

# ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКИХ СИСТЕМ И ПТИЧЬЕГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ПОДБОРА ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКЕ В ФОРВАКУУМНОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ

*М.О. Светлаков*

Научный руководитель И.А. Ходашинский, профессор каф. КИБЭВС

г. Томск, ТУСУР

Проект ГПО КИБЭВС-1211 – Нечёткие системы

## Введение

Актуальность темы исследования обусловлена тем, что внедрение новых керамических материалов и полимеров требует их обработки новым методом - импульсной электронно-лучевой обработкой в форвакуумном диапазоне давлений. Важнейшим параметром при этом является однородность плотности тока по сечению пучка, однако процессы, протекающие в электронных пучках форвакуумных диапазонов давлений, мало изучены и подбор параметров плазменного источника для достижения однородности плотности тока затруднен [1,2]. Эти затруднения возможно решить путем построения аппроксимирующих кривых к полученным экспериментальным данным, используя новый метод оптимизации базы правил нечеткой системы.

## Описание методики получения данных

Эксперименты проводились с использованием импульсного плазменного электронного источника, функционирующего в форвакуумном диапазоне давлений [3]. Для изучения распределений плотности тока использовалась тепловизионная методика. На пути электронного пучка в пространстве дрейфа устанавливалась тонкая алюминиевая пластина, на которую попадал электронный пучок, нагревая её. Полученное распределение температуры тыловой стороны пластины фиксировалось с помощью тепловизора Fluke 200Ti в режиме видеосъемки с частотой 9 кадров/с. Использование тепловизионной методики позволяет за один импульс фиксировать распределения плотности энергии (тока) по всему сечению пучка.

## Описание нечеткой системы типа Такаги-Сугено

В данной работе рассмотрено построение нечеткой модели на основе таблицы наблюдений. Как указано в публикации [3], нечеткая система может быть представлена как:

$$y = f(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{D}),$$

где  $\mathbf{x}$  – входной вектор,  $\boldsymbol{\theta} = \|\theta_1, \dots, \theta_M\|$  — вектор параметров антецедентов,  $N = n * M$  (число параметров, описывающих одну функцию принадлежности) \* (число термов, описывающих одну входную переменную),  $y$  — скалярный выход системы,  $\mathbf{D}$  — вектор параметров консеквентов.

Нечеткая система строится на множестве нечетких правил типа «ЕСЛИ-ТО». В нечеткой системе типа Такаги-Сугено  $i$ -ое правило имеет следующий вид:

$$\text{IF } x_1=A_{1i} \text{ AND } x_2=A_{2i} \text{ AND } \dots \text{ AND } x_n=A_{ni} \text{ THEN } y = d_{0i} + d_{1i}x_1 + \dots + d_{ni}x_n,$$

где  $A_{ij}$  — лингвистический терм, которым оценивается переменная  $x_i$ ; выход  $y$  задается линейной функцией от входных переменных [4].

Каждая нечеткая область  $A_{ij}$  связана с  $x$  степенью принадлежности  $\mu_{A_{ij}}(x)$ , вычисляемой по следующей функции:

$$\mu_{A_{ij}}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & \text{если } a < x \leq b; \\ \frac{x-c}{b-c}, & \text{если } b < x < c; \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases}$$

Выход нечеткого аппроксиматора вычисляется по следующей формуле:

$$f(\mathbf{x}; \boldsymbol{\theta}; \mathbf{D}) = \frac{\sum_{i=1}^R \prod_{j=1}^n \mu_{A_{ij}}(x_{ij}) * (d_{0i} + d_{1i}x_1 + \dots + d_{ni} * x_n)}{\sum_{i=1}^R \prod_{j=1}^n \mu_{A_{ij}}(x_{ij})}$$

где  $R$  – число правил,  $n$  – количество входных переменных.

Пусть имеется таблица наблюдений  $\{(\mathbf{x}_p; t_p), p = 1, \dots, m\}$ , тогда критерий качества аппроксимации может быть выражен среднеквадратической функцией ошибки:

$$MSE(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{m} * \sum_{p=1}^m (t_p - f(\mathbf{x}_p, \boldsymbol{\theta}; \mathbf{D}))^2.$$

### Описание алгоритма оптимизации базы правил

Алгоритм основан на результатах наблюдений за стайным поведением птиц [5]. Птицы могут заниматься сбором пищи или двигаться к центру стаи. Каждые  $FQ$  итераций птицы перелетают на новое место, занимаясь при этом либо поиском пищи, либо попрошайничеством. Введем следующие условные обозначения:  $N$  – число всех особей в стае,  $FL, C, S, a1, a2$  – параметры алгоритма ( $FL \in (0, 1), C > 0, S > 0, a1 \in [0, 2], a2 \in [0, 2]$ ),  $M$  – максимальное число итераций,  $D$  – размерность вектора  $\boldsymbol{\theta}_i$ ,  $\theta_{i,j}^t$  – позиция каждой особи ( $i \in [1, \dots, N], j \in [1, \dots, D], t$  – номер текущей итерации),  $rand(a, b)$  – значение случайной равномерно распределенной в интервале  $(a, b)$  величины,  $\varepsilon$  – константа, принимающая малые значения,  $\boldsymbol{\theta}_0$  – вектор, описывающий начальную базу правил,  $\boldsymbol{\theta}_{best}$  – оптимизированный вектор-решение.

Алгоритм:

1) Генерируем  $N$  особей, вычисляем для каждой значение критерия  $MSE(\boldsymbol{\theta}_i)$ , находим особь с его лучшим значением из них ( $\boldsymbol{\theta}_{best}$ ),  $t = 0$ ;

2) Если  $(t \bmod FQ \neq 0)$  и  $rand(0, 1) < P$ , то вычисляем новую позицию каждой птицы по формуле (1 поисковая стратегия):

$$\theta_{i,j}^{t+1} = \theta_{i,j}^t + (p_{i,j} - \theta_{i,j}^t) * C * rand(0, 1) + (g_j - \theta_{i,j}^t) * S * rand(0, 1),$$

где  $i \in [1, \dots, D]$ ,  $p_{i,j}$  – лучшая предыдущая позиция  $i$ -й птицы и  $g_j$  – лучшая предыдущая позиция среди всех птиц стаи. Если  $rand(0, 1) \geq P$ , то используем 2-ю поисковую стратегию:

$$\theta_{i,j}^{t+1} = \theta_{i,j}^t + A1 * (\bar{\theta}_j - \theta_{i,j}^t) * rand(0, 1) + A2 * (p_{k,j} - \theta_{i,j}^t) * rand(-1, 1),$$

$$A1 = a1 * \exp\left(-\frac{pFit_i}{sumFit + \varepsilon} * N\right),$$

$$A2 = a2 * \exp\left(\left(\frac{pFit_i - pFit_k}{|pFit_k - pFit_i| + \varepsilon}\right) * \frac{N * pFit_k}{sumFit + \varepsilon}\right),$$

где  $k \in [1, \dots, N]$  ( $k \neq i$ ),  $pFit_i$  – лучшее значение критерия  $MSE(\boldsymbol{\theta}_i)$  и  $sumFit$  – сумма всех лучших значений критерия ( $MSE_{best}$ );

3) Если  $(t \bmod FQ = 0)$ , то птица с наиболее высоким значением критерия перемещается следующим образом (3 поисковая стратегия):

$$\theta_{i,j}^{t+1} = \theta_{i,j}^t + \theta_{i,j}^t * randn(0, 1),$$

где  $randn(0, 1)$  – значение нормально распределенной случайной величины с  $\mu = 0$  и  $\sigma = 1$ . Птица с наиболее низким значением критерия перемещается следующим образом (4 поисковая стратегия):

$$\theta_{i,j}^{t+1} = \theta_{i,j}^t + (\theta_{k,j}^t - \theta_{i,j}^t) * FL * rand(0, 1),$$

где  $k \in [1, \dots, N]$  ( $k \neq i$ ). Для всех остальных птиц формула для вычисления новой позиции выбирается случайным образом из вышеприведенных двух формул;

4) Вычисляются новые решения критерия  $MSE(\boldsymbol{\theta}_i)$ , обновляется лучшее решение ( $\boldsymbol{\theta}_{best}$ ),  $t = t + 1$ . Если  $(t < M)$ , то переходим на шаг 2, иначе завершаем работу алгоритма.

## Результаты

В результате серии экспериментов была сформирована таблица наблюдений, выходным признаком которой является плотность тока по сечению пучка источника. Таблица размером 625 наблюдений включает пять входных признаков:  $U$  – ускоряющее напряжение,  $p$  – давление остаточного газа,  $I$  – ток разряда,  $r$  – радиальная координата и  $L$  – вертикальная координата от экстрактора. Генерировалась нечеткая система методом динамического разбиения входного пространства [6], использовался механизм кросс-валидации. Результатом кросс-валидации является среднее по всем разбиениям значение численного критерия аппроксимации (MSE) на контрольных подвыборках. В данном случае набор данных разбивался на пять выборок, 80% выборки помещалось в обучающую подвыборку (Tra), а остальные 20% в контрольную (Tst).

Таблица 1 – Результаты работы аппроксиматора

	MSE		Число правил
	ValueTraMSE	ValueTstMSE	
plasmks-1	0,12069	<b>0,050195</b>	60
plasmks-2	0,097145	0,143257	
plasmks-3	0,106192	0,102563	
plasmks-4	<b>0,080429</b>	0,218894	
plasmks-5	0,134744	0,054619	
Среднее значение	0,105721	0,112476	

## Заключение

В получены и обработаны первичные данные с плазменного источника, используемого для импульсной электронно-лучевой обработки в форвакуумном диапазоне давлений. На основе этих данных была построена нечеткая система типа Такаги-Сугено, база правил полученной системы была оптимизирована с помощью птичьего алгоритма, получена средняя ошибка аппроксимации. В дальнейшем планируется применить иные алгоритмы генерации структуры для уменьшения ошибки.

## Список использованных источников

- 1) Burdovitsin, V.A. Surface structure of alumina ceramics during irradiation by a pulsed electron beam // V.A. Burdovitsin, E.S. Dvilis, A.V. Medovnik, E.M. Oks, O.L. Khasanov, Yu.G. Yushkov // Technical Physics. – 2013. – V. 58, Iss. 1. – P. 111–113;
- 2) Kazakov, A.V. A Forevacuum Pulse Arc Discharge Based Plasma Electron Source / A.V. Kazakov, V.A. Burdovitsin, A.V. Medovnik, E.M. Oks // Instruments and Experimental Techniques. – 2013. – V. 56, No. 6. – P. 659–662;
- 3) Ходашинский, И.А. Идентификация нечетких систем на основе непрерывного алгоритма муравьиной колонии / И.А. Ходашинский, П.А. Дудин // Автометрия. – 2012. – Т. 48, № 1. – С. 45–71;
- 4) Ходашинский, И.А. Методика построения компактных и точных нечетких систем типа Такаги–Сугено / И.А. Ходашинский, К.С. Сарин // Доклады ТУСУРА. – 2016. – V. 19, No. 1. – P. 50–56;
- 5) Meng, X. A new bio-inspired optimization algorithm: Bird Swarm Algorithm / X. Gao, L. Lu, Y. Liu, H. Zhang // Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence. – 2016. – V.208, No. 4. – P. 673–687;
- 6) Сарин, К.С. Три алгоритма генерации структуры нечеткой системы типа Такаги–Сугено / К.С. Сарин, И.А. Ходашинский // Знания-Онтологии-Теории (ЗОНТ- 2015): матер. Всерос. конф. с междунар. участием. Российская академия наук, Сибирское отделение; Институт математики им. С.Л. Соболева, 2015. – С. 124–132;