УДК 004.85: 621.3.032.269

К.С. Сарин, А.В. Медовник, И.А. Ходашинский

Нечеткий аппроксиматор значения плотности тока в пучке электронов форвакуумного плазменного источника

Представлена нечеткая система, аппроксимирующая плотность тока в пучке электронов форвакуумного плазменного источника. Процессы, протекающие в электронных пучках форвакуумных диапазонов давлений, мало изучены, поэтому затруднено построение точных аналитических моделей этих процессов. В связи с этим предложено построение модели на основе экспериментальных данных. В качестве модели выбрана нечеткая система типа Такаги–Сугено. Структурная идентификация системы осуществлялась методом кусочно-линейной инициализации. Для параметрической идентификации были применены рекуррентный метод наименьших квадратов и метаэвристический алгоритм «кукушкин поиск». Адекватность полученной модели оценивалась среднеквадратичной ошибкой аппроксимации.

Ключевые слова: нечеткая система, идентификация, «кукушкин поиск», рекуррентный метод наименьших квадратов, электронный пучок, распределение плотности тока.

Генерация электронных пучков в форвакуумном диапазоне давлений (3–50 Па) позволяет осуществлять эффективную обработку материалов [1]. В статье [2] рассматривается форвакуумный источник электронов, использующий дуговой разряд с катодным пятном. Его применение позволяет значительно увеличить мощность плазменного источника по сравнению с существующими источниками, функционирующими на основе тлеющего разряда с полым катодом и в связи с этим имеющими ограничения по максимальному току и длительности импульса.

Важным параметром электронного пучка при осуществлении поверхностной обработки материалов является однородность плотности тока по сечению пучка, так как от распределения плотности зависят качество и эффективность модификации поверхности. В связи с этим возникает проблема определения зависимости плотности тока от параметров плазменного источника, расстояния от экстрактора источника и расстояния от центра пучка. Процессы, протекающие в электронных пучках форвакуумных диапазонов давлений, мало изучены, поэтому затруднено построение точных аналитических моделей этих процессов [3]. Поскольку возникают такие трудности, предлагается создание статистических или нечетких моделей на основе экспериментальных данных.

Цель настоящей работы заключается в нахождении зависимости плотности тока по сечению пучка от параметров импульса в форвакуумном источнике, расстояния от экстрактора источника и расстояния от центра пучка вдоль его сечения.

Экспериментальные данные. Эксперимент проводился на макете электронного источника с плазменным катодом на основе дугового разряда, описание макета дано в работе [2]. Постоянное ускоряющее напряжение U (4–8 кВ) формировалось высоковольтным блоком электропитания. Давление p (3–8 Па) регулировалось напуском рабочего газа непосредственно в камеру. Ток разряда I варьировался в пределах от 20 до 60 А.

Регистрация распределения плотности тока пучка j (А/см^2) осуществлялась с помощью плоского зонда, который был помещен в металлический заземленный экран с коллимирующим отверстием диаметром 3 мм. Зонд устанавливался на двухкоординатную систему перемещения. Радиальная координата r отсчитывалась от оси симметрии источника электронов, которая совпадает с центром катода, а вертикальная координата L – от экстрактора. L изменялась в диапазоне от 75 до 275 мм, а r – от –60 до 60 мм [2].

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.

Нечеткий аппроксиматор. Нечеткий аппроксиматор – это нечеткая система типа Такаги–Сугено [4]. Основная идея этих систем заключается в разделении пространства входных переменных на области, в которых поведение моделируемой системы можно описать с помощью простых

функций, чаще всего линейных. Правила нечеткой системы типа Такаги–Сугено имеют следующий вид:

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

где A_{ji} – лингвистический терм, которым оценивается входная переменная x_j; выход y задается линейной функцией от входных переменных.

Выход нечеткого аппроксиматора определяет следующее отображение:

$$f(\mathbf{x};\boldsymbol{\theta},\mathbf{D}) = \frac{\sum_{i=1}^{R}\prod_{j=1}^{n}\mu(x_j;c_{ij},\sigma_{ij})\cdot(d_{0i}+d_{1i}x_1+\ldots+d_{ni}x_n)}{\sum_{i=1}^{R}\prod_{j=1}^{n}\mu(x_j;c_{ij},\sigma_{ij})}, \quad (1)$$

где $\mathbf{x}$ – входной вектор; R – число правил; n – число входных переменных; μ – функция принадлежности гауссового типа, имеющая вид $\mu(x_j; c_{ji}, \sigma_{ji}) = \exp(-((x_j - c_{ji}) / \sigma_{ji})^2)$; $\boldsymbol{\theta}$ – матрица параметров функций принадлежности правил нечеткого аппроксиматора; $\mathbf{D}$ – матрица параметров линейных функций консеквентов правил нечеткого аппроксиматора.

Построение нечеткого аппроксиматора заключается в подборе структуры системы и параметров $\boldsymbol{\theta}$ и $\mathbf{D}$. В данной работе построение осуществлялось на основе таблицы наблюдений. Для имеющейся таблицы качество аппроксимации проверялось методом кроссвалидации [5]. Согласно этому методу таблица наблюдений была разделена на обучающую и тестовую в отношении 4:1. Обучающая часть таблицы имеет вид $\{(\mathbf{x}_p; t_p), p = 1, ..., m\}$, а тестовая $\{(\mathbf{x}_p; t_p), p = 1 , ..., s\}$, где $\mathbf{x}_p$ – вектор входных значений, а t_p – выход. С помощью обучающей части осуществлялось построение аппроксиматора, а на тестовой проводилась оценка качества аппроксимации, которая в данной работе выражается среднеквадратичной ошибкой (Mean Squared Error, *MSE*):

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

Построение нечеткого аппроксиматора. Построение нечеткого аппроксиматора производилось в два этапа – структурная и параметрическая идентификация. На этапе структурной идентификации осуществлялось определение структурных характеристик нечеткой системы, таких как число нечетких правил и количество нечетких термов для каждого входного признака. На этапе параметрической идентификации в сформированной структуре подбирались параметры $\boldsymbol{\theta}$ и $\mathbf{D}$ таким образом, чтобы среднеквадратичная ошибка *MSE*, вычисленная на обучающей части таблицы наблюдений, была минимальна.

Структурная идентификация производилась методом кусочно-линейной инициализации [6], который относится к методам кластеризации. В методах этого типа входные данные собираются в группы по определенному условию, каждая такая группа ассоциируется с правилом нечеткой системы. Условием образования кластера в этом методе является порог среднеквадратичной ошибки между данными в кластере и аппроксимирующей эти данные линейной функцией, найденной с помощью метода наименьших квадратов.

Параметрическая идентификация осуществлялась с помощью метаэвристического алгоритма «кукушкин поиск» [7] для нахождения параметров $\boldsymbol{\theta}$ и рекуррентным методом наименьших квадратов [8] для нахождения параметров $\mathbf{D}$.

Оптимизационный алгоритм «кукушкин поиск» (АКП) – метаэвристика, основанная на имитации способа размножения кукушки, когда она находит недавно построенные гнезда и подкладывает в них свои яйца (заменяет своими), которые в итоге могут быть выкинуты хозяином гнезда. В основе алгоритма лежат три следующих правила: 1) кукушка откладывает по одному яйцу в случайно выбранное гнездо, которое представляет собой решение; 2) часть лучших решений будет перенесена в следующее поколение; 3) количество гнезд фиксировано, и есть вероятность того, что хозяин может обнаружить чужое яйцо; в этом случае хозяин может выбросить яйцо из гнезда или вовсе отказаться от гнезда и построить новое на новом месте.

Важной составляющей АКП является использование полетов Леви для локального и глобального поиска. Процесс полета Леви является случайным блужданием, которое характеризуется серией скачков, обусловленных функцией плотности вероятности с «толстыми» хвостами, за счет которых

вероятность значительных отклонений от среднего больше, чем у нормального распределения. Пошаговое описание алгоритма для оптимизации параметров **θ** нечеткой системы дано в [9, 10].

Рекуррентный метод наименьших квадратов (РМНК), используемый в данной работе, позволяет подобрать коэффициенты линейной функции, которая наилучшим образом будет аппроксимировать экспериментальные данные. Преимущество РМНК перед обычным методом наименьших квадратов состоит в том, что он позволяет работать с линейно зависимыми и зашумленными данными. Чтобы воспользоваться этим методом для оптимизации параметров **D**, приведем выражение (2) к виду, в котором выход нечеткой системы является линейной функцией, коэффициентами которой будут параметры **D**. Для этого введем следующее обозначение:

$$\beta_i = \frac{\prod_{j=1}^{n} \mu\left(x_j; c_{ij}, \sigma_{ij}\right)}{\sum_{i=1}^{R} \prod_{j=1}^{n} \mu\left(x_j; c_{ij}, \sigma_{ij}\right)}. \tag{3}$$

Используя обозначение (3), выход нечеткого аппроксиматора принимает следующий вид:

$$f\left(\mathbf{x}; \boldsymbol{\theta}, \mathbf{D}\right) = \sum_{i=1}^{R} \left(d_{0i}\beta_i + d_{1i}x_1\beta_i + \ldots + d_{ni}x_n\beta_i\right). \tag{4}$$

Выражение (4) показывает, что выход нечеткого аппроксиматора является линейной функцией с коэффициентами **D** при переменных $\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_R, x_1\beta_1, x_2\beta_1, \ldots, x_n\beta_1, x_1\beta_2, \ldots, x_n\beta_R$. Чтобы найти **D**, необходимо знать экспериментальные значения этих переменных, которые находятся с помощью обучающей таблицы наблюдений. Представим эти значения в виде матрицы **Z** размерностью $m \times R(n+1)$:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \cdots & \beta_{R1} & x_{11}\beta_{11} & \cdots & x_{11}\beta_{R1} & \cdots & x_{n1}\beta_{11} & \cdots & x_{n1}\beta_{R1} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \beta_{1m} & \cdots & \beta_{Rm} & x_{1m}\beta_{1m} & \cdots & x_{1m}\beta_{Rm} & \cdots & x_{nm}\beta_{1m} & \cdots & x_{nm}\beta_{Rm} \end{bmatrix}, \tag{5}$$

где β_{ij} обозначает значение β_i для элемента $\mathbf{x}_j$ обучающих данных таблицы наблюдений, а x_{lj} – его l-й признак. Выходы обучающей части таблицы наблюдений представим в виде вектора $\mathbf{T} = [t_1 \ \cdots \ t_m]^T$, а параметры **D** в виде $\mathbf{D} = [d_{01} \ \cdots \ d_{0R} \ \ d_{11} \ \cdots \ d_{1R} \ \cdots \ d_{n1} \ \cdots \ d_{nR}]^T$, k-й столбец матрицы **Z** будем обозначать $\mathbf{Z}_k$. Тогда $\mathbf{D} = \mathbf{D}_k$, где $\mathbf{D}_k$ рекурсивно вычисляется по следующей схеме:

$$\mathbf{D}_k = \mathbf{D}_{k-1} + \frac{\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{Z}_k}{1 + \mathbf{Z}_k^T \mathbf{P}_{k-1}\mathbf{Z}_k}\left(\mathbf{T}_k - \mathbf{Z}_k^T \mathbf{D}_{k-1}\right), \tag{6}$$

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_{k-1} - \frac{\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{Z}_k \mathbf{Z}_k^T \mathbf{P}_{k-1}}{1 + \mathbf{Z}_k^T \mathbf{P}_{k-1}\mathbf{Z}_k}, \tag{7}$$

где $k = 1, 2, \ldots, m$; $\mathbf{P}_0 = \alpha\mathbf{I}$ матрица размерностью $R(n+1) \times R(n+1)$; α – большое число (в данной работе использовалось 10^{100}); **I** – единичная матрица; $\mathbf{D}_0$ – вектор размера $R(n+1)$, элементы которого равны 0.

Результаты. После построения нечеткого аппроксиматора указанным выше способом среднеквадратичная ошибка аппроксимации *MSE* плотности тока в пучке электронов на обучающей части таблицы наблюдений составила 0,0083, а на тестовой 0,006. База правил нечеткого аппроксиматора состоит из четырех правил и приведена ниже:

*R*1: IF $L = \mu(L;274.884,122.535)$ AND $p = \mu(p;5.842,4.61)$ AND $U = \mu(U;7.026,4)$ AND $I = \mu(I;51.955,30.12)$ AND $r = \mu(r;33.987,23.961)$ THEN
$j = -0.166 + 0.002L - 0.011p - 0.003U + 0.006I - 0.009r$

*R*2: IF $L = \mu(L;271.666,143.821)$ AND $p = \mu(p;4.02,3.744)$ AND $U = \mu(U;5.353,2.914)$ AND $I = \mu(I;31.189,38.273)$ AND $r = \mu(r;-56.868,32.479)$ THEN
$j = -0.585 + 0.004L - 0.017p - 0.012U + 0.006I + 0.007r$

*R*3: IF $L = \mu(L;116.994,70.315)$ AND $p = \mu(p;6.452,4.51)$ AND $U = \mu(U;7.372,3.881)$ AND $I = \mu(I;34.944,39.691)$ AND $r = \mu(r;57.785,116.179)$ THEN
$j = -0.117 + 0.001L + 0.02p + 0.014U + 0.006I - 0.003r$

*R*4: IF $L = \mu(L;270.534,43.879)$ AND $p = \mu(p;6.72,4.927)$ AND $U = \mu(U;7.877,1.852)$ AND $I = \mu(I;59.648,11.499)$ AND $r = \mu(r;\ -0.487,5.331)$ THEN
$j = 6.453 - 0.049L + 0.556p + 1.068U - 0.013I + 0.107r$

Результат работы аппроксиматора приведен на рис. 1, причем на рис. 1, *б* и *г* изображена работа в режиме прогнозирования, поскольку на этих срезах не было экспериментальных данных из таблицы наблюдений.

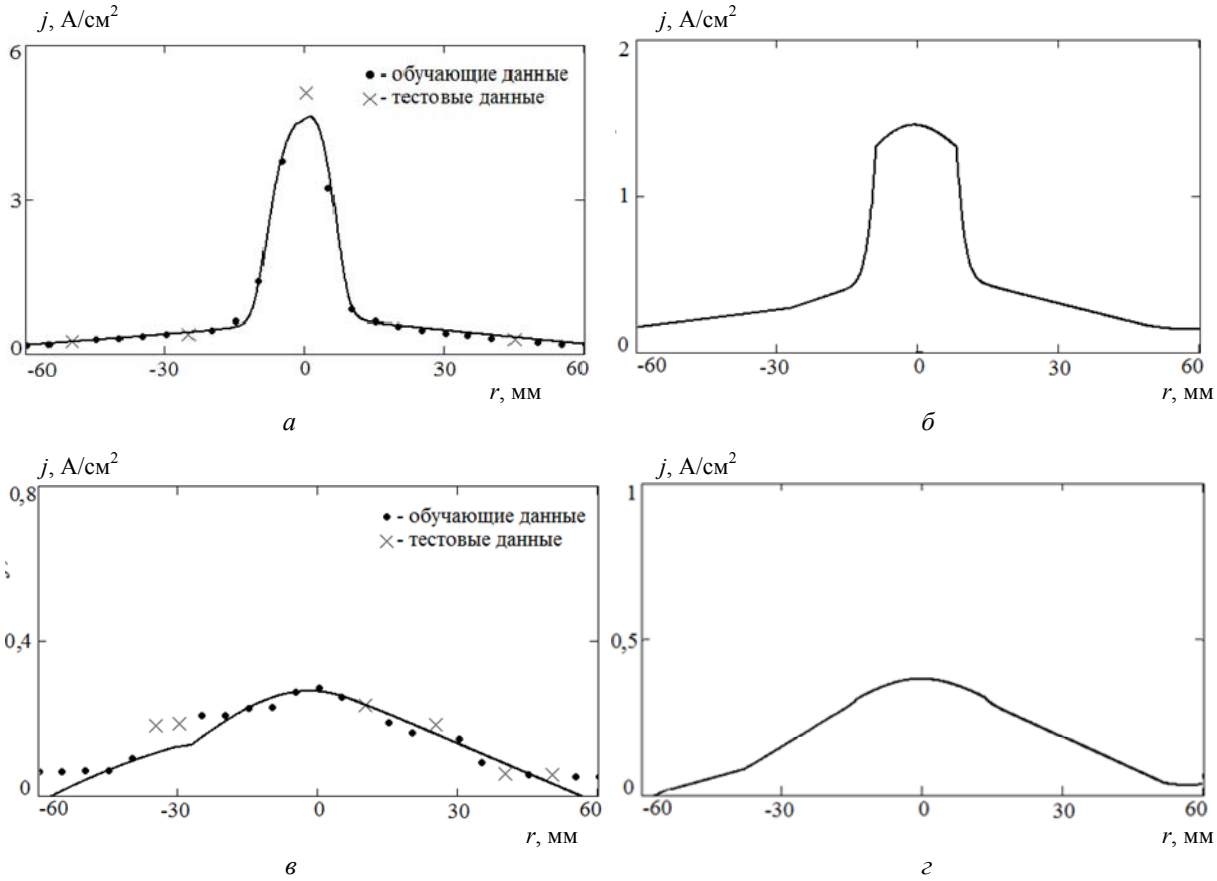

Рис. 1. Зависимость плотности тока пучка электронов *j* от радиальной координаты *r*:
а – $L = 275$, $p = 8$, $U = 8$, $I = 60$; *б* – $L = 200$, $p = 4$, $U = 8$, $I = 50$;
в – $L = 170$, $p = 3$, $U = 8$, $I = 20$; *г* – $L = 190$, $p = 4$, $U = 7$, $I = 30$

Заключение. Представленный в работе нечеткий аппроксиматор позволяет получать значения плотности тока в пучке электронов форвакуумного плазменного источника, задав на входе аппроксиматора произвольные значения ускоряющего напряжения, давления остаточного газа, ток разряда, радиальной координаты и вертикальной координаты. Ошибка аппроксимации не превышает допустимый инженерный уровень, что позволяет сделать вывод о практической применимости описанного подхода для аппроксимации и прогнозирования.

Литература

1. Бурдовицин В.А. О возможности электронно-лучевой обработки диэлектриков плазменным источником электронов в форвакуумной области давлений / В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, Е.М. Окс // Письма в Журнал технической физики. – 2009. – Т. 35, № 11. – С. 61–66.

2. Форвакуумный импульсный плазменный источник электронов на основе дугового разряда / А.В. Казаков, В.А. Бурдовицин, А.В. Медовник, Е.М. Окс // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – № 6. – С. 50–53.

3. Park H.W. Large pulsed electron beam surface treatment of translucent PMMA / H.W. Park, I. Lee // Applied Surface Science. – 2014. – Vol. 308. – P. 311–315.

4. Takagi T. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control / T. Takagi, M. Sugeno // IEEE Transaction Systems, Man and Cybernetics. – 1985. – Vol. 15. – P. 116–132.

5. Kohavi R. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection // International Joint Conferences on Artificial Intelligence. – 1995. – Vol. 2, № 12. – P. 1137–1145.

6. Сарин К.С. Метод кусочно-линейной инициализации нечетких систем типа Такаги–Сугено / К.С. Сарин, И.А. Ходашинский // Робототехника и искусственный интеллект: матер. VI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием / Сиб. федер. ун-т. – Красноярск: Центр информации, ЦНИ «Монография». – 2014. – С. 147–152.

7. Yang X.-S. Engineering optimisation by cuckoo search / X.-S. Yang, S. Deb // International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation. – 2010. – Vol. 1. – P. 330–343.

8. Ljung L. Theory and practice of recursive identification / L. Ljung, T. Soderstrom. – Cambridge, MA: MIT Press, 1983. – 528 p.

9. Ходашинский И.А. Идентификация параметров нечетких аппроксиматоров и классификаторов на основе алгоритма «кукушкин поиск» / И.А Ходашинский, Д.Ю. Минина, К.С. Сарин // Автометрия. – 2015. – Т. 51, № 3. – С. 27–34.

10. Hodashinsky I. A. Identification of the Parameters of Fuzzy Approximators and Classifiers Based on the Cuckoo Search Algorithm / I.A. Hodashinsky, D.Yu. Minina, K.S. Sarin // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2015. – Vol. 51, № 3. – P. 234–240.

Сарин Константин Сергеевич
Ассистент каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС) ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29
Эл. почта: sks@security.tomsk.ru

Медовник Александр Владимирович
Канд. техн. наук, доцент каф. физики ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 41-33-69
Эл. почта: medovnikav@mail.ru

Ходашинский Илья Александрович
Д-р техн. наук, профессор каф. КИБЭВС ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 90-01-11
Эл. почта: hodashn@rambler.ru

Sarin K.S., Medovnik A.V., Hodashinsky I.A.

Fuzzy approximator for determining the value of the current density in the electron beam of foreline plasma source

This paper presents a fuzzy system for approximation the value of the current density in the electron beam of foreline plasma source. Because of insufficient knowledge about the behavior of the arc cathode spot in the operating pressure range of foreline plasma electron sources, it is difficult to construct accurate analytical models describing this behavior. Thus, we propose to construct such a model based on experimental data. As the mathematical model, we use a fuzzy system of Takagi-Sugeno type. For structure identification of this system, we propose the method of piecewise linear initialization. For parameter identification of the system, we use the recursive least-square method and the cuckoo search optimization algorithm. Validity of the model is evaluated in terms of the mean square error, which is shown not to exceed the tolerable level.

Keywords: fuzzy system, identification, cuckoo search algorithm, recursive least squares method, electron beam, current density