УДК 629.7.083+658.514 https://doi.org/10.26160/2542-0127-2026-18-61-65

МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОБЪЕМА И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ РЕМОНТА ПЛАНЕРА ВЕРТОЛЕТА НА МЕСТЕ ВЫНУЖДЕННОЙ ПОСАДКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НАИВНОГО БАЙЕСОВСКОГО КЛАССИФИКАТОРА

Петров Ю.В., Угренинов В.Г.
Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва

Ключевые слова: прогнозирование ремонта, планер вертолета, наивный байесовский классификатор, распознавание образов, признаковое пространство, вертолет, полевое техническое обслуживание.
Аннотация. В статье рассматривается актуальная задача повышения эффективности управления восстановлением авиационной техники в полевых условиях. Предложена методика оперативного прогнозирования категории ремонта планера вертолета на месте вынужденной посадки на основе классификации по сформированному признаковому пространству. В качестве математического аппарата для прогнозирования объема и продолжительности ремонта предлагается использовать наивный байесовский классификатор.

METHODS FOR OPERATIONAL PREDICTION OF THE VOLUME AND DURATION OF HELICOPTER AIRCRAFT AIRFRAME REPAIR AT THE SITE OF AN EMERGENCY LANDING USING A NAIVE BAYESIAN CLASSIFIER

Petrov Yu.V., Ugreninov V.G.
Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow

Keywords: repair prediction, helicopter airframe, naive Bayes classifier, pattern recognition, feature space, helicopter, field maintenance.
Abstract. The article addresses the pressing issue of improving the efficiency of managing the restoration of aviation equipment in field conditions. A methodology is proposed for the operational prediction of the repair category of a helicopter airframe at the site of an emergency landing, based on classification using the formed feature space. A naive Bayes classifier is proposed as the mathematical tool for predicting the scope and duration of repairs.

Введение

Одной из ключевых проблем в обеспечении эксплуатационной надежности вертолетной техники в чрезвычайных ситуациях является неопределенность в оценке объема и продолжительности ремонтных работ непосредственно на месте вынужденной посадки. Эксплуатация в неблагоприятных климатических условиях (высокая температура, запыленность, высокогорье) и получение эксплуатационных повреждений создают широкий спектр дефектов, для которых классические детерминированные методики прогнозирования часто неприменимы.

Традиционный подход к принятию решения типа «ремонтировать/не ремонтировать», где ремонтировать (в месте вынужденной посадки или на авиационно – технической базе (АТБ)), оценка трудоемкости ремонта и его

логистическое обеспечение часто основываются на субъективном опыте инженерного состава, что приводит к задержкам и нерациональному использованию ресурсов [1]. В связи с этим, актуальной является задача создания формализованной методики, позволяющей по ограниченному набору визуально определяемых признаков повреждений с высокой вероятностью классифицировать параметры предстоящего ремонта.

В качестве математического аппарата для прогнозирования объема и продолжительности ремонта предлагается использовать наивный байесовский классификатор (Naive Bayes Classifier). Этот метод относится к статистическим методам распознавания образов и хорошо зарекомендовал себя в задачах диагностики и прогнозирования технического состояния сложных систем [2].

Основное научное содержание данной статьи заключается в адаптации наивного байесовского классификатора для решения специфической задачи прогнозирования ремонтных воздействий на планер вертолета в полевых условиях с учетом специфики эксплуатационных повреждений.

Математический аппарат. Постановка задачи

В основе метода лежит теорема Байеса, позволяющая вычислять апостериорную вероятность принадлежности объекта к определенному классу на основе его признаков.

Пусть у нас есть объект B, который характеризуется набором из n признаков: $B = (B_1, B_2, \dots B_i, \dots, B_n)$. Необходимо определить, к какому классу из множества $R = (R_1, R_2, \dots R_j, \dots, R_k)$ этот объект относится.

Вероятность того, что объект B принадлежит классу R, вычисляется по формуле Байеса:

$$P(R_j|B) = \frac{P(R_j) \cdot P(B\,|R_j)}{P(B)},$$

где $P(R_j|B)$ – вероятность предположения R_j при наступлении события B;

$P(R_j)$ – изначальная вероятность предположения R_j;

$P(B)$ – абсолютная вероятность наступления события B;

$P(B\,|R_j)$ – вероятность наступлении события B, если предположения R_j истинно.

Так как знаменатель $P(B)$ является константой для всех классов, то для принятия решения достаточно сравнить числители. Классификатор относит объект к тому классу R_j, для которого эта вероятность максимальна, т.е. находится такой элемент R_j из множества R, при котором функция $P(R_j)\prod_{i=1}^{n} P(B_i\,|R_j)$ принимает максимальное значение:

$$\bar{Y} = argmax_{R_j \in R}\, P(R_j) \prod_{i=1}^{n} P(B_i\,|R_j).$$

Ключевое предположение "наивного" классификатора – условная независимость признаков. Это означает, что вероятность наблюдения конкретного набора признаков $P(B\,|R_j)$ равна произведению вероятностей каждого отдельного признака $P(B_i\,|R_j)$. Несмотря на указанное упрощение, на практике этот метод показывает высокую эффективность и устойчивость.

Формирование признакового пространства и классификация ремонтов

Для создания работоспособной модели необходимо определить:

А. Целевые классы (прогнозируемые переменные)

В зависимости от прогнозируемого объема и продолжительности ремонта предлагается выделить следующие классы:

1. R_1 ***(оперативный ремонт)*:** восстановление работоспособности силами экипажа на месте посадки без привлечения дополнительных сил и средств.

2. R_2 ***(малый ремонт)*:** восстановление работоспособности силами одной ремонтной бригады в течение до 12 часов с обеспечением логистической поддержки.

3. R_3 ***(средний ремонт)*:** восстановление работоспособности вертолета силами полевой ремонтной бригады в течение 1-2 суток с обеспечением логистической поддержки.

4. R_4 ***(крупный ремонт)*:** для восстановления работоспособности требует более 2 суток, специальное оборудование и, возможно, эвакуации в АТБ.

Б. Информационные признаки (факторы B_i)

Рассмотрим возможный перечень типовых признаков при наличии повреждений обшивки фюзеляжа, крыла и оперения (табл. 1).

Табл. 1. Типовые признаки наличия повреждений обшивки фюзеляжа, крыла и оперения

Признак	**Тип**	**Описание / Градации**
B_1 – тип ВС	Категориальный	Ми-8/17/171/МТВ, Ми-26Т, Ка-62, Ансат, UH-60, АН-64, СН-47 и т.д.
B_2 – локализация повреждения	Категориальный	Передняя часть фюзеляжа, средняя часть фюзеляжа, хвостовая балка, стабилизатор и др.
B_3 – характер повреждения	Категориальный	Трещина, пробоина, коррозионное повреждение, износ и др.
B_4 – геометрия повреждения	Количественный	Оценочная площадь, длина, глубина, локализация по отношению к силовым элементам и др.
B_5 – температурные условия	Количественный	Фактическая температура наружного воздуха, °С
B_6 – влажность воздуха	Категориальный	Сухо, небольшой дождь, сильный дождь, ливень
B_7 – запыленность	Категориальный	Низкая, средняя, высокая (по визуальной оценке)
B_8 – высота над уровнем моря	Количественный	Диапазон высот в м: <500, 500-1000, 1000-2500, >2500

Методика применения классификатора

1. ***Обучение модели:*** на основе анализа массива данных с использованием доступных источников информация и алгоритмов искусственного интеллекта формируется база данных о выполненных ремонтах на вертолетах данного типа, а также однотипных повреждений на ЛА других типов. Рассчитываются априорные

вероятности классов $P(R_j)$ и условные вероятности $P(B_i \mid R_j)$ для каждого признака. Эти вероятности формируют базу знаний классификатора [3].

2. ***Прогнозирование на месте (работа классификатора):***

– специалист на месте вынужденной посадки визуально оценивает повреждения вертолета и заполняет таблицу векторов признаков $B = (B_1, B_2, \dots, B_8)$. Эти данные подаются на вход обученного классификатора;

– классификатор вычисляет апостериорную вероятность $P(R_j|B)$ для каждого из классов ремонта и выдает наиболее вероятный класс (например, "Средний ремонт" с вероятностью 85%.

3. ***Принятие решения*:** на основе полученного прогноза руководитель принимает взвешенное решение о выделении ресурсов, времени и необходимости эвакуации.

4. ***Обучение модели:*** на основе анализа массива данных с использованием доступных источников информация и алгоритмов искусственного интеллекта формируется база данных о выполненных ремонтах на вертолетах данного типа, а также однотипных повреждений на ЛА других типов. Рассчитываются априорные вероятности классов $P(R_j)$ и условные вероятности $P(B_i \mid R_j)$ для каждого признака. Эти вероятности формируют базу знаний классификатора [3].

5. ***Прогнозирование на месте (работа классификатора):***

– специалист на месте вынужденной посадки визуально оценивает повреждения вертолета и заполняет таблицу векторов признаков $B = (B_1, B_2, \dots, B_8)$. Эти данные подаются на вход обученного классификатора;

– классификатор вычисляет апостериорную вероятность $P(R_j|B)$ для каждого из классов ремонта и выдает наиболее вероятный класс (например, "Средний ремонт" с вероятностью 85%.

6. ***Принятие решения*:** на основе полученного прогноза руководитель принимает взвешенное решение о выделении ресурсов, времени и необходимости эвакуации.

Заключение

Разработанная методика на основе наивного байесовского классификатора позволяет формализовать процесс принятия решения в условиях неопределенности, характерных для аварийных ситуаций. Ее применение обеспечивает: скорость (прогноз может быть получен за секунды), объективность (решение основывается на статистических данных, а не на субъективном мнении даже квалифицированного специалиста), адаптивность (по мере накопления новых данных о ремонтах модель может быть дообучена, повысится ее точность [4]. Предложенный подход может стать первым шагом при создании *интеллектуальной системы поддержки принятия решений* в инженерно-авиационной службе. Дальнейшие исследования необходимо направить на уточнение признакового пространства, сбор эмпирических данных для обучения и валидации модели, а также на разработку пользовательского интерфейса для мобильных устройств.

Список литературы

1. Володко А.М., Горшков В.А. Вертолет в Афганистане. – М.: Воениздат. А/О «РЕАМ-Билдинг», 1993. – 216 с.

2. Peng Q., Zhu H., Wu J., Cao F., Fang X. Intelligent Fault Identification in Flight Vehicles Using Bayes Classifier with Dynamic Feature Optimization and Adaptive Mo del Selection // IFAC-PapersOnLine. 2025, vol. 59, no. 35, pp. 614-619.
3. Dietz D.C. Analytical Methodology for Predicting Repair Time Distributions of Advanced Technology Aircraft: technical report // Wright-Patterson AFB, OH: Air Force Inst. of Tech., School of Engineering, 2023.
4. Чинючин Ю.М., Ойдов Н. К задачам поддержания лётной годности воздушных судов на основе мониторинга их ресурсного состояния // Научный вестник МГТУ ГА. – 2017. – Т. 20, №3. – С.110-121.

Сведения об авторах:

Петров Юрий Владимирович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технической механики и инженерной графики;

Угренинов Владимир Германович – к.т.н., доцент, доцент кафедры технической механики и инженерной графики.