f(\vec{r}, t) \leq 0: \begin{cases} \vec{J}(\vec{r}, t) = 0 \\ \vec{J}_{ch}(\vec{r}, t) = 0 \\ \rho_{возм}(\vec{r}, t) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Закон Кирхгофа распространяется на токи, протекающие через области разряда на теле и плоскости.

Уравнение (2) также можно рассматривать как интегральное уравнение для магнитного поля. Член $\vec{H}(\vec{r}, \vec{t})$ представляет собой магнитное поле на поверхности тела, обусловленное током, протекающим по разрядному каналу:

$$\vec{H}(\vec{r}, \vec{t}) = \frac{1}{2\pi} \left(\int_{V_{ch}} \left\{ \frac{\vec{J}_{ch}(\vec{r}', \tau)}{R} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial \tau} \vec{J}_{ch}(\vec{r}', \tau) \right\} \times \frac{\vec{R}}{R^2} \right) dV_{ch} \quad (7)$$

$\vec{r} \in V_{ch}$

где V_{ch} — объем разрядного канала и его электрическое изображение относительно плоскости; \vec{r}' — точка в области интегрирования; τ — время запаздывания: $\tau = t - R/c$, $R = [\vec{R}]$, $\vec{R} = \vec{r} - \vec{r}'$.

В уравнении (4) слагаемое $\vec{E}_{смам}(\vec{r})$ — стационарное электрическое поле, создаваемое зарядами непосредственно перед разрядом; именно это поле инициирует разряд. Термины $\vec{E}_{возм}^{\rightarrow ch}(\vec{r}, t)$ и $\vec{E}_{возм}^{\rightarrow b}(\vec{r}, t)$ — переходные поля, излучаемые каналом и телом соответственно, они также находятся под влиянием плоскости. Поля связаны со своими источниками как

$$\vec{E}_{возм}^{\rightarrow ch}(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\pi} \int_{V_{ch}} \left\{ \mu \frac{1}{R} \frac{\partial J_{ch}(\vec{r}', \tau)}{\partial \tau} - \left[\frac{\rho_{ch}(\vec{r}', \tau)}{R} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial \tau} \rho_{ch}(\vec{r}', \tau) \right] \frac{\vec{R}}{\varepsilon R^2} \right\} dV_{ch} \quad (8a)$$

$$\vec{E}_{\text{возм}}^{\rightarrow b}(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\pi \epsilon_{\text{возм}}} \int_{V_{\text{ch}}} \left\{ \mu \frac{1}{R} \frac{\partial J(\vec{r}', \tau)}{\partial \tau} - \left[\frac{\rho_{\text{ch}}(\vec{r}', t)}{R} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial \tau} \rho(\vec{r}', \tau) \right] \frac{\vec{R}}{\epsilon R^2} \right\} dS, \quad (86)$$

где ϵ и μ — диэлектрическая и магнитная проницаемости соответственно среды, которой считался воздух.

Так как предварительно заряженное тело представляет собой сфероид, на его поверхности зададим ортогональные координаты единичными векторами $\vec{n}_u = \frac{\vec{r}_u}{|\vec{r}_u|}$ и $\vec{n}_v = \frac{\vec{r}_v}{|\vec{r}_v|}$ таким образом, чтобы в любой момент \vec{r}_u — касательный вектор к образующей сфероида ($\vec{r}_u = \partial \vec{r} / \partial u$, $\vec{r}_v = \partial \vec{r} / \partial v$, $\vec{r}_u \cdot \vec{r}_v = 0$).

В этой системе координат $J_v = 0$ и $J_u(\vec{r}, t)$ подчиняется уравнению

$$J_u(\vec{r}, t) = -2H_v^d(\vec{r}, t) \frac{1}{2\pi} \times \int_S \left(\frac{J_u(\vec{r}', \tau)}{R} - \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial J_u(\vec{r}', \tau)}{\partial \tau} \right) G(\vec{r}, \vec{r}') dS \quad (9)$$

где $G(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{\vec{R}(\vec{n}_u \times \vec{n}_v)}{R^2}$.

Моделирование (9) выполнено на FEMM методом моментов во временной области с использованием дельта-функций в качестве базисных функций, а индуцированный заряд обрабатывался методом изображений. Расчеты проводились относительно однородной пространственно-временной сетки ($\Delta l \times \Delta l \times c \Delta t$). Дискретизированная версия уравнения (9) построена по методу Галеркина с разбиением тела на N_s зоны. Она решалась по методике, описанной в [8].

Результаты второго этапа представлены на рисунке 4 (a,b), где смоделированная динамика генерации магнитного поля показана в ближней зоне. Каждая панель

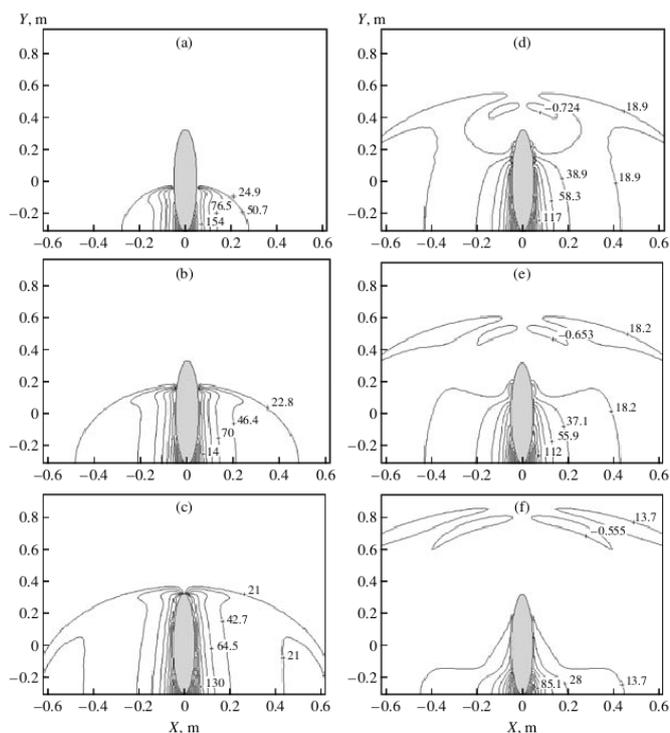


Рисунок 4 – Смоделированная динамика генерации магнитного поля ($V = 10$ кВ, $h = 0,625$ мм) в ближней зоне. Панели для $t = 1,3$ (a), $1,9$ (b), $2,6$ (c), $3,2$ (d), $3,4$ (e) и $4,3$ нс (f).

отображает кривые одинаковой величины поля в определенный момент времени. Образцы показывают, что волна магнитного поля сначала идет вверх вдоль оси тела, достигая высшей точки при $t = 2,1$ нс.

Как показано на рисунке 4 (с,d), магнитное поле состоит как из нисходящей поверхностной волны, так и из восходящей исходящей волны, которая наиболее сильна в направлениях около 30° к оси, имеет большое значение при исследовании электромагнитной совместимости.

Нисходящая волна оставляет после себя очень низкие уровни магнитного поля, на что указывают низкие токи на рисунке 4 (e,f). Течения остаются слабыми в промежутке между двумя последовательными волнами.

Модель адаптивной нейро-нечеткой системы вывода (ANFIS)

Архитектура и работа модели. Предположим, что нечеткая система Такаги-Сугено имеет m входов (x_1, x_2, \dots, x_m) и один выход t . Лингвистическими метками x_i являются $A_{1i}, A_{2i}, \dots, A_{ni}$. База правил содержит $p = n^m$ правил «если-то»:

$$\begin{aligned}
 R_1: & \quad x_1 \text{ is } A_{11} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{12} \dots \text{ and } x_m \text{ is } A_{1m} \text{ то} \\
 & \quad f_1 = p_{11}x_1 + p_{12}x_2 + \dots + p_{1m}x_m + c_1 \\
 R_2: & \quad x_1 \text{ is } A_{21} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{22} \dots \text{ and } x_m \text{ is } A_{2m} \text{ то} \\
 & \quad f_2 = p_{21}x_1 + p_{22}x_2 + \dots + p_{2m}x_m + c_2 \\
 & \quad \dots \\
 R_k: & \quad x_1 \text{ is } A_{k1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{k2} \dots \text{ and } x_m \text{ is } A_{km} \text{ то} \\
 & \quad f_k = p_{k1}x_1 + p_{k2}x_2 + \dots + p_{km}x_m + c_k \\
 & \quad \dots \\
 R_p: & \quad x_1 \text{ is } A_{p1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{p2} \dots \text{ and } x_m \text{ is } A_{pm} \text{ то} \\
 & \quad f_p = p_{p1}x_1 + p_{p2}x_2 + \dots + p_{pm}x_m + c_p .
 \end{aligned} \tag{10}$$

Число лингвистических правил равно $P = n^m$.

Эквивалентная архитектура ANFIS состоит из 5 слоев [11, 12] (ANFIS типа 3), как показано на рисунке 5.

Слой 1. Выходы этого слоя представляют собой нечеткую степень принадлежности входов $\mu_{A_{ij}}(x_j)$. Если взять функцию принадлежности в форме колокола, $\mu_{A_{ij}}(x_j)$ определяется выражением:

$$\mu_{A_{ij}}(x_j) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x_j - a_{ij}}{c_{ij}} \right)^2 \right]^{b_{ij}}}, \quad i = 1 \dots n, \quad j = 1 \dots m \tag{11}$$

где a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} — параметры функции принадлежности или параметры предпосылки.

Функция принадлежности Гаусса определяется следующим образом:

$$\mu_{A_{ij}}(x_j) = e^{-\frac{(c_{ij} - x_j)^2}{2\sigma_{ij}^2}}, \quad i = 1 \dots n, \quad j = 1 \dots m, \tag{12}$$

где a_{ij}, σ_{ij} — центр и ширина нечеткого множества A_{ij} .

Слой 2. Каждый узел в этом слое является фиксированным узлом. Выход узлов можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
 u_1 &= \mu_{A11}(x_1) \cdot \mu_{A12}(x_2) \dots \mu_{A1m}(x_m) \\
 u_2 &= \mu_{A21}(x_1) \cdot \mu_{A22}(x_2) \dots \mu_{A2m}(x_m) \\
 u_k &= \mu_{Ak1}(x_1) \cdot \mu_{Ak2}(x_2) \dots \mu_{Akm}(x_m) \\
 u_p &= \mu_{Ap1}(x_1) \cdot \mu_{Ap2}(x_2) \dots \mu_{Apm}(x_m)
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Узлы отмечены кружком и обозначены буквой П.

Слой 3. Выход каждой фиксированной метки узла с N может быть представлен как:

$$\bar{u}_i = \frac{u_i}{\sum_{i=1}^p u_i}
 \tag{14}$$

Слой 4. Каждый узел в этом слое представляет собой квадрат. Выходы этого слоя задаются следующим образом:

$$\bar{u}_i f_i = \bar{u}_i \left(\sum_{j=1}^m p_{ij} x_j + c_i \right)
 \tag{15}$$

Слой 5. Выходные данные ANFIS можно представить в виде:

$$t = \frac{\sum_{i=1}^p \bar{u}_i f_i}{\sum_{i=1}^p \bar{u}_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^p \bar{u}_i} \sum_{i=1}^p u_i \left(\sum_{j=1}^m p_{ij} x_j + c_i \right)
 \tag{16}$$

В [15] алгоритм гибридного обучения используется для обновления параметров. Для адаптации параметров предпосылки a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} используется метод градиентного спуска. Метод наименьших квадратов используется для обновления последующих параметров [16].

ANFIS обучается в автономном режиме с использованием обучающего набора $P = \{p_1, p_2, \dots, p_r\}$. Каждый элемент набора $p_k = (x_k, t_{zk})$ определяется входным вектором желаемой реакцией t_{zk} .

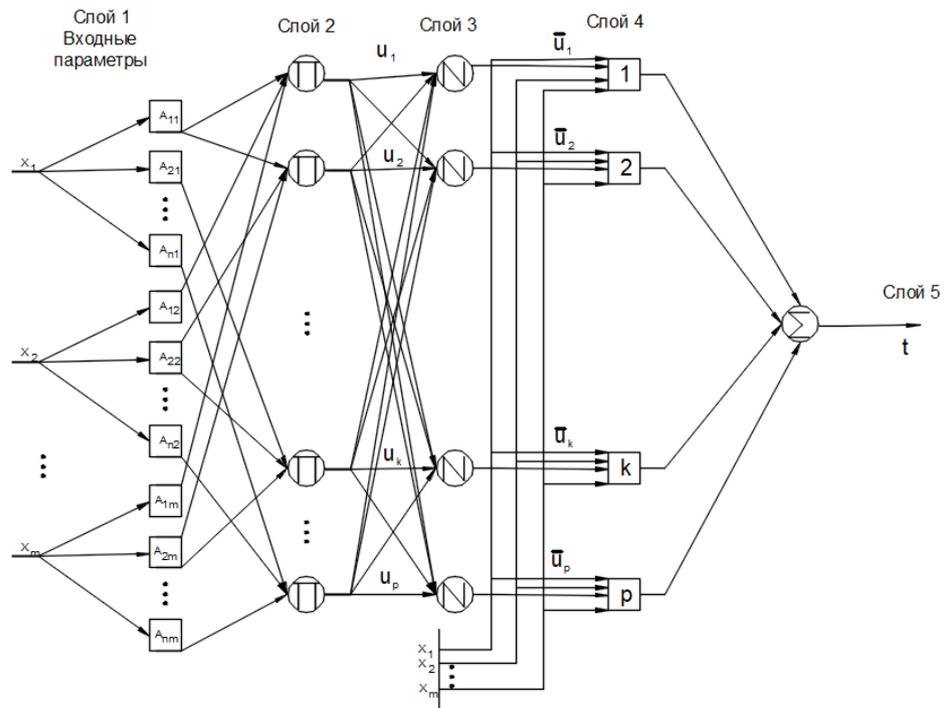


Рисунок 5 – Архитектура m -входной ANFIS с p - правилами

В данной работе использовался трехходовый, одновыходной ANFIS. Входы и выходы ANFIS следующие:

- Входные данные: координата a (высота сфероида), координата h (высота сфероида над разряжаемым объектом) и координата r (радиус сфероида) (рис. 1).
- Выход: каждый из двух ANFIS имеет одну выходную переменную (электрическое поле E (кВ/м) и плотность магнитного потока B (мГс)).

Алгоритмы ANFIS реализованы с использованием набора инструментов MATLAB fuzzy.

После процесса выбора входных данных результаты МКЭ вертикальной конфигурации системы, показанной на рисунке 1, используются для создания подходящей обучающей базы данных для ANFIS с использованием гибридного алгоритма обучения. Набор обучающих данных представляет собой значения амплитуд электрического и магнитного полей (E и B) [17].

На рисунке 6 показаны функции принадлежности входных переменных h , a и r для электрического поля E и магнитного поля B после настройки параметров с использованием процедуры гибридной оптимизации в процессе обучения ANFIS. В качестве функции принадлежности в модели ANFIS использована функция Гаусса [17].

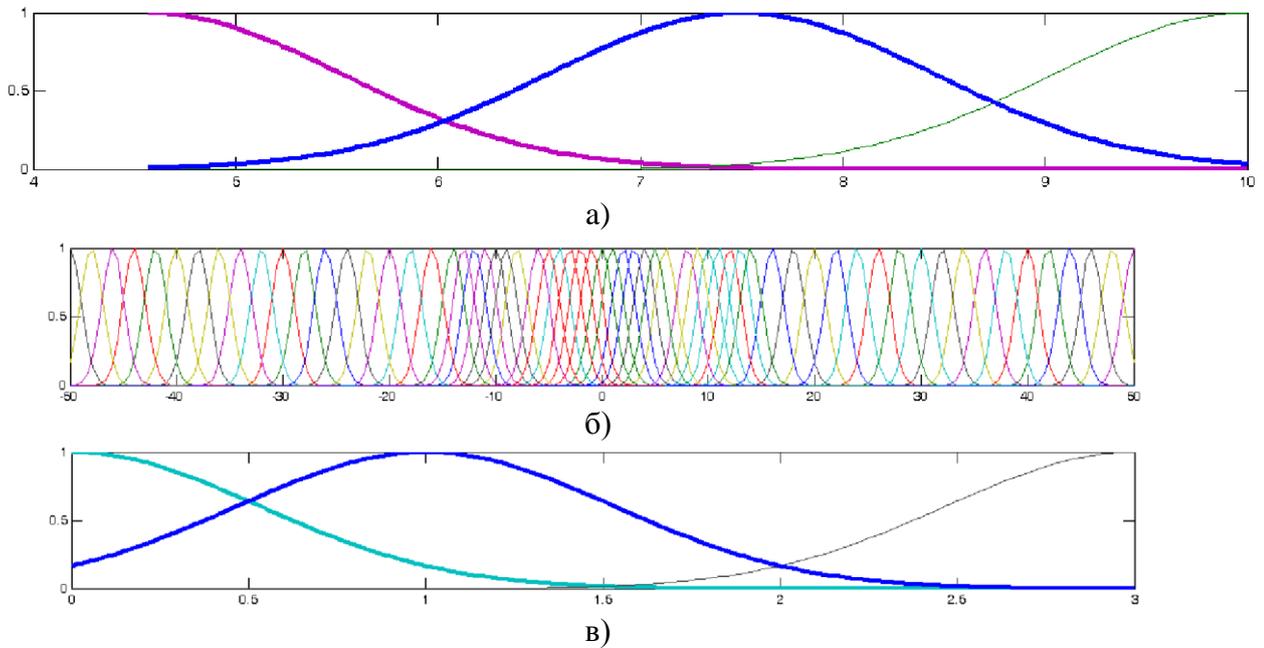


Рисунок 6 – Функции принадлежности входных переменных: а) a (высота сфероида), б) h (высота сфероида над разряжаемым объектом) в) r (радиус сфероида) после обучения

Результаты моделирования

Результаты моделирования представлены в таблице 2 и на рисунке 7, где показаны напряженности электрического поля и магнитного поля для различных вариантов положения рассматриваемой задачи электромагнитного поля, полученные с помощью FEMM и ANFIS

Таблица 2

h , (м)	a , (м)	r , (м)	МКЭ		ANFIS		Абсолютные ошибки	
			E (кВ/м)	B (мГ)	E (кВ/м)	B (мГс)	e_E (%)	e_B (%)
5	3	0,5	1.8300	63,8430	1,8268	63,5079	0,1765	0,5249
5	13	0,5	0,0443	26.5300	0,0451	26,5867	1,9079	0,2137
5	25	0,5	0,0340	7,9878	0,0348	8.0051	0,0235	0,2167
5	11	2	0,3018	40.6820	0,3078	40.7313	1,9916	4,8588

5	17	2	0,0289	19.4310	0,0291	19.4921	0,3886	0,3143
5	33	2	0,0279	3,6222	0,0280	3,6280	0,0433	0,1608
7,5	5	0,5	1,2235	29.4810	1.2002	28,6869	1,9026	2,6935
7,5	15	0,5	0,1223	20.3210	0,1257	20.1934	2,7899	0,6282
7,5	29	0,5	0,0328	5.3832	0,0329	5.3929	0,0030	0,1804
7,5	9	2	0,5230	19.5370	0,5332	19,8639	1,9514	1,6733
7,5	21	2	0,0346	12.1540	0,0345	12.1791	0,0340	0,2068
7,5	35	2	0,0249	3.0724	0,0247	3.0769	0,0080	0,1459
10	1	0,5	1,233	25,5150	1.0181	25.3388	0,5118	0,6907
10	19	0,5	0,0693	11,5660	0,0696	11.5631	0,4269	0,0252
10	27	0,5	0,0425	6.2074	0,0426	6.2160	0,1132	0,1388
10	7	2	0,7013	13.0960	0,7018	13.2593	0,0723	1,2470
10	23	2	0,0473	8,7085	0,0474	8,7196	0,1556	0,1270
10	45	2	0,0150	1,4492	0,0152	1.4503	0,0133	0,0790

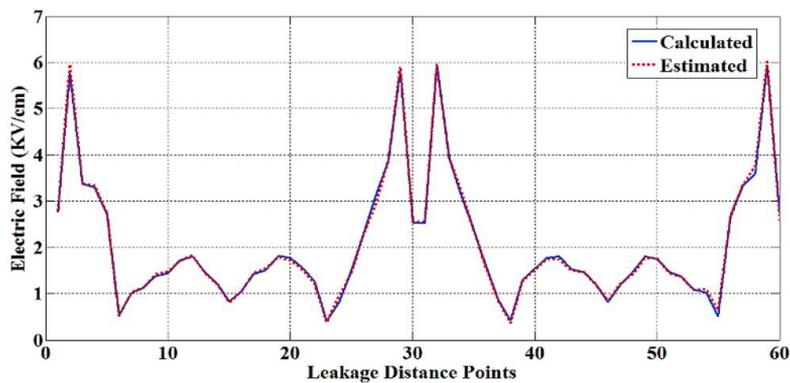


Рисунок 7– Значения электрического поля на горизонтальном профиле расчетов вертикальной конфигурации с помощью FEMM и ANFIS

На рисунке 8 представлено распределение электрических полей, полученное с помощью ANFIS на разные уровни напряжения:

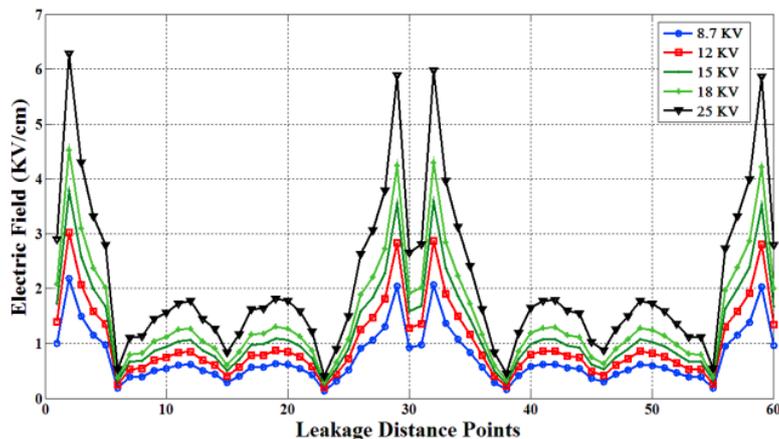


Рисунок 8 – Распределение электрического поля в зависимости от координат узла в точках (h)

Производительность ANFIS проверяется во второй геометрии, для которой ANFIS не обучен. Соответствующее решение FEMM также получено для сравнения результатов ANFIS. Новая геометрия изменена для конфигурации проводников, где рассматривается плоская (горизонтальная) конфигурация.

В таблице 3 обобщены результаты испытаний для нескольких случаев новой конфигурации, в которых сравнивались расчеты E и B с помощью ANFIS и МКЭ.

Таблица 3 представляет напряженность электрического поля и магнитного поля для случая горизонтальной конфигурации рассматриваемой задачи об электромагнитном поле, полученная с помощью FEMM и ANFIS.

Таблица 3

МКЭ		ANFIS		e E (%)	e в (%)
E(кВ/м)	B(мГ)	E(кВ/м)	B(мГ)		
6.3043	510.8300	6.1316	496.0659	2,7393	2,8902
2,3883	222,6600	2,4417	223.7100	2.2351	0,4716
0,8723	66.2820	0,8819	66,6666	1.1009	0,5803
0,5367	40.1160	0,5409	40.4319	0,7895	0,7876
0,2283	17.7490	0,2297	17,8528	0,6058	0,5848
0,0860	6,8794	0,0863	6.9029	0,3555	0,3413
0,0508	2.1753	0,0510	2.1793	0,2695	0,1826

Для новой конфигурации средняя абсолютная ошибка между МКЭ и ANFIS составляет 0,5396% и 0,4353% для рассматриваемых задач электрического поля и магнитного поля соответственно. На рисунке 9 показан горизонтальный профиль электрического поля и магнитного поля в зависимости от координаты узла в воздухе для нового случая (горизонтальная конфигурация), рассчитанный с помощью FEMM и ANFIS. В обоих случаях ясно, что ANFIS удовлетворительно следует результатам FEMM.

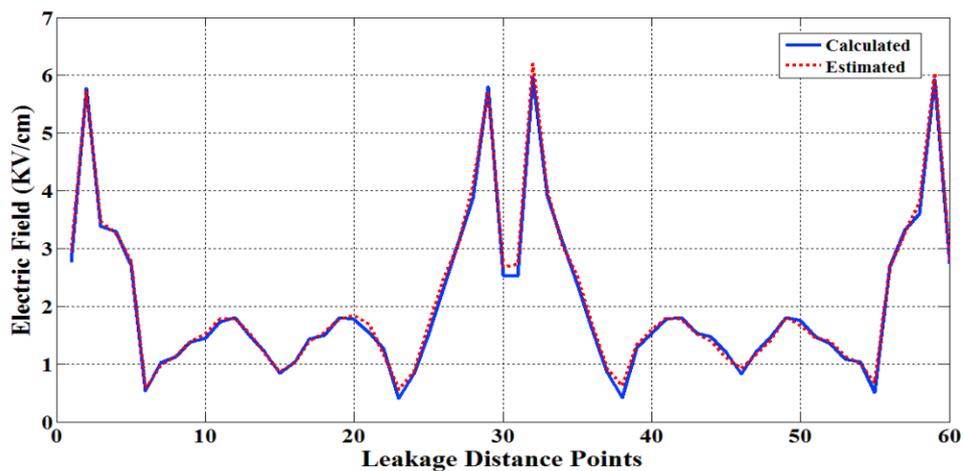


Рисунок 9 – Значения электрического поля на горизонтальной конфигурации, расчеты по FEMM и ANFIS

В ходе исследования процесса разрядки выявлено, что при вертикальной конфигурации модели ЭСР значения электрических и магнитных полей имеют два пиковых момента в сравнении с горизонтальной конфигурацией. Это означает, что при оценке электромагнитной совместимости и исследовании ЭСР требуется учитывать не только стандартные параметры (зарядное напряжение, время нарастания, максимальный разрядный ток, токи при различном значении времени, расстояние, материалы, влажность) но и направление, и конфигурацию разряда.

Заключение

Результаты исследований показывают, что ANFIS может использоваться для решения проблем оценки электрических и магнитных полей токов ЭСР. Подходящая модель ANFIS разработана и обучена для некоторых случаев конфигурации этой проблемы. В исследовании производительность ANFIS была проверена для двух случаев конфигурации, которые значительно отличались от случаев, используемых для обучения. Из результатов испытаний можно сделать вывод, что результаты моделирования,

представленные в работе, показывают, что применение ANFIS к аппроксимации электромагнитного поля дает удовлетворительные результаты. Тест ANFIS очень хорошо согласуется с результатами, полученными методом МКЭ. Максимальная абсолютная ошибка менее 4%.

Литература

1. J. Weiss and Z. Csendes, "A one-step finite element method for multiconductor skin effect problems," IEEE Trans. Power Appart. Syst., vol. PAS-101, no. 10, pp. 3796-3803, Oct. 1982.
2. D. Labridis and P. Dokopoulos, "Finite element computation of field, losses and forces in a three-phase gas cable with nonsymmetrical conductor arrangement," IEEE Trans. Power Delivery, vol. PWDR-3, pp. 1326-1333, Oct. 1988
3. I. G. Damouis, K. J. Satsios, D. P. Labridis, P. S. Dokopoulos, "A fuzzy logic system for calculation of the interference of overhead transmission lines on buried pipelines", Electric Power Systems Research, vol. 57, pp. 105-113, 2001.
4. I. G. Damouis, K. J. Satsios, D. P. Labridis, P. S. Dokopoulos, "Combined fuzzy logic and genetic algorithm techniques-application to an electromagnetic field problem", Fuzzy sets and systems, vol. 129, pp. 371-386, 2002.
5. T. I. Maris, L. Ekonomou, G. P. Fotis, A. Nakulas, E. Zoulias, "Electromagnetic field identification using artificial neural networks", Proc. of the 8th Conference on 8th WSEAS International Conference on Neural Networks - Volume 8, Canada, pp.84-89, 2007.
6. R. G. Olsen and P. S. Wong, "Characteristics of Low Frequency Electric and Magnetic Fields in the Vicinity of Electric Power Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, pp. 2046-2055, 1992.
7. S. Reitzinger, U. Schreiber, and U. V. Rienen, "Electro-quasi-static calculation of electric field strength on high-voltage insulators with an algebraic multigrid algorithm," IEEE Trans. Magn., vol. 39, pp. 2129-2132, 2003.
8. Hasselgren L., Moller E., Hamnerius Y., "Calculation of Magnetic Shielding of a Substation at Power Frequency Using FEM", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, 1994.
9. G.B. Iyyuni and S.A. Sebo, "Study of Transmission Line Magnetic Fields," Proceedings of the Twenty-Second Annual North American, IEEE Power Symposium, pp.222-231, 1990.
10. Ministry of Electricity, Iraq, "Iraq Super Grid Projects 132 kV Single and Double Circuit Steel Tower Transmission Lines", Volume 1 Technical Specification, 2006.
11. J.-S. R. Jang, "ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference Systems", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, No. 3, pp. 665-685, 1993.
12. R. Jang, "Input selection for ANFIS learning," in Proc. 5th IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems, Sep. 8-11, 1996, vol. 2, pp. 1493-1499.
13. G. Capizzi, G., S. Coco, A. Laudani, "A Neural Network tool for the prediction of electromagnetic field in urban environment", Proc. of the 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, pp. 60, 2006
14. Бакасова, А. Б., Асан уулу, А., (2022). Обзор альтернативных подходов к моделированию электромагнитной обстановки на высоковольтной электрической подстанции. Проблемы автоматизации и управления, №2 (44), 4–14. извлечено от <https://imash.kg/jrn/index.php/pau/article/view/307>.
15. Верзунов С. Н. (2022) СИСТЕМА ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ COVID-19 ПО КТ-СНИМКАМ. Проблемы автоматизации и управления, №3 (45), 119–134. извлечено от <http://pau.imash.kg/index.php/pau/article/view/396/295>

16. Бакасова, А., & Асан уулу, А. (2022). Применение нейронных сетей в задачах электромагнитных помех. Проблемы автоматки и управления, №1 (43), 95–103. извлечено от <https://imash.kg/jrn/index.php/pau/article/view/259>.

17. Бакасова, А., & Асан уулу, А. (2022). МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ Проблемы автоматки и управления, №3 (45), 159–166. извлечено от <http://pau.imash.kg/index.php/pau/article/view/387/299>