Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Г. И. Козырев, А. А. Хаматов, А. И. Лоскутов, В. А. Клыков, Диагностирование бортовой аппаратуры космических аппаратов на основе нечеткой логики, *Нечеткие системы и мягкие вычисления*, 2018, том 13, выпуск 2, 126–146

DOI: <https://doi.org/10.26456/fssc43>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.162.85.209

26 апреля 2023 г., 08:19:56

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Козырев Г.И., Хаматов А.А., Клыков В.А., Лоскутов А.И.

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 22.10.2018, после переработки 08.12.2018.

В предлагаемой статье в рамках современных требований к автономности космических аппаратов (КА) обоснована необходимость совершенствования процессов диагностирования бортовой аппаратуры КА на основе применения конечных автоматов и нечеткой логики. Предложена математическая постановка задачи диагностирования бортовой аппаратуры КА. Разработаны модель и алгоритм диагностирования бортовой аппаратуры КА на основе нечеткой логики. Проведено имитационное моделирование процесса диагностирования на примере бортового ретранслятора КА связи. Произведен расчет достоверности диагностирования для различных алгоритмов нечеткого вывода.

Ключевые слова: достоверность диагностирования, конечный автомат, модель бортовой системы, алгоритм нечеткого вывода.

Нечеткие системы и мягкие вычисления. 2018. Т. 13, № 2. С. 126–146.
<https://doi.org/10.26456/fssc43>

1. Введение

Основными направлениями повышения эффективности применения современных и перспективных космических аппаратов (КА) следует считать [1]: увеличение срока их автономного функционирования, сокращение количества сеансов телеконтроля и обеспечение высокого уровня достоверности диагностирования бортовой аппаратуры (БА), который для сложных технических систем такого типа должен находиться в пределах 0,95–0,997 [2].

Проведенный анализ отказов БА КА, выявленных за последние несколько лет на этапе целевого функционирования КА, показывает, что используемые методы контроля и диагностирования БА не позволяют с требуемой достоверностью определить техническое состояние (ТС) БА. Причины отказов удается установить не более чем в 75–80% случаев [3, 4]. Данное обстоятельство в целом приводит к повышению стоимости эксплуатации БА и снижает эффективность применения КА в целом [1].

В настоящее время для определения ТС БА КА обычно используется алгоритм, основанный на опросе телеметрических датчиков и последующем сравнении полученных значений диагностических параметров (ДП) с допусками [3]. Такой подход часто приводит к необходимости принятия решения о ТС БА КА в условиях недостатка необходимой информации (неопределенности).

Источниками данной неопределенности являются:

- неточность измерений реальных физических величин входных и выходных сигналов;
- ошибки задания допусков на ДП;
- невозможность полного и точного описания систем и процессов из-за их сложности;
- неполнота контроля технического состояния БА КА, не позволяющая определить все значимые ее свойства;
- случайный характер входных сигналов и внешних возмущающих воздействий.

Все технические состояния (ТС) объекта представляют собой случайные события, обусловленные случайностью появления отказов отдельных элементов, для их полного описания априорных статистических данных часто оказывается недостаточно [4]. Применительно к целевому функционированию БА КА использование управляющих воздействий (с учетом времени их выполнения) и возможность дискретизации состояний БА КА по значениям выходных контролируемых параметров (КП) позволяют рассматривать БА КА как объект с дискретным входом X (множество команд управления) и дискретным выходом Y (множество ДП), функционирующий в дискретные моменты. Из предположения о том, что БА КА, как искусственно созданный объект, не может иметь бесконечного разнообразия КП, следует, что множество состояний Q БА КА является конечным. Таким образом, можно рассматривать БА КА как дискретную динамическую систему. Так как множества X , Y , Q являются конечными, то в дальнейшем представим модель функционирования БА КА в виде детерминированного конечного автомата.

Задача однозначного определения любого состояния из множества Q в общем случае решается с помощью функции отнесения $\varphi^{-1} : Y \rightarrow Q$ или функции, обратной функции выходов конечно-автоматных моделей (КАМ), в предположении, что каждый ДП из Y находится в границах заранее определенного допуска. Такой подход объективен при условии, что границы допусков заданы строго и используется равномерный закон распределения значений ДП внутри допусков. Однако наличие априорных данных говорит о том, что значения ДП внутри допусков чаще всего распределяются по нормальному закону [2]. Тогда при определении состояния из множества Q возникает информационная неопределенность, вызванная наличием ошибок первого (α) и второго рода (β), которые влияют на достоверность диагностирования D . Плотности вероятности указанных ошибок имеют максимальные значения на границе допускового интервала. При этом для значений ДП, которые находятся в середине допусков, достоверность диагностирования может быть вполне приемлема, но для значений ДП, которые находятся вблизи границ допусков, достоверность диагностирования снижается и не всегда удовлетворяет предъявляемым требованиям. Конкретные значения ошибок первого и второго рода в зависимости от близости к границе допускового интервала достаточно сложно получить на практике [4]. Данный факт затрудняет достоверное диагностирование традиционными методами.

Одним из возможных вариантов решения проблемы неопределенности может стать применение нечеткой логики. Каждому состоянию БА КА в зависимости от того, насколько БА правильно функционирует, исправна она или работоспособна, можно присвоить значение некоторой лингвистической (нечеткой) переменной.

Аналогично, любое значение каждого ДП в зависимости от близости к допуску можно оценить лингвистически. Причем конкретный набор значений ДП должен соответствовать только одному ТС. Исходя из вышеизложенного, процесс совершенствования контроля и диагностирования БА КА будем осуществлять на основе применения КАМ и нечеткой логики [4, 5].

1. Постановка задачи

Дано:

- C – объект диагностирования – некоторая бортовая система (БС) из состава БА КА, например, бортовой ретранслятор КА связи;
- $A_{од} = \langle X, Y, Q_{рф}, Q_{тд}, f, \varphi_{рф}, \varphi_{тд} \rangle$ – модель объекта диагностирования (объекта C), где:
 - X – множество команд управления объекта C , $X = \langle x_1, x_2, \dots, x_B \rangle$ (например, включение-выключение БС, переключение на резервный комплект и др.);
 - Y – множество ДП объекта Y , $Y = \langle y_1, y_2, \dots, y_G \rangle$ (например, выходная мощность, включена-выключена БС, основной-резервный комплект и др.);
 - $Q_{рф} = \langle q_{рф1}, q_{рф2}, \dots, q_{рфN} \rangle$ – множество режимов функционирования (например, включена БС и подключен резервный комплект, выключена БС и подключен основной комплект и др.);
 - $Q_{тд} = \langle q_{тд1}, q_{тд2}, \dots, q_{тдZ} \rangle$ – множество технических диагнозов (ТД) (например, БС работоспособна, отказ усилителя мощности, отказ датчика мощности, множественный отказ и др.);
 - $f: Q_{рф} \times X \rightarrow Q_{рф}$ – функция переходов;
 - $\varphi_{рф}: Q_{рф} \rightarrow Y$ – функция выходов режимов функционирования;
 - $\varphi_{тд}: Q_{тд} \rightarrow Y$ – функция выходов технических диагнозов;
- $D_{треб}(T_{авт_треб})$ – требование к достоверности диагностирования объекта C ;
- $T_{авт_треб}$ – требование к сроку автономного функционирования объекта C .

Допущения и ограничения:

1. Множество ТД наблюдаемо на множестве ДП и множестве режимов функционирования.
2. Диагностические параметры функционального типа распределены по закону, близкому к нормальному.
3. Все возможные отказы, изменяющие функцию переходов, множественные отказы учтены в $Q_{тд}$, как один элемент.
4. При наличии отказа в процессе диагностирования значения ДП в одном и том же режиме функционирования не изменяются.

5. Существующий отказ обязательно проявляет себя в соответствии с $\varphi_{\text{тд}}$.
6. Требование к достоверности диагностирования $D_{\text{треб}}$ объекта C определяется в зависимости от требований, предъявляемых к сроку автономного функционирования $T_{\text{авт_треб}}$ БА КА.
7. Срок автономного функционирования $T_{\text{авт}}$ объекта C определяется применительно к задаче автономного диагностирования БА КА.

Требуется:

Определить пороговые значения граничных областей ДП Y для предотказных состояний объекта C с учетом требований к достоверности диагностирования $D_{\text{треб}}(T_{\text{авт_треб}}) \geq 0.95$.

2. Разработка математической модели процесса диагностирования бортовой аппаратуры космического аппарата на основе нечеткой логики

Каждому состоянию бортовой системы КА в зависимости от того, насколько она правильно функционирует, исправна или работоспособна, можно присвоить значение некоторой лингвистической (нечеткой) переменной. Аналогично, любое значение каждого ДП в зависимости от близости к границе допускового интервала можно оценить лингвистически. Причем конкретный набор значений ДП можно поставить в соответствие только одному определенному информационному состоянию (множеству текущих ТД) [6].

С учетом приведенной выше постановки задачи исследования математическая модель процесса диагностирования объекта C может быть представлена в следующем виде:

$$A_{\text{пд}}(C) = \langle Q_{\text{тд}}^*(Q_{\text{рф}}), Y^*, X_T, \varphi_{\text{тд(рф)}}^*, f_T, T_{\text{рф}}, S \rangle, \quad (1)$$

где

- $Q_{\text{тд}}^*(Q_{\text{рф}})$ – множество лингвистических переменных, однозначно соответствующих множеству переменных $Q'_{\text{тд}}(Q_{\text{рф}})$, численно характеризующих технические диагнозы $Q_{\text{тд}}$ в режимах функционирования $Q_{\text{рф}}$;
- $Q'_{\text{тд}}(Q_{\text{рф}}) = \langle q'_{\text{тд1}}, q'_{\text{тд1}}, \dots, q'_{\text{тдZ}} \rangle$, где $q'_{\text{тдZ}}$ – переменная, численно характеризующая технический диагноз $q_{\text{тдZ}}$;
- $Q_{\text{тд}}^*(Q_{\text{рф}}) = \langle q_{\text{тд1}}^*, q_{\text{тд2}}^*, \dots, q_{\text{тдZ}}^* \rangle$, $q'_{\text{тдZ}} = (R_Z, Q'_{\text{тд}}, M_Z)$, где $R_Z = \langle r_{\text{тд1}}, r_{\text{тд2}}, \dots, r_{\text{тдN}} \rangle$ – множество термов лингвистической переменной $q_{\text{тд}}^*$ (например, высокая, средняя, низкая и др.);
- $Q'_{\text{тдZ}}$ – область определения численной оценки технического диагноза $q_{\text{тдZ}}$ (например, $[0,1]$);
- $M_Z = \langle \mu_{Z1}, \mu_{Z2}, \mu_{ZN} \rangle$ – множество функций принадлежности (ФП) термов лингвистической переменной $q_{\text{тдZ}}^*$;
- Y^* – множество лингвистических переменных, однозначно соответствующих множеству ДП Y и характеризующих значения ДП Y на предмет соответствия допусковым интервалам. $Y^* = \langle y_1^*, y_2^*, \dots, y_g^* \rangle$, где

$y_g^* = (R_g, Y_g, M_g)$, соответственно $R_g = \langle r_{g1}, r_{g2}, \dots, r_{gL} \rangle$ – множество термов лингвистической переменной y_g^* (например, норма, не норма и др.); Y_g – область определения показаний ДП y_g ; $M_g = \langle \mu_{g1}, \mu_{g2}, \mu_{gL} \rangle$ – множество функций принадлежности (ФП) термов лингвистической переменной y_g^* ;

- X_T – множество тестовых команд управления объекта C , однозначно соответствующее множеству команд управления X , $X_T = \langle x_{T1}, x_{T2}, \dots, x_{TB} \rangle$;
- $\varphi_{\text{тд(рф)}}^*: Y^* \rightarrow Q_{\text{тд}}^*(Q_{\text{рф}})$ – база нечетких правил (на основе функции отношения технических диагнозов в режимах функционирования);
- $f_T: Q_{\text{рф}} \times X_T \rightarrow Q_{\text{рф}}$ – функция переходов;
- $T_{\text{рф}}$ – веса кратчайших путей между режимами функционирования;
- S – решение о техническом диагнозе (например, объект C работоспособен, отказ усилителя мощности и др.).

Текущий вектор значений $Q'_{\text{тд}}(Q_{\text{рф}})$ является информационным состоянием. Разработанная модель в отличие от известных подходов учитывает связь между близостью значений диагностических параметров к границам допусковых интервалов и численными оценками возможных технических диагнозов для различных режимов функционирования и включает граничные области предотказных состояний, при достижении которых предусматривается дополнительная процедура – тестирование, что позволяет обеспечить требуемую достоверность диагностирования бортовыми средствами в условиях автономного функционирования. Процесс диагностирования по представленной модели иллюстрируется диаграммой (Рис. 1).

Рис. 1: Диаграмма процесса диагностирования

В соответствии с представленной диаграммой процесс диагностирования осуществляется следующим образом. В процессе автономного функционирования КА бортовая система (объект C) находится в состоянии, характеризуемом некоторым текущим ТД $q_{\text{тдз}}$ из $Q_{\text{тд}}$ и режимом функционирования $q_{\text{рфн}}$ из $Q_{\text{рф}}$. В соответствии с функцией выходов ТД в режимах функционирования $\varphi_{\text{тд(рф)}}$ текущий ТД $q_{\text{тдз}}$ в режиме функционирования $q_{\text{рфн}}$ характеризуется соответствующим кортежем значений ДП из Y . На основании алгоритмов нечеткого вывода по кортежу значений ДП из Y определяется текущее информационное состояние $Q'_{\text{тд}}(Q_{\text{рф}})$, принимается решение о текущем ТД, и, при необходимости, объект C посредством команды управления из X_T переводится в другой режим функционирования для уточнения ТД.

Обобщая вышеизложенное, можно выделить последовательность операций, которую необходимо выполнить для моделирования процесса диагностирования бортовой системы КА с помощью конечного автомата и нечеткой логики [6,7]:

1. Предварительный анализ исходных данных.

В качестве исходных данных для анализа бортовой системы КА могут использоваться:

- перечень приборов, входящих в состав БС;
- интенсивности отказов указанных приборов;
- структурная или функциональная схема;
- множество режимов функционирования;
- множество команд управления;
- множество ДП;
- множество ТД;
- ограничения на управление.

2. Построение конечного автомата, описывающего процесс функционирования и диагностирования бортовой системы КА (объекта C). При синтезе конечно-автоматной модели можно выделить следующие пункты [8]:

2.1 Построение таблицы влияния команд управления на ДП.

2.2 Разбиение множества ДП Y на классы Y_s . ДП принадлежат одному классу, если множества тестовых команд управления $X_s \subseteq X_T$, которые на них влияют, совпадают.

2.3 Уточнение ограничений на управление и определение для каждого класса ДП Y_s :

- множества ДП Y'_s из других классов, каждый из которых влияет на какой-либо ДП из Y_s ;
- множества ТД Q_{Tds} , которые могут быть выявлены с помощью ДП из Y_s .

2.4 Получение комплекса логических подсистем (ЛПС) вида $[Y_s, Y'_s, X_s, Q_{Tds}]$.

2.5 Построение конечных автоматов, описывающих работу каждой ЛПС:

2.6 Построение полного конечного автомата по моделям отдельных ЛПС:

3. Построение базы нечетких правил на основе функции отнесения.

Основой для формирования базы нечетких правил является функция отнесения (обратная от полученной функции выходов), экспертные знания и априорная информация

3.1 Определение структуры нечеткого правила.

В качестве связки условий и следствий нечетких правил целесообразно использовать логическую операцию «И». Тогда структура нечеткого правила будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} &\text{Если } y_1^* \text{ это } r_{11} \text{ и } y_2^* \text{ это } r_{21}, \text{ и } \dots, \text{ и } y_G^* \text{ это } r_{G1}, \\ &\text{то } q_{Tд1}^* \text{ это } r_{Tд1n} \text{ и } q_{Tд2}^* \text{ это } r_{Tд2n}, \text{ и } \dots, \text{ и } q_{TдZ}^* \text{ это } r_{TдZn}. \end{aligned} \quad (2)$$

3.2 Определение входных переменных:

- количество входов;
- количество термов на каждый вход;
- построение ФП термов.

Количество входов базы правил соответствует количеству ДП. Количество термов соответствует количеству допусковых интервалов на каждый ДП. Для различных ДП БС КА функционального типа количество допусковых интервалов может быть одинаковым.

В качестве ФП входных термов ДП функционального типа целесообразно применять кусочно-линейные или колоколообразные ФП [7,9], при построении которых можно использовать априорные данные о распределении ДП вблизи границ допусковых интервалов (Рис. 2).

Рис. 2: Кусочно-линейные и колоколообразные ФП для функциональных ДП

Кусочно-линейные ФП ввиду простоты и практичности могут использоваться на начальном этапе построения алгоритма диагностирования, а колоколообразные ФП лучше соответствуют особенностям распределения ДП, позволяют смоделировать вблизи границ допусковых интервалов неопределенность, близкую к реальной, и целесообразны после проведения настройки алгоритма нечеткого вывода.

Для ДП цифрового и сигнального типа конкретный вид ФП не имеет значения, основное условие при их построении, чтобы они не имели общих точек (Рис. 3).

3.3 Определение выходных переменных:

- количество выходов;
- количество термов на каждый выход;
- построение ФП выходных термов.

Количество выходов соответствует количеству ТД. Каждому выходу будет соответствовать от 2 до 10 термов. Точное количество термов определяется экспертами и уточняется на этапе настройки. В рамках решаемой задачи целесообразно определить одинаковое количество термов для различных ТД.

Так как ТД представляют собой измеримые понятия, то для определения вида ФП выходных термов можно использовать способ прямого задания. Формально условия задачи не накладывают никаких ограничений на выбор конкретной ФП. На практике, в случае недостатка информации об особенностях ФП, рекомендуется на начальном этапе построения систем нечеткого вывода использовать

Рис. 3: Вид ФП для ДП цифрового и сигнального типа

наиболее простые их виды, а именно, треугольные. Основное удобство связано с тем, что треугольные ФП допускают аналитическое представление в виде некоторой простой математической функции, а также обладают возможностью универсальной аппроксимации экспертного мнения в условиях неопределенности. Это упрощает не только соответствующие численные расчеты, но и сокращает вычислительные ресурсы, необходимые для хранения отдельных значений этих ФП. Впоследствии характер ФП выходных термов может быть уточнен при коррекции алгоритма.

3.4. Построение базы и ее настройка по количеству правил.

При построении и настройке базы необходимо выполнить следующие условия:

- построение хотя бы одного правила для каждого терма выходной переменной;
- построение хотя бы одного правила для любого терма входной переменной с использованием его в качестве послылки;
- построение хотя бы одного правила со степенью выполнения больше нуля для произвольного вектора входных переменных;
- правила должны покрывать все возможное пространство состояний (режимов функционирования и ТД);
- между правилами должны отсутствовать противоречия.

3.5 Выбор алгоритма нечеткого вывода.

Структура правил и используемые ФП для входов и выходов предопределяют в качестве основы нечеткого вывода алгоритмы Мамдани или Ларсена. Алгоритм Мамдани чаще применяется на практике, показывает наименьшее отклонение от средних выходных значений и имеет относительную простоту формирования заключений по каждому правилу [7].

3.6 Обучение и настройка алгоритма нечеткого вывода.

Обучение и настройка параметров алгоритма необходимы для приведения результатов его работы к максимальному соответствию статистическим данным о

реальных отказах БС КА и, тем самым, повышения достоверности диагностирования. Обучение и настройка проводятся посредством многократной подачи на вход модели данных, соответствующих реальным неисправностям объекта C и последующей коррекции параметров модели [10,11]. При обучении и настройке могут быть скорректированы:

- структура правила и их количество;
- количество выходных или входных термов;
- условия или заключения в отдельных правилах;
- алгоритм нечеткого вывода;
- значение выходного порогового коэффициента $K_{\text{вых_пор}}$.

Выходной пороговый коэффициент $K_{\text{вых_пор}}$ определяет величину пороговых значений множества переменных $Q'_{\text{тд}}(Q_{\text{рф}})$, численно характеризующих технические диагнозы $Q_{\text{тд}}$ в режимах функционирования $Q_{\text{рф}}$. Достижение выходного порогового значения в текущем информационном состоянии двумя и более переменными из множества $Q'_{\text{тд}}(Q_{\text{рф}})$ означает необходимость проведения или продолжения тестового диагностирования.

3. Алгоритм диагностирования бортовой аппаратуры КА на основе нечеткой логики

Основными этапами алгоритма диагностирования БА КА (объекта C) являются [7]:

1. Предварительная настройка.
2. Нечеткий вывод. Определение текущего информационного состояния.

В рамках сформулированных этапов алгоритм диагностирования состоит из следующих шагов.

1. Этап предварительной настройки

Предварительная настройка алгоритма необходима для приведения соответствия результатов его работы требованиям к достоверности диагностирования объекта C , которые определяются исходя из требований к автономности БА КА.

Шаг 1.1 Уточнение требований к сроку автономного функционирования $T_{\text{авт_треб}}$ БА КА.

Требования к указанному показателю определяются руководящими документами и эксплуатационно-технической документацией на БА КА.

Шаг 1.2 Установка входного порогового коэффициента $K_{\text{вх_пор}}$. Указанный входной пороговый коэффициент $K_{\text{вх_пор}}$ определяет положение пороговых значений ДП для предотказных состояний объекта C и указывает на степень удаления от границ допусковых интервалов.

Шаг 1.3 Имитационное моделирование процесса диагностирования объекта C . Имитационное моделирование включает следующие пункты:

1.3.1. Настройка системы диагностирования для установленного значения входного порогового коэффициента $K_{\text{вх_пор}}$. Производится путем настройки множества функций принадлежности M_g входных переменных базы нечетких правил оригинальным способом, разработанным в процессе исследования:

$$\mu_g(y_g) = \begin{cases} P'_i / (P'_i - P'_{i-1}), y_g \in (y_{g_{i-1}П}(K_{вх}), y_{g_iЛ}(K_{вх})), \\ 1, y_g \in (y_{g_iЛ}(K_{вх}), y_{g_iП}(K_{вх})), \\ P'_i / (P'_i + P'_{i+1}), y_g \in (y_{g_iП}(K_{вх}), y_{g_{i+1}Л}(K_{вх})), \end{cases} \quad (2)$$

где P'_i, P'_{i-1}, P'_{i+1} - преобразованные плотности вероятности нормального распределения ДП y_g в i -м, предыдущем и последующем допусковых интервалах; $y_{g_{i-1}П}(K_{вх}), y_{g_iЛ}(K_{вх}), y_{g_iП}(K_{вх}), y_{g_{i+1}Л}(K_{вх})$ - границы областей ДП y_g в $i-1, i$ -м и $i+1$ допусковых интервалах, соответствующих предотказным состояниям БС КА. На Рис. 4 пример настройки функций принадлежности оригинальным способом.

1.3.2. Подготовка исходных данных соответствующих статистическим данным о значениях ДП при неисправностях и штатном функционировании объекта C .

1.3.3. Ввод исходных данных на вход системы диагностирования.

1.3.4. Анализ результатов диагностирования и расчет достоверности диагностирования D объекта C как вероятности принятия правильного решения при диагностировании.

Шаг 1.4 Вычисление срока автономного функционирования $T_{авт}$.

Расчет срока автономного функционирования комплекса $T_{авт}$ объекта C производится в части решения задачи автономного диагностирования объекта C .

Шаг 1.5 Сравнение полученных результатов с требуемыми значениями и, при необходимости, коррекция входного порогового коэффициента $K_{вх_пор}$ и возврат к Шагу 1.2.

Шаг 1.6 Окончание настройки.

2. Этап нечеткого вывода. Определение текущего информационного состояния

Шаг 2.1 Измерение значений ДП.

В процессе целевого функционирования объекта C значения ДП измеряются с помощью датчиков типа «сухой контакт», «электронный ключ», а также аналоговых и цифровых.

Шаг 2.2 Фаззификация значений ДП в нечетких правилах. Фаззификация значений ДП происходит путем вычисления значения функции принадлежности μ_{g1} от значения соответствующего ДП y_g .

Шаг 2.3 Агрегирование подусловий в нечетких правилах.

Для нахождения степени истинности условий каждого из правил используется логическая операция «И». Правила, степень истинности которых отлична от нуля, считаются активными.

Шаг 2.4 Активизация подзаключений в нечетких правилах.

Активизация подзаключений выполняется с помощью min-активизации (алгоритм Мамдани) или prod-активизации (алгоритм Ларсена).

Шаг 2.5 Аккумуляирование заключений нечетких правил.

Аккумуляирование заключений нечетких правил выполняется с помощью max-объединения.

Шаг 2.6 Деффазификация значений $Q'_{тд}(Q_{рф})$ в нечетких правилах.

В рамках настоящих исследований шаг деффазификации проводился путем нахождения центра площади или центра тяжести.

Шаг 2.7 Анализ текущего информационного состояния.

Анализ текущего информационного состояния подразумевает сравнение вычисленных четких значений множества переменных $Q'_{тд}(Q_{рф})$, характеризующих степени верности технических диагнозов $Q_{тд}$ в режимах функционирования $Q_{рф}$

Рис. 4: Пример настройки функций принадлежности оригинальным способом

с выходным пороговым коэффициентом $K_{\text{вых_пор}}$. А также уточнение текущих ТД, значения которых достигли порогового значения.

В случае выявления только одного ТД, у которого соответствующая переменная $Q'_{\text{тд}}(Q_{\text{рф}})$ достигла порогового значения, то перейти к Шагу 2.4.

В случае выявления двух и более ТД, у которых соответствующие переменные $Q'_{\text{тд}}(Q_{\text{рф}})$ достигли порогового значения, то перейти к Шагу 2.5.

Шаг 2.8 Принятие решение о текущем ТД. Возврат к Шагу 2.1 или переход на тестовое диагностирование.

Пример нечеткого вывода при измерении значений двух ДП y_1 и y_2 на основе нечеткой логики показан на Рис. 5.

В указанном примере база нечетких правил состоит из трех правил (строчки а)-в). В левой части иллюстрируется, как текущим значениям ДП y_1 и y_2 присваиваются значения функций принадлежности μ_1, μ_2 (фаззификация), после чего сравниваются значения их функций принадлежности (агрегирование подусловий). Минимальное из значений функций принадлежности определяет в правой части примера степень истинности правила (активизация подзаключений). Строчка г) демонстрирует суммированные степени истинности всех трех правил (аккумуляция заключений), а также полученное в результате дефаззификации четкое значение переменной $q'_{\text{тд}} = 0.4$.

Рис. 5: Пример нечеткого вывода для двух ДП y_1 и y_2

4. Имитационное моделирование процесса диагностирования бортового ретранслятора космического аппарата связи

На Рис. 6 представлена структурная схема бортового ретранслятора (БР) КА связи.

Перечень основных приборов, входящих в состав БР, включает в себя:

- приемную антенну (ПрмАН);
- два комплекта малошумящего усилителя (МШУ1, МШУ2);
- мультиплексор (МУЛ);
- два комплекта усилителя мощности первого ствола (УМ11, УМ12);
- два комплекта усилителя мощности второго ствола (УМ21, УМ22);
- демультиплексор (ДЕМУЛ);
- передающую антенну (ПрдАН);
- датчик мощности МШУ;
- датчики мощности УМ.

При наличии конечно-автоматной модели БР этапы имитационного моделирования процесса диагностирования включают в себя:

Рис. 6: Структурная схема БР

1. Построение базы нечетких правил, выбор алгоритма и предварительная настройка системы диагностирования для значений входного порогового коэффициента $K_{вх_пор} : 0; 0.25; 0.5; 0.75; 1$.
2. Анализ статистических данных о значениях ДП при неисправностях и штатном функционировании БР за последние 10 лет на основе бортовых журналов, сообщений о неисправностях, актов исследования [12,13]. Выявление особенностей распределения ДП при неисправностях и штатном функционировании БС КА связи.
3. Подготовку исходных имитационных данных, соответствующих по характеру распределения реальным значениям ДП, для проведения имитационного моделирования процесса диагностирования.
4. Расчет достоверности. Ввод имитационных данных, соответствующих значениям ДП при неисправностях БР, в модель процесса диагностирования БР. Получение выходных данных по результатам диагностирования. Расчет вероятности правильного решения при диагностировании для каждого значения входного порогового коэффициента. Построение графика зависимости достоверности от значения входного порогового коэффициента.
5. Расчет срока автономного функционирования БР (в части решения задачи автономного диагностирования БР). Анализ выходных данных по результатам диагностирования. Расчет среднего времени функционирования БР между двумя неправильно диагностированными неисправностями (для каждого значения входного порогового коэффициента), когда для решения задачи диагностирования потребовались наземные средства. Построение графика зависимости срока автономного функционирования БР от значения достоверности диагностирования.

В результате анализа исходных данных, изучения мнений экспертов и выполнения предварительных шагов алгоритма диагностирования, приведенных выше, была построена база нечетких правил диагностирования БР КА связи.

В качестве алгоритма нечеткого вывода был выбран алгоритм Мамдани. Определена следующая базовая структура нечеткого правила:

Если y_1^* это r_{1l} и y_2^* это r_{2l} , и $\dots$, и y_G^* это r_{Gl} ,
то $q_{тд1}^*$ это $r_{тд1n}$ и $q_{тд2}^*$ это $r_{тд2n}$, и $\dots$, и $q_{тдZ}^*$ это $r_{тдZn}$.

Множество входных переменных базы нечетких правил представлено в Таблице 1.

Таблица 1: Множество входных лингвистических переменных

№ п/п	Обозначения и наименования	Значения (названия терм)	Вид функции принадлежности
1	y_1^* , контроль вкл. БР и МШУ	выключены	кусочно-линейная
		выключены	кусочно-линейная
2	y_2^* , контроль МШУ	подкл. 1 комплект	кусочно-линейная
		подкл. 2 комплект	кусочно-линейная
3	y_3^* , выходная мощность МШУ	нет сигнала	кусоч-линейн. или колоко- лообразная
		сигнал	кусоч-линейн. или колоко- лообразная
		не норма (нижняя)	кусоч-линейн. или колоко- лообразная
		не норма (верхняя)	кусоч-линейн. или колоко- лообразная
4	y_4^* , комплект УМ1	подкл. 1 комплект	кусочно-линейная
		подкл. 2 комплект	кусочно-линейная
5	y_5^* , комплект УМ1	включен	кусочно-линейная
		выключен	кусочно-линейная
6	y_6^* , комплект УМ1	нет сигнала	кусоч-линейн. или колоко- лообразная
		сигнал	кусоч-линейн. или колоко- лообр.
		не норма (нижняя)	кусоч-линейн. или колоко- лообразная
		не норма (верхняя)	кусоч-линейн. или колоко- лообразная

Для ДП цифрового и сигнального типа основное условие при построении – чтобы они не имели общих точек. При построении ФП входных переменных функционального типа необходимо задать конкретное значение входного порогового коэффициента $K_{вх_пор}$. Множество выходных переменных представлено в Таблице 2.

ФП выходных лингвистических переменных полностью покрывают область значений соответствующих переменных, характеризующих степень уверенности в ТД.

Таблица 2: Множество выходных лингвистических переменных базы нечетких правил бортового ретранслятора

№ п/п	Обозначения и наименования	Значения (названия терм)	Вид функции принадлежности
1	q_1^* , БР работоспособен	нет	кусочно-линейная
		почти	кусочно-линейная
		достаточно	кусочно-линейная
		да	кусочно-линейная
1	q_2^* , отказ УМ 11	нет	кусочно-линейная
		почти	кусочно-линейная
		достаточно	кусочно-линейная
		да	кусочно-линейная
1	q_3^* , отказ УМ 12	нет	кусочно-линейная
		почти	кусочно-линейная
		достаточно	кусочно-линейная
		да	кусочно-линейная
1	q_4^* , отказ датчика мощности УМ1	нет	кусочно-линейная
		почти	кусочно-линейная
		достаточно	кусочно-линейная
		да	кусочно-линейная
1	q_5^* , отказ МШУ1	нет	кусочно-линейная
		почти	кусочно-линейная
		достаточно	кусочно-линейная
		да	кусочно-линейная
1	q_6^* , отказ МШУ2	нет	кусочно-линейная
		почти	кусочно-линейная
		достаточно	кусочно-линейная
		да	кусочно-линейная
1	q_7^* , отказ датчика мощности МШУ	нет	кусочно-линейная
		почти	кусочно-линейная
		достаточно	кусочно-линейная
		да	кусочно-линейная
1	q_8^* , множественный отказ или отказ приборов управления	нет	кусочно-линейная
		почти	кусочно-линейная
		достаточно	кусочно-линейная
		да	кусочно-линейная

Фрагмент базы нечетких правил представлен в Таблице 3. С учетом требований к построению и оптимизации базы общее количество нечетких правил составило: 144.

В процессе исследования был разработан способ настройки колоколообразных ФП, учитывающий априорные данные о распределении ДП. Указанный способ при относительно невысокой трудоемкости позволяет смоделировать у границ допусковых интервалов ДП неопределенность наиболее близкую к реальной.

Для построения базы нечетких правил была использована среда программирования MATLAB. С помощью разработанной программы была проведена предварительная настройка алгоритма диагностирования. В результате настройки

Таблица 3: Фрагмент базы нечетких правил

№ п/п	Правило
1	если y_1^* это r_{11} , и y_2^* это r_{21} , и y_3^* это r_{31} , и y_4^* это r_{41} , и y_5^* это r_{51} , и y_6^* это r_{61} , то q_1^* это r_{14}
2	если y_1^* это r_{11} , и y_2^* это r_{21} , и y_3^* это r_{32} , и y_4^* это r_{41} , и y_5^* это r_{51} , и y_6^* это r_{61} , то q_5^* это r_{52}
3	если y_1^* это r_{11} , и y_2^* это r_{21} , и y_3^* это r_{33} , и y_4^* это r_{41} , и y_5^* это r_{51} , и y_6^* это r_{61} , то q_1^* это r_{53}
...	...

предложено значение выходного порогового коэффициента для переменных, численно характеризующих ТД в режимах функционирования, $K_{\text{вых_пор}} = 0.0$.

Достижение выходного порогового значения в текущем информационном состоянии с двумя и более переменными из множества $Q_{\text{тд}}$ означает необходимость проведения или продолжения тестового диагностирования. Найденное значение для $K_{\text{вых_пор}}$ позволяет настроить чувствительность системы диагностирования от текущих значений ДП таким образом, что, если значение хотя бы одного ДП достигнет пороговое упор, определенное соответствующим входным пороговым коэффициентом $K_{\text{вх_пор}}$, система обязательно отреагирует проведением или продолжением тестового диагностирования.

Результаты имитационного моделирования показали, что разработанный алгоритм позволяет осуществить с помощью нечеткого вывода функциональное диагностирование БР и определить текущее информационное состояние. При выявлении двух и более ТД, чьи переменные достигли или превысили пороговое значение, система диагностирования переходит в тестовый режим и далее диагностирование осуществляется в соответствии с тестовой программой диагностирования.

На Рис. 7 изображены графики зависимости достоверности диагностирования от значений входного порогового коэффициента $K_{\text{вх_пор}}$ для различных алгоритмов нечеткого вывода (Мамдани и Ларсена), а также для различных видов ФП входных переменных (кусочно-линейных и колоколообразных), построенные по результатам имитационного моделирования.

На Рис. 8 изображен график зависимости срока автономного функционирования КА связи от достоверности диагностирования БР КА.

Анализ графиков на Рис. 7,8 показывает следующее:

1. Достоверность диагностирования зависит от значения входного порогового коэффициента $K_{\text{вх_пор}}$. Особенно сильно эта зависимость проявляется при малых значениях $K_{\text{вх_пор}}$, что связано с низкой достоверностью диагностирования вблизи границ допусковых интервалов при диагностировании без разработанного подхода.
2. С ростом достоверности диагностирования срок автономного функционирования возрастает, что связано с увеличением возможности автономного решения задачи диагностирования БС КА без наземных служб.

В итоге можно сделать вывод, что в настоящее время требование к сроку автономного функционирования КА связи не выполняется из-за низкого уровня

Рис. 7: Графики зависимости достоверности диагностирования от значений входного порогового коэффициента $K_{вх_пор}$

Рис. 8: Зависимость срока автономного функционирования КА связи от достоверности диагностирования

достоверности диагностирования бортовых систем КА. Использование нечеткой логики (в рамках допущенных ограничений) позволит обеспечить требуемую достоверность диагностирования и увеличить срок автономного функционирования бортовых систем и КА в целом.

Заключение

В данной статье обоснована актуальность применения нечеткой логики в процессе диагностирования бортовой аппаратуры КА. Осуществлена математическая постановка задачи на основе аппарата конечных автоматов и нечеткой логики. Разработана модель процесса диагностирования бортовой аппаратуры КА в условиях автономного функционирования, учитывающая связь между близостью значений диагностических параметров к границам допусковых интервалов и численными оценками возможных технических диагнозов для различных режимов функционирования. Предложен алгоритм диагностирования бортовой аппаратуры КА, учитывающий результаты нечеткого вывода и включающий оригинальный способ построения функций принадлежности, что позволяет настраивать систему диагностирования с учетом реального распределения значений диагностических параметров вблизи границ допусковых интервалов. Проведено имитационное моделирование процесса диагностирования бортового ретранслятора КА связи, результаты которого доказывают полезность применения нечеткой логики для обеспечения требуемой достоверности принятия решения о техническом диагнозе.

Список литературы

- [1] Мануйлов Ю.С., Калинин В.Н., Гончаревский В.С. Управление космическими аппаратами и средствами наземного комплекса управления. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010. 609 с.
- [2] Миронова А.Н. Метрологическое обеспечение эксплуатации вооружения и военной техники. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2009.
- [3] Назаров А.В., Козырев Г.И., Шитов И.В. Современная телеметрия в теории и на практике. СПб.: Наука и Техника, 2007.
- [4] Полянский В.И. Нечеткие множества в моделях и методах диагностирования сложных технических систем. М.: Полиграф-сервис, 2010.
- [5] Мышко В.В., Кравцов А.Н., Копкин Е.В., Чикуров В.А. Теоретические основы и методы оптимизации анализа технического состояния систем. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013.
- [6] Ратушняк Г.Я. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления сложными организационно-техническими системами. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2010.
- [7] Адаменко А.Н., Войцеховский С.В., Компаниец Р.И. Системы искусственного интеллекта. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013.

- [8] Лоскутов А.И., Козырев Г.И., Сакулин А.Н., Бянкин А.А. Основы испытаний бортовых радиоэлектронных систем. СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2017.
- [9] Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
- [10] Рыжиков Ю.И. Имитационное моделирование. Теория и технологии. СПб.: Корона, 2004.
- [11] Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. СПб.: БХВ-Петербург, 2005.
- [12] Подготовка к испытаниям, летные испытания, летная эксплуатация космических аппаратов научного и социально-экономического назначения. Отчет об ОИР Е 1605-07. 2016.
- [13] Орлов А.Г., Севастьянов Н.Н. Бортовой ретрансляционный комплекс (БРК) спутника связи. Принципы работы, построение, параметры. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014.

Образец цитирования

Козырев Г.И., Хаматов А.А., Клыков В.А., Лоскутов А.И. Диагностирование бортовой аппаратуры космических аппаратов на основе нечеткой логики // Нечеткие системы и мягкие вычисления. 2018. Т. 13, № 2. С.126–146. <https://doi.org/10.26456/fssc43>

Сведения об авторах

1. **Козырев Геннадий Иванович**
профессор кафедры телеметрических систем, комплексной обработки и защиты информации Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.
Россия, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.
2. **Хаматов Андрей Анатольевич**
преподаватель кафедры управления организационно-техническими системами космического назначения Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.
Россия, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.
3. **Клыков Владимир Алексеевич**
начальник лаборатории кафедры телеметрических систем, комплексной обработки и защиты информации Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.
Россия, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.
4. **Лоскутов Андрей Иванович**
начальник кафедры телеметрических систем, комплексной обработки и защиты информации Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.
Россия, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

DIAGNOSTICS ON-BOARD EQUIPMENT OF SPACECRAFTS ON THE BASIS OF FUZZY LOGIC

Kozyrev Gennadiy Ivanovich

Professor at Telemetry Systems, Complex Processing and Protection of Information
department, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky
Russia, 197198, Saint-Petersburg, 13 Zhdanovskaya str..

Khamatov Andrei Anatolyevich

Teacher at Management of Organizational and Technical Systems for Space
Purposes department, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky
Russia, 197198, Saint-Petersburg, 13 Zhdanovskaya str..

Klykov Vladimir Alekseevich

Head of the laboratory at Telemetry Systems, Complex Processing and Protection
of Information department, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky
Russia, 197198, Saint-Petersburg, 13 Zhdanovskaya str..

Loskutov Andrey Ivanovich

Head of Telemetry Systems, Complex Processing and Protection of Information
department, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky
Russia, 197198, Saint-Petersburg, 13 Zhdanovskaya str..

Received 22.10.2018, revised 08.12.2018.

In the present article, within the framework of modern requirements for the autonomy of spacecraft, the need to improve the processes of diagnosing onboard equipment of spacecraft based on the use of finite state machines and fuzzy logic is justified. A mathematical formulation of the problem of diagnosing spacecraft onboard equipment is proposed. A model and algorithm for diagnosing spacecraft onboard equipment based on fuzzy logic have been developed. Simulation modeling of the diagnostic process on the example of the onboard repeater of the communication spacecraft is carried out. The reliability of diagnostics for various fuzzy inference algorithms is calculated.

Keywords: the accuracy of the diagnosis, finite state machine model of the onboard systems, the fuzzy logic algorithm.

Citation

Kozyrev G.I., Khamatov A.A., Klykov V.A., Loskutov A.I., “Diagnostics on-Board equipment of spacecrafts on the basis of fuzzy logic”, *Nechetkie Sistemy i Myagkie Vychisleniya [Fuzzy Systems and Soft Computing]*, **13**:2 (2018), 126–146 (in Russian).
<https://doi.org/10.26456/fssc43>

References

- [1] Manujlov Yu.S., Kalinin V.N., Goncharevskij V.S., *Upravlenie kosmicheskimi apparatami i sredstvami nazemnogo kompleksa upravleniya [Management of space vehicles and ground control equipment]*, VKA im. A.F. Mozhajskogo, SPb., 2010 (in Russian), 609 pp.

- [2] Mironova A.N., *Metrologicheskoe obespechenie ekspluatatsii vooruzheniya i voennoj tekhniki* [Metrological support of the operation of weapons and military equipment], VKA im. A.F. Mozhajskogo, SPb., 2009 (in Russian).
- [3] Nazarov A.V., Kozyrev G.I., Shitov I.V., *Sovremennaya telemektriya v teorii i na praktike* [Modern telemetry in theory and practice], Nauka i Tekhnika, SPb., 2007 (in Russian).
- [4] Polyanskij V.I., *Nechetkie mnozhestva v modelyakh i metodakh diagnostirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Fuzzy sets in models and methods for diagnosing complex technical systems], Poligraf-servis, Moscow, 2010 (in Russian).
- [5] Myshko V.V., Kravtsov A.N., Kopkin E.V., Chikurov V.A., *Teoreticheskie osnovy i metody optimizatsii analiza tekhnicheskogo sostoyaniya sistem* [Theoretical foundations and methods for optimizing the analysis of the technical condition of systems], VKA im. A.F. Mozhajskogo, SPb., 2013 (in Russian).
- [6] Ratushnyak G.Ya., *Intellektualnye tekhnologii monitoringa i upravleniya slozhnyimi organizatsionno-tekhnicheskimi sistemami* [Intellectual technologies of monitoring and management of complex organizational and technical systems], VKA im. A.F. Mozhajskogo, SPb., 2010 (in Russian).
- [7] Adamenko A.N., Vojtsekhovskij S.V., Kompaniets R.I., *Sistemy iskusstvennogo intellekta* [Artificial intelligence systems], VKA im. A.F. Mozhajskogo, SPb., 2013 (in Russian).
- [8] Loskutov A.I., Kozyrev G.I., Sakulin A.N., Byankin A.A., *Osnovy ispytaniy bortovykh radioelektronnykh sistem* [Fundamentals of tests of onboard electronic systems], VKA im. A.F. Mozhajskogo, SPb., 2017 (in Russian).
- [9] Leonenkov A.V., *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH* [Fuzzy simulation in MATLAB and fuzzyTECH], BKhV-Peterburg, SPb., 2005 (in Russian).
- [10] Ryzhikov Yu.I., *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i tekhnologii* [Simulation. Theory and technology], Korona, SPb., 2004 (in Russian).
- [11] Karpov Yu.G., *Imitatsionnoe modelirovanie sistem* [Systems simulation], BKhV-Peterburg, SPb., 2005 (in Russian).
- [12] *Podgotovka k ispytaniyam, letnye ispytaniya, letnaya ekspluatatsiya kosmicheskikh apparatov nauchnogo i sotsialno-ekonomicheskogo naznacheniya*, Otchet ob OIR E 1605-07, 2016 (in Russian).
- [13] Orlov A.G., Sevastyanov N.N., *Bortovoj retranslyatsionnyj kompleks (BRK) sputnika svyazi. Printsipy raboty, postroenie, parametry* [Airborne Repeater Complex (BRK) communication satellite. Principles of operation, construction, parameters], Publishing House of Tomsk State University, Tomsk, 2014 (in Russian).