

УДК 621.396.6:004.89

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.60.9.016](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.60.9.016)

Алгоритм диагностического вывода для радиотехнических устройств на основе семантической базы знаний

П.П. Несмеянов✉

*Московский технический университет связи и информатики, Москва
Российская Федерация*

Резюме. В работе предложен воспроизводимый алгоритм диагностического вывода для радиотехнических устройств на основе семантической базы знаний. Разнородные измерения приводятся к общей шкале по расстоянию от нормативной до явно заданной критической границы; для расчетного сценария опубликованы все масштабы нормировки и полная знаковая матрица связей «симптом – неисправность». Базовая оценка учитывает подтверждающие и опровергающие признаки, а отдельное правило критичности предотвращает подавление единичного физически значимого симптома суммой менее важных связей. В сценарии усилительного тракта отклонение частоты 14 кГц при норме не более 5 кГц активировало приоритетную проверку генераторного узла; за ней следуют усилительный каскад, фильтр или согласующие цепи, антенно-фидерный тракт и цепи питания. Предложенный подход обеспечивает интерпретируемое ранжирование диагностических гипотез и формирование очередности инженерных проверок. Анализ чувствительности при коэффициенте учета опровергающих признаков от 0,2 до 0,6 сохранил базовый порядок неприоритетных гипотез, а изменение контекста контроля изменило активации и итоговую очередность. Расчеты сопоставлены с невзвешенным правилом прямого соответствия. Полученные результаты подтверждают воспроизводимость вычислительной процедуры, но не заменяют стендовую или эксплуатационную валидацию.

Ключевые слова: радиотехническое устройство, техническая диагностика, семантическая база знаний, диагностический вывод, диагностический симптом, диагностическая гипотеза, ранжирование гипотез, усилительный тракт.

Для цитирования: Несмеянов П.П. Алгоритм диагностического вывода для радиотехнических устройств на основе семантической базы знаний. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(9). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2473>
DOI: 10.26102/2310-6018/2026.60.9.016

Diagnostic inference algorithm for radio engineering devices based on a semantic knowledge base

P.P. Nesmeyanov✉

*Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow
the Russian Federation*

Abstract. A reproducible diagnostic inference algorithm for radio engineering devices based on a semantic knowledge base is proposed. Heterogeneous measurements are converted to a common scale based on the distance from the normative value to the explicitly defined critical boundary; all normalization scales and the complete sign matrix of "symptom – fault" relationships have been published for the computational scenario. The basic assessment takes into account confirming and refuting indicators, and a separate criticality rule prevents the suppression of a single physically significant symptom by the sum of less important relationships. In the amplification path scenario, a frequency deviation of 14 kHz with a norm of no more than 5 kHz activated the priority check of the generator node; this is followed by the amplification stage, filter or matching circuits, antenna-feeder

path and power supply circuits. The proposed approach provides an interpretable ranking of diagnostic hypotheses and prioritization of engineering checks. Sensitivity analysis with a factor of refuting signs from 0.2 to 0.6 preserved the basic order of non-priority hypotheses, and a change in the control context changed the activation and the final order. The calculations are compared with the unweighted direct correspondence rule. The obtained results confirm the reproducibility of the computational procedure, but they do not replace bench or operational validation.

Keywords: radio engineering device, technical diagnostics, semantic knowledge base, diagnostic inference, diagnostic symptom, diagnostic hypothesis, hypothesis ranking, amplification path.

For citation: Nesmeyanov P.P. Diagnostic inference algorithm for radio engineering devices based on a semantic knowledge base. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(9). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2473> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.60.9.016

Введение

Диагностирование радиотехнического устройства редко сводится к проверке одного параметра. Выходная мощность, коэффициент усиления, ток потребления, частотная нестабильность, уровень шумов, напряжение питания, коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) и спектральные составляющие описывают разные стороны состояния тракта. Одно и то же отклонение может иметь разные причины: например, снижение выходной мощности связано не только с усилительным каскадом, но и с питанием, согласованием нагрузки или фильтрующими цепями. В классической технической диагностике такая неопределенность рассматривается через параметры, признаки, состояния и процедуры проверки [1, 2]. В количественных и качественных моделях обнаружения неисправностей та же проблема проявляется как необходимость учитывать одновременно расчетные зависимости и эвристические признаки [3, 4]. При автоматизации поэтому требуется задать более строгий порядок перехода от измерения к диагностической гипотезе.

Экспертные системы позволяют представить часть инженерного опыта в виде правил, связывающих симптомы с возможными неисправностями [5, 6]. В диагностике на основе первых принципов дополнительно подчеркивается необходимость объяснять гипотезу через согласующиеся и противоречащие признаки [7]. При прямом использовании правил возникает неоднозначность: один симптом может соответствовать нескольким неисправностям, а одна неисправность – подтверждаться набором признаков. Модельно-ориентированная диагностика решает близкую задачу через сопоставление наблюдаемого состояния с ожидаемым поведением объекта [8, 9]. Прикладные системы диагностики отказов также показывают, что полная модель всех режимов и связей между узлами не всегда доступна на эксплуатационном уровне [10]. Поэтому практически значим алгоритм, работающий с измеренными и экспертно заданными данными без потери связи с физической структурой устройства.

Для такой задачи удобна семантическая база знаний, в которой параметр не хранится отдельно от симптома, а симптом – отдельно от возможной неисправности и узла локализации. В отличие от простой таблицы соответствий, связанное представление сохраняет маршрут инженерного рассуждения: от измеренного значения к отклонению, затем к симптому, гипотезе, узлу локализации и рекомендации. Близкая логика используется в графах знаний и семантических моделях, где значение элемента раскрывается через его отношения с другими объектами [11, 12].

В современных исследованиях семантические и онтологические графы объединяют структурные, атрибутивные и логические связи для промышленных задач диагностики [13]. Графовые модели также используют экспертную топологию датчиков совместно с измерительными данными [14], а графы отказов строятся по журналам

обслуживания при ограниченной разметке [15]. Отдельное направление связывает граф знаний с большой языковой моделью для интерпретируемого диагностического поиска [16]. Гибридная архитектура, в которой data-driven обнаружение аномалий передает результаты графу экспертных знаний для поиска причин, показана в работе [17]. Эти подходы подтверждают актуальность связанного представления знаний, но не снимают требования к раскрытию нормировок, весов и границ применимости конкретного алгоритма.

Цель статьи – разработать воспроизводимый алгоритм перехода от измеренных параметров радиотехнического устройства к ранжированному набору диагностических гипотез с учетом контекста контроля и критичности отдельных симптомов. Задачи исследования включают явное задание шкал нормировки и матрицы связей, анализ чувствительности к коэффициенту опровергающих признаков, проверку механизма критичности и сравнение с невзвешенным правилом прямого соответствия. Новизна состоит в двухуровневом выводе: сначала вычисляется согласованность гипотезы со всей совокупностью признаков, затем физически критичные симптомы формируют приоритетную группу обязательной проверки.

Материалы и методы

Методика построена вокруг промежуточного уровня симптомов. Измеренное значение сначала сопоставляется с нормативом, выбранным для конкретного контекста контроля, затем получает диагностическую интерпретацию и только после этого участвует в формировании гипотезы. Такая последовательность близка к классической технической диагностике, где состояние объекта оценивается по параметрам, признакам и процедурам проверки [1, 2]. Для алгоритмической обработки важно учитывать количественную и качественную природу признаков [3, 4], поэтому правила нормировки, выбора контекста, назначения весов и критического приоритета задаются явно.

Исходными данными являются множество контролируемых параметров радиотехнического устройства, нормативные диапазоны этих параметров, результаты измерений и условия проведения контроля. Для параметра p_i задается измеренное значение x_i и нормативный диапазон:

$$N_i = [L_i, H_i], \quad (1)$$

где L_i и H_i – нижняя и верхняя границы допустимого значения. Если параметр имеет одностороннее ограничение, например, «не выше» или «не ниже» заданного уровня, используется только соответствующая предельная граница. В состав параметров могут входить выходная мощность, коэффициент усиления, ток потребления, уход частоты, уровень шумов, напряжение питания, коэффициент стоячей волны и побочные спектральные составляющие.

Переход от измеренного значения к диагностически значимому отклонению выполняется через сравнение с нормативом. Для дальнейшей обработки используется нормированная степень отклонения:

$$d_i = \begin{cases} 0, & L_i \leq x_i \leq H_i \\ \min \left(1, \frac{L_i - x_i}{\Delta_i^-} \right), & x_i < L_i \\ \min \left(1, \frac{x_i - H_i}{\Delta_i^+} \right), & x_i > H_i \end{cases}, \quad (2)$$

где Δ_i^- и Δ_i^+ – масштабы диагностически значимого отклонения ниже и выше допустимого диапазона. Значение $d_i = 0$ соответствует отсутствию отклонения, а значение, близкое к единице, отражает выраженное нарушение параметра. Такой способ не заменяет физическую модель радиотехнического устройства, но позволяет привести разнотипные параметры к сопоставимой шкале для последующего вывода.

Масштаб нормировки назначается через критическую границу параметра: для нижнего нарушения это расстояние от нижней нормативной границы до нижней критической границы, для верхнего – расстояние от верхней нормативной границы до верхней критической границы. Критическая граница означает уровень, при котором для данного контекста требуется обязательная инженерная проверка; она берется из технической документации, методики контроля или согласованной экспертной шкалы. Если такое значение отсутствует, алгоритм не должен назначать его скрыто: параметр помечается как требующий калибровки. В расчетном сценарии все критические границы и полученные масштабы приведены в Таблице 2; они являются условиями вычислительного примера, а не универсальными нормативами оборудования.

Степень выраженности активного симптома обозначим через a_j . В простейшем случае она может приниматься равной степени отклонения того параметра, на основании которого сформирован симптом. Если симптом определяется несколькими параметрами, a_j задается как функция соответствующих отклонений и условий применимости:

$$a_j = \varphi_j(d_i, C_j), \quad (3)$$

где C_j – условия применимости симптома, включая режим работы, тип узла и характер измерения.

Контекст контроля хранится в базе знаний как набор режима работы, уровня входного сигнала, температуры, сопротивления нагрузки и времени прогрева. По этому набору выбираются нормативные границы, масштабы нормировки, применимость симптомов и веса связей. В основном сценарии C_0 зафиксированы номинальный режим, условно нормальный входной уровень, температура 25 °С, нагрузка 50 Ом и установившееся состояние. Дополнительный сценарий C_1 моделирует иной режим только путем выбора другого набора нормативов; он не интерпретируется как результат температурного или нагрузочного испытания.

$$B = \langle P, S, F, U, C, R, W \rangle, \quad (4)$$

где P – множество диагностических параметров; S – множество симптомов; F – множество возможных неисправностей; U – множество функциональных узлов; C – множество рекомендаций; R – множество отношений между сущностями; W – множество весов связей между симптомами и неисправностями. В данной структуре правило не существует отдельно от предметного контекста: симптом связан с параметром, параметр – с режимом и нормативом, а возможная неисправность – с узлом локализации и проверочным действием. Такой подход согласуется с логикой экспертных систем, где правило должно оставаться интерпретируемым для специалиста [5, 6]. Связанность сущностей базы знаний дополнительно соответствует представлению знаний через отношения между объектами предметной области [11, 12].

Для каждой пары «симптом – неисправность» задается вес w_{jk} , отражающий диагностическую значимость симптома s_j для гипотезы F_k . Положительный вес соответствует подтверждающему признаку, отрицательный – признаку, ослабляющему гипотезу. Степень соответствия гипотезы наблюдаемым данным рассчитывается по выражению:

$$R(F_k) = \frac{\sum_j a_j w_{jk}^+}{\sum_j w_{jk}^+ + \varepsilon} - \mu \frac{\sum_j a_j |w_{jk}^-|}{\sum_j |w_{jk}^-| + \varepsilon}, \quad (5)$$

где a_j – степень выраженности симптома; w_{jk}^+ – положительный вес связи симптома s_j с неисправностью F_k ; w_{jk}^- – отрицательный вес связи; μ – коэффициент учета опровергающих признаков; ε – малое число, исключающее деление на ноль. Полученное значение $R(F_k)$ используется не как абсолютная вероятность неисправности, а как показатель степени соответствия диагностической гипотезы наблюдаемой совокупности признаков. Отрицательные веса используются для учета признаков, противоречащих отдельной гипотезе. Например, повышенный ток потребления может ослаблять гипотезы, не связанные с энергетическим режимом усилительного каскада или цепей питания.

Для воспроизводимости используется единая шкала назначения весов: 1,00 – прямая физически ожидаемая связь; 0,50 – вторичная связь; 0,25 – слабая, но допустимая связь; 0 – устойчивая связь не установлена. Отрицательный знак с теми же модулями обозначает противоречие гипотезе. Значение должно сопровождаться ссылкой на физическую модель, техническую документацию, статистику отказов или протокол экспертного согласования. В данной работе матрица имеет статус прозрачной экспертной настройки вычислительного сценария и полностью приведена в Таблице 4.

Коэффициент учета опровергающих признаков не является универсальной константой. Для размеченной эксплуатационной выборки его следует выбирать по заранее заданной функции потерь или кросс-валидации. Поскольку такая выборка отсутствует, в расчетном сценарии значение 0,4 рассматривается как середина заранее заданного рабочего интервала 0,2–0,6, а не как найденный оптимум. Чувствительность оценок к трем значениям этого интервала приведена в Таблице 6.

Для расчетной проверки далее используется фрагмент радиотехнического устройства, включающий усилительный тракт, цепи питания, генераторный узел, антенно-фидерный тракт и согласующие цепи. Такой фрагмент выбран потому, что его состояние определяется несколькими взаимосвязанными параметрами, а одни и те же признаки могут указывать на разные классы неисправностей. Это позволяет проверить работу алгоритма в условиях неоднозначности диагностических симптомов.

Алгоритм диагностического вывода. Алгоритм диагностического вывода переводит набор измеренных параметров в ранжированное множество диагностических гипотез. Его входом являются измерения (6), нормативные диапазоны, условия контроля и семантическая база знаний, а выходом – гипотезы с оценкой соответствия, узлом локализации и рекомендацией.

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \quad (6)$$

нормативные диапазоны $N_i = [L_i, H_i]$, условия контроля и семантическая база знаний B , содержащая связи между параметрами, симптомами, неисправностями, функциональными узлами и рекомендациями. На выходе формируется множество:

$$H = \{(F_k, R(F_k), U_k, C_k)\}, \quad (7)$$

где F_k – возможная неисправность, $R(F_k)$ – степень соответствия гипотезы наблюдаемым данным, U_k – узел локализации, C_k – рекомендация или проверочное действие.

Алгоритм включает проверку и нормализацию измерений, сопоставление параметров с нормативными диапазонами, формирование активных симптомов, семантический поиск связанных неисправностей, расчет $R(F_k)$, ранжирование гипотез и выдачу проверочных действий (Рисунок 1).

Первые три шага не содержат диагноза: алгоритм только проверяет данные, выбирает контекстные нормативы и определяет отклонения. После формирования симптомов база знаний ограничивает область поиска и рассчитывает базовые оценки. Затем применяется правило критичности. Для каждого симптома база содержит признак критичности и порог активации; гипотезы, имеющие прямую положительную связь с активным критичным симптомом, включаются в приоритетную группу. Сначала группа упорядочивается по поддержке критичного симптома, затем – по базовой оценке; остальные гипотезы ранжируются по базовой оценке. Такая двухуровневая процедура сохраняет совокупный анализ и одновременно не позволяет множеству слабых связей подавить обязательную проверку физически значимого симптома.



Рисунок 1 – Общая схема алгоритма автоматизированного диагностического вывода
Figure 1 – General scheme of the automated diagnostic inference algorithm

Результаты

Для проверки работы алгоритма рассмотрен детерминированный расчетный сценарий усилительного тракта, включающего усилительный каскад, цепи питания, элементы согласования и выходной фильтр. Исходные значения не получены на стенде: это опубликованный набор для проверки вычислительной процедуры. Контекст C_0 фиксирует номинальный режим, температуру 25 °С, нагрузку 50 Ом и установившееся состояние. Входные параметры приведены в Таблице 1, а критические границы, масштабы нормировки и вычисленные отклонения – в Таблице 2.

Таблица 1 – Входные диагностические параметры расчетного примера
Table 1 – Input diagnostic parameters of the computational example

Код	Диагностический параметр	Норматив	Измерение	Отклонение
p_1	Выходная мощность	8–10 Вт	5,8 Вт	ниже нормы
p_2	Коэффициент усиления	24–28 дБ	19 дБ	ниже нормы
p_3	Ток потребления	0,8–1,2 А	1,62 А	выше нормы
p_4	Уход частоты	не более 5 кГц	14 кГц	выше нормы

Таблица 1 (продолжение)
Table 1 (continued)

p_5	Уровень шумов	не выше –90 дБм	–82 дБм	выше нормы
p_6	Напряжение питания	11,8–12,2 В	11,4 В	ниже нормы
p_7	КСВН	1,0–1,5	2,1	выше нормы
p_8	Побочные спектральные составляющие	не выше –50 дБн	–36 дБн	выше нормы

Таблица 2 – Масштабы нормировки расчетного сценария
Table 2 – Normalization scales of the computational scenario

Параметр	Нормативная граница	Критическая граница	Δ	d
p_1	$L = 8,0$ Вт	5,0 Вт	3,0 Вт	0,733
p_2	$L = 24$ дБ	17 дБ	7 дБ	0,714
p_3	$H = 1,2$ А	1,8 А	0,6 А	0,700
p_4	$H = 5$ кГц	20 кГц	15 кГц	0,600
p_5	$H = -90$ дБм	–70 дБм	20 дБ	0,400
p_6	$L = 11,8$ В	11,0 В	0,8 В	0,500
p_7	$H = 1,5$	2,5	1,0	0,600
p_8	$H = -50$ дБн	–30 дБн	20 дБ	0,700

Таблицы 1 и 2 показывают, что в контролируемом фрагменте одновременно присутствуют энергетические, частотные, шумовые и согласующие отклонения. Все значения d получены непосредственно из опубликованных границ и масштабов. Поэтому дальнейший вывод выполняется не напрямую от параметра к неисправности, а через промежуточный уровень симптомов. Переход от измеренных параметров к активным диагностическим симптомам показан на Рисунке 2.



Рисунок 2 – Формирование диагностических симптомов на основе отклонений параметров
Figure 2 – Formation of diagnostic symptoms based on parameter deviations

Сформированные активные симптомы и степени их выраженности приведены в Таблице 3.

Таблица 3 – Активные симптомы и степени их выраженности
Table 3 – Active symptoms and their severity levels

Симптом	Описание симптома	Основание	Активация
S_1	Снижение выходной мощности	p_1 ниже нормы	0,733
S_2	Повышенный ток потребления	p_3 выше нормы	0,70
S_3	Нестабильность частоты	p_4 выше нормы	0,60
S_4	Повышенный уровень шумов	p_5 выше нормы	0,40
S_5	Просадка напряжения питания	p_6 ниже нормы	0,50
S_6	Рассогласование антенно-фидерного тракта	p_7 выше нормы	0,60
S_7	Рост побочных спектральных составляющих	p_8 выше нормы	0,70
S_8	Снижение коэффициента усиления	p_2 ниже нормы	0,714

Активные симптомы сопоставляются с семантической базой знаний, в которой заданы связи «симптом – неисправность» и веса этих связей (Таблица 4). В расчетном сценарии веса связей заданы экспертно и используются для демонстрации работы алгоритма; при практическом применении они должны уточняться по результатам стендовых испытаний или эксплуатационной статистики. В расчетном примере рассматриваются пять диагностических гипотез: F_1 – неисправность усилительного каскада; F_2 – нестабильность генераторного узла; F_3 – нарушение питания узла; F_4 – рассогласование антенно-фидерного тракта; F_5 – неисправность фильтра или согласующих цепей. Расчет степени соответствия выполнен при $\mu = 0,4$ и $\varepsilon = 10^{-6}$. Полученные значения используются не как абсолютные вероятности неисправностей, а как сравнительные оценки согласованности гипотез с наблюдаемой совокупностью признаков. Итоговое ранжирование представлено в Таблице 5.

Таблица 4 – Знаковые веса связей «симптом – неисправность»
Table 4 – Signed weights of symptom – fault relations

Симптом	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
S_1	1,00	0,25	0,50	0,25	0,50
S_2	1,00	-0,50	0,50	-0,50	-0,25
S_3	0,00	1,00	0,00	-0,50	-0,50
S_4	0,50	0,50	0,25	-0,25	0,25
S_5	0,50	0,00	1,00	-0,50	-0,50
S_6	0,00	-0,50	-0,25	1,00	0,50
S_7	1,00	0,25	-0,50	0,25	0,75
S_8	1,00	-0,50	0,25	0,25	0,50

Связь S_7 с F_1 имеет вес 1,00, а с F_5 – 0,75. Тем самым рост побочных спектральных составляющих трактуется прежде всего как возможное проявление нелинейного режима усилительного каскада, но одновременно сохраняет гипотезу неисправности фильтра или согласующих цепей. Такое распределение исключает прежнюю однозначную интерпретацию симптома p_8 и делает конкурирующие физические объяснения явными.

Таблица 5 – Результаты двухуровневого ранжирования диагностических гипотез
Table 5 – Results of two-level ranking of diagnostic hypotheses

Ранг	Гипотеза	Интерпретация	Базовая оценка	Критическая поддержка
1	F_2	Нестабильность генераторного узла	0,311	0,600; приоритет
2	F_1	Неисправность усилительного каскада	0,660	0
3	F_5	Неисправность фильтра или согласующих цепей	0,428	0
4	F_4	Рассогласование антенно-фидерного тракта	0,421	0
5	F_3	Нарушение питания узла	0,331	0

Для проверки выбора коэффициента μ выполнен детерминированный пересчет при значениях 0,2; 0,4 и 0,6. Базовый порядок неприоритетных гипотез сохраняется, а критическая поддержка F_2 не зависит от μ , поскольку вычисляется отдельным правилом.

Таблица 6 – Чувствительность базовых оценок к коэффициенту μ
Table 6 – Sensitivity of baseline scores to coefficient μ

μ	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
0,2	0,660	0,445	0,465	0,535	0,544
0,4	0,660	0,311	0,331	0,421	0,428
0,6	0,660	0,176	0,198	0,307	0,312

Базовая оценка при $\mu = 0,4$ максимальна для F_1 и отражает совместное влияние снижения мощности и усиления, повышенного тока и побочных спектральных составляющих. Однако S_3 имеет активацию 0,600 при пороге критичности 0,500 и прямую связь с F_2 весом 1,00. Поэтому F_2 включается в приоритетную группу с поддержкой 0,600 и занимает первое место в очередности инженерной проверки. Это не объявляет генератор единственной причиной всех наблюдений: F_1 сохраняет наибольшую совокупную согласованность и проверяется второй. Разделение критического приоритета и базовой согласованности устраняет прежнее подавление частотного симптома, не смешивая два разных основания решения.

Обсуждение

В расчетном сценарии признаки не складываются в одну очевидную причину. Снижение мощности и коэффициента усиления поддерживает F_1 , повышенный ток и просадка напряжения – энергетическую ветвь, КСВН – тракт согласования, а побочные спектральные составляющие одновременно связаны с нелинейностью усилителя и фильтрацией. Полная матрица делает эти конкурирующие объяснения проверяемыми. Невзвешенное правило, усредняющее активации по всем положительным связям, сформировало порядок F_4 – F_5 – F_1 – F_3 – F_2 и снова поставило F_2 последней. Двухуровневый

алгоритм сформировал $F_2-F_1-F_5-F_4-F_3$: различие обусловлено не подбором μ , а отдельным правилом критичности.

Влияние условий контроля проверено отдельным сценарием C_1 . При выборе из базы знаний верхней границы тока 1,6 А и допустимого ухода частоты 10 кГц активации S_2 и S_3 снизились соответственно с 0,700 до 0,100 и с 0,600 до 0,400. Критический порог S_3 перестал выполняться, а итоговый порядок изменился на $F_1-F_4-F_5-F_2-F_3$. Расчет показывает, что контекст должен выбирать нормативы до формирования симптомов. Значения C_1 иллюстрируют работу механизма и не являются паспортными характеристиками или результатом температурных испытаний.

Проведенные проверки подтверждают внутреннюю воспроизводимость нормирования, вычисления оценок, анализа μ , приоритетного правила и выбора контекста. Они не подтверждают диагностическую точность на реальном изделии. Для практической валидации необходимы независимая калибровка матрицы несколькими специалистами, стендовые серии с контролируемым внесением неисправностей и сопоставление с подтвержденным диагнозом. До такой проверки алгоритм следует рассматривать как средство формирования очередности инженерных действий, а не как автономный диагностический классификатор.

Заключение

Предложен воспроизводимый двухуровневый алгоритм диагностического вывода на основе семантической базы знаний. Для расчетного сценария раскрыты критические границы и масштабы нормирования восьми параметров, полная матрица из 40 знаковых связей, рабочий интервал коэффициента μ и правило выбора контекстных нормативов.

В основном сценарии критичное отклонение частоты сформировало обязательный приоритет F_2 , тогда как F_1 сохранила максимальную базовую согласованность со всей совокупностью признаков. Анализ μ в интервале 0,2–0,6 не изменил порядок неприоритетных гипотез; смена контекста контроля изменила активации и сняла критический приоритет. Сравнение с невзвешенным правилом показало, что без механизма критичности F_2 остается последней.

Доказанный результат ограничен детерминированным вычислительным сценарием. Стендовых и эксплуатационных данных в работе нет, поэтому точность и переносимость на другие устройства не заявляются. Следующий этап должен включать независимое экспертное согласование весов, серию контролируемых испытаний в нескольких режимах и оценку качества по подтвержденным неисправностям.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Isermann R. Model-based fault-detection and diagnosis – status and applications. *Annual Reviews in Control*. 2005;29(1):71–85. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2004.12.002>
2. Gao Zh., Cecati C., Ding S.X. A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques – Part I: fault diagnosis with model-based and signal-based approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015;62(6):3757–3767. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2417501>
3. Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Yin K., Kavuri S.N. A review of process fault detection and diagnosis. Part I: quantitative model-based methods. *Computers & Chemical Engineering*. 2003;27(3):293–311. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(02\)00160-6](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(02)00160-6)
4. Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Kavuri S.N. A review of process fault detection and diagnosis. Part II: qualitative models and search strategies. *Computers & Chemical Engineering*. 2003;27(3):313–326. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(02\)00161-8](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(02)00161-8)

5. Giarratano J.C., Riley G.D. *Expert Systems: Principles and Programming*. Boston: Course Technology; 2005. 842 p.
6. Buchanan B.G., Shortliffe E.H. *Rule-Based Expert Systems: The MYCIN Experiments of the Stanford Heuristic Programming Project*. Reading: Addison-Wesley; 1984. 748 p.
7. Reiter R. A theory of diagnosis from first principles. *Artificial Intelligence*. 1987;32(1):57–95. [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(87\)90062-2](https://doi.org/10.1016/0004-3702(87)90062-2)
8. De Kleer J., Mackworth A.K., Reiter R. Characterizing diagnoses and systems. *Artificial Intelligence*. 1992;56(2–3):197–222. [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(92\)90027-U](https://doi.org/10.1016/0004-3702(92)90027-U)
9. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Berlin: Springer; 2016. 695 p.
10. Isermann R. *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Berlin: Springer; 2006. 475 p.
11. Hogan A., Blomqvist E., Cochez M., et al. Knowledge Graphs. *ACM Computing Surveys*. 2021;54(4):71. <https://doi.org/10.1145/3447772>
12. Ji Sh., Pan Sh., Cambria E., Marttinen P., Yu Ph.S. A survey on knowledge graphs: representation, acquisition, and applications. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2022;33(2):494–514. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2021.3070843>
13. Huang X., Yang Ch., Zhang Y., Lou S., Kong L., Zhou H. Ontology guided multi-level knowledge graph construction and its applications in blast furnace ironmaking process. *Advanced Engineering Informatics*. 2024;62:102927. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102927>
14. Brahmbhatt P., Patel R., Maheshwari A., Gudi R.D. Improved fault detection and diagnosis using graph auto encoder and attention-based graph convolution networks. *Digital Chemical Engineering*. 2024;11(4):100158. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2024.100158>
15. Ding Y., Li H., Zhu F., Wang Zh., Peng W., Xie M. A semi-supervised failure knowledge graph construction method for decision support in operations and maintenance. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2024;20(3):3104–3114. <https://doi.org/10.1109/TII.2023.3299078>
16. Liu P., Qian L., Zhao X., Tao B. Joint knowledge graph and large language model for fault diagnosis and its application in aviation assembly. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2024;20(6):8160–8169. <https://doi.org/10.1109/TII.2024.3366977>
17. Klein P., Malburg L., Bergmann R. Combining informed data-driven anomaly detection with knowledge graphs for root cause analysis in predictive maintenance. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2025;145(1):110152. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110152>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Несмеянов Павел Павлович, аспирант, **Pavel P. Nesmeyanov**, Postgraduate, Moscow Московский технический университет связи и Technical University of Communications and информатики, Москва, Российская Федерация. Informatics, Moscow, the Russian Federation.
e-mail: bst1701nesmeyanov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 22.06.2026; одобрена после рецензирования 14.09.2026; принята к публикации 24.09.2026.

The article was submitted 22.06.2026; approved after reviewing 14.09.2026; accepted for publication 24.09.2026.