

# ОЦЕНКА ДЕЙСТВИЙ ОПЕРАТОРА ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ С УЧИТЕЛЕМ

М. А. Нафиков, С. П. Полуэктов

ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж)

Поступила в редакцию 10.05.2016 г.

**Аннотация.** Представлены результаты разработки методики оценки действий оператора эргатической системы «Летчик – Самолет» на этапе посадки по информации о параметре «Угол отклонения ручки управления самолетом по тангажу» с помощью методов машинного обучения с учителем: метода опорных векторов и градиентного бустинга деревьев. Представлены результаты тестирования предложенной методики.

**Ключевые слова:** обработка сигнала, спектр сигнала, метод опорных векторов, градиентный бустинг деревьев, безопасность полётов, оценка действий лётчика.

**Annotation.** The method of evaluation of «Pilot – Aircraft» ergatic system operator actions in the landing phase by «Deviation angle of aircraft control stick on pitch» parameter are described. Support vector machine and gradient boosted trees are used in the method. The experiment results of the proposed algorithm are represented.

**Keywords:** signal processing, spectrum, support vector machine, gradient boosted trees, aviation safety, evaluation of pilot actions.

## ВВЕДЕНИЕ

Вопросы управления сложными эргатическими системами являются актуальными на современном этапе развития науки и техники. Особый интерес вызывает задача оценки действий оператора. Необходимость решения подобных задач определяется тяжёлыми материальными, в том числе и людскими потерями, вызываемыми случайными ошибками операторов. Особенно актуальна данная задача для авиации. Количество авиационных происшествий из-за нарушений и ошибок личного состава систематически превышает количество авиационных происшествий из-за отказов авиационной техники [1]. Необходимо также учитывать тот факт, что наиболее опасным участком полёта по-прежнему остаётся посадка. В статье предлагается новый метод объективной оценки качества управления сложными объектами на примере пилотирования самолётом в режиме снижения по глиссаде, который позволяет своевременно

реагировать на снижение уровня натренированности лётчика и в конечном итоге позволит повысить безопасность полетов.

Основным источником полетных данных являются бортовые устройства регистрации (БУР). Выполненный анализ существующих способов оценивания качества пилотирования, в том числе и с использованием информации БУР, показал их недостаточную эффективность [2, 3, 4]. Поэтому существует необходимость дополнения известных методик параметрами, учитывающими характер пилотирования самолета на протяжении всего этапа снижения самолета по глиссаде и регистрируемыми штатными БУР.

## МОДИФИКАЦИЯ СУЩЕСТВУЮЩЕГО СПОСОБА ОЦЕНКИ ДЕЙСТВИЙ ЛЁТЧИКА НА ЭТАПЕ ПОСАДКИ

В работах [5, 6, 7] было доказано, что структура движения ручки управления самолетом в продольном канале на этапе посадки является показателем качества пилотирования и поэтому для оценки качества посадки

можно обоснованно использовать параметр «Угол отклонения ручки управления самолетом по тангажу» ( $\delta_{РУС\theta}$ ), который регистрируется на всех современных воздушных судах штатным БУР. Использование информации, содержащейся в указанном полетном параметре, позволит повысить объективность итоговой оценки за весь полет, так как она основана на инструментальной обработке исходного сигнала и не зависит от ошибок оператора наземного устройства обработки полетной информации. На рис. 1. Представлены графики изменения во времени параметра «Угол отклонения ручки управления самолетом по тангажу» на этапе посадки для летчиков различного уровня подготовки.

На основе работ [8-11] для оценки посадки предлагается использовать спектр сигнала  $\delta_{РУС\theta}$ , а для построения модели зависимости между данным спектром и уровнем подготовки пилота, характеризующимся его классной квалификацией, использовать методы машинного обучения с учителем.

В качестве входных признаков в реализации предложенного метода использовались отсчеты нормализованного сглаженного спектра  $\tilde{F}_n$  исследуемого дискретного сигнала  $\delta_{РУС\theta}$ , а в качестве выходного признака – номер класса летчика.

Вектор входных признаков  $\tilde{F}_n$  формировался при помощи описанных ниже преобразований

$$\tilde{F}(k) = \frac{\sum_{j=k-(m-1)/2}^{k+(m-1)/2} F(j)}{m}, \quad (1)$$

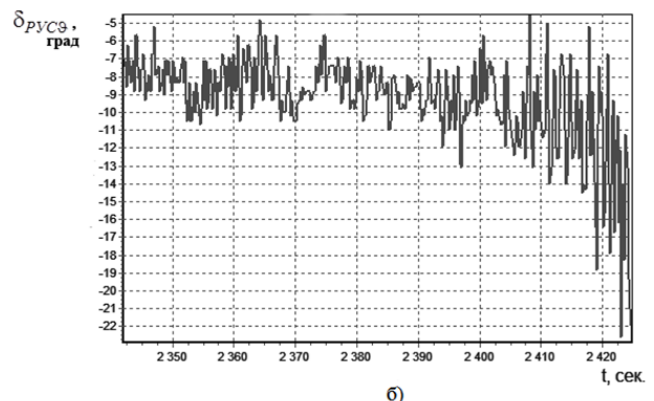
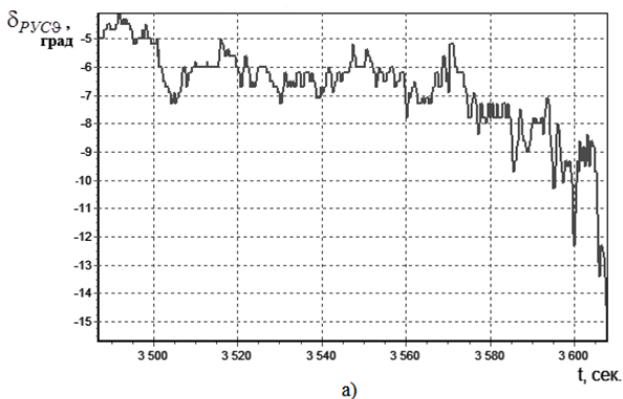


Рис. 1. Графики изменения параметра «Угол отклонения РУС по тангажу» на этапе посадки для летчиков различной классной квалификации.

(а) «3-й класс», (б) «1-й класс»

$$\tilde{F}_n = \frac{\tilde{F}(k)}{K}, \quad (2)$$

где  $F$  – спектр дискретного сигнала  $S$  длины  $N$ ,  $m$  – размер окна,  $K$  – постоянное число, превосходящее все значения  $\tilde{F}$ ,

$$F(k) = \sum_{i=0}^{N-1} S(i) e^{-\frac{2\pi i k}{N}}. \quad (3)$$

Спектр дополнительно сглаживался при помощи метода скользящего окна для получения более однородных данных, а амплитуды сигнала, частоты которых меньше 0,5 Гц, приравнялись к нулю для исключения информативной составляющей сигнала, связанной с частотой собственных колебаний воздушного судна по углу атаки.

Построение модели зависимости между спектром сигнала  $\delta_{РУС\theta}$  и номером класса летчика выполнялось при помощи двух алгоритмов машинного обучения с учителем: метода опорных векторов (SVM) с радиальной базисной функцией в качестве ядра [12] и метода градиентного бустинга деревьев (GBТ) [13].

Основной идеей метода опорных векторов является перевод векторов в пространство более высокой размерности и поиск разделяющей гиперплоскости с максимальным зазором в этом пространстве.

В качестве ядра в реализации использовалась радиальная базисная функция

$$K(x_i, x_j) = e^{-\|x_i - x_j\|^2}. \quad (4)$$

Градиентный бустинг деревьев является обобщением бустинга для многомерной классификации, в основе которого лежит эмпи-

### Градиентный бустинг деревьев

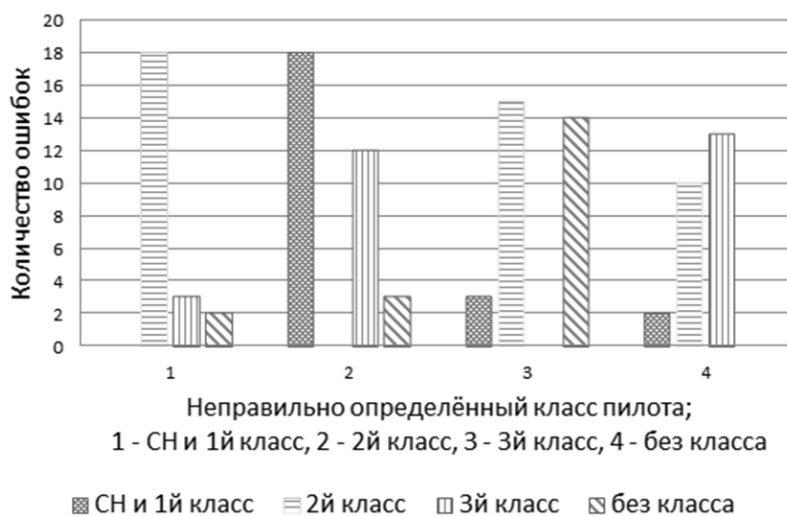


Рис. 2. Диаграмма распределения ошибок для метода GBT

рический факт о композиции слабых моделей распознавания (моделей, допускающих множество ошибок). Данный метод позволяет существенно увеличить качество обучения алгоритма. При бустинге происходит последовательное обучение классификаторов. Таким образом, обучающий набор данных на каждом последующем шаге зависит от точности прогнозирования предыдущего базового классификатора.

В реализации метод GBT использовался со следующими параметрами:

- тип функции потерь – аномальные потери;
- количество итераций бустинга – 3000;
- параметр регуляризации – 0,0008;
- порция подвыборки – 0,0001;
- максимальная глубина деревьев принятия решений – 1.

#### УТОЧНЕНИЕ ПРЕДСКАЗАННОГО НОМЕРА КЛАССА ЛЁТЧИКА

В методах машинного обучения выборку принято делить на обучающую (по которой производится настройка модели зависимости) и на тестовую (по которой оценивается качество построенной модели).

Обучение алгоритмов выполнялось по обучающей выборке, состоящей из 40 реализаций параметра «Угол отклонения ручки управления самолетом по тангажу» на этапе

снижения самолета по глиссаде: 10 реализации для летчиков без класса, 10 реализации для летчиков 3-го класса, 10 реализации для летчиков 2-го класса и 10 реализации для летчиков снайперов и летчиков 1-го класса. Летчики 1 класса и летчики-снайперы были объединены в одну группу на основании исследования, результаты которого представлены в [8].

Тестирование алгоритмов проводилось по тестовой выборке объемом 454 реализации параметра «Угол отклонения ручки управления самолетом по тангажу» на этапе снижения самолета по глиссаде: 49 реализаций для летчиков без класса, 115 реализаций для летчиков 3-го класса, 181 реализация для летчиков 2-го класса, 109 реализаций для летчиков снайперов и летчиков 1-го класса.

В результате тестирования методов машинного обучения были получены диаграммы распределения ошибок для каждого из методов. На рис. 2 представлена диаграмма распределения ошибок для метода градиентного бустинга деревьев.

Анализ диаграмм распределения ошибок показал, что в большинстве случаев алгоритмы ошибаются на один класс, поэтому целесообразно в дальнейшем провести отдельный анализ для каждой пары ближайших классов. Например, уточнять предсказанный номер класса лётчика уже в бинарном классификаторе.

В реализации использовались следующие бинарные классификаторы:

- если предсказанный класс «3-й класс», то используется метод SVM для классификации лётчиков 2-го и 3-го классов;

- если предсказанный класс «без класса», то используется метод GBT для классификации лётчиков 3-го класса и без класса.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии со стандартной схемой оценивания обобщающей способности алгоритма классификации весь исходный массив полетных данных делится на обучающую и тестовую выборки. Однако из-за большого количества входных признаков требуется как можно большее количество примеров в обучающей выборке, иначе алгоритму классификации может не хватить информации для построения модели зависимости. Также требуется большое количество примеров в тестовой выборке для оценки качества классификации с высокой точностью.

В исследовании объём исходных данных ограничен, поэтому для оценивания обобщающей способности алгоритма классификации используется кросс-валидация. Вся выборка исходных данных делится на  $k$  блоков (рис. 3). На каждом шаге процедуры кросс-валидации  $k-1$  блоков данных объединяют в обучающую подвыборку, а оставшийся блок соответствует тестовой подвыборке. Затем обучают классификатор на обучающей подвыборке и определяют долю ошибок на тестовой подвыборке. Далее вся последовательность повторяется, но в качестве обучающей и тестовой подвыборок используют уже другие блоки данных [14]. Итоговая оценка вычисляется как среднее значение оценок  $E_i$  (формула 5). Таким образом, достигается тестирование всего объема данных.



Рис. 3. Схема кросс-валидации

Итоговая оценка эффективности алгоритма рассчитывается как

$$E = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k E_i, \quad (5)$$

где  $E_i = 1 - \frac{n_{\Delta}}{n_{\Sigma}}$ ,  $n_{\Delta}$  – количество тестовых

примеров, в которых допущена ошибка,  $n_{\Sigma}$  – количество тестовых примеров в тестовой выборке.

Все имеющиеся данные были разбиты на 5 непересекающихся блоков, каждый из которых содержит 48 образцов по 12 образцов на каждую классность пилота: без класса, 3 класс, 2 класс и 1 класс (включая лётчиков снайперов). Полетные данные были получены с бортовых устройств регистрации маневренных самолётов. Результаты тестирования алгоритмов представлены в табл. 1.

Анализ полученных результатов показал, что наилучшую общую точность имеет метод градиентного бустинга деревьев GBT. Кроме того, уточнение предсказанного номера класса лётчика в бинарных классификаторах повысило общую точность для метода опорных векторов SVM на 2 %, а для метода GBT – на 3 %.

Таблица 1

Результаты тестирования алгоритмов машинного обучения

Вид алгоритма	Ошибка алгоритма $E$ , ед.				
	общая точность	1 и СН	2	3	БК
Метод SVM	0,5526	0,5667	0,6167	0,3167	0,7152
Метод GBT	0,5566	0,6167	0,3667	0,5167	0,7318



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование методов машинного обучения при обработке полетной информации позволило экспериментальным путем подтвердить коррелированность спектра сигнала «Угол отклонения ручки управления самолетом по тангажу» на этапе снижения самолета по глиссаде с уровнем подготовки летчика. Использование информации, содержащейся в спектре предлагаемого параметра, в программное обеспечение современных наземных устройств обработки полетной информации позволит модернизировать современную автоматизированную систему оценки качества пилотирования воздушного судна за счет получения дополнительного информационного канала, позволяющего увеличить объем исходной объективной информации для принятия решения руководителем о качестве выполнения посадки. При условии систематизации результатов обработки полетных данных по предлагаемой методике предполагается повышение эффективности процесса управления эргатической системой уже более высокого уровня – системой управления летной работой в рамках целой организации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов Ю. В. Количественные показатели безопасности полётов / Ю. В. Попов // Проблемы безопасности полётов. – 2015. – № 2. – С. 10–19.
2. Тихий И. И. Оценка качества пилотирования в режиме полета по глиссаде / И. И. Тихий, В. В. Кашковский, С. П. Полуэктов // Научный вестник Московского государственного технического университета ГА. – 2008. – № 138 (1). – С. 191–197.
3. Тихий И. И. Оценка качества управления сложными техническими объектами / И. И. Тихий, В. В. Кашковский, С. П. Полуэктов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2008. – № 2 (34). – С. 37–41.
4. Тихий И. И. Исследование показателей качества управления в эргатических системах / И. И. Тихий, В. В. Кашковский, С. П. Полуэктов // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте: сборник научных трудов Иркутского государственного университета путей сообщения. – 2009. – № 16. – С. 123–132.
5. Авиационная медицина / под ред. Н. М. Рудного, П. В. Васильева, С. А. Гозулова. – М.: Медицина, 1986. – 580 с.
6. Гладков Б. М. Автоматизированная оценка натренированности летчиков с использованием показателей управляющих воздействий: научно-методические материалы по проблемам обеспечения безопасности полетов. Иркутское ВВАИУ / Б. М. Гладков. – И., 1991. – С. 73–79.
7. Фролов Н. И. Пути изучения работоспособности летчика в полете / Н. И. Фролов // Космическая биология. – 1978. – № 1. – С. 3–10.
8. Патент № 2436164 Российская Федерация, МПК G07C 11/00, G08G 5/00. Способ оценивания качества пилотирования самолета летчиком на этапе посадки по данным штатного бортового устройства регистрации / Полуэктов С. П., Кашковский В. В., Тихий И. И., Лапин И. П.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Военный авиационный инженерный университет» (г. Воронеж) Министерства обороны РФ. – № 2010140360/08; заявл. 01.10.2010; опубл. 10.12.2011, Бюл. № 34. – 3 с.
9. Полуэктов С. П. Один из подходов к расширению возможностей автоматизированной системы оценки качества пилотирования воздушного судна / С. П. Полуэктов, Е. П. Колесников // Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации: сборник тезисов докладов III Международной научно-технической конференции авиационного факультета. – Минск: Военная академия Республики Беларусь, 2013. – С. 81–82.
10. Полуэктов С. П. Модуль автоматизированной оценки качества пилотирования маневренного самолета / С. П. Полуэктов, Е. П. Колесников // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции «Теоретические и прикладные проблемы развития и совершенствования автоматизированных систем управления военного назна-

чения». – СПб. : ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. Ч. II. Т. 2. – С. 361–366.

11. *Полуэктов С. П.* Расширение возможностей программно-аппаратных средств обработки полетной информации при решении задач оценки качества пилотирования воздушного судна / С. П. Полуэктов, Е. П. Колесников // Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации: сборник тезисов докладов IV Международной научно-технической конференции авиационного факультета. – Минск: Военная академия Республики Беларусь, 2014. – С. 85–86.

**Нафиков М. А.** – оператор научной роты, ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж).  
Тел.: 8 (953) 119-82-54  
E-mail: nafikov.maksim.emp@gmail.com

**Полуэктов С. П.** – кандидат технических наук, доцент кафедры «автоматизации управления летательных аппаратов (и вычислительных систем)», факультет авиационного оборудования, ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» (г. Воронеж).  
Тел.: 8 (910) 343-25-01  
E-mail: poluektov.sp@mail.ru

12. *Хайкин С.* Нейронные сети. Полный курс: пер. с англ. / С. Хайкин. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.

13. *Friedman J. H.* Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine / J. H. Friedman // The Annals of Statistics. – 2001. – vol. 29. – no. 5. – P. 1189–1232.

14. *Пятницкий М. А.* Распознавание образов и биоинформатика / М. А. Пятницкий. – Режим доступа: [http://bioinformatics.ru/Data-Analysis/patrecog\\_bioinf.html](http://bioinformatics.ru/Data-Analysis/patrecog_bioinf.html).

**Nafikov M. A.** – Federal State Official Military Educational Institution of Higher Professional Education Military Educational-Research Centre of Air Force «Air Force Academy», Voronezh.  
Tel.: 8 (953) 119-82-54  
E-mail: nafikov.maksim.emp@gmail.com

**Poluektov S. P.** – PhD in Technique, Associate Professor, Department of Automation of Flight Vehicles Management (and Computing Systems), Air Equipment Faculty, Federal State Official Military Educational Institution of Higher Professional Education Military Educational-Research Centre of Air Force «Air Force Academy», Voronezh.  
Tel.: 8 (910) 343-25-01  
E-mail: poluektov.sp@mail.ru