

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА СУГЕНО В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА АВИАЦИОННЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Чан Минь Хай¹, Ку Тхань Фонг², Нгуен Тхе Тханг³,
Нгуен Тхань Санг⁴, Н. К. Юрков⁵, Фам Ван Ту⁶

^{1, 2, 3, 4} Академия противовоздушной обороны и Военно-воздушных сил Вьетнама, Ханой, Вьетнам

⁵ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

⁶ Войска противовоздушной обороны и Военно-воздушных сил Вьетнама, Ханой, Вьетнам

¹ minhhai.kq80@gmail.com, ² thanhphongkshk@gmail.com, ³ thethang.pkkq@gmail.com,

⁴ thanhsang8227@gmail.com, ⁵ yurkov_NK@mail.ru, ⁶ phamvantu15a@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальной в современном мире является проблема повышения помехоустойчивости, скрытности, надежности, пропускной способности и дальности действия наземных и бортовых радиоэлектронных систем (РЭС), а также определение величин остаточного ресурса. Техническое состояние радиотехнических систем зависит от множества факторов, основные из которых будем учитывать. Зная нормативные значения диагностических параметров узлов и агрегатов, можно прогнозировать остаточный ресурс системы, т.е. ее наработку от момента технического диагностирования параметра до момента получения им предельного значения. *Материалы и методы.* Рассматривается применение алгоритма нечетко-логического вывода Сугено – Кана для оценки остаточного ресурса для авиационных радиотехнических средств. *Результаты.* Изложено теоретическое представление нечеткой логики, остаточного ресурса и применение алгоритмов логико-нечеткого вывода для решения задач продления и прогнозирования остаточного ресурса авиационных радиотехнических устройств. *Выводы.* Получены технические рекомендации для практических приложений продления и прогнозирования остаточного ресурса технических изделий.

Ключевые слова: нечеткий логический вывод, алгоритмы, продление, прогнозирование, остаточный ресурс, радиотехнические средства

Для цитирования: Хай Чан Минь, Фонг Ку Тхань, Тханг Нгуен Тхе, Санг Нгуен Тхань, Юрков Н. К., Ту Фам Ван. Применение алгоритма нечеткого логического вывода Сугено в задаче прогнозирования остаточного ресурса авиационных радиотехнических средств // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 15–25. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-2

APPLICATION OF SUGENO FUZZY INFERENCE ALGORITHM IN THE PROBLEM OF PREDICTING THE RESIDUAL LIFE OF AVIATION RADIOTECHNICAL EQUIPMENT

Trần Minh Hải¹, Ku Thanh Phong², Nguyen The Thang³,
Nguyễn Thanh Sáng⁴, N.K. Yurkov⁵, Phạm Văn Tú⁶

^{1, 2, 3, 4} Vietnam Air Defense and Air Force Academy, Hanoi, Vietnam

⁵ Penza State University, Penza, Russia

⁶ Vietnam Air Defense and Air Force Service, Hanoi, Vietnam

¹ minhhai.kq80@gmail.com, ² thanhphongkshk@gmail.com, ³ thethang.pkkq@gmail.com,

⁴ thanhsang8227@gmail.com, ⁵ yurkov_NK@mail.ru, ⁶ phamvantu15a@gmail.com

Abstract. *Background.* The problem of increasing noise immunity, secrecy, reliability, throughput and range of ground and airborne electronic systems (RES), as well as determining the values of the residual resource, is relevant in the modern world. The technical condition of radio engineering systems depends on many factors, the main ones of which will be taken into account. Knowing the standard values of the diagnostic parameters of units and assemblies, it is possible to predict the residual resource of the system, i.e. its operation from the moment of technical diagnostics of the parameter until the moment it receives the limit value. *Materials and methods.* The paper considers the application of the Sugeno-Kan fuzzy-logical inference algorithm for assessing the residual resource for aviation radio engineering equipment. *Results.* The paper presents a theoretical representation of fuzzy logic, residual resource and the application of fuzzy-logical inference algorithms for solving the problems of extending and predicting the residual resource of aviation radio engineering devices. *Conclusions.* Technical recommendations for practical applications of extending and predicting the residual resource of technical products are obtained.

Keywords: fuzzy logical inference, algorithms, extension, forecasting, residual resource, radio engineering means

For citation: Hải Trần Minh, Phong Ku Thanh, Thang Nguyen The, Sáng Nguyễn Thanh, Yurkov N.K., Tú Phạm Văn. Application of sugeno fuzzy inference algorithm in the problem of predicting the residual life of aviation radiotechnical equipment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(2):15–25. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-2

Введение

В настоящее время во многих странах эксплуатируются различные типы радиотехнических средств для гражданской и военной авиации. Возрастающие требования к повышению помехоустойчивости, скрытности, надежности, пропускной способности и дальности действия наземных и бортовых радиоэлектронных систем (РЭС) требуют особого внимания к эффективности технического обслуживания и прогнозирования остаточного ресурса всех элементов и комплексов РЭС. Эффективное использование радиолокационной (обзорный радиолокатор трассовый ОРЛ-Т, обзорный радиолокатор аэродромный ОРЛ-А, автономный вторичный радиолокатор ВРЛ, посадочный радиолокатор РЛС-П, радиолокационная станция обзора летного поля РЛС ОЛП) и радионавигационной (автоматический радиопеленгатор АРП, наземный всенаправленный ОВЧ-радиомаяк азимутальный РМА (VOR-маяк), наземный всенаправленный УВЧ-радиомаяк дальномерный РМД (DME-маяк), радиотехническая система ближней навигации РСБН, отдельная приводная радиостанция ОПРС, курсовой радиомаяк КРМ, глиссальный радиомаяк ГРМ, маркерный радиомаяк МРМ, дальняя приводная радиостанция ДПРС, ближняя приводная радиостанция БПРС) информации, а также авиационной электро-связи (передающий радиоцентр ПРЦ, приемный радиоцентр ПМРЦ и радиобюро; автономный ретранслятор авиационной подвижной воздушной связи АРТР, центр коммутации сообщений ЦКС) необходимо для обеспечения безопасности полетов воздушных судов (ВС) [1–4].

Как известно, техническое состояние радиотехнических систем при их эксплуатации зависит от различных факторов, не поддающихся предварительному учету. Зная нормативные значения диагностических параметров узлов и агрегатов, можно прогнозировать *остаточный ресурс* системы, т.е. ее наработку от момента технического диагностирования параметра до момента получения им предельного значения.

Прогнозирование остаточного ресурса проводится с целью определения наработки средств и систем с момента технического диагностирования его состояния до достижения им предельного состояния с заданной вероятностью безотказной работы.

В общем случае выбор метода прогнозирования остаточного ресурса должен обосновываться точностью и достоверностью полученных данных, а также требованиями точности и достоверности прогнозируемого ресурса объекта и риска его дальнейшей эксплуатации, наличия и надежности системы контроля его технического состояния.

Основой прогнозирования остаточного ресурса служит следующая информация: диагностические данные о состоянии объекта; данные о режиме и условиях эксплуатации; априорная информация о процессах, ограничивающих ресурс.

Номенклатура параметров технического состояния должна содержать:

- наименование параметра;
- принадлежность его к параметрам, описывающим групповые или индивидуальные особенности исследуемого объекта;
- способ измерения параметра;
- характеристику погрешности измерения параметра.

Остаточный ресурс авиационных радиотехнических средств с применением алгоритмов нечеткого логического вывода

Остаточный срок службы авиационных радиотехнических средств (АРТС)

Распределение остаточного срока службы оцениваемого АРТС и, соответственно, кривая выживаемости, характеризующая вероятностный процесс выбытия АРТС данного класса, доживших до данного возраста, могут быть рассчитаны, исходя из условного распределения вероятностей. Условная плотность логарифмически нормального распределения остаточного срока службы, выраженного в относительных единицах, отвечающая условию, что АРТС дожил до возраста τ , определяется следующим образом [5, 6]:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} e^{-\frac{(\lg t - \mu)^2}{2\sigma^2}}, \dots, t > \frac{\tau}{\tau_N}, \\ 0, \dots, t \leq \frac{\tau}{\tau_N}. \end{cases} \quad (1)$$

Дальнейшие расчеты и соответствующие графики [7–9] построены в предположении, что коэффициент вариации $\rho = 0,3$ и допустимый уровень выбытия АРТС из эксплуатации до достижения ими нормативного срока $\alpha = 0,1$.

Зная плотность распределения остаточного срока службы (1), можно определить среднее значение остаточного срока службы T (в относительных единицах) при условии, что АРТС уже эксплуатировался некоторое время (t).

При эксплуатации технических систем и изделий используют следующие методы прогнозирования остаточного ресурса основных агрегатов и узлов по реализации:

1) прямые (метод временных рядов, метод степенных функций, метод дробно-линейных функций, экспоненциальный метод, логарифмический метод, метод среднестатистических закономерностей параметра, линейный метод и др.);

2) системные (дифференциальный метод, по энергетическим параметрам, метод построения математических моделей, адаптационное прогнозирование и др.) [10].

Чаще всего используются методики, позволяющие провести прогнозирование остаточного ресурса по диагностическим параметрам на основе определения статистических взаимосвязей между структурными и диагностическими параметрами технических систем. а также при наличии адекватных статистических моделей изменения данных их параметров во времени.

На системном уровне учитывается не только изменение диагностических параметров и их взаимосвязи, а также и влияние внешних факторов. Если не принимать во внимание внешние условия, то чаще всего используются подходы, основанные на экстраполяции ресурса.

Признаки предельного состояния оборудования, установленные нормативно-технической документацией, являются критериями предельного состояния. Одним из таковых является остаточный ресурс – запас возможной наработки оборудования после момента контроля его технического состояния (или ремонта), в течение которого обеспечивается соответствие требованиям нормативно-технической документации всех его основных технико-экономических показателей.

Для принятия обоснованных решений необходимо иметь достаточную информацию о нагруженности основных и наиболее напряженных элементов в течение всего предыдущего периода эксплуатации, а также об изменении технического состояния этих элементов.

Диагностирование предельного технического состояния и прогнозирование величины остаточного ресурса может быть надежно осуществлено при одновременном выполнении следующих условий [6, 7]:

- известны параметры технического состояния (ПТС) оборудования;
- известны критерии предельного состояния оборудования;
- имеется возможность периодического (или непрерывного) контроля значений ПТС.

Информативными параметрами для прогнозирования и расчета остаточного ресурса также могут быть:

- величины возникающих повреждений (глубина коррозии, величина эрозионного или механического износа);
- параметры сопутствующих процессов (уровни вибрации агрегатов, величины утечек в уплотнениях, температура узлов трения и др.);
- технологические параметры (давление, температура, расход продукта);
- показатели качества и эффективности функционирования оборудования (производительность, расход электроэнергии, коэффициент полезного действия и т.п.).

В общем случае для выбора наиболее информативных параметров составляется полный перечень предельных состояний оборудования и соответствующих контролируемых параметров, связанных с каждым предельным состоянием.

Для расчета предельного срока службы при наличии достаточной статистической базы данных используются классические методы графической экстраполяции [6].

Нечетко-логический подход к оценке остаточного ресурса авиационных радиотехнических средств

Для автоматизированной оценки состояния узлов авиационных радиотехнических средств (АРТС) используются экспертные системы, основанные на знаниях и нечеткой логике [11, 12]. Известные экспертные системы используют продукционную модель представления знаний, что позволяет прогнозировать отказы АРТС и определять причины, из-за которых возникли отказы, за счет получения и сопоставления трендов, полученных с участков временного ряда значений измеряемых параметров функционирования оборудования, с определенным набором правил для допустимых изменений этих параметров. Основной трудностью при разработке подобных экспертных систем является формирование требуемой базы знаний, основанной на опыте экспертов и данных о прошедших отказах АРТС.

Существующие методики и стандарты [5–7] в области прогнозирования остаточного ресурса АРТС требуют наличия большого объема вводных и статистических данных (совокупность сведений о состоянии оборудования, его узлов и агрегатов, а также параметрах, тенденциях и закономерностях происходящих процессов) для расчета.

Шкалы оценки состояния АРТС (неработоспособное, неисправное, ограниченно работоспособное, работоспособное, недопустимое, аварийное) являются средством адекватного сопоставления и определения численных значений отдельных свойств и качеств различных систем АРТС.

Применительно к решению задач оценки технического состояния АРТС и прогнозирования их работоспособности при использовании централизованных систем технического обслуживания (ТО) и ремонта (Р) может быть использована экспертная система с применением алгоритмов нечетко-логического вывода. Это объясняется следующим обоснованием [13–16]:

- нечеткая логика дает возможность достаточно просто заложить информацию об объекте в виде нечетких правил, которые более близки к естественному языку и понятны;
- при привлечении экспертов (специалистов, связанных с эксплуатацией и ремонтом оборудования) увеличится и вероятность того, что диагностическая информация и прогноз состояния оборудования будут ближе к истине;
- нечеткие модели оказываются более простыми для реализации по сравнению с классическими алгоритмами оценки и прогнозирования технического состояния сложных технических систем;
- правила нечеткой логики могут быть использованы для построения структуры нейроноподобной сети;
- результаты вывода нечеткой экспертной системы в задачах прогнозирования и диагностирования объекта могут быть использованы в качестве обеспечивающей системы ТО и Р для принятия решений, а также интегрированы в ЕАМ/ERP системы и др.

База знаний представляет собой набор правил для конкретных производственных условий и учитывает влияние тех или иных АРТС. В данном случае задача системы нечеткого вывода состоит в том, чтобы, руководствуясь базой правил для фактических значений входных переменных (экспертных оценок, системы АРТС и др.), определить основные параметры плотности распределения ресурса (область нечетких отказов). Таким образом, возможно сузить или расширить интервал нечеткого отказа. Распределение Вейбулла применяют при описании надежности сложных технических систем [5–7]. Это распределение является двухпараметрическим универсальным законом, так как при изменении параметров оно в пределе может описывать нормальное распределение, логнормальное распределение, экспоненциальное распределение и др.

Теоретическое представление нечетких множеств, нечеткой логики для алгоритмов нечеткого логического вывода

По определению [17, 18], нечетким множеством (fuzzy set) A на универсальном множестве U называется совокупность пар $(\mu_A(u), u)$, где $\mu_A(u)$ – степень принадлежности (число из диапазона $[0, 1]$) элемента $u \in U$ к нечеткому множеству A .

Функцией принадлежности (membership function) $\mu_A(u)$ возможно вычислить степень принадлежности произвольного элемента $u \in U$ универсального множества к нечеткому множеству A . Функции принадлежности имеют различные формы, типичными из которых являются кусочно-

линейные (треугольные, трапециевидные), Z -образные и S -образные (или сплайн-функции) функции принадлежности. Z -образная кривая используется для представления таких свойств нечетких множеств, характеризующихся неопределенностью типа: «малое количество», «небольшое значение», «незначительная величина», «низкий уровень» и др. (т.е. низкая степень проявления того или иного качественного или количественного признака). S -образные функции используются для представления неопределенностей типа: «высокая норма», «высокий уровень», «большое, значительное значение» и многих других (т.е. высокая степень проявления того или иного качественного или количественного признака). Π -образные функции принадлежности представляют целый класс кривых, которые по своей форме напоминают колокол, сглаженную трапецию или букву «П».

Нечеткая переменная – это кортеж вида $\langle \alpha, X, A \rangle$, где α – имя нечеткой переменной; X – ее область определения; A – нечеткое множество на универсуме X .

Лингвистическая переменная определяется как кортеж

$$\langle \alpha, T, U, G, M \rangle,$$

где α – название (имя) лингвистической переменной; T – базовое терм-множество лингвистической переменной или множество ее значений (термов), каждое из которых представляет собой наименование отдельной нечеткой переменной α ; U – область определения (универсум) нечетких переменных, которые входят в определение лингвистической переменной α ; G – некоторая синтаксическая процедура, которая описывает процесс образования или генерирования из множества T новых, осмысленных в рассматриваемом контексте значений для данной лингвистической переменной α ; M – семантическая процедура, которая позволяет поставить в соответствие каждому новому значению данной лингвистической переменной, получаемому с помощью процедуры G , некоторое осмысленное содержание посредством формирования соответствующего нечеткого множества.

Терм-множеством (term set) называется множество всех возможных значений лингвистической переменной. Термом (term) называется любой элемент терм-множества.

Нечеткая база знаний

Правилом нечетких продукций называется классическое правило вида «ЕСЛИ... ТО ...», где в качестве условий и заключений будут использоваться нечеткие высказывания и записываются в форме [19–23]:

$$\text{IF } (\beta_1 \text{ IS } \alpha_1) \text{ AND (OR) } (\beta_2 \text{ IS } \alpha_2) \text{ THEN } (\beta_3 \text{ IS } \alpha_3)$$

или

$$(i) \quad Q; P; A \Rightarrow B; \quad S, F, N,$$

где (i) – имя нечеткой продукции; Q – сфера применения нечеткой продукции; P – условие применимости ядра нечеткой продукции; $A \Rightarrow B$ – ядро нечеткой продукции, в котором A – условие ядра (или антецедент); B – заключение ядра (или консеквент); « $\Rightarrow$ » – знак логической секвенции (или следование); S – метод или способ определения количественного значения степени истинности заключения ядра; F – коэффициент определенности или уверенности нечеткой продукции; N – постусловия продукции.

Продукция ядро $A \Rightarrow B$ является центральным компонентом нечеткой продукции. Ядро продукции записывается в форме обычной логики: «ЕСЛИ A , ТО B » или в виде: «IF A , THEN B », где A и B – некоторые выражения нечеткой логики, которые наиболее часто представляются в форме нечетких высказываний. При этом секвенция интерпретируется в обычном логическом смысле как знак логического следования заключения B из условия A .

S – метод или способ определения количественного значения степени истинности заключения B на основе известного значения степени истинности условия A . Данный способ в общем случае определяет так называемую схему или алгоритм нечеткого вывода в продукционных нечетких системах и называется также методом композиции или методом активации.

F – коэффициент определенности или уверенности выражает количественную оценку степени истинности или относительный вес нечеткой продукции. Коэффициент уверенности принимает свое значение из интервала $[0, 1]$ и часто называется весовым коэффициентом нечеткого правила продукции.

Подход к решению задач продления и прогнозирования остаточного ресурса авиационных радиотехнических средств с применением алгоритмов нечеткого логического вывода

Для оценки остаточного ресурса радиотехнических средств обычно используют метод аналитического прогнозирования, задачей которого является получение аналитических выражений для оценки значений прогнозируемых параметров в будущий момент времени t или момент времени, когда параметр технического состояния достигает предельного значения. Если техническое состояние описывается несколькими параметрами, то используют понятие *обобщенного многомерного вектора состояния* $x(t) = \{x_1, x_2, \dots\}$.

Индивидуальный прогноз объекта исследования основан на знании математического ожидания M_y и условной дисперсии величины x в моменты времени, предшествующие моменту обследования $x(t_i)$, $i = 1, N$, и принимаемой модели развития этого процесса.

Рассматриваемый процесс представляют в виде сочетания регулярной и случайной составляющих: $x(t) = y(t, j) + z(t)$.

Предполагается, что регулярная составляющая $y\{t, j\}$ представляет гладкую функцию времени, описываемую конечно-мерным вектором параметров j . Эта составляющая имеет ряд синонимов: тренд, уровень, тенденция, детерминированная основа процесса.

Случайная составляющая $z(t)$ принимается некоррелируемым случайным процессом с нулевым математическим ожиданием.

Наибольшее применение нашли следующие аппроксимирующие функции:

- линейная модель вида $y(t) = y_0 + Ct$. Эта модель хорошо описывает кинетику разрушения металлов при общей коррозии и разных видах механического изнашивания;
- степенная модель $y(t) = Ct^m$. Модель применяется при описании многих видов коррозии (сплошной, локальной), а также при коррозии под напряжением и при изнашивании;
- логарифмическая зависимость $y(t) = A \ln(t + C)$. Она хорошо описывает кинетику газовой и локальной коррозии;
- экспоненциальная модель $y(t) = C \exp[T(t)]$. Применяется при описании общей коррозии под напряжением.

В качестве основного показателя остаточного ресурса в результате прогноза определяется *гамма-процентный ресурс*, задаваемый двумя численными параметрами: наработкой и выраженной в процентах вероятностью того, что в течение этой наработки предельное состояние не будет достигнуто. При отсутствии второго показателя величина наработки считается *назначенной*.

В статистических методах оценки ресурса по результатам исследования партии изделий гамма-процентный ресурс определяется по кривой распределения ресурсного показателя. При отсутствии закона распределения используют непараметрические методы оценки надежности.

В экстраполяционных методах определения ресурса единичного объекта ожидаемый ресурс определяется при достижении $y(t)$ предельной величины. Если параметр x неравномерно распределен по поверхности (например, глубина и площадь коррозионного разрушения), то определяют функцию распределения этой величины и находят доверительные нижнюю и верхнюю границы ресурсного показателя, задаваясь величиной гамма. При этом полагают, что закон распределения в начале и конце прогнозируемого интервала времени не изменяется.

Общая типовая методика прогнозирования технического состояния оборудования содержит следующие этапы исследования:

- определение стратегии прогноза (определение цели, задач, интервала упреждения, рабочих гипотез, методов и организации исследования);
- прогностический фон (сбор информации о методах прогнозирования по схожим с объектом исследования объектам);
- разработка системы параметров, отображающей характер и структуру объекта;
- разработка поисковой модели (проекции в будущее системы показателей модели на дату упреждения по наблюдаемой тенденции с учетом факторов прогностического фона);
- разработка нормативной модели (проекции в будущее системы показателей модели в соответствии с заданными целями и нормами по заданным критериям);
- оценка степени достоверности (верификации) и уточнения предварительных моделей с помощью параллельных контрольных методов (опросом экспертов, математическим экспериментом);
- выработка рекомендаций для оптимизации принятия решения в планировании и управлении эксплуатацией оборудования на основе прогностических моделей.

При прогнозировании остаточного ресурса прежде всего необходимо установить закономерности достижения диагностическими и структурными параметрами их предельных значений, а также определить критерии технического состояния. Этот процесс основывается на изменении технического состояния исследуемых технических систем, функционирующих в условиях неопределенности. При этом эффективным аппаратом расчета остаточного ресурса технических систем и изделий является нечеткий логический вывод [24, 25].

Используется функция состояния [24, 25], характеризующая качество исследуемых систем и изделий диагностирования через их производительность – внесистемная величина, равная отношению объема проделанной работы ко времени, за которое она была совершена.

Логичной формой представления всех элементов множеств входов и выходов будут временные ряды, которые предлагается использовать в качестве исходных данных для анализа изменения технического состояния исследуемых систем и изделий.

В рамках нечеткой логики значения любой величины входных данных и выхода представляются термами (значениями терм-множеств). Применительно к оцениванию понятий (лингвистических переменных) технического состояния логично представляются применимыми термы «неработоспособное», «исправное», «аварийное» и «критическое». Для реализации лингвистической переменной необходимо определить точные физические значения ее термов. Предлагается нормировать «техническое состояние» значением из диапазона от 0 до 1: $Q(t) \in [0;1]$.

Для выполнения процедуры нечеткого логического вывода представляются импликациями, последовательная композиция которых выполняется с использованием пакета Fuzzy Logic Toolbox for Matlab [26].

В качестве лингвистических переменных в задачах продления и прогнозирования остаточного ресурса авиационных радиотехнических средств выбираем критерии оценки технического состояния и остаточного ресурса.

Каждому терму лингвистической переменной соответствует нечеткое множество и функция. С помощью функции принадлежности определяются степени принадлежности каждого элемента глобального множества данному терму. Элементами глобального множества являются численные экспертные оценки технического состояния и остаточного ресурса по некоторой шкале.

На вход алгоритма нечеткого вывода подаются четкие значения критерия оценки технического состояния и остаточного ресурса. Выходной переменной системы является лингвистическая переменная «остаточного ресурса» авиационных радиотехнических средств.

Для реализации алгоритма принятия решения с помощью нечеткого вывода необходимо описать правила, по которым осуществляется связь между различными характеристиками и выходным значением полезности альтернатив. Сравнение альтернатив и принятие решения производится с помощью продукционных правил. Каждое продукционное правило состоит из одной или нескольких посылок и заключения. Если посылок несколько, они связываются логическим «И». Продукционное правило имеет вид [27, 28]:

ЕСЛИ посылка [И посылка ...], ТО заключение,

где посылка и заключение являются нечеткими высказываниями.

На основе имеющихся правил делаются соответствующие заключения для выходной переменной. Заключения правил объединяются для получения четких значений переменной полезности. Полученные четкие значения являются численными оценками предпочтительности альтернатив.

Алгоритм нечеткого вывода Сугено (Sugeno) представляется в следующей форме [27, 28]:

если x есть a_1 и y есть b_1 , то $z_1 = a_1x + b_1y$;

если x есть a_2 и y есть b_2 , то $z_2 = a_2x + b_2y$. (2)

Реализуются следующие этапы нечеткого логического вывода:

1) фазификация: находятся степени истинности для предпосылок каждого правила (2): $a_1(x_0), a_2(x_0), b_1(y_0), b_2(y_0)$;

2) вывод: находятся уровни отсечения для предпосылок каждого из правил с использованием операции минимума:

$$\begin{cases} a_1 = a_1(x_0) \wedge b_1(y_0); \\ a_2 = a_2(x_0) \wedge b_2(y_0). \end{cases} \quad (3)$$

Находятся индивидуальные выводы правил:

$$\begin{cases} z_1^* = a_1x + b_1y; \\ z_2^* = a_2x + b_2y; \end{cases} \quad (4)$$

3) определяется четкое значение выходной переменной логического вывода в виде

$$z_0 = \frac{a_1z_1^* + a_2z_2^*}{a_1 + a_2}. \quad (5)$$

Схема алгоритма нечеткого логического вывода Сугено (Sugeno) представлена на рис. 1.

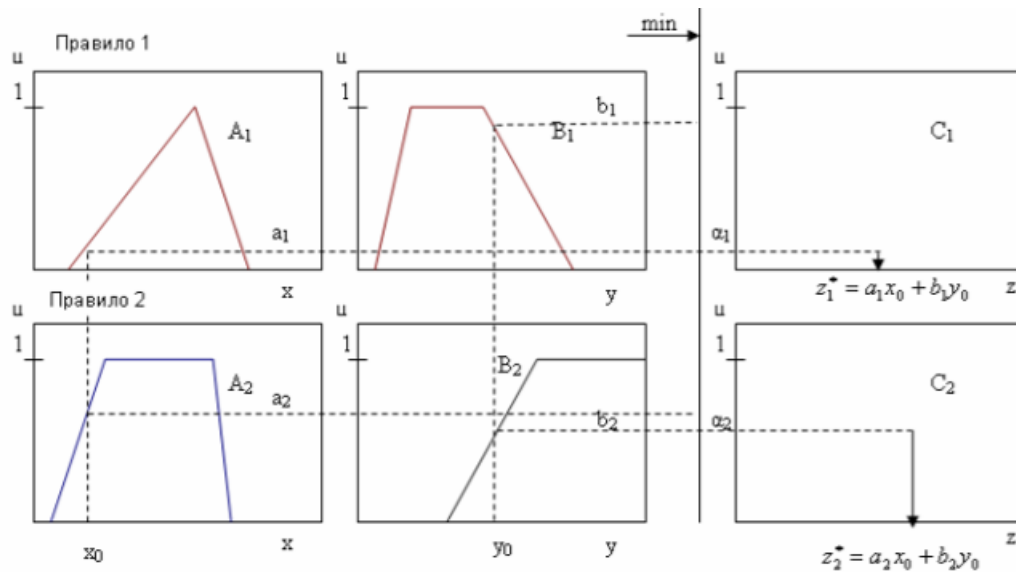


Рис. 1. Алгоритм нечеткого логического вывода Сугено (Sugeno)

Заключение

Представленный нечетко-логический подход к оценке остаточного ресурса авиационных радиотехнических средств на примере алгоритма нечеткого логического вывода Сугено (Sugeno), основываясь на теоретическом представлении нечеткой логики, остаточного ресурса и применении алгоритмов логико-нечеткого вывода, используется для решения задач продления и прогнозирования остаточного ресурса авиационных радиотехнических средств.

Алгоритм нечеткого вывода обеспечивает гибкость системы принятия решения за счет возможности корректировки критериев оценки и правил вывода.

Полученные технические рекомендации приемлемы для практических приложений продления и прогнозирования остаточного ресурса технических изделий.

Список литературы

1. Ярлыков М. С., Богачев А. С., Меркулов В. И., Дрогалов В. В. Радиотехнические комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов. Т. 1. Теоретические основы / под ред. М. С. Ярлыкова. М. : Радиотехника, 2012. 504 с.
2. Барбашев П. М., Гаврюшин В. Н., Мощенко А. А., Пипченко И. П. Бортовое радиоэлектронное оборудование : учеб. пособие. Иркутск : ИВВАИУ (ВИ), 2007. 246 с.
3. Тихонов В. И. [и др.]. Авиационные системы и комплексы радиосвязи : учебник для слушателей и курсантов вузов ВВС / под ред. В. И. Тихонова. М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2007. 784 с.
4. Авиационные радиолокационные комплексы и системы / под ред. П. И. Дудника. М. : ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2006. 1112 с.
5. Егишянц С. А., Гулина О. М., Коновалов Э. Н. Оценка распределения ресурса при суммировании повреждений // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 1997. № 1. С. 18–21.
6. Антонов А. В., Никулин М. С. Статистические методы в теории надежности. М. : Абрис, 2012. 390 с.
7. Садыхов Г. С. Остаточный ресурс технических объектов и методы его оценки. М. : Знание, 1986. 50 с.

8. Абрамов О. В. Дестабилизирующие факторы и случайные процессы изменения параметров технических устройств и систем // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 13–20. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-2
9. Морозов В. Б., Морозова М. А. О методах оценки интенсивности отказов оборудования для вероятностного анализа безопасности проектируемой АЭС при объединении данных от различных источников // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 39–48. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-5
10. Воробьев В. Г., Константинов В. Д. Надежность и техническая диагностика авиационного оборудования : учебник. М. : МГТУ ГА, 2010. 448 с.
11. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб. : БХВ-Петербург, 2003. 736 с.
12. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М. : Горячая линия – Телеком, 2007. 288 с.
13. Дмитриевцев А. Ю., Зырянов Ю. Т., Нестерович С. А., Хрипунов С. П. Постановка задачи оценки технического состояния информационно-измерительных систем на основе формализованного описания знаний экспертов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 113–119. doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-13.
14. Заяра А. В., Данилин М. Е. Применение нечеткого логического вывода для моделирования процесса изменения технического состояния электроаппаратуры мобильных робототехнических комплексов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 120–125. doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-14
15. Baldwin J. F. A new approach to approximate reasoning using a fuzzy logic // Fuzzy Sets and Sustems. 1979. P. 225–251.
16. Kudłacik P. Advantages of an Approximate Reasoning Based on a Fuzzy Truth Value // J. Medical Informatics & Technologies. 2010. Vol. 16. P. 125–132.
17. Заде Л. Нечеткая логика: понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М. : Мир, 1976. С. 167.
18. Рутковский Л. Методы и технологии искусственного интеллекта : пер. с пол. М. : Горячая Линия – Телеком, 2010. 520 с.
19. Тэрано Т., Асаи К., Сугэно М. Прикладные нечёткие системы. М. : Мир, 1993. 368 с.
20. Mamdani E. H. Applications of Fuzzy Algorithm for Control a Simple Dynamic Plant // Proc. IEEE. 1974. Vol. 121, № 12. P. 1585–1588.
21. Larsen P. M., Industrial applications of fuzzy logic control // Int. J. Man Mach. Studies. 1980. Vol. 12, № 1. P. 3–10.
22. Sinuk V. G., Kutsenko D. A. Inference methods for systems with many fuzzy inputs // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2015. Vol. 54. P. 375–383.
23. Tsukamoto Y. An approach to fuzzy reasoning method // Advances in Fuzzy Set Theory and Applications / ed. by M. M. Gupta, R. K. Ragade, R. R. Yager. Amsterdam : NorthHolland, 1979.
24. Мишанов Р. О., Пиганов М. Н. Методика определения набора информативных параметров для проведения индивидуального прогнозирования показателей качества и надежности радиоэлектронных средств // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 1. С. 93–104. doi: 10.21685/2307-4205-2017-1-12
25. Заяра А. В., Данилин М. Е. Применение нечеткого логического вывода для моделирования процесса изменения технического состояния электроаппаратуры мобильных робототехнических комплексов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 2. С. 120–125. doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-14
26. Тарасян В. С. Пакет Fuzzy Logic Toolbox for Matlab : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2013. 112 с.
27. Рыбанов А. А., Фадеева М. В. Методы анализа нечеткой информации: курс лекций : учеб. пособие. Волжский : Волжский политехнический институт, 2019.
28. Хижняков Ю. Н. Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени : учеб. пособие. Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. 156 с.

References

1. Yarlykov M.S., Bogachev A.S., Merkulov V.I., Drogalin V.V. *Radioelektronnye kompleksy navigatsii, pritselivaniya i upravleniya vooruzheniem letatel'nykh apparatov. T. 1. Teoreticheskie osnovy = Radio-electronic complexes for navigation, aiming and armament control of aircraft. Vol. 1. Theoretical foundations*. Moscow: Radiotekhnika, 2012:504. (In Russ.)
2. Barbashev P.M., Gavryushin V.N., Moshchenko A.A., Pipchenko I.P. *Bortovoe radioelektronnoe oborudovanie: ucheb. posobie = Avionics : a textbook*. Irkutsk: IVVAIU (VI), 2007:246. (In Russ.)
3. Tikhonov V.I. et al. *Aviatsionnye sistemy i komplekсы radiosvyazi: uchebnik dlya slushateley i kursantov vuzov VVS = Aviation systems and radio communication complexes : a textbook for students and cadets of Air Force universities*. Moscow: VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 2007:784. (In Russ.)
4. Dudnik P.I. (ed.). *Aviatsionnye radiolokatsionnye komplekсы i sistemy = Aviation radar complexes and systems*. Moscow: VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 2006:1112. (In Russ.)

5. Egishyants S.A., Gulina O.M., Kononov E.N. Resource allocation assessment in damage summation. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika = News of higher educational institutions. Nuclear power engineering*. 1997;(1): 18–21. (In Russ.)
6. Antonov A.V., Nikulin M.S. *Statisticheskie metody v teorii nadezhnosti = Statistical methods in the theory of reliability*. Moscow: Abris, 2012:390. (In Russ.)
7. Sadykhov G.S. *Ostatochnyy resurs tekhnicheskikh ob"ektov i metody ego otsenki = Residual resource of technical facilities and methods of its assessment*. Moscow: Znanie, 1986:50. (In Russ.)
8. Abramov O.V. Destabilizing factors and random processes of changing the parameters of technical devices and systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1): 13–20. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-2
9. Morozov V.B., Morozova M.A. On methods for assessing the failure rate of equipment for probabilistic safety analysis of a projected NPP when combining data from various sources. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):39–48. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-5
10. Vorob'ev V.G., Konstantinov V.D. *Nadezhnost' i tekhnicheskaya diagnostika aviatsionnogo oborudovaniya: uchebnik = Reliability and technical diagnostics of aviation equipment : textbook*. Moscow: MGTU GA, 2010:448. (In Russ.)
11. Leonenkov A.V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH = Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2003:736. (In Russ.)
12. Shtovba S.D. *Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB = Design of fuzzy systems using MATLAB*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2007:288. (In Russ.)
13. Dmitriyev A.Yu., Zyryanov Yu.T., Nesterovich S.A., Khripunov S.P. Setting the task of assessing the technical condition of information and measurement systems based on a formalized description of expert knowledge. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):113–119. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-13
14. Zayara A.V., Danilin M.E. Application of fuzzy logical inference for modeling the process of changing the technical condition of electrical equipment of mobile robotic complexes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):120–125. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-14
15. Baldwin J.F. A new approach to approximate reasoning using a fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems*. 1979:225–251.
16. Kudłacik P. Advantages of an Approximate Reasoning Based on a Fuzzy Truth Value. *J. Medical Informatics & Technologies*. 2010;16:125–132.
17. Zade L. *Nechetkaya logika: ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy = Fuzzy logic: the concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions*. Moscow: Mir, 1976:167. (In Russ.)
18. Rutkovskiy L. *Metody i tekhnologii iskusstvennogo intellekta: per. s pol'skogo = Methods and technologies of artificial intelligence : translated from Polish*. Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom, 2010:520. (In Russ.)
19. Terano T., Asai K., Sugeno M. *Prikladnye nechetkie sistemy = Applied Fuzzy Systems*. Moscow: Mir, 1993:368. (In Russ.)
20. Mamdani E.H. Applications of Fuzzy Algorithm for Control a Simple Dynamic Plant. *Proc. IEEE*. 1974;121(12):1585–1588.
21. Larsen P.M. Industrial applications of fuzzy logic control. *Int. J. Man Mach. Studies*. 1980;12(1):3–10.
22. Sinuk V.G., Kutsenko D.A. Inference methods for systems with many fuzzy inputs. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2015;54:375–383.
23. Tsukamoto Y. An approach to fuzzy reasoning method. *Advances in Fuzzy Set Theory and Applications*. Ed. by M.M. Gupta, R.K. Ragade, R.R. Yager. Amsterdam: NorthHolland, 1979.
24. Mishanov R.O., Piganov M.N. Methodology for determining a set of informative parameters for conducting individual forecasting of quality and reliability indicators of radioelectronic devices. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(1):93–104. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2017-1-12
25. Zayara A.V., Danilin M.E. Application of fuzzy logical inference for modeling the process of changing the technical condition of electrical equipment of mobile robotic complexes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(2):120–125. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-2-14
26. Tarasyan V.S. *Paket Fuzzy Logic Toolbox for Matlab: ucheb. posobie = Fuzzy Logic Toolbox for Matlab : textbook*. Ekaterinburg: Izd-vo UrGUPS, 2013:112. (In Russ.)
27. Rybanov A.A., Fadeeva M.V. *Metody analiza nechetkoy informatsii: kurs lektсий: ucheb. posobie = Methods of fuzzy information analysis: a course of lectures : textbook*. Volzhskiy: Volzhskiy politekhnicheskii institut, 2019. (In Russ.)
28. Khizhnyakov Yu.N. *Algoritmy nechetkogo, neyronnogo i neyro-nechetkogo upravleniya v sistemakh real'nogo vremeni: ucheb. posobie = Algorithms of fuzzy, neural and neuro-fuzzy control in real-time systems : textbook*. Perm': Izd-vo Perm. nats. issled. politekhn. un-ta, 2013:156. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Чан Минь Хай

кандидат технических наук,
преподаватель кафедры радиотехники,
Академия противовоздушной обороны
и Военно-воздушных сил Вьетнама
(Вьетнам, г. Ханой)
E-mail: minhhai.kq80@gmail.com

Ку Тхань Фонг

кандидат технических наук,
преподаватель кафедры радиотехники,
Академия противовоздушной обороны
и Военно-воздушных сил Вьетнама
(Вьетнам, г. Ханой)
E-mail: thanhphongkshk@gmail.com

Нгуен Тхе Тханг

кандидат технических наук,
преподаватель кафедры радиотехники,
Академия противовоздушной обороны
и Военно-воздушных сил Вьетнама
(Вьетнам, г. Ханой)
E-mail : thethang.pkkq@gmail.com

Нгуен Тхань Санг

кандидат технических наук,
преподаватель кафедры радиотехники,
Академия противовоздушной обороны
и Военно-воздушных сил Вьетнама
(Вьетнам, г. Ханой)
E-mail : thanhhsang8227@gmail.com

Николай Кондратьевич Юрков

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Фам Ван Ту

аспирант,
361-я дивизия,
Войска противовоздушной обороны
и Военно-воздушных сил Вьетнама
(Вьетнам, г. Ханой)
E-mail: phamvantu15a@gmail.com

Trần Minh Hải

Candidate of technical sciences,
lecturer of the sub-department of radio engineering,
Vietnam Air Defense and Air Force Academy
(Hanoi, Vietnam)

Ku Thanh Phong

Candidate of technical sciences,
lecturer of the sub-department of radio engineering,
Vietnam Air Defense and Air Force Academy
(Hanoi, Vietnam)

Nguyen The Thang

Candidate of technical sciences,
lecturer of the sub-department of radio engineering,
Vietnam Air Defense and Air Force Academy
(Hanoi, Vietnam)

Nguyễn Thanh Sáng

Candidate of technical sciences,
lecturer of the sub-department of radio engineering,
Vietnam Air Defense and Air Force Academy
(Hanoi, Vietnam)

Nikolay K. Yurkov

Doctor of technical sciences, professor,
honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Phạm Văn Tú

Postgraduate student,
361st Division,
Vietnam Air Defense and Air Force Service
(Hanoi, Vietnam)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 05.04.2025

Поступила после рецензирования / Revised 24.04.2025

Принята к публикации / Accepted 05.05.2025