

Научная статья

УДК 681.5.01

DOI: [10.34759/trd-2021-121-21](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-21)

ВИРТУАЛЬНЫЙ АДАПТИВНЫЙ ВЕКТОРНО-МАТРИЧНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ОКИСЛИТЕЛЯ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Вячеслав Сергеевич Никулин^{1✉}, Юрий Николаевич Хижняков²,
Сергей Александрович Сторожев³**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
ПНИПУ,

Пермь, Россия

[1kalif23@yandex.ru](mailto:kalif23@yandex.ru)✉

Аннотация. Рассматривается применение нейро-нечеткого векторно-матричного адаптивного подхода при расчете коэффициента камеры сгорания газотурбинного двигателя с целью повышения точности расчетов, сокращения времени обучения, расширении область применения исследуемых алгоритмов при автоматизации недетерминированных объектов в системе MISO. В работе получены аналитические выражения предикатов нейро-нечеткого векторно-матричного адаптивного подхода и их графическое представление, а также проведены исследования в области проектирования нейро-нечеткого адаптивного измерителя окислителя газотурбинного двигателя.

Ключевые слова: Прямоугольный функции принадлежности, предикаты, продукционные правила, нечеткая прямая и обратная импликация, метод средневзвешанного, полиномы Сугено

Для цитирования: Никулин В.С., Хижняков Ю.Н., Сторожев С.А. Виртуальный адаптивный векторно-матричный измеритель окислителя камеры сгорания газотурбинного двигателя // Труды МАИ. 2021. № 121. DOI: [10.34759/trd-2021-121-21](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-21)

VIRTUAL ADAPTIVE VECTOR-MATRIX METER OF THE OXIDIZER OF THE COMBUSTION CHAMBER OF A GAS TURBINE ENGINE

Vyacheslav S. Nikulin^{1✉}, Yuri N. Khizhnyakov², Sergey A. Storozhev³

Perm National Research Polytechnic University, PNRPU,

Perm, Russia

[1kalif23@yandex.ru](mailto:kalif23@yandex.ru)✉

Abstract. Fuzzy logic methods have found wide application in control problems. However, when using the apparatus of fuzzy logic, it is necessary to select models of fuzzy logical operations, being selected from empirical considerations. This complicates the algorithms construction for specific problems solving. Application of “classical” operations is justified only for solving simple problems and does not require a large number of rules. The purpose of the study consists in modernizing the vector-matrix approach applicable to the design of a neuro-fuzzy adaptive meter for the oxidizer of a gas turbine engine

algorithm. The vector models application is being proposed, aimed at the ease of implementation, high speed and of the field application expansion.

Practical significance consists in application of the vector-matrix approach of adaptive fuzzy control in the design of the combustion chamber coefficient meter of a gas turbine engine allows computational accuracy increasing, training time reduction, the scope of application expanding at the non-deterministic objects automation in the MISO system.

Application of the matrix apparatus replaces the projections of the linguistic variable (term-set) vector with the fuzzy vectors. The main operations on fuzzy vectors are given in the works of M.A. Martsenyuk, on which basis the design of a vector fuzzy oxidizer of the combustion chamber of a gas turbine engine is considered. Relevant is application of a singleton base for fuzzifier fuzzy vectors activation, as well as the fuzzy forward and backward vector implicators application for the turboprop scalar control forming. Vector-matrix representation of the initial information is convenient when programming the state-of-the-art controllers of various objects. The disadvantage of this representation consists in the fact that it is not adaptable. Thus, the article proposes to supplement the vector part of the meter with Sugeno polynomials, which coefficients are being adjusted with the teacher by least squares method.

Keywords: rectangular membership functions, predicates, production rules, fuzzy forward and backward implications, weighted average method, Sugeno polynomials

For citation: Nikulin V.S., Khizhnyakov Yu.N., Storozhev S.A. Virtual adaptive vector-matrix meter of the oxidizer of the combustion chamber of a gas turbine engine. *Trudy MAI*, 2021, no. 121. DOI: [10.34759/trd-2021-121-21](https://doi.org/10.34759/trd-2021-121-21)

Введение

В настоящее время основное направление развития прикладных задач ориентируется на разработку моделей всё более трудно формализуемых сложных систем, состоящих из большого числа взаимодействующих компонентов. Нечёткая логика является математическим аппаратом, моделирующим «человеческие» рассуждения, что позволяет применять её для построения алгоритмов управления сложными системами на языке высокого уровня.

Методы нечёткой логики нашли многочисленные применения в задачах управления [1, 2], относящихся к разным областям человеческой деятельности: в промышленности [3, 4], на транспорте [5, 6] и многих других. Понятия нечёткой логики и представления о нечётких множествах были впервые введены в работах Л.Заде [7, 8, 9, 10]. В дальнейшем было разработано несколько вариантов реализации нечётких логических операций и основанных на них алгоритмов, а также способов получения информации с использованием нечётких систем [9, 11, 12, 13, 14].

Однако при использовании аппарата нечёткой логики возникает необходимость выбора моделей нечётких логических операций – пересечение, объединение, дополнение, импликация, композиция и т.д. В литературе предложено большое количество вариантов их реализации, но все они выбраны из эмпирических соображений, что затрудняет построение алгоритмов решений конкретных задач. Так, например, по Л.Заде логическая операция «пересечение» выражается как $a \wedge b = \min(a, b)$, а логическая операция «объединение» как $a \vee b = \max(a, b)$ где a и b

есть рациональные и иррациональными числа с любым знаком и лежат на отрезке $[0,1]$.

В дальнейшем модели нечётких логических операций, введённые Л.Заде, будем называть «классическими».

Применение «классических» операций оправдано только для решения относительно простых задач, не требующих большого количества правил или многоэтапного логического вывода [1,15]. Кроме того, рассматриваемые неаналитические модели нечётких логических операций требуют при реализации на ЭВМ большого количества действий и места в статической памяти вычислительных устройств.

В связи с этим существует необходимость разработки нового, более обоснованного представления операций нечёткой логики, а также новых моделей алгоритмов нечёткого вывода, направленных на простоту реализации в контроллерах, высокое быстродействие и расширение области применения.

В работе М.А. Марценюка [16,17] для представления нечетких переменных и операций над ними предложено использовать матричный аппарат. В матричном представлении нечёткой логики для описания достоверности проекции вектора лингвистической переменной (терм-множество) заменяются нечёткими векторами.

Если ввести базисные векторы $e^{(0)}$ и $e^{(1)}$, то отдельно нечёткий вектор x может быть представлен в виде

$$x = x_0 \cdot e^{(0)} + x_1 \cdot e^{(1)}$$

причем координаты вектора x (числа x_0, x_1) должны удовлетворять условиям (1)

$$0 \leq x_0, x_1 \leq 1 \quad (1)$$

т.е. принадлежать множеству $F = [0,1]$ и удовлетворять условию нормировки (2)

$$x_0 + x_1 = 1 \quad (2)$$

В дальнейшем удобно использовать понятие пространства нечётких векторов V . Базисные векторы $e^{(0)}$ и $e^{(1)}$ образуют ортонормированный базис этого пространства. Любой нечёткий вектор может быть представлен в виде проекций x_0 , x_1 . Условие нормировки (2) означает, что концы любого нечёткого вектора x лежат на отрезке, соединяющем точки (1,0) и (0,1) отрезка АВ (рис.1).

Таким образом, пространство V образовано всеми векторами, начинающимися в начале координат (точке (0,0)) и заканчивающимися на отрезке АВ. Отметим, что в пределе чёткой логики пространство V сводится к двум базисным векторам $e^{(0)}$ и $e^{(1)}$.

Основные операции над нечеткими векторами.

Операции отрицания векторной переменной соответствует перестановка компонент вектора x : $-x = x_1 \cdot e^{(0)} + x_0 \cdot e^{(1)}$. Для представления этой операции в матричном виде потребуется матрица (3)

$$N = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

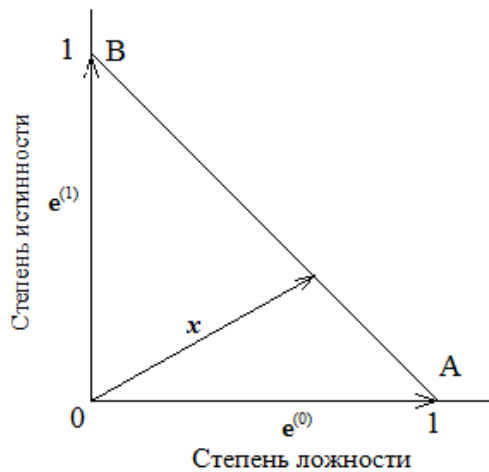


Рис.1. Пространство нечётких векторов V включает вектора, отложенные от начала координат и заканчивающиеся на отрезке АВ

Логическую операцию над векторами – конъюнкцию, дизъюнкцию и импликацию также можно представить в матричном виде.

Составим из компонент вектора x конъюнктивную матрицу $C(x)$ размером 2×2 [15]:

$$C(x) = \begin{pmatrix} 1 & x_0 \\ 0 & x_1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

С помощью этой матрицы логическая операция пересечение над нечёткими векторами могут быть представлены в виде

$$x \wedge y = C(x) \cdot y \quad (5)$$

где вектор y следует представлять как матрицу размером 1×2 , составленную из его

компонент $y = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \end{pmatrix}$, а точка в (5) обозначает матричное умножение. В явном виде

уравнения **Ошибка! Источник ссылки не найден.** имеют вид:

$$x \wedge y = \begin{pmatrix} 1 & x_0 \\ 0 & x_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_0 + x_0 y_1 \\ x_1 y_1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Результатом логической операции, сформулированной в таком виде, тоже будет нечёткий вектор. Детальное обоснование сделанного выбора матриц представлено в работе [15].

Для численной реализации нечеткого логического вывода используется матрица обратной импликации:

$$\Gamma^1(x) = \begin{pmatrix} \frac{1}{x_1} & 0 \\ -\frac{x_0}{x_1} & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Постановка задачи

В статье предлагается ввести алгоритм адаптации во вновь проектируемый векторно-матричный нейро-нечеткий измеритель окислителя камеры сгорания ГТД.

Основой в алгоритме является связь векторной фаззификации с нечеткой векторной импликацией, представленной через векторы с матричным описанием для случая, когда связь между входными переменными неизвестна. Далее с помощью обратных матриц импликации получить выходы по каждой переменной, определить среднеарифметический результат (математическое ожидание) для каждой выборки и выполнить нечеткую композицию с помощью полиномов Сугено. Коэффициенты полиномов первого порядка Сугено настраиваются учителем с помощью метода наименьших квадратов с последующим запоминанием.

Основная часть

В «классическом» подходе [10] значение функции принадлежности $\mu(u)$ элементов u универсального множества U заданному нечёткому подмножеству U_x

может выступать как свойство этих элементов u . Такое описание хорошо подходит под определение предикатов, применение которых для нечёткой логики введено в работах [15, 16, 17].

Нечёткий предикат $x(u)$ задаётся функцией, определённой на универсальном множестве U и принимающей значения в пространстве нечётких векторов V . При этом координаты нечёткого вектора $x(u)$ выражаются через функцию принадлежности $\mu_x(u)$ следующим образом:

$$x(u) = \begin{pmatrix} 1 - \mu_x(u) \\ \mu_x(u) \end{pmatrix} \quad (8)$$

Как видно из определения нечёткого предиката, он полностью задается степенью истинности $\mu(u)$, которая соответствует степени принадлежности элементов u некоторому нечёткому подмножеству U_x . В матричном подходе на этапе реализации решения задачи намного удобнее оперировать именно предикатами, заданными в форме (8), а не функциями принадлежности нечётких множеств.

Рассмотрим на примере алгоритм расчета коэффициента камеры сгорания газотурбинного двигателя (ГТД) с помощью нейро-нечеткого векторно-матричного адаптивного подхода.

ГТД есть нелинейный многорежимный объект с мерой неопределенности математического описания. Данный объект, имеющий один вход (дозатор) и n селективно управляемых выходов, подвержен влиянию внутренним неконтролируемым возмущениям (протечка разогретого топлива в дозаторе,

изменение зазора в регуляторе сопло-заслонка дозатора, переменным запаздыванием, зависящим от давления в камере сгорания, взлетно-посадочных режимов работы ГТД и т.д.) и внешним возмущениям (отклонения температуры и давления воздуха от заданных значений и т.д.) [18, 19].

В качестве управляемых выходов ГТД примем температуру за камерой сгорания $x_1 = f(T_{kc})$ с диапазоном изменения $(T_{kc \min} - T_{kc \max})$, давление в камере сгорания $x_2 = f(P_{kc})$ с диапазоном изменения $(P_{kc \min} - P_{kc \max})$ и расход топлива диффузионным коллектором (дозатором) $x_3 = f(G_T)$ с диапазоном изменения $(G_{T \min} - G_{T \max})$.

Примем для управления процессом горения в камере сгорания расчетное значение коэффициента избытка окислителя, которое определяется нейро-нечетким векторно-матричным адаптивным измерителем.

Для формирования нечетких терм-множеств по всем переменным примем прямоугольные функций принадлежности, расположенные в нормированном интервале от -1 до +1.

На рис. 2. приведено графическое представление терм-множеств векторных фазсификаторов $B\Phi_1, B\Phi_2, B\Phi_3$.

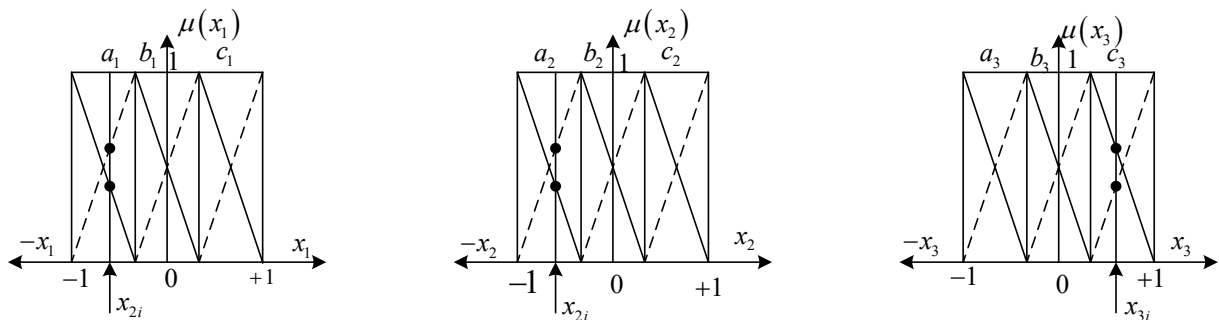


Рис. 2. Терм-множества векторных фаззификаторов ($B\Phi_1, B\Phi_2, B\Phi_3$): терм-множество входного параметра x_1 (температура); терм-множество входного параметра x_2 (давление); терм-множество входного параметра x_3 (расход топлива).

Заменяем прямоугольные функции принадлежности предикатами (см. рис.3) согласно (8), которые аналитически представлены выражениями (9)

$$\begin{aligned}
 a_1(x_1) &= \begin{pmatrix} 1 - \mu_{a1}(x_1) \\ \mu_{a1}(x_1) \end{pmatrix}; & b_1(x_1) &= \begin{pmatrix} 1 - \mu_{b1}(x_1) \\ \mu_{b1}(x_1) \end{pmatrix}; & c_1(x_1) &= \begin{pmatrix} 1 - \mu_{c1}(x_1) \\ \mu_{c1}(x_1) \end{pmatrix}; \\
 a_2(x_2) &= \begin{pmatrix} 1 - \mu_{a2}(x_2) \\ \mu_{a2}(x_2) \end{pmatrix}; & b_2(x_2) &= \begin{pmatrix} 1 - \mu_{b2}(x_2) \\ \mu_{b2}(x_2) \end{pmatrix}; & c_2(x_2) &= \begin{pmatrix} 1 - \mu_{c2}(x_2) \\ \mu_{c2}(x_2) \end{pmatrix}; \\
 a_3(x_3) &= \begin{pmatrix} 1 - \mu_{a3}(x_3) \\ \mu_{a3}(x_3) \end{pmatrix}; & b_3(x_3) &= \begin{pmatrix} 1 - \mu_{b3}(x_3) \\ \mu_{b3}(x_3) \end{pmatrix}; & c_3(x_3) &= \begin{pmatrix} 1 - \mu_{c3}(x_3) \\ \mu_{c3}(x_3) \end{pmatrix}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

С использованием унимодальной функцией принадлежности (синглтон), жестко связанных с текущими значениями входных переменных каждой выборки [21], определим степени истинности (см. рис.2).

Запишем продукционные правила базы знаний для данного примера (10):

$$\begin{aligned}
 \Pi_1 &: \text{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть } a_1 \text{ И } x_2 \text{ есть } b_1 \text{ И } x_3 \text{ есть } c_1, \text{ТО } h_1; \\
 \Pi_2 &: \text{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть } a_2 \text{ И } x_2 \text{ есть } b_2 \text{ И } x_3 \text{ есть } c_2, \text{ТО } h_2; \\
 \Pi_3 &: \text{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть } a_3 \text{ И } x_2 \text{ есть } b_3 \text{ И } x_3 \text{ есть } c_3, \text{ТО } h_3.
 \end{aligned} \tag{10}$$

На рис.3 приведена структурная схема векторно-нечеткого адаптивного измерителя коэффициента камеры сгорания ГТД.

Запишем прямые векторные импликаторы (11)

$$\begin{aligned}
 h_1 &= \begin{pmatrix} 1 - \mu_{a_1}(x_1) \\ \mu_{a_1}(x_1) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 - \mu_{a_1}(x_2) \\ \mu_{a_1}(x_2) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 - \mu_{a_1}(x_3) \\ \mu_{a_1}(x_3) \end{pmatrix}; \\
 h_2 &= \begin{pmatrix} 1 - \mu_{b_1}(x_1) \\ \mu_{b_1}(x_1) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 - \mu_{b_1}(x_2) \\ \mu_{b_1}(x_2) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 - \mu_{b_1}(x_3) \\ \mu_{b_1}(x_3) \end{pmatrix}; \\
 h_3 &= \begin{pmatrix} 1 - \mu_{c_1}(x_1) \\ \mu_{c_1}(x_1) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 - \mu_{c_1}(x_2) \\ \mu_{c_1}(x_2) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 - \mu_{c_1}(x_3) \\ \mu_{c_1}(x_3) \end{pmatrix}.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Векторные прямые импликаторы h_1, h_2, h_3 рассчитывают относительные значения выполнения продукционных правил (10).

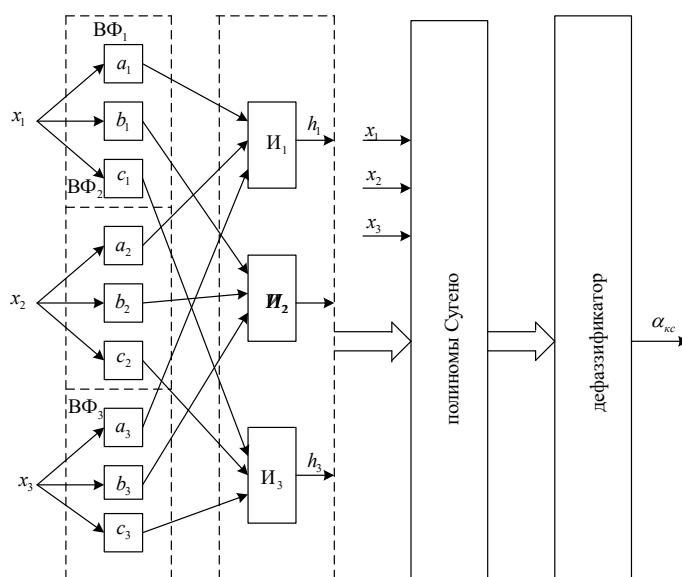


Рис. 3. Структурная схема векторно-нечеткого адаптивного измерителя коэффициента камеры сгорания ГТД, где слой 1 – векторные фаззификаторы BF_1, BF_2, BF_3 , выраженные через предикаты; слой; 2 – нечеткие прямые и обратные импликаторы (I_1, I_2, I_3); нечеткая композиция с применением полиномов первого порядка Сугено; слой 4 – дефаззификация по методу средневзвешанного

Для численной реализации логического вывода (расход топлива) используется обратная матрица импликации согласно (12):

$$I^{-1}(h_1) = \begin{pmatrix} \frac{1}{h_1} & 0 \\ h_1 & 1 \end{pmatrix};$$

$$I^{-1}(h_2) = \begin{pmatrix} \frac{1}{h_2} & 0 \\ h_2 & 1 \end{pmatrix};$$

$$I^{-1}(h_3) = \begin{pmatrix} \frac{1}{h_3} & 0 \\ h_3 & 1 \end{pmatrix}.$$
(12)

Запишем среднеарифметическое значение выхода слоя 2 согласно (13).

$$h^* = \frac{\sum_{i=1}^3 I^{-1}(h_i)}{3}$$
(13)

На этом расчет векторной части измерителя коэффициента камеры сгорания ГТД заканчивается.

Далее необходимо выполнить декомпозицию измерителя по формуле средневзвешенного (слой 4).

На рис.4 показана расчетная схема формулы средневзвешенного.

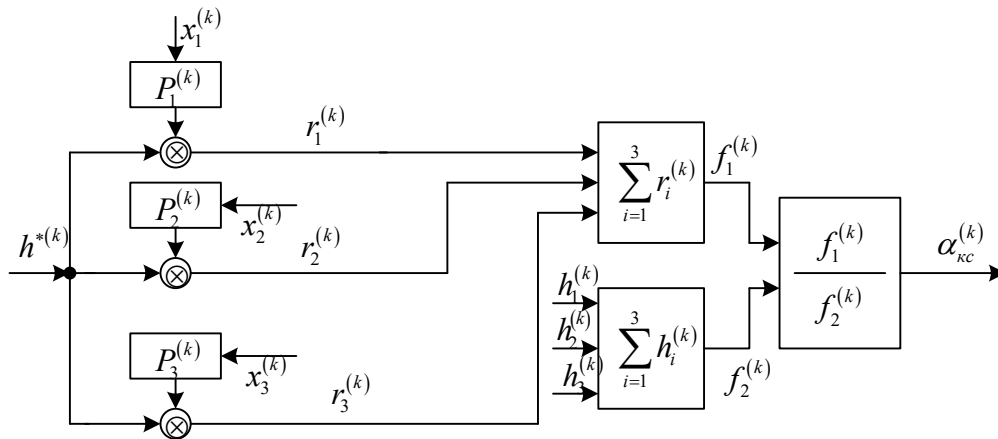


Рис. 4. Расчетная схема формулы средневзвешенного

Нечеткая композиция выполнена на полиномах Сугено. Ниже дается математический вывод итерационной процедуры настройки коэффициентов полиномов Сугено для k -выборки n входов ННР.

Запишем полиномы Сугено (14)

$$\begin{aligned}
 P_1^{(k)} &= \sum_{i=1}^n c_i^{(k)} \cdot x_i^{(k)}; \\
 P_2^{(k)} &= \sum_{i=1}^n c_i^{(k)} \cdot x_i^{(k)}; \\
 &\dots\dots\dots \\
 P_n^{(k)} &= \sum_{i=1}^n c_i^{(k)} \cdot x_i^{(k)}.
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Далее запишем (15)

$$\begin{aligned}
 r_1^{(k)} &= h^{*(k)} \cdot P_1^{(k)}; \\
 r_2^{(k)} &= h^{*(k)} \cdot P_2^{(k)}; \\
 &\dots\dots\dots \\
 r_n^{(k)} &= h^{*(k)} \cdot P_n^{(k)},
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

где

$h^{*(k)}$ – выход блока нечеткой импликации;

$r_1^{(k)}, r_2^{(k)}, \dots, r_n^{(k)}$ – выходы блока нечеткой композиции.

Запишем выход измерителя на k -выборке (16)

$$y_i^{(k)} = \alpha_{\text{кс}}^{(k)} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i^{(k)}}{\sum_{i=1}^n h_i^{(k)}}.
 \tag{16}$$

Определяем ошибку (невязку) (17)

$$E_i^{(k)} = y_i^{(k)} - y^{(k)}
 \tag{17}$$

где $y^{(k)}$ – выход k -выборки.

Запишем рекуррентную формулу итераций (18)

$$c_i^{(k)}(t+1) = c_i^{(k)}(t) + C \frac{dE_i^{(k)}(t)}{dc_i^{(k)}}
 \tag{18}$$

где k – номер текущей выборки (эпохи); C – шаг итерации

Алгоритм настройки с учителем заключается в следующем:

– задается k – выборка (значения синглтонов);

- определяются степени истинности векторных фаззификаторов;
 - определяются выходы векторных импликаторов;
 - определяется среднеарифметическое значение (выход слоя 2);
 - определяется текущее значение средневзвешанного;
- при достижении ошибки (17) меньше 1% процесс итерации текущей эпохи завершается и новые коэффициенты полиномов первого порядка Сугено запоминаются;
- задается $(k+1)$ – выборка (начало следующей эпохи) и процесс настройки полиномов повторяется с учетом ранее рассчитанных коэффициентах полиномов Сугено и т.д.

Вычислительные эксперименты в системе MATLAB позволяют оценить работу при «классическом» подходе (см. рис. 5) и матричном подходе (см. рис. 6) описания нечетких логических операций.

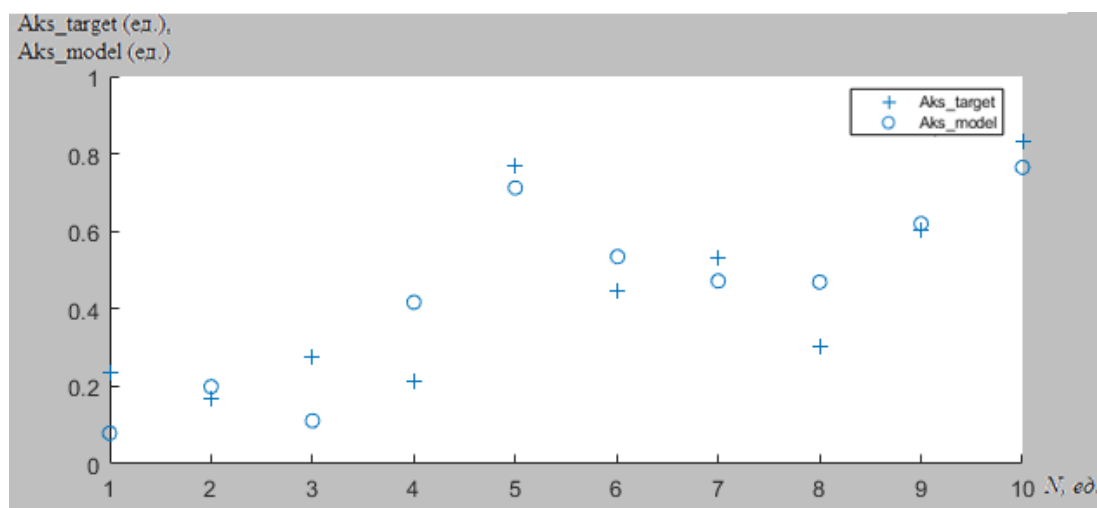


Рис. 5. Результаты эксперимента при «классическом» описании нечетких логических операций

где Aks_target – желаемое значение коэффициента избытка воздуха, Aks_model – текущее значение коэффициента избытка воздуха, N номер эксперимента.

Среднеквадратическая ошибка при «классическом» подходе составляет (19):

$$E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^9 (a_{\kappa c_i}^{\text{target}} - a_{\kappa c_i}^{\text{model}})^2} \rightarrow 0.0926(\text{ед.}) \quad (19)$$

Время обучения: $t_{\text{обуч.}} = 3,28\text{с.}$

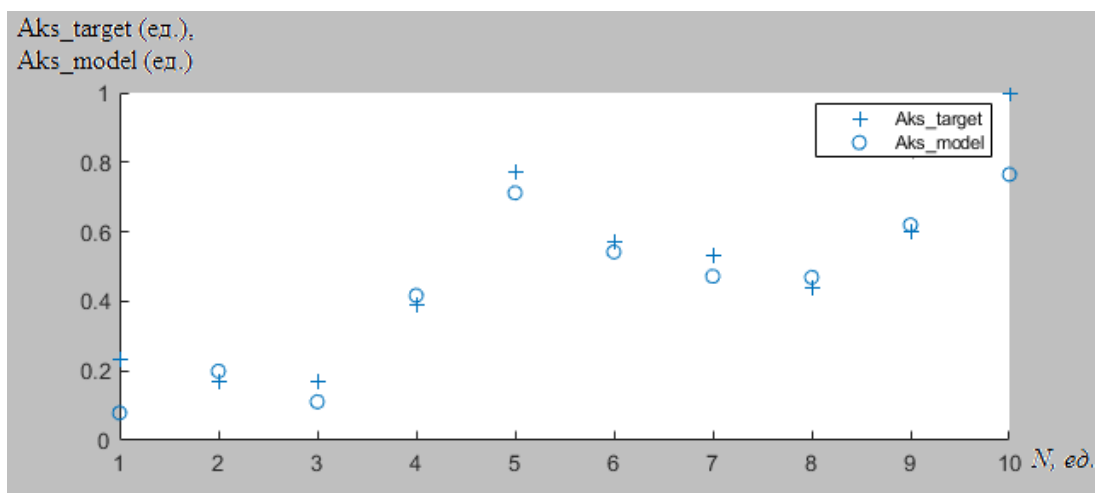


Рис. 6. Результаты эксперимента при «матричном» описании нечетких логических операций

Среднеквадратическая ошибка при «матричном» подходе составляет (20):

$$E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^9 (a_{\kappa c_i}^{\text{target}} - a_{\kappa c_i}^{\text{model}})^2} \rightarrow 0.0261(\text{ед.}) \quad (20)$$

Время обучения: $t_{\text{обуч.}} = 1,12\text{с.}$

Связь векторной фаззификации с нечеткой векторной импликацией, представленной через векторы с матричным описанием для случая, когда связь между входными переменными неизвестна, позволяет снизить среднеквадратическую ошибку с 0,0926 («классический» подход) до 0,0261. Также «матричный подход» позволяет снизить время обучения нечеткого векторно-матричного адаптивного измерителя с 3.28 до 1,12 с.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что модификация сети Anfis с применением векторных фаззификаторов способствует дальнейшему развитию теории нечетких систем [20, 21].

Заключение

1. Рассмотрен векторно-матричный подход к проектированию нейро-нечеткого адаптивного измерителя окислителя газотурбинного двигателя.

2. Получены аналитические выражения предикатов и их графическое представление.

3. Приведены аналитические выражения продукционных правил базы знаний.

4. Получены выражения обратных матриц импликаций для скалярного расчета выхода нечеткой импликации.

5. Приведена рекуррентная формула для расчета коэффициентов полиномов первого порядка Сугено в каждой эпохе с последующим запоминанием для придания измерителю адаптивных свойств.

6. Векторно-матричный подход адаптивного нечеткого управления повышает точность расчетов, сокращает время обучения, расширяет область применения при автоматизации недетерминированных объектов в системе MISO.

Список источников

1. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы. – М.: Горячая линия -Телеком, 2006. – 452 с.

2. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and applications to modeling and control // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1985, SMC-15, pp. 116-132. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399>
3. Гостев В.И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. – СПб: БХВ-Петербург, 2011. – 416 с.
4. Девятков В.В. Системы искусственного интеллекта силовыми установками. – М.: Машиностроение, 1991. – 320 с.
5. Никулин В.С., Сторожев С.А., Абдуллин Д.М., Хижняков Ю.Н. Адаптивный виртуальный измеритель вредных веществ в камере сгорания ГТД с применением нечеткой логики // Труды МАИ. 2020. № 116. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=121086>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-11)
6. Сторожев С.А., Хижняков Ю.Н. Новый метод адаптации регулятора состояний с применением нечеткой логики // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=158255>. DOI [10.34759/trd-2021-118-16](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-16)
7. Zadeh L.A. Outline of a New Approach to Analysis of Complex Systems and Decision Processes // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1973, no. 1, pp. 28-44.
8. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях / В кн.: Вопросы анализа и процедуры принятия решений. - М.: Мир, 1976. С. 172-215.
9. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. - М.: Мир, 1976. - 165 с.
10. Заде Л.А. Размытые множества и их применение в распознавании образов и кластер-анализе / В кн.: Классификация и кластер. – М.: Мир, 1980. С. 208-247.

11. Хижняков Ю.Н. Нечеткое, нейронное и гибридное управление. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 303 с.
12. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 798 с.
13. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTech. - СПб.: БХВ Петербург, 2005. – 736 с.
14. Ярушкина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем: - М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с.
15. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1974, vol. 121, no.12, pp. 1585-1588.
16. Марценюк М.А., Селетков И.П. Нечеткий клеточный автомат для регулирования поля температуры. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2015. № 2-3 (212-217). С. 125-138.
17. Марценюк М.А., Поляков В.Б., Селетков И.П. Матричная реализация алгоритмов нечёткого вывода. // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2012. № 6 (162). С. 133-141.
18. Мосолов С.В. Сидлеров Д.А., Пономарев А.А. Сравнительный анализ особенностей рабочего процесса в камерах сгорания ЖРД со струйно-струйными и

струйно-центробежными форсунками на основе численного моделирования // Труды МАИ. 2012. № 59. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=34989>

19. Бакланов А.В., Макарова Г.Ф., Васильев А.А., Нуждин А.А. Влияние перфорированного обтекателя фронтного устройства на основные характеристики камеры сгорания ГТД // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100700>

20. Чичерова Е.В. Использование алгоритмов нечёткой логики для управления частотой вращения силовой турбины газотурбинного двигателя // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57812>

21. Верещиков Д.В., Волошин В.А., Ивашков С.С., Васильев Д.В. Применение нечеткой логики для создания имитационной модели управляющих действий летчика // Труды МАИ. 2018. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91926>

References

1. Rutkovskaya D., Pilin'skii M., Rutkovskii L. *Neironnyye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* (Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems), Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2006, 452 p.

2. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and applications to modeling and control, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1985, SMC-15, pp. 116-132. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399>

3. Gostev V.I. *Proektirovanie nechetkikh regulyatorov dlya sistem avtomaticheskogo upravleniya* (Design of fuzzy controllers for automatic control systems), Saint Petersburg, BKhV-Peterburg, 2011, 416 p.
4. Devyatkov V.V. *Sistemy iskusstvennogo intellekta silovymi ustanovkami* (Artificial intelligence systems by power plants), Moscow, Mashinostroenie, 1991, 320 p.
5. Nikulin V.S., Storozhev S.A., Abdullin D.M., Khizhnyakov Yu.N. *Trudy MAI*, 2020, no. 116. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=121086>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-11](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-11)
6. Storozhev S.A., Khizhnyakov Yu.N. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158255>. DOI [10.34759/trd-2021-118-16](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-16)
7. Zadeh L.A. Outline of a New Approach to Analysis of Complex Systems and Decision Processes, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1973, no. 1, pp. 28-44.
8. Bellman R., Zade L. *Prinyatie reshenii v rasplyvchatykh usloviyakh. V kn.: Voprosy analiza i protsedury prinyatiya reshenii* (Decision-making in vague conditions. In the book: Issues of analysis and decision-making procedures), Moscow, Mir, 1976, pp. 172-215.
9. Zade L.A. *Ponyatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennykh reshenii* (The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions), Moscow, Mir, 1976, 165 p.
10. Zade L.A. *Razmytye mnozhestva i ikh primenenie v raspoznavanii obrazov i klaster-analize / V kn.: Klassifikatsiya i klaster* (Fuzzy sets and their application in pattern

recognition and cluster analysis. In the book: Classification and cluster), Moscow, Mir, 1980, pp. 208-247.

11. Khizhnyakov Yu.N. *Nechetkoe, neironnoe i gibridnoe upravlenie* (Fuzzy, neural and hybrid control), Perm', Izd-vo PNIPU, 2013, 303 p.

12. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* (Fuzzy modeling and control), Moscow, BINOM. Laboratoriya znanii, 2007, 798 p.

13. Leonenkov A.V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i FuzzyTech* (Fuzzy modeling in MATLAB and FuzzyTech), Saint Petersburg, BKhV Peterburg, 2005, 736 p.

14. Yarushkina N.G. *Osnovy teorii nechetkikh i gibridnykh system* (Fundamentals of the theory of fuzzy and hybrid systems), Moscow, Finansy i statistika, 2004, 320 p.

15. Mamdani E.H. Application of fuzzy algorithms for the control of a simple dynamic plant, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1974, vol. 121, no.12, pp. 1585-1588.

16. Martsenyuk M.A., Seletkov I.P. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*, 2015, no. 2-3 (212-217), pp. 125-138.

17. Martsenyuk M.A., Polyakov V.B., Seletkov I.P. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie*, 2012, no. 6 (162), pp. 133-141.

18. Mosolov S.V. Sidlerov D.A., Ponomarev A.A. *Trudy MAI*, 2012, no. 59. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34989>

19. Baklanov A.V., Makarova G.F., Vasil'ev A.A., Nuzhdin A.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=100700>
20. Chicherova E.V. *Trudy MAI*, 2015, no. 81. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57812>
21. Vereshchikov D.V., Voloshin V.A., Ivashkov S.S., Vasil'ev D.V. *Trudy MAI*, 2018, no. 99. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=91926>

Статья поступила в редакцию 10.11.2021; одобрена после рецензирования 20.11.2021; принята к публикации 21.12.2021.

The article was submitted on 10.11.2021; approved after reviewing on 20.11.2021; accepted for publication on 21.12.2021