

**Б. Курбанов, А. С. Катасёв, Д. В. Катасёва,
Б. Р. Зиннуров**

НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОНЛИВОСТИ ЧЕЛОВЕКА ПО ВЫРАЖЕНИЮ ЛИЦА

Ключевые слова: нейронная сеть, нейросетевая сверточная модель, нейросетевая система, определение сонливости человека, компьютерное зрение.

Статья посвящена разработке нейросетевой системы для определения сонливости человека по выражению лица. Существуют различные системы определения сонливости, отслеживающие манеру вождения человека, физиологические показатели водителя, распознают выражение лица. Однако эти системы часто недоступны для пользователей вследствие дороговизны, что актуализирует необходимость разработки собственной системы. Анализ предметной области показал, что оценка сонливости человека может быть основана на использовании показателей EAR (Eye Aspect Ratio) и MAR (Mouth Aspect Ratio). Первый показатель определяет степень открытости глаз, а второй – степень открытости рта человека. Эти характеристики можно рассчитать путем использования специальной маски лица на изображении с ключевыми точками для обнаружения рта и глаз человека. Алгоритм распознавания сонливости по лицевым характеристикам включает следующие этапы: захват изображения лица, локализация глаз и рта, расчет EAR и MAR, определение пороговых значений, мониторинг и распознавание сонливости. Несмотря на множество приложений, применение этой технологии для определения сонливости человека требует дополнительных исследований. Особую актуальность в этой области приобретает построение и исследование сверточных нейросетевых моделей и систем. Для построения такой системы необходимо подготовить данные для анализа, построить нейросетевую сверточную модель, реализовать графический интерфейс нейросетевой системы и произвести проверку адекватности ее работы. В настоящем исследовании использовались наборы данных Driver Drowsiness Dataset, Drowsiness Prediction Dataset и UTA Real-Life Drowsiness Dataset, полученные из общедоступного источника Kaggle. Для анализа данных использована нейронная сеть YOLO версии v5. При построении нейросетевой модели на платформе Google Colab использовался язык программирования Python. Процесс обучения модели длился в течение 30 эпох. В результате обучения точность определения класса бодрый составила 97,9%, точность определения класса сонливый – 95,7%. Средняя точность модели составила 96,8%, что является высоким результатом. На основе построенной модели в среде Visual Studio разработана нейросетевая система. Для ее разработки использован язык программирования Python. Для оценки эффективности разработанной системы проведена ее валидация с использованием следующих метрик качества классификации: точности, полноты, F1-меры и меткости. Результаты валидации показали, что система достаточно точно классифицирует большинство случаев состояния сонливости и бодрости человека. Это указывает на ее эффективность и возможность решения практических задач.

**B. Kurbanov, A. S. Katasev, D. V. Kataseva,
B. R. Zinnurov**

NEURAL NETWORK SYSTEM FOR DETERMINING HUMAN DROPPINESS BY FACIAL EXPRESSION

Keywords: neural network, neural network convolutional model, neural network system, human drowsiness detection, computer vision.

The article is devoted to the development of a neural network system for determining human drowsiness by facial expression. There are various drowsiness detection systems that track a person's driving style, driver's physiological indicators, and recognize facial expressions. However, these systems are often unavailable to users due to their high cost, which makes it necessary to develop our own system. The analysis of the subject area showed that human drowsiness assessment can be based on the use of EAR (Eye Aspect Ratio) and MAR (Mouth Aspect Ratio) indicators. The first indicator determines the degree of eye openness, and the second determines the degree of mouth openness. These characteristics can be calculated by using a special face mask on an image with key points to detect a person's mouth and eyes. The algorithm for recognizing drowsiness by facial characteristics includes the following steps: capturing a face image, localizing the eyes and mouth, calculating EAR and MAR, determining threshold values, monitoring and recognizing drowsiness. Despite many applications, the use of this technology to determine human drowsiness requires additional research. Of particular relevance in this area is the construction and study of convolutional neural network models and systems. To build such a system, it is necessary to prepare data for analysis, build a neural network convolutional model, implement a graphical interface for the neural network system and check the adequacy of its operation. In this study, we used the Driver Drowsiness Dataset, Drowsiness Prediction Dataset and UTA Real-Life Drowsiness Dataset obtained from the publicly available Kaggle source. The YOLO neural network version v5 was used to analyze the data. When building a neural network model on the Google Colab platform, the Python programming language was used. The model training process lasted for 30 epochs. As a result of training, the accuracy of determining the vigorous class was 97.9%, the accuracy of determining the sleepy class was 95.7%. The average accuracy of the model was 96.8%, which is a high result. Based on the constructed model, a neural network system was developed in the Visual Studio environment. The Python programming language was used for its development. To evaluate the effectiveness of the developed system, it was validated using the following classification quality metrics: accuracy, recall, F1-measure and precision. The results of the validation showed that the system classifies most cases of human drowsiness and alertness quite accurately. This indicates its effectiveness and the possibility of solving practical problems.

Введение

В настоящее время концентрация внимания важна в любом виде деятельности человека [1]. Сонливость является проблемой в современном обществе, поскольку в некоторых ситуациях может приводить к серьезным, а порой непоправимым последствиям. Для предотвращения опасных ситуаций важно научиться выявлять состояние сонливости у человека и сигнализировать об этом. Одна из сфер деятельности человека, где сонливость может привести к самым трагическим последствиям – транспортная сфера, в которой одной из самых распространенных причин дорожно-транспортных происшествий является сонливость за рулем [2]. Усталость, переутомление, сонливость сильно влияют на бдительность водителя: снижается концентрация внимания, увеличивается время реакции, снижается способность оценивать расстояние и управлять автомобилем. Все эти факторы приводят к увеличению числа аварий и происшествий на дорогах [3]. Уснувший за рулем водитель создает серьезную угрозу для безопасности участников дорожного движения. Борьба с сонливостью может стать эффективным способом снижения количества дорожно-транспортных происшествий [2].

На сегодняшний день существуют различные системы определения сонливости человека [4-6]. Такие системы могут отслеживать манеру вождения человека, физиологические показатели водителя, распознавать выражение лица для выявления сонливого состояния человека. Однако эти системы часто являются недоступными для рядового человека вследствие своей дороговизны. Это актуализирует необходимость разработки собственной системы. Перед началом ее разработки необходимо произвести анализ существующих систем в этой области.

Анализ предметной области и постановка решаемых задач

Сонливость [7] – это физиологическое состояние человека, характеризующееся повышенной потребностью во сне. Оно может быть вызвано различными факторами, такими как недостаток сна, монотонная деятельность, физическое или эмоциональное утомление. Сонливость оказывает значительное воздействие на человеческий организм и его функционирование. Недостаток сна и частые периоды сонливости могут привести к снижению когнитивных функций, включая внимание, память, реакцию и принятие решений [8]. Сонливость является серьезной проблемой в современном обществе и часто приводит к серьезным, а порой непоправимым последствиям в различных областях [9, 10]. Для предотвращения опасных ситуаций, важно научиться выявлять состояние сонливости у человека.

Выявление сонливости человека с использованием компьютерного зрения представляет собой важную область исследований [11-13], которая может быть применена в различных сферах, включая логистику, транспорт, производственные предприятия. Распознавание сонливости в реальном режиме времени является важной задачей для различных сфер [14-16]. С использованием компьютерного зрения

[17] и алгоритмов обработки изображений [18, 19] интеллектуальные системы могут эффективно и точно определять признаки сонливости по лицу человека. Это позволяет предпринимать корректирующие действия в реальном режиме времени.

Основой для выявления сонливости с использованием систем компьютерного зрения является анализ изображений лица человека. Такие системы обычно используют веб-камеры, инфракрасные датчики или другие устройства, способные захватывать изображения [20]. На этапе обработки изображений такие системы анализируют различные характеристики [21]: частота моргания глаз, микродвижения головы, выражение лица, глаз и др. Компьютерное зрение позволяет обнаруживать признаки сонливости, опираясь на указанные характеристики, и выдавать соответствующие предупреждения.

Для создания собственной системы проведен анализ методов определения сонливости человека. Так, например, в исследовании [22] авторы создали систему отслеживания состояния человека в режиме реального времени. Они использовали смартфон для записи лица человека. Основываясь на контуре лица, система вычисляет пропорции глаз, состояние открытости рта. На основе вычисленных характеристик и использованием алгоритмов SVM и HOG, система определяет состояние человека.

В работе [23] описывается система определения сонливости человека, которая была разработана в качестве приложения для смартфона. Приложение, используя камеру телефона, выделяет лицо человека и определяет состояние человека с точностью 93%.

В [24] используется сверточная нейронная сеть ResNet50. В результате применения сети формируется результат классификации усталый/бодрый с точностью классификации 95%.

В статье [25] представлена система Driver Fatigue Detection System, производящая мониторинг состояния человека и, в случаях сонливости, предупреждает через звуковые сигналы. Система также использует камеру мобильного устройства для отслеживания зевания, движения глаз и кивания головы.

В указанных работах критерии оценки сонливости основаны на анализе показателей EAR (Eye Aspect Ratio) и MAR (Mouth Aspect Ratio). Первый показатель определяет степень открытости глаз, а второй – степень открытости рта человека.

На рисунке 1 представлены координаты глаз для вычисления показателя EAR.

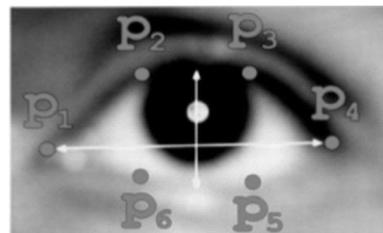


Рис. 1 – Координаты глаз для вычисления EAR

Fig. 1 – Eye coordinates for EAR calculation

Исследования показали, что сонливость часто сопровождается медленным и нерегулярным морганием или полным закрытием глаз.

Показатель EAR вычисляется на основе отношения длин горизонтальной и вертикальной составляющих глаза. Уменьшение значения показателя может свидетельствовать о состоянии сонливости.

Параметр MAR (Mouth Aspect Ratio) вычисляется на основе отношения длин горизонтальной и вертикальной составляющих рта (см. рис. 2).

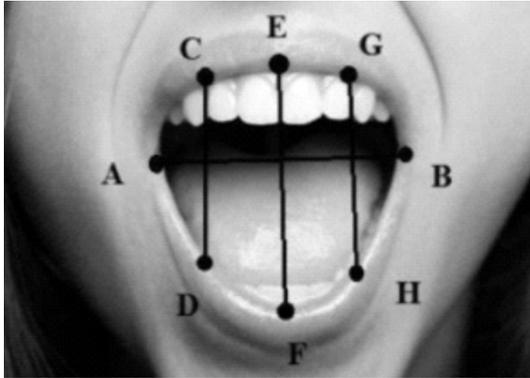


Рис. 2 – Координаты рта для вычисления MAR

Fig. 2 – Mouth coordinates for MAR calculation

Изначально показатель MAR был создан для определения уровня улыбки на изображениях. Его также можно использовать для анализа сонливости, так как положение рта также может демонстрировать признаки усталости или сонливости.

Характеристики, подобные EAR и MAR, можно рассчитать путем использования специальной маски лица с ключевыми точками для обнаружения рта и глаз человека [26] (см. рис. 3).

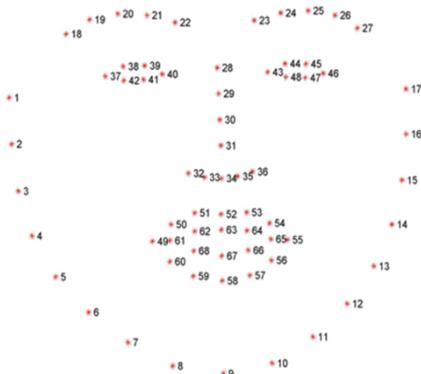


Рис. 3 – Маска лица человека с ключевыми точками

Fig. 3 – Human face mask with key points

Алгоритм распознавания сонливости по лицевым характеристикам, используемый в системах из указанных исследований, включает следующие этапы:

1) захват изображения лица (используется технология компьютерного зрения или обработки изображений для захвата изображения лица человека);

2) локализация глаз и рта (после получения изображения лица определяется положение глаз и рта на лице; для этого используются методы поиска и локализации объектов на изображении);

3) расчет EAR и MAR (после локализации глаз и рта необходимо рассчитать значения этих характеристик);

4) определение пороговых значений (устанавливаются пороговые значения EAR и MAR, ниже которых человек считается сонным);

5) мониторинг и распознавание сонливости (после определения пороговых значений EAR и MAR происходит их мониторинг во времени; если EAR и MAR опускаются ниже установленных порогов на протяжении определенного интервала, то делается вывод о сонливости человека).

Несмотря на множество исследований по анализу выражений лица в различных условиях [27-29], применение этой технологии для определения сонливости человека требует дополнительных исследований и разработок для достижения надежной работы системы в реальных условиях. В частности, целесообразно построение и исследование интеллектуальных моделей и алгоритмов, основанных на нечеткой логике [30-32], нейронных [33-35] и сверточных нейронных сетях [36-38]. Особую актуальность приобретает построение и исследование сверточных нейросетевых моделей [39], доказавших свою эффективность в решении большого количества задач обработки и анализа изображений в различных предметных областях [40-42].

Таким образом, разработка нейросетевой системы, основанной на использовании сверточной нейросетевой модели для определения сонливости человека по выражению лица, имеет большой потенциал и является актуальной задачей. Для построения такой системы необходимо подготовить объемный набор анализируемых данных, содержащих два класса значений (сонливый и бодрый человек), провести предобработку данных для обучения сверточной нейронной сети, построить нейросетевую сверточную модель, реализовать графический интерфейс нейросетевой системы и произвести проверку адекватности ее работы.

Подготовка данных и построение нейросетевой системы для определения сонливости человека

В настоящем исследовании использовались следующие наборы данных: Driver Drowsiness Dataset [43], Drowsiness Prediction Dataset [44] и UTA Real-Life Drowsiness Dataset [45]. Все данные получены из общедоступного источника Kaggle.

Набор данных Driver Drowsiness Dataset представлен в виде извлеченных и обрезанных изображений лиц людей, взятых из видеозаписей. Изображения представлены в двух классах: сонливый и бодрый человек. Общее количество изображений в наборе превышает 40 000.

Набор данных Drowsiness Prediction Dataset представлен в виде изображений различных людей в разном физиологическом состоянии. Изображения представлены в двух классах: сонливый и бодрый. В каждом классе имеются по 4560 изображений.

Набор UTA Real-Life Drowsiness Dataset содержит данные, представленные в виде видеозаписей бодрых и сонливых людей. Данные опубликованы в

виде 180 видеозаписей 60 человек, средняя продолжительность видеозаписи составляет 10 минут, общая продолжительность видеозаписей – 30 часов.

Выбранные наборы данных являются достаточно объемными и разнообразными, что позволяет создать систему, которая при успешном обучении сможет достаточно точно определять наличие либо отсутствие состояния сонливости человека.

В настоящее время одной из наиболее известных и эффективных технологий в задачах обнаружения объектов на изображениях является YOLO. Особенность всех моделей семейства YOLO заключается в том, что на их вход подается сразу все распознаваемое изображение, которое проходит через нейронную сеть только один раз, в отличие от других, где этот процесс происходит многократно. Благодаря такой особенности, модель YOLO может использоваться для решения задач, где требуется быстрое определение класса в режиме реального времени. В рамках проведенного исследования была использована YOLO версии v5 – архитектура сверточной нейронной сети для обнаружения объектов в режиме реального времени, которая включает в себя несколько ключевых компонентов:

- сверточные слои (применяются для выделения признаков из подаваемых изображений, самостоятельно выделяют значимые черты, тем самым исключая необходимость ручного программирования);
- слои сокращения (используются для сокращения размерности данных и увеличения области восприятия нейронов);
- соединения пропуска (помогают сохранить информацию о пространственном разрешении, что важно для точной локализации объектов);
- слои объединения признаков (объединяют признаки из разных частей сети, что позволяет улучшить обнаружение объектов разного размера);
- голова детектора (использует признаки, извлеченные предыдущими слоями, для предсказания классов объектов и их ограничивающих рамок).

Модель YOLOv5 также использует различные техники и улучшения, такие как автоматическое масштабирование изображений, использование аугментации данных для улучшения обобщающей способности модели и применение различных оптимизаций для ускорения обучения.

Все данные были случайным образом разделены на обучающую (70%) и валидационную (30%) выборки. Каждая выборка включала изображения (images) и папки с текстовыми файлами (labels), содержащими метки объектов на этих изображениях в формате YOLO. Для создания меток использовался инструмент с открытым исходным кодом LabelImg. Данный формат подразумевает, что каждая строка текстового файла представляется в виде n, x, y, w, h , где n – номер класса объекта, x – относительная координата ограничивающей рамки объекта по оси X , y – относительная координата ограничивающей рамки объекта по оси Y , w – относительная ширина ограничивающей рамки объекта, h – относительная высота ограничивающей рамки объекта.

После подготовки изображений и меток был создан единый файл dataset.yaml для указания пути до

тренировочной и валидационной выборок данных, а также количества классов и их меток.

При построении нейросетевой модели YOLOv5 на платформе Google Colab использовался язык программирования Python. Процесс обучения модели длился в течение 30 эпох, при этом в каждой итерации использовалось по 32 обучающих примера.

В директории модели YOLOv5 после обучения была создана папка run с успешными экспериментами обучения, хранящимися в папках expN, где N – номер последнего проведенного обучения. В папке обученной модели хранятся также изображения с процессом обучения модели и промежуточным результатом классификации.

На рисунке 4 представлены примеры работы обученной нейросетевой модели для определения сонливости человека по выражению лица.

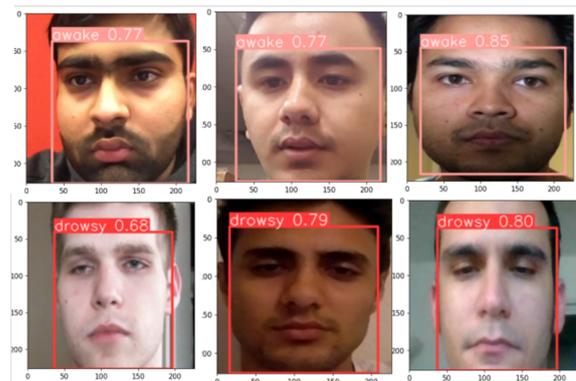


Рис. 4 – Результат применения модели для классификации (класс бодрый – сверху, класс сонливый – снизу)

Fig. 4 – The result of applying the model for classification (the awake class is on top, the drowsy class is on the bottom)

В результате построения нейросетевой сверточной модели с использованием обучающего набора данных получены следующие результаты: точность определения класса бодрый составила 97,9%, точность определения класса сонливый – 95,7%. Средняя точность модели составила 96,8%, что является высоким результатом для ее дальнейшего практического использования в составе нейросетевой системы определения сонливости человека по выражению лица.

На основе построенной сверточной нейросетевой модели в среде Visual Studio разработана нейросетевая система для распознавания сонливости человека по выражению лица. Для ее разработки использован язык программирования Python, библиотеки интерфейсов Tkinter и Customtkinter, а также фреймворки для моделей машинного обучения PyTorch, Tensorflow gpu и Dlib.

Экспериментальное исследование и оценка эффективности системы

После разработки нейросетевой системы важным шагом является ее тестирование на данных, которые не использовались для обучения модели. В экспериментальном исследовании приняли участие 4 че-

ловека. Для каждого участника создана отдельная папка для хранения заранее записанных видеозаписей и полученных результатов их классификации.

Для записи видео использовалось встроенное приложение «Камера» из операционной системы Windows 10. Все участники эксперимента по просьбе эксперта находились в различных состояниях бодрствования. Кроме того, проводилось тестирование программы в режиме реального времени при работе с веб-камерой. Участники находились перед веб-камерой с запущенной программой «Hawkeye». Участники также в течении некоторого времени демонстрировали различные состояния (бодрое, усталое). Запись результатов осуществлялась в текстовый файл. На завершающем этапе эксперимента проводилось тестирование программы в режиме работы с видеозаписями, а все результаты записывались в текстовый файл.

Экспертным путем проведен анализ полученных результатов работы системы и оценка качества ее работы с использованием метрик EAR и MAR, где за контрольные значения были взяты значения $EAR = 0,3$, а значение $MAR = 0,12$. При пересечении контрольного значения состояние человека классифицировалось как «сонливый». В ходе проверки точности определения состояния человека эксперт оценивал результат работы модели и сравнивал его со значениями метрик EAR и MAR. Результат распознавания каждого кадра фиксировался на графике, представленном на рисунке 5.

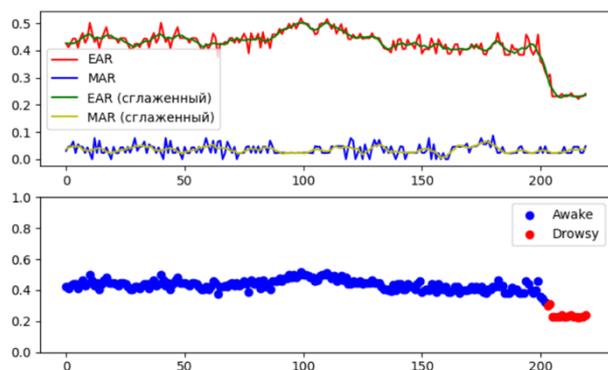


Рис. 5 – Результаты распознавания состояния сонливости человека

Fig. 5 – Results of recognizing the state of human drowsiness

Для оценки эффективности разработанной системы проведена ее валидация с использованием следующих метрик качества классификации: точности, полноты, F1-меры и меткости. Значения этих метрик представлены в таблице 1.

Как видно из представленных данных, система достаточно точно классифицирует большинство случаев состояния сонливости и бодрости человека. Это означает достаточно высокую ее эффективность для решения задачи определения сонливости человека по выражению лица.

Таблица 1 – Значения метрик качества классификации для нейросетевой модели

Table 1 – Values of classification quality metrics for a neural network model

Класс	Точность (Precision)	Полнота (Recall)	F1-мера (F1-score)	Меткость (Accuracy)
Сонливый (Drowsy)	0,89	0,83	0,86	87,5
Бодрый (Awake)	0,88	0,93	0,91	87,5

Заключение

Разработанная система для определения сонливости человека по выражению лица имеет перспективы в использовании в различных областях человеческой деятельности, таких как логистика (система может быть использована для контроля состояния водителя в режиме реального времени), образование (система может использоваться в качестве меры оценки состояния преподавателей и обучающихся [46]), производство (система может использоваться на предприятиях для оценки сонливости работников, что может помочь в предотвращении несчастных случаев на производстве и в улучшении производительности труда [47]).

Литература

1. А.А. Адер, *Инновационные научные исследования*, 1-1 (25), 137-148 (2023).
2. А.В. Шулаев, Э.З. Якупов, А.А. Мардиев, *Современные проблемы здравоохранения и медицинской статистики*, 3, 54-75 (2020).
3. Р. Ни, А.М. Арингазина, А.К. Болатов, Р.А. Аскеров, Н.Е. Глушкова, Д.С. Смаилова, *Наука и здравоохранение*, 24, 6, 251-258 (2022).
4. В.А. Демарева, В.В. Вяхирева, И.А. Исакова, М.В. Жукова, *Вестник психофизиологии*, 4, 73-77 (2023).
5. Н.С. Киселев, Е.Д. Ушаков, *Оригинальные исследования*, 12, 4, 271-277 (2022).
6. Н.Н. Калинин, Ю.Г. Скурыдин, Е.М. Скурыдина, *Высокопроизводительные вычислительные системы и технологии*, 7, 1, 106-114 (2023).
7. К.Е. Гольцман, М.В. Бочкарев, В.В. Амелина, И.Д. Губарева, Ю.Д. Свиряев, *Российский журнал персонализированной медицины*, 4, 3, 246-254 (2024).
8. И.Л. Иванова, Т.А. Ахметшин, И.А. Саегараев, Е.Т. Хасанова, Н.А. Яковлева, *Наукофера*, 5-1, 139-145 (2024).
9. К.А. Иванов, Н.В. Камардина, И.К. Данилов, В.Н. Коноплев, *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*, 22, 2, 217-224 (2021).
10. М.П. Малиновский, *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*, 4 (18), 3-25. (2018).
11. И.Б. Лашков, А.М. Кашевник, *Информационные технологии и вычислительные системы*, 2, 84-96 (2019).
12. J. Kim, K. Sato, N. Hashimoto, A.M. Kashevnik, K. Tomita, S. Miyakoshi, Yu. Takinami, O. Matsumoto, A. Bouali, *SPIIRAS Proceedings*, 18, 3, 582-613 (2019).
13. Н.Н. Зиятдинов, Л.М. Дмитриева, А.Е. Сережкина, М.Е. Дмитриев, *Вестник Технологического университета*, 18, 2, 357-361 (2015).
14. С.С. Жумажанова, А.Е. Сулаво, Д.В. Лукин, *Вопросы защиты информации*, 2 (129), 24-30 (2020).

15. Н.С. Киселев, Е.Д. Ушаков, *Оригинальные исследования*, **12**, 4, 271-277 (2022).
16. Т.А. Фам, Н.А. Жукова, Е.Л. Евневич, *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, **10**, 640-645 (2021).
17. А.Е. Sulavko, P.S. Lozhnikov, A.G. Choban, D.G. Stadnikov, A.A. Nigrey, D.P. Inivatov, *Information and Control Systems*, **6** (109), 37-49 (2020).
18. И.Б. Лашков, *Информационно-управляющие системы*, **4** (89), 7-17 (2017).
19. Б.Х. Нурғалиев, Д.В. Катасёва, А.С. Катасёв, *Вестник Технологического университета*, **24**, 1, 104-107 (2021).
20. А.Д. Обухов, К.И. Патутин, Е.О. Суркова, А.Е. Архипов, *Вестник Тамбовского государственного технического университета*, **29**, 3, 363-374 (2023).
21. С.А. Казакова, П.А. Леонтьева, М.И. Фролова, Ю.В. Донецкая, И.Ю. Попов, А.Ю. Кузнецов, *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, **21**, 4, 571-577 (2021).
22. A. Kumar, R. Patra, *Computer Applications & Industrial Electronics*, **2**, 339-344 (2018).
23. E.E. Galarza, *Information Theoretic Security*, **6**, 563-572 (2018).
24. А.С. Катасёв, Б. Курбанов, *Вестник Технологического университета*, **26**, 3, 67-71 (2023).
25. M. Abulkhair, *Procedia Computer Science*, **62**, 555-564 (2015).
26. V. Maheswari, A. Rajanikanth, K. Krishna, *Image Processing*, **10**, 54980-54990 (2022).
27. Л.И. Ивановский, О.А. Степанова, В.В. Хрящев, *Вопросы применения цифровой обработки сигналов*, **8**, 4, 170-173 (2018).
28. Е.В. Рюмина, А.А. Карпов, *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, **20**, 5, 683-691 (2020).
29. О.Н. Корсун, В.Н. Юрко, *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение*, **1** (134), 120-134 (2021).
30. А.С. Катасёв, *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*, **4**, 212-217 (2013).
31. А.С. Катасёв, *Научно-технический вестник Поволжья*, **5**, 191-194 (2013).
32. С.В. Новикова, Ю.А. Тунакова, Э.Ш. Кремлева, *Вестник Казанского технологического университета*, **16**, 17, 262-264 (2013).
33. Н.Р. Кашапов, А.С. Катасёв, Д.В. Катасёва, *Информация и безопасность*, **19**, 4, 555-558 (2016).
34. А.М. Ахметвалеев, А.С. Катасёв, *Автоматизация процессов управления*, **3** (49), 88-95 (2017).
35. Ю.А. Тунакова, С.В. Новикова, Р.А. Шагидуллина, А.Р. Шагидуллин, *Вестник Казанского технологического университета*, **16**, 10, 155-157 (2013).
36. О.А. Пырнова, М.Г. Кузнецов, Д.П. Никоноров, *Научно-технический вестник Поволжья*, **12**, 369-372 (2023).
37. А.А. Алексеев, А.С. Катасёв, А.Е. Кириллов, А.П. Кирпичников, *Вестник Технологического университета*, **19**, 18, 116-119 (2016).
38. А.М. Ахметвалеев, А.С. Катасёв, М.А. Подольская, *Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии*, **1** (41), 69-85 (2018).
39. И.И. Багаев, *Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах*, **8**, 1, 15-22 (2020).
40. В.И. Глова, И.В. Аникин, А.С. Катасёв, *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*, **2**, 46-49 (2006).
41. А.С. Катасёв, *Автоматизация процессов управления*, **1** (55), 21-29 (2019).
42. O.I. Sheremet, O.Ye. Korobov, O.V. Sadovoi, Yu.V. Sokhina, *Applied Aspects of Information Technology*, **3**, 3, 133-144 (2020).
43. N. Adhithyaa, A. Tamilarasi, D. Sivabalaselvamani, L. Rahunathan, *Information Technology and Control*, **52**, 3, 713-730 (2023).
44. A. Sharma, G. Sethi, *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, **32**, 4, 97-108 (2023).
45. S.S. Husain, Ju. Mir, S.M. Anwar, W. Rafique, M.O. Ullah, *Multimedia Tools and Applications*, **81**, 15, 20425-20441 (2022).
46. С.В. Новикова, Н.Л. Валитова, Э.Ш. Кремлева, *Образовательные технологии и общество*, **19**, 3, 451-462 (2016).
47. Д.Г. Петросянц, А.М. Ахметвалеев, А.С. Катасёв, *Компьютерные исследования и моделирование*, **13**, 2, 417-427 (2021).

References

1. A.A. Ader, *Innovative Scientific Research*, **1-1** (25), 137-148 (2023).
2. A.V. Shulaev, E.Z. Yakupov, A.A. Mardiev, *Modern problems of health care and medical statistics*, **3**, 54-75 (2020).
3. R. Ni, A.M. Aringazina, A.K. Bolatov, R.A. Askerov, N.E. Glushkova, D.S. Smailova, *Science and Health*, **24**, 6, 251-258 (2022).
4. V.A. Demareva, V.V. Vyakhireva, I.A. Isakova, M.V. Zhukova, *Bulletin of Psychophysiology*, **4**, 73-77 (2023).
5. N.S. Kiselev, E.D. Ushakov, *Original research*, **12**, 4, 271-277 (2022).
6. N.N. Kalinin, Yu.G. Skurydin, E.M. Skurydina, *High-performance computing systems and technologies*, **7**, 1, 106-114 (2023).
7. K.E. Goltsman, M.V. Bochkarev, V.V. Amelin, I.D. Gubareva, Yu.D. Sviryaev, *Russian Journal of Personalized Medicine*, **4**, 3, 246-254 (2024).
8. I.L. Ivanova, T.A. Akhmetshin, I.A. Sayetgarayev, E.T. Khasanova, N.A. Yakovleva, *Scienceosphere*, **5-1**, 139-145 (2024).
9. K.A. Ivanov, N.V. Kamardina, I.K. Danilov, V.N. Konoplev, *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering Research*, **22**, 2, 217-224 (2021).
10. M.P. Malinovsky, *Automobile. Road. Infrastructure*, **4** (18), 3-25. (2018).
11. I.B. Lashkov, A.M. Kashevnik, *Information technologies and computing systems*, **2**, 84-96 (2019).
12. J. Kim, K. Sato, N. Hashimoto, A.M. Kashevnik, K. Tomita, S. Miyakoshi, Yu. Takinami, O. Matsumoto, A. Boyali, *SPIIRAS Proceedings*, **18**, 3, 582-613 (2019).
13. N.N. Ziyatdinov, L.M. Dmitrieva, A.E. Serezhkina, M.E. Dmitriev, *Herald of Technological University*, **18**, 2, 357-361 (2015).
14. S.S. Zhumazhanova, A.E. Sulavko, D.V. Lukin, *Information Security Issues*, **2** (129), 24-30 (2020).
15. N.S. Kiselev, E.D. Ushakov, *Original research*, **12**, 4, 271-277 (2022).
16. T.A. Fam, N.A. Zhukova, E.L. Evnevich, *Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*, **10**, 640-645 (2021).
17. А.Е. Sulavko, P.S. Lozhnikov, A.G. Choban, D.G. Stadnikov, A.A. Nigrey, D.P. Inivatov, *Information and Control Systems*, **6** (109), 37-49 (2020).
18. I.B. Lashkov, *Information and Management Systems*, **4** (89), 7-17 (2017).
19. B.Kh. Nurgaliev, D.V. Kataseva, A.S. Katasev, *Herald of Technological University*, **24**, 1, 104-107 (2021).
20. A.D. Obukhov, K.I. Patutin, E.O. Surkova, A.E. Arkhipov, *Bulletin of the Tambov State Technical University*, **29**, 3, 363-374 (2023).

21. S.A. Kazakova, P.A. Leontyeva, M.I. Frolova, Yu.V. Donetskaya, I.Yu. Popov, A.Yu. Kuznetsov, *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, **21**, 4, 571-577 (2021).
22. A. Kumar, R. Patra, *Computer Applications & Industrial Electronics*, **2**, 339-344 (2018).
23. E.E. Galarza, *Information Theoretic Security*, **6**, 563-572 (2018).
24. A.S. Katasev, B. Kurbanov, *Herald of Technological University*, **26**, 3, 67-71 (2023).
25. M. Abulkhair, *Procedia Computer Science*, **62**, 555-564 (2015).
26. V. Maheswari, A. Rajanikanth, K. Krishna, *Image Processing*, **10**, 54980-54990 (2022).
27. L.I. Ivanovsky, O.A. Stepanova, V.V. Khryashchev, *Issues of Application of Digital Signal Processing*, **8**, 4, 170-173 (2018).
28. E.V. Ryumina, A.A. Karpov, *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, **20**, 5, 683-691 (2020).
29. O. N. Korsun, V. N. Yurko, *Bulletin of the Moscow State Technical University named after N. E. Bauman. Series Instrument Engineering*, **1** (134), 120-134 (2021).
30. A.S. Katasev, *Bulletin of the Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*, **4**, 212-217 (2013).
31. A.S. Katasev, *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*, **5**, 191-194 (2013).
32. S.V. Novikova, Yu.A. Tunakova, E.Sh. Kremlev, *Herald of Kazan Technological University*, **16**, 17, 262-264 (2013).
33. N.R. Kashapov, A.S. Katasev, D.V. Kataseva, *Information and Security*, **19**, 4, 555-558 (2016).
34. A.M. Akhmetvaleev, A.S. Katasev, *Automation of control processes*, **3** (49), 88-95 (2017).
35. Yu.A. Tunakova, S.V. Novikova, R.A. Shagidullina, A.R. Shagidullin, *Herald of Kazan Technological University*, **16**, 10, 155-157 (2013).
36. O.A. Pymova, M.G. Kuznetsov, D.P. Nikonov, *Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*, **12**, 369-372 (2023).
37. A.A. Alekseev, A.S. Katasev, A.E. Kirillov, A.P. Kirpichnikov, *Herald of Technological University*, **19**, 18, 116-119 (2016).
38. A.M. Akhmetvaleev, A.S. Katasev, M.A. Podolskaya, *Caspian Journal: management and high technologies*, **1** (41), 69-85 (2018).
39. I.I. Bagaev, *Mathematical and software support for systems in the industrial and social spheres*, **8**, 1, 15-22 (2020).
40. V.I. Glova, I.V. Anikin, A.S. Katasev, *Bulletin of the Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev*, **2**, 46-49 (2006).
41. A.S. Katasev, *Automation of control processes*, **1** (55), 21-29 (2019).
42. O.I. Sheremet, O.Ye. Korobov, O.V. Sadovoi, Yu.V. Sokhina, *Applied Aspects of Information Technology*, **3**, 3, 133-144 (2020).
43. N. Adhithyaa, A. Tamilarasi, D. Sivabalaselvamani, L. Rahunathan, *Information Technology and Control*, **52**, 3, 713-730 (2023).
44. A. Sharma, G. Sethi, *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, **32**, 4, 97-108 (2023).
45. S.S. Husain, Ju. Mir, S.M. Anwar, W. Rafique, M.O. Ullah, *Multimedia Tools and Applications*, **81**, 15, 20425-20441 (2022).
46. S.V. Novikova, N.L. Valitova, E.Sh. Kremlin, *Educational technologies and society*, **19**, 3, 451-462 (2016).
47. D.G. Petrosyants, A.M. Akhmetvaleev, A.S. Katasev, *Computer Research and Modeling*, **13**, 2, 417-427 (2021).

© **Б. Курбанов** – аспирант кафедры Систем Информационной Безопасности (СИБ), Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ им. А.Н. Туполева), Казань, Россия, babahan-98@mail.ru; **А. С. Катасёв** – д-р техн. наук, профессор кафедры СИБ, КНИТУ им. А.Н. Туполева, профессор кафедры Цифровых Систем и Моделей, Казанский государственный энергетический университет, ASKatasev@kai.ru; **Д. В. Катасёва** – канд. техн. наук, доцент кафедры СИБ, КНИТУ им. А.Н. Туполева, dvkataseva@kai.ru; **Б. Р. Зиннуров** – магистрант кафедры СИБ, КНИТУ им. А.Н. Туполева, bulatzinnurov99@gmail.com.

© **В. Kurbanov** – PhD-Student of the Information Security Systems (ISS) department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (KNRTU named after A.N. Tupolev), Kazan, Russia, babahan-98@mail.ru; **A. S. Katasev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the ISS department, KNRTU named after A.N. Tupolev, Professor of the Digital Systems and Models Department, Kazan State Energy University, ASKatasev@kai.ru; **D. V. Kataseva** – PhD. (Technical sci.), Associate Professor of the ISS department, KNRTU named after A.N. Tupolev, dvkataseva@kai.ru; **B. R. Zinnurov** – Master-Student of the ISS department, KNRTU named after A.N. Tupolev, bulatzinnurov99@gmail.com.