

TECHNOLOGICAL DEVELOPMENTS

UDC 621.865.8:629.735

Chaikina D.V., Khafizov I.I. A method for fault localization and recovery action selection in the autonomous service cycle of the Falco robotic system

Метод локализации отказов и выбора восстановительного действия в автономном сервисном цикле робототехнического комплекса «Фалько»

Chaikina Dzhamilya Viktorovna,

Master's degree in Innovation (27.04.05), Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan

Khafizov Ildar Ilisurovich,

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Physics of Advanced Technologies and Materials Science, Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan

Чайкина Джамия Викторовна,

магистр по направлению подготовки 27.04.05 «Инноватика»,

ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань

Хафизов Ильдар Ильсурович,

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры физики перспективных технологий и материаловедения,

ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань

Abstract. A method for fault localization and recovery action selection in the autonomous service cycle of the FALCO robotic system is proposed. Evidence from the unmanned aircraft, payload, and service dock is combined in a three-state diagnostic vector: a symptom is confirmed, rejected, or unavailable. Bayesian updating ranks seven fault classes, while automatic intervention is permitted only when both the maximum posterior probability and the margin between the two leading hypotheses satisfy confidence thresholds. A recovery action is selected by minimizing expected risk, including action cost and the consequence of an incorrect repair. The method is evaluated in a reproducible computational experiment comprising nine synthetic scenarios. In seven single-fault scenarios, the leading hypothesis matched the injected class with posterior probabilities from 0.948 to 0.996. Propulsion degradation retained a probability of 0.945 when the vibration channel was unavailable. For a deliberately conflicting incomplete packet, the posterior margin was 0.165 against a threshold of 0.20; therefore, the method selected an extended test instead of an invasive action. These results are not presented as field validation and provide a transparent basis for subsequent bench calibration.

Keywords: technical diagnostics, fault localization, Bayesian inference, action selection, autonomous maintenance, UAV, service dock, robotic system.

Аннотация. Предложен метод локализации отказов и выбора восстановительного действия для автономного сервисного цикла робототехнического комплекса «ФАЛЬКО». Метод объединяет признаки от бортовых подсистем беспилотного летательного аппарата, полезной нагрузки и сервисного дока в трёхсостоянный диагностический вектор: признак подтверждён, отклонён либо не измерен. Для ранжирования семи классов отказов применяется байесовское обновление, а разрешение автоматического вмешательства определяется максимальной апостериорной вероятностью и разностью двух ведущих гипотез. Восстановительное действие выбирается минимизацией ожидаемого риска с учётом стоимости операции и последствий ошибочного ремонта. Выполнен воспроизводимый вычислительный эксперимент на девяти синтетических сценариях. В семи одноотказных сценариях ведущая гипотеза совпала с заданным классом при вероятности 0,948–0,996; при отсутствии вибрационного измерения деградация двигателя сохранила вероятность 0,945. Для противоречивого неполного пакета разность гипотез составила 0,165 при пороге 0,20, поэтому вместо вмешательства выбран

расширенный тест. Результаты не трактуются как натурная валидация и задают проверяемую основу для последующей стендовой калибровки.

Ключевые слова: *техническая диагностика, локализация отказов, байесовский вывод, выбор действия, автономное обслуживание, БПЛА, сервисный док, робототехнический комплекс.*

Рецензент: Дёма Роман Рафаэлевич — доктор технических наук, доцент кафедры
«Машины и технологии обработки давлением и машиностроения»
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова»

Введение

Автономность робототехнического комплекса определяется не только способностью беспилотного летательного аппарата выполнить маршрут. После возвращения аппарат должен безопасно завершить сервисный цикл: состыковаться с доком, передать данные, восстановить запас энергии, пройти контроль состояния и получить обоснованное действие при обнаружении отклонения. Ошибка на этом этапе может привести либо к повторному запуску неисправного оборудования, либо к ненужной замене исправного модуля.

В полёте признаки отказов обычно формируются внутри одного динамического контура. В сервисном цикле картина распределена между тремя источниками: бортовой системой, сменной полезной нагрузкой и доком. Например, отсутствие зарядного тока может быть связано с батареей, контактами стыковочного узла или ошибкой сервисного механизма; рост тока двигателя без вибрационного канала остаётся неполным, но значимым свидетельством. Простое правило «первый признак — первое действие» не учитывает конкурирующие объяснения и качество пакета наблюдений.

Исследования по диагностике БПЛА развили методы формирования невязок, наблюдатели, нейросетевые классификаторы и отказоустойчивое управление [1–7]. Вероятностное объединение разнородных сведений применяется в диагностических сетях [8], а теория устранения неисправностей связывает диагноз с ценой проверки или ремонта [9, 10]. Однако для автономного дока требуется отдельный прикладной уровень: он должен сопоставить признаки разных подсистем, оценить неоднозначность и выбрать не только класс отказа, но и безопасное следующее действие.

Цель работы — разработать формализованный метод локализации отказов и выбора восстановительного действия в сервисном цикле комплекса «ФАЛЬКО». Исследовательский вопрос сформулирован следующим образом: позволяет ли совместное использование апостериорного ранжирования и риск-ориентированного выбора действия сохранить однозначное решение при неполном наблюдении и отказаться от вмешательства при конфликте признаков? Научная новизна состоит в объединении трёх элементов в одном контуре: многоканального сервисного

диагностирования, явной оценки разрыва между гипотезами и решения по ожидаемому риску с обязательной проверкой результата.

Материалы и методы

Объектом моделирования принят завершённый миссионно-сервисный цикл комплекса «ФАЛЬКО»: БПЛА возвращается в док, после чего доступны послеполётные телеметрические итоги, результаты самоконтроля полезной нагрузки и состояния сервисных механизмов. Полётное управление, планирование маршрута, размещение доков и прогноз остаточного ресурса находятся за границами исследования. Метод начинает работу после безопасной посадки и не выдаёт команд управления в воздухе.

Диагностическое пространство содержит семь взаимоисключающих классов одного доминирующего отказа $F = \{F1, \dots, F7\}$. Такое допущение принято для первичного вычислительного эксперимента. Составные отказы не принудительно сводятся к одному классу: конфликт признаков должен уменьшать доверие и переводить цикл к расширенной проверке. Для каждого класса определены основной объект локализации и наблюдаемые каналы (таблица 1).

Таблица 1

Классы отказов и источники диагностических признаков

Класс	Локализуемый отказ	Основные признаки	Источник
F1	деградация батареи / дисбаланс ячеек	рост внутреннего сопротивления; разбаланс напряжений	БПЛА, зарядный канал
F2	деградация движительного модуля	аномальный ток двигателя; повышенная вибрация	БПЛА
F3	отказ навигационного датчика	рассогласование GNSS и инерциального канала	БПЛА
F4	нарушение полезной нагрузки	ошибка самотеста или недействительная калибровка	полезная нагрузка
F5	отказ стыковки / зарядного интерфейса	нет подтверждения фиксации; отсутствует зарядный ток	док и БПЛА
F6	отказ канала связи / передачи данных	потери пакетов или нарушение целостности передачи	БПЛА и док
F7	отказ сервисного механизма	тайм-аут операции или повышенный ток привода	док

Представление наблюдений

Использованы десять бинарных признаков: s_1 — повышенное внутреннее сопротивление батареи; s_2 — дисбаланс напряжений ячеек; s_3 — аномальный ток двигателя; s_4 — повышенная вибрация; s_5 — рассогласование GNSS/IMU; s_6 — ошибка

самотеста или калибровки полезной нагрузки; s7 — фиксация/центрирование не подтверждены; s8 — зарядный ток отсутствует; s9 — потеря пакетов или ошибка целостности; s10 — тайм-аут либо повышенный ток сервисного привода. Отсутствие измерения не приравнивается к норме. Поэтому компонент диагностического вектора имеет три состояния:

$$y_i \in \{1, 0, \emptyset\} \quad (1)$$

Связь между признаками и отказами задаётся матрицей $q_{ij} = P(y_i = 1 \mid F_j)$. В таблице 2 приведена фиксированная матрица вычислительного эксперимента. Коэффициенты назначены экспертно так, чтобы отразить физически ожидаемые связи; они опубликованы полностью для воспроизводимости и не являются оценками частот реальной эксплуатации «ФАЛЬКО». В прикладной реализации матрица должна уточняться по стендовым и эксплуатационным данным.

Таблица 2

Матрица условных вероятностей q_{ij}

Признак	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
s1 — сопротивление батареи	0,85	0,15	0,08	0,05	0,10	0,05	0,08
s2 — дисбаланс ячеек	0,90	0,10	0,05	0,05	0,08	0,04	0,06
s3 — ток двигателя	0,30	0,88	0,12	0,10	0,12	0,08	0,20
s4 — вибрация	0,10	0,82	0,18	0,10	0,08	0,06	0,18
s5 — GNSS/IMU	0,08	0,10	0,92	0,12	0,08	0,12	0,07
s6 — самотест нагрузки	0,05	0,08	0,08	0,92	0,06	0,12	0,10
s7 — фиксация в доке	0,08	0,06	0,05	0,08	0,88	0,08	0,30
s8 — нет зарядного тока	0,50	0,05	0,05	0,05	0,88	0,12	0,20
s9 — ошибка передачи	0,05	0,05	0,15	0,12	0,08	0,92	0,10
s10 — привод сервиса	0,10	0,15	0,05	0,08	0,22	0,08	0,90

Вероятностная локализация

Для локализации применяется наивный байесовский классификатор с условной независимостью признаков при заданном классе. Произведение вычисляется только по множеству O фактически полученных наблюдений; компоненты со значением $\emptyset$ исключаются. При равных априорных вероятностях $\pi_j = 1/7$ апостериорная вероятность имеет вид:

$$p_j(y) = [\pi_j \prod_{i \in O} q_{ij}^{y_i} (1 - q_{ij})^{1-y_i}] / [\sum_k \pi_k \prod_{i \in O} q_{ik}^{y_i} (1 - q_{ik})^{1-y_i}] \quad (2)$$

В программной реализации расчёт ведётся в логарифмической области, что предотвращает численное обнуление произведений. Кандидатом считается класс с максимальным $p_{\max}$. Одной величины $p_{\max}$ недостаточно, поскольку два класса могут получить сопоставимые значения. Поэтому дополнительно рассчитывается запас решения — разность первой и второй вероятностей в ранжированном векторе:

$$\Delta = p(1) - p(2) \quad (3)$$

Автоматическое восстановительное действие допускается при $p_{\max} \geq 0,80$ и $\Delta \geq 0,20$. Пороговые значения заданы как исследовательские настройки синтетического эксперимента, а не как сертификационные нормы. При невыполнении хотя бы одного условия разрешены только расширенная диагностика либо безопасная изоляция оборудования.

Выбор восстановительного действия

Для классов F1–F7 предусмотрены соответствующие действия u_1 – u_7 : обслуживание батареи; замена движительного модуля; перекалибровка навигационного канала; переустановка и калибровка полезной нагрузки; очистка и повторная стыковка; сброс и проверка канала связи; обслуживание сервисного механизма. Дополнительные действия u_8 и u_9 — расширенный тест и карантин. Выбор производится по ожидаемому нормированному риску:

$$R(u | y) = C_u + \sum_j p_j(y) L(F_j, u) \quad (4)$$

Здесь C_u — стоимость времени и ресурсов действия, а $L(F_j, u)$ — остаточные потери. Для правильного целевого действия принято $L(F_j, u_j) = 0,03h_j$; для ошибочного целевого действия $L(F_j, u_k) = h_j$ при $k \neq j$; для расширенного теста — $0,10h_j$, для карантина — $0,02h_j$. Коэффициент h_j характеризует относительную критичность класса. Полный набор коэффициентов приведён в таблице 3.

Таблица 3

Нормированные коэффициенты риска вычислительного эксперимента

Класс	h_j	C_u целевого действия	Целевое действие
F1	0,65	0,08	обслуживание или замена батареи
F2	0,95	0,12	замена движительного модуля
F3	0,90	0,07	перекалибровка навигационного канала
F4	0,55	0,06	переустановка и калибровка нагрузки
F5	0,75	0,05	очистка интерфейса и повторная стыковка
F6	0,60	0,04	сброс и проверка канала связи
F7	0,80	0,10	обслуживание сервисного механизма

Для u_8 принято $C_8 = 0,18$, для u_9 — $C_9 = 0,35$. Если порог доверия выполнен, выбирается действие с минимальным $R(u | y)$. Если порог не выполнен, множество допустимых действий ограничивается $\{u_8, u_9\}$. После любого восстановительного действия выполняется независимый проверочный тест. Положительный результат закрывает сервисный цикл; отрицательный переводит объект в карантин. Общая логика показана на рисунке 1.



Рисунок 1 — Контур локализации отказа, выбора действия и проверки восстановления (разработано авторами)

План вычислительного эксперимента

Сформированы девять синтетических сценариев. А1–А7 содержат по одному заданному классу отказа и полный пакет из десяти состояний: характерные признаки установлены в 1, остальные — в 0. В А8 для движительного отказа признак s_3 подтверждён, а измерение s_4 отсутствует; остальные признаки отклонены. В А9 доступны только два положительных сообщения s_8 и s_9 , а остальные каналы не передали данных. Последний сценарий намеренно допускает конкуренцию версий F5 и F6.

Для каждого сценария вычислялись полный вектор p , $r_{\max}$, вторая гипотеза, запас Δ , ожидаемый риск всех девяти действий и итоговое допустимое действие. Исходные q_{ij} , π_j , h_j , C_u и наблюдения указаны в статье; поэтому результаты могут быть независимо пересчитаны без закрытого набора данных. Критерием внутренней

проверки для A1–A7 служило совпадение ведущего класса с заданным, для A8 — сохранение ведущего F2 при пропуске канала, для A9 — блокирование целевого вмешательства.

Литературный обзор

Ранние исследования отказоустойчивости беспилотных вертолётот связывали обнаружение отказа с формированием аналитических невязок и последующей реконфигурацией. Heredia и соавт. рассмотрели обнаружение отказов датчиков и приводов малого автономного вертолётот [1]. В архитектуре Drozeski, Saha и Vachtsevanos диагностика была встроена в контур реконфигурируемого управления и подтверждалась лётными экспериментами [2]. Эти работы показывают необходимость связи диагноза с реакцией системы, но основное внимание уделяют сохранению управляемости в полёте.

Для многороторных аппаратов Avram, Zhang и Muse разработали схему обнаружения, изоляции и оценивания смещений акселерометров и гироскопов и представили экспериментальные результаты [3]. Saied и соавт. использовали измерения скоростей двигателей для диагностики и отказоустойчивого управления окторотором [4]. Lien, Peng и Chen предложили адаптивный наблюдатель для условий отказа ротора [5], а Qin и соавт. объединили оценивание неисправности датчика с активным отказоустойчивым управлением квадрокоптером [6]. Современная работа Casace и соавт. сочетает оценивание внешнего воздействия и рекуррентную нейронную сеть для распознавания моторных отказов в моделируемой среде [7]. Общим для этих подходов является использование динамики аппарата; признаки дока и полезной нагрузки как единого сервисного пакета в них не являются предметом выбора ремонтного действия.

Вероятностные графические модели дают другой способ объединить разнородные свидетельства. Cai и соавт. показали применение байесовской сети для многоканальной диагностики технической системы [8]. Для этапа после локализации важен выбор проверки или ремонта: Langseth и Jensen сформулировали устранение неисправностей как задачу теории решений с учётом стоимости действий и неполного эффекта ремонта [9]. Классическая работа de Kleer и Williams показывает, почему при нескольких совместимых объяснениях нельзя ограничиваться первым найденным диагнозом [10]. Эти идеи образуют методическую основу настоящего исследования.

Выявленный пробел состоит в отсутствии компактной процедуры для послемиссионного цикла, которая одновременно: принимает признаки с борта, нагрузки и дока; различает отрицательное наблюдение и отсутствие данных; количественно проверяет однозначность локализации; выбирает восстановление по ожидаемому риску; подтверждает результат отдельным тестом. Предлагаемый метод

закрывает этот пробел на уровне воспроизводимой концептуальной модели, не подменяя стендовую или полевую валидацию.

Результаты

Таблица 4

Результаты локализации и выбора действия

Код	Сценарий	Наблюдения	Две ведущие гипотезы	Δ	Решение	R
A1	Деградация батареи	1: s1, s2; остальные 0	F1=0,996; F2=0,001	0,995	обслуживание/замена батареи	0,103
A2	Деградация двигателя	1: s3, s4; остальные 0	F2=0,990; F7=0,004	0,986	замена движительного модуля	0,156
A3	Отказ навигационного датчика	1: s5; остальные 0	F3=0,966; F4=0,012	0,954	перекалибровка навигационного канала	0,118
A4	Нарушение калибровки нагрузки	1: s6; остальные 0	F4=0,972; F6=0,012	0,961	переустановка и калибровка нагрузки	0,097
A5	Отказ стыковки/зарядка	1: s7, s8; остальные 0	F5=0,989; F7=0,008	0,981	очистка и повторная стыковка	0,081
A6	Отказ канала связи	1: s9; остальные 0	F6=0,966; F3=0,014	0,952	сброс и проверка канала связи	0,083
A7	Отказ сервисного механизма	1: s10; остальные 0	F7=0,948; F4=0,014	0,934	обслуживание сервисного механизма	0,160
A8	Нет канала вибрации	1: s3; $\emptyset$: s4	F2=0,945; F7=0,017	0,928	замена движительного модуля	0,187
A9	Противоречивый неполный пакет	1: s8, s9; $\emptyset$: s1, s2, s3, s4, s5, s6, s7, s10	F6=0,457; F5=0,291	0,165	расширенный тест	0,248

В сценариях A1–A7 ведущая гипотеза совпала с заданным одиночным отказом. Минимальная максимальная вероятность получена для F7 в A7 и равна 0,9476; максимальная — для F1 в A1 и равна 0,9957. Запас решения находится в диапазоне 0,9337–0,9945, то есть во всех семи случаях существенно превышает порог 0,20.

Минимизация ожидаемого риска выбрала соответствующее целевое действие, а значение R составило от 0,0805 до 0,1597.

Сценарий A8 проверяет обработку отсутствующего измерения. При подтверждённом росте тока двигателя и недоступном канале вибрации класс F2 сохранил $p_{\max} = 0,9454$ и $\Delta = 0,9282$. Значение не достигает результата A2 с двумя согласованными признаками (0,9904), что отражает потерю информации, но порог доверия остаётся выполненным. Метод не создаёт искусственного отрицательного свидетельства из пропуска s4.

В A9 одновременно получены сообщения об отсутствии зарядного тока и нарушении передачи, а остальные восемь каналов недоступны. Версия F6 получила вероятность 0,4566, F5 — 0,2911, F1 — 0,1030. Запас $\Delta = 0,1654$ меньше порога, поэтому целевые операции блокированы. Из допустимых вариантов расширенный тест имеет ожидаемый риск 0,2477 и предпочтён карантину. Таким образом, противоречивый пакет не приводит к автоматическому ремонту по первому признаку.

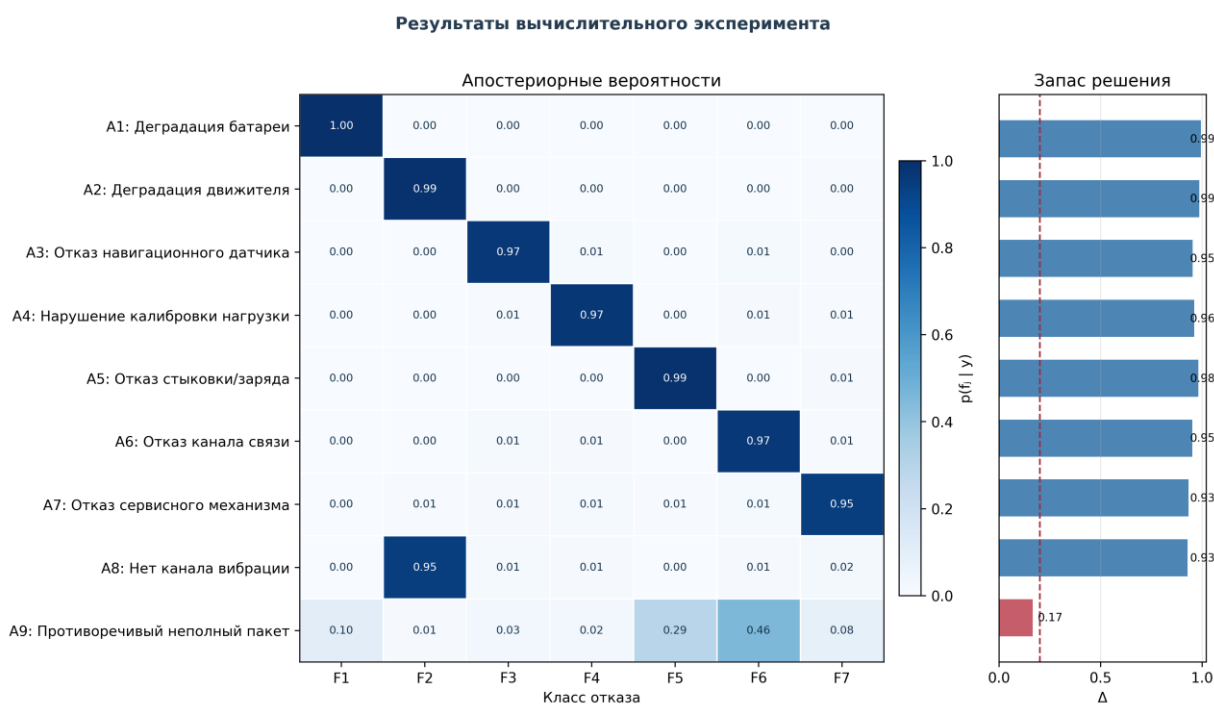


Рисунок 2 — Апостериорные вероятности и запас решения для синтетических сценариев (расчёт авторов)

Тепловая карта показывает диагональную структуру A1–A7 и снижение концентрации вероятности в A8. В A9 вероятность распределена между несколькими классами, а столбец запаса решения выделяет единственный случай ниже порога. Такое

представление полезно при проверке модели: оператор видит не только итоговую метку, но и альтернативную гипотезу, из-за которой вмешательство заблокировано.

Для n классов, m полученных признаков и r допустимых действий вычисление апостериорного вектора требует $O(nm)$, а оценка рисков — $O(nr)$. В рассматриваемом варианте $n = 7$, $m \leq 10$, $r = 9$, поэтому расчёт не является вычислительным ограничением для контроллера дока. Более существенными остаются калибровка вероятностей, контроль качества входных измерений и независимость проверочного теста.

Обсуждение

Полученный результат подтверждает исследовательскую гипотезу в границах вычислительного эксперимента. Апостериорное ранжирование позволяет сохранить локализацию при пропуске одного измерительного канала, если оставшееся свидетельство достаточно специфично. Одновременно запас Δ не допускает свести конфликт к формальной победе максимальной вероятности. Это различие принципиально для автономного сервиса: действие по замене модуля имеет физические и временные последствия, тогда как дополнительный тест является обратимым шагом.

Предложенный контур отличается от активного отказоустойчивого управления [2, 4–6]. Он не компенсирует отказ во время полёта, а работает после безопасного завершения миссии и выбирает сервисное действие. От методов, использующих только динамику БПЛА [1, 3, 7], подход отличается составом наблюдений: батарея, полезная нагрузка, стыковочный интерфейс, связь и механизмы дока рассматриваются в одном диагностическом пространстве. От байесовской диагностики как таковой [8] метод наследует работу с неопределённостью, но дополняет её явным порогом неоднозначности, ограничением допустимых действий и проверкой результата.

Решение остаётся объяснимым при условии, что вместе с ним сохраняются исходные состояния u_i , версия матрицы q_{ij} , априорные вероятности, полный вектор p , значения $p_{\max}$ и Δ , набор коэффициентов риска и результат проверочного теста. Такой журнал нужен не для доказательства «правильности» математической модели, а для воспроизведения конкретного решения и анализа ошибочных вмешательств. Порядок классов или признаков не должен влиять на результат, что устраняет неоднозначность последовательных правил типа if-then.

Главное ограничение — параметры модели заданы экспертно, а сценарии синтетические. Высокие вероятности $A1$ – $A7$ следуют из спроектированной матрицы и не являются оценкой эксплуатационной точности. Допущение условной независимости упрощает расчёт, хотя ток и вибрация либо фиксация и заряд могут быть коррелированы. Равные априорные вероятности не отражают реальную частоту

отказов. Наконец, модель одного доминирующего класса не локализует составные отказы; она лишь должна распознать недостаток уверенности, что показано одним конфликтным сценарием.

Для перехода к опытной эксплуатации необходимы четыре этапа. Сначала требуется стендовая разметка отказов с контролируемым изменением тяжести и режима работы. Затем q_{ij} и π_j следует оценить с доверительными интервалами и проверить калибровку p на данных, не использованных при настройке. После этого пороги $p_{\min}$, Δ и коэффициенты риска должны быть выбраны по цене ложного ремонта и пропущенного отказа. Завершающим этапом являются длительные циклические испытания «миссия — стыковка — диагностика — восстановление — проверка» с регистрацией времени решения, доли дополнительных тестов, ложных вмешательств и остаточного риска.

Заключение

Разработан метод послемиссионной локализации семи классов отказов комплекса «ФАЛЬКО» по десяти признакам от БПЛА, полезной нагрузки и сервисного дока. Отсутствующее измерение представлено отдельным состоянием и не подменяется отрицательным наблюдением.

Предложено двухуровневое правило допуска автоматического вмешательства: максимальная апостериорная вероятность должна быть не ниже 0,80, а разность двух ведущих гипотез — не ниже 0,20. Действие выбирается по минимуму ожидаемого риска и завершается независимым проверочным тестом.

В воспроизводимом синтетическом эксперименте семь одиночных отказов локализованы как ведущие классы при $p_{\max} = 0,948\text{--}0,996$. При пропуске вибрационного канала для движительного отказа получено $p_{\max} = 0,945$. Конфликтный неполный пакет дал $\Delta = 0,165$ и корректно перевёл цикл к расширенной диагностике без целевого ремонта.

Численные коэффициенты и результаты не являются доказательством готовности к эксплуатации. Следующий этап — стендовая идентификация вероятностей и потерь, проверка составных отказов и валидация порогов на независимой серии сервисных циклов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование выполнено без внешнего финансирования.

References

1. Heredia G., Ollero A., Bejar M., Mahtani R. Sensor and actuator fault detection in small autonomous helicopters // *Mechatronics*. 2008. Vol. 18, No. 2. P. 90–99. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2007.09.007.
2. Drozeski G.R., Saha B., Vachtsevanos G.J. A Fault Detection and Reconfigurable Control Architecture for Unmanned Aerial Vehicles // 2005 IEEE Aerospace Conference. 2005. P. 1–9. DOI: 10.1109/AERO.2005.1559597.
3. Avram R.C., Zhang X., Muse J. Quadrotor Sensor Fault Diagnosis with Experimental Results // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2017. Vol. 86. P. 115–137. DOI: 10.1007/s10846-016-0425-1.
4. Saied M., Lussier B., Fantoni I., Shraim H., Francis C. Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control of an Octorotor UAV using motors speeds measurements // *IFAC-PapersOnLine*. 2017. Vol. 50, No. 1. P. 5263–5268. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.468.
5. Lien Y.-H., Peng C.-C., Chen Y.-H. Adaptive Observer-Based Fault Detection and Fault-Tolerant Control of Quadrotors under Rotor Failure Conditions // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No. 10. Article 3503. DOI: 10.3390/app10103503.
6. Qin L., He X., Yan R., Zhou D. Active Fault-Tolerant Control for a Quadrotor with Sensor Faults // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2017. Vol. 88. P. 449–467. DOI: 10.1007/s10846-017-0474-0.
7. Cacace J., Scognamiglio V., Ruggiero F., Lippiello V. Motor Fault Detection and Isolation for Multi-Rotor UAVs Based on External Wrench Estimation and Recurrent Deep Neural Network // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2024. Vol. 110. Article 148. DOI: 10.1007/s10846-024-02176-2.
8. Cai B., Liu Y., Fan Q., Zhang Y., Liu Z., Yu S., Ji R. Multi-source information fusion based fault diagnosis of ground-source heat pump using Bayesian network // *Applied Energy*. 2014. Vol. 114. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.09.043.
9. Langseth H., Jensen F.V. Decision theoretic troubleshooting of coherent systems // *Reliability Engineering & System Safety*. 2003. Vol. 80, No. 1. P. 49–62. DOI: 10.1016/S0951-8320(02)00202-8.
10. de Kleer J., Williams B.C. Diagnosing multiple faults // *Artificial Intelligence*. 1987. Vol. 32, No. 1. P. 97–130. DOI: 10.1016/0004-3702(87)90063-4.multiple faults. *Artificial Intelligence*, 32(1), 97–130. [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(87\)90063-4](https://doi.org/10.1016/0004-3702(87)90063-4)