

М.В. Чавычалов, И.И. Лубенец

НЕЙРОСЕТЕВОЙ КОНТРОЛЬ БДИТЕЛЬНОСТИ МАШИНИСТА ПО ВИДЕО- И РЕЧЕВЫМ ДАННЫМ: ОБЗОР МЕТОДОВ И КОНЦЕПЦИЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Аннотация. Рассмотрены штатные средства контроля бдительности машиниста (рукоятка бдительности, АЛСН, КЛУБ-У, ТСКБМ) и показано, что они либо срабатывают уже после утраты контроля над поездом, либо требуют контакта с телом и оценивают один физиологический канал. По опубликованным работам систематизированы бесконтактно наблюдаемые признаки утомления и сонливости по видео (динамика моргания, PERCLOS, положение головы) и по речи (темп, паузы, основная частота, кепстральные коэффициенты) с указанием источника и достигнутых показателей. Предложена концепция бортовой системы, объединяющей видео- и речевой каналы нейросетевой моделью с гибридным слиянием, и программа её проверки: метрики, критерии для бортовой платформы, этапы испытаний.

Ключевые слова: безопасность труда машиниста, безопасная эксплуатация транспортных машин, человеческий фактор, бдительность, ТСКБМ, компьютерное зрение, PERCLOS, анализ речи, мультимодальное слияние, искусственные нейронные сети.

Для цитирования: Чавычалов, М. В. Нейросетевой контроль бдительности машиниста по видео- и речевым данным: обзор методов и концепция мультимодальной системы / М. В. Чавычалов, И. И. Лубенец // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 2. – С. 115–128. – DOI 10.46973/1818-5509_2026_2_115.

1. Введение

Происшествия, обусловленные действиями человека, остаются ведущей категорией на железнодорожном транспорте. По данным Федеральной железнодорожной администрации США, в 2005 г. на человеческий фактор пришлось 38 % происшествий с поездами [1], а в 2022 г. частота таких происшествий достигла максимального за 14 лет значения 1,43 на миллион поездо-миль [2]. На железных дорогах Европейского союза в 2018–2022 гг. ежегодно регистрировалось в среднем около 2 275 проездов запрещающего сигнала [3]. По выборкам происшествий с участием машиниста утомление отмечено как фактор в 17–21 % случаев [4]. В отчётности ОАО «РЖД» за 2024 г. приведено 535 нарушений безопасности движения по ответственности холдинга против 639 годом ранее, без распределения по причинам [5]; открытых данных о доле локомотивных бригад в этой статистике авторам найти не удалось.

За утомлением и сонливостью стоит снижение психофизиологической готовности машиниста: замедление реакции, провалы внимания, микросон. Именно это состояние должно выявляться системой контроля, причём до того, как оно приведёт к ошибке управления.

Штатные локомотивные устройства безопасности решают иную задачу. Рукоятка бдительности требует периодического подтверждения со стороны машиниста; при отсутствии подтверждения снимается питание с электропневматического клапана автостопа и включается экстренное торможение. Автоматическая локомотивная сигнализация непрерывного типа (АЛСН) и комплексное локомотивное устройство безопасности КЛУБ-У переносят показания путевых светофоров в кабину и останавливают поезд при проезде запрещающего сигнала или превышении скорости [6]. Устройства обоих классов реактивны:

они фиксируют уже совершённую ошибку или отсутствие реакции, но не состояние, которое к ним приводит. С точки зрения безопасной эксплуатации транспортной машины это означает, что машинист как звено системы «машинист — локомотив — участок» контролируется только по факту отказа.

Единственным серийным средством, оценивающим состояние машиниста непосредственно, является телемеханическая система контроля бодрствования машиниста (ТСКБМ), внедряемая с 1996 г. и основанная на регистрации электродермальной активности через носимый браслет [6, 7]. Подход имеет три ограничения. Во-первых, он контактный: браслет создаёт дополнительную нагрузку, и по результатам интервью с машинистами сама система становится источником стрессовых ситуаций [7]. Во-вторых, независимая лабораторная проверка запястного устройства того же класса (*DVTCS, Driver Vigilance Telemetric Control System*, контроль по электродермальной активности) на 15 испытуемых при 28 часах бодрствования показала, что электродермальный показатель не отреагировал на достигнутый в эксперименте уровень сонливости [8]; является ли *DVTCS* экспортным вариантом ТСКБМ, по опубликованным данным установить не удалось. В-третьих, сигнал носимой части поддаётся имитации: отраслевая пресса фиксирует распространённую среди локомотивных бригад практику применения устройств, подающих системе требуемый сигнал бодрствования, и ответные меры производителя по их нейтрализации [9, 10]; рецензируемых оценок масштаба явления не обнаружено. Один контактный физиологический канал не обеспечивает ни требуемой надёжности, ни приемлемости для персонала. Кроме того, контактный канал контролирует не столько состояние машиниста, сколько наличие сигнала с браслета.

Отсюда следует постановка задачи: необходима бесконтактная система, оценивающая состояние машиниста по нескольким независимым каналам до наступления критической фазы.

2. Цель работы

Цель статьи – систематизировать опубликованные данные о бесконтактных признаках утомления по видео и речи, предложить концепцию мультимодальной нейросетевой архитектуры контроля состояния машиниста как элемента системы обеспечения безопасной эксплуатации локомотива и сформулировать программу её экспериментальной проверки.

3. Подходы к мониторингу состояния машиниста

Методы мониторинга делятся на контактные и бесконтактные. Контактные регистрируют физиологические сигналы: электроэнцефалограмму (ЭЭГ), электрокардиограмму (ЭКГ), кожную проводимость. Они информативны: для машинистов высокоскоростных поездов предлагались носимые ЭЭГ-устройства [11], а совместная обработка ЭЭГ и ЭКГ обеспечивает высокую точность распознавания утомления в лабораторных условиях [12]. Однако в кабине они наследуют ограничения ТСКБМ: датчики мешают работе, а качество сигнала снижается при движении и потоотделении; в итоге персонал склонен от них отказываться.

Бесконтактные методы не требуют от машиниста никаких дополнительных действий. Два основных направления – компьютерное зрение и анализ речи. Согласно обзорам систем детекции утомления и отвлечения водителей, автомобильные системы мониторинга опираются прежде всего на видеокамеру в кабине: детекция лица, ключевые точки, показатели моргания, положение головы, зевота [13, 14].

Для железнодорожного транспорта опубликованных работ существенно меньше, и все они используют только видео. Для машинистов реализована схема с детекцией лица по локальным бинарным шаблонам, регрессией ключевых точек и нечётким выводом по признакам глаз, рта и головы с заявленной точностью 95 % при нормальном освещении и 86,8 % при слабом [15]. Лёгкая свёрточная сеть с механизмом внимания на собственном наборе из 6 991 кадра дала точность 96,8 %, при этом отмечена деградация при солнечных бликах [16]. Детекторы семейства YOLO на 6 115 изображениях достигли *mAP50* 97,1 % [4].

В работе [17] по лицевым и скелетным ключевым точкам машиниста строится направленный граф и различаются три состояния: бодрствование, невнимательность, патологическое состояние. Речевой канал для оценки состояния машиниста ни в одной из этих работ не используется.

Отечественные разработки бортовых нейросетевых систем ведёт АО «НИИАС». В комплексе технического зрения электропоезда ЭС2Г «Ласточка» применяются семантическая сегментация колеи, нейросетевой анализ поз человека для распознавания ручных сигналов и распознавание голосовых команд составителя [18]; состав бортовых сенсоров (камеры видимого и инфракрасного диапазонов, лидары, радары) и уровни комплексирования их данных для систем автоведения рассмотрены в работе [19]. Контроль бодрствования машиниста в запатентованных решениях института включён в архитектуру бортовой системы, но реализован контактно, через узел регистрации кожно-гальванической реакции [20], либо через подтверждение запроса рукояткой, при том что стереокамеры устройства направлены на путь, а не на машиниста [21]. Таким образом, нейросетевые модули анализа поз и речи в отечественной практике уже применяются на борту, но обращены к внешней сцене; задача переноса их на оценку состояния самого машиниста остаётся открытой.

Общая слабость одноканальных систем видна по самим этим публикациям: освещение, блики, очки, поворот головы. На участках с автоведением малоинформативны и поведенческие признаки управления. Отсюда потребность во втором независимом канале.

4. Визуальные признаки утомления

Из поведенческих признаков наиболее проверены параметры глаз. Показатель PERCLOS (*percentage of eye closure*) введён как доля времени в минутном окне, в течение которого глаза закрыты не менее чем на 80 % (вариант P80) [22]. В исследовании с психомоторным тестом бдительности PERCLOS оказался наиболее надёжным из проверенных показателей, включая ЭЭГ и параметры моргания [23]; этот вывод подтверждён и в недавнем обзоре [24]. Пороговые значения, при которых состояние считается опасным, в первоисточниках не зафиксированы; в прикладных работах они лежат в диапазоне примерно 7,5–15 %, поэтому при интерпретации необходимо явно указывать вариант метрики и длину окна. Критика PERCLOS как единственного показателя приведена в работе [25].

Частота моргания сама по себе ненадёжна: в покое она составляет в среднем 17 актов в минуту, при разговоре возрастает до 26, при чтении снижается до 4,5 [26], а при работе с дисплеем — с 22 до 7 [27]. Более информативна длительность закрытия: с ростом сонливости закономерно изменяются длительность моргания и время повторного открытия века, а доля длинных закрытий становится самостоятельным параметром [28]. На выборке из 129 человек лучшими индикаторами утомления названы длительность моргания, задержка открытия века, интервал между морганиями и нормированная скорость закрытия [29]. Закрытия глаз длительностью более 0,5 с в ряде работ трактуются как поведенческий микросон [30].

Положение головы дополняет картину: при снижении тонуса мышц шеи голова опускается вперёд или запрокидывается, и угол наклона в сочетании с замедлением движений глаз указывает на переход в сонливость. Зевота как отдельный признак слабее, поскольку возникает и по иным причинам, однако её повторение в коротком окне вместе с другими маркерами повышает достоверность оценки.

Извлечение перечисленных признаков выполняется по стандартному конвейеру. Детекция лица исторически выполнялась каскадами Хаара [31]; в настоящее время применяются глубокие детекторы MTCNN и RetinaFace, устойчивые к изменению освещения, поворотам и частичным окклюзиям [32, 33]. Далее локализуются ключевые точки: 68-точечная разметка по протоколу 300-W [34], реализованная в библиотеке Dlib ансамблем регрессионных деревьев [35], либо 468-точечная сетка MediaPipe Face Mesh, рассчитанная на мобильные устройства [36]. Последнее свойство существенно для бортового исполнения.

По координатам шести точек контура века $p_1 \dots p_6$ (рис. 1) вычисляется коэффициент раскрытия глаза EAR (*eye aspect ratio*) по формуле (1) [37]:

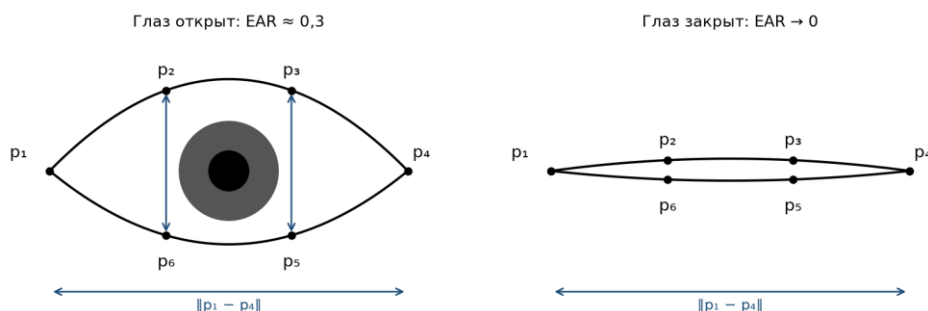


Рис. 1. Ключевые точки контура века $p_1 \dots p_6$, по которым вычисляется EAR: при закрытии глаза вертикальные расстояния стремятся к нулю, горизонтальное не изменяется

$$EAR = \frac{\|p_2 - p_6\| + \|p_3 - p_5\|}{2\|p_1 - p_4\|}, \quad (1)$$

где числитель отражает вертикальное раскрытие, знаменатель – горизонтальный размер глаза. При закрытии глаза значение EAR резко падает. В качестве базового порога закрытого глаза принято значение 0,2, а лучший результат в исходной работе дал классификатор по окну из 13 кадров [37]; в прикладных системах порог подбирается под камеру и конкретного машиниста. Показатель PERCLOS для доли закрытия α на скользящем окне ΔT определяется по формуле (2):

$$PERCLOS(\alpha) = \frac{1}{\Delta T} \int_{t-\Delta T}^t \mathbf{1}[EAR(\tau) < EAR_{\max}(1 - \alpha)] d\tau, \quad (2)$$

где $\mathbf{1}[\cdot]$ — индикаторная функция, равная единице при выполнении условия в скобках и нулю в остальных случаях; $EAR_{\max}$ — раскрытие глаза данного машиниста в бодром состоянии; $\alpha = 0,8$ для варианта P80. Интеграл равен суммарному времени внутри окна, в течение которого глаз закрыт не менее чем на долю α . Временные ряды EAR, PERCLOS, углов наклона головы и раскрытия рта подаются на вход модели, классифицирующей состояние.

Для отработки видеоканала доступны публичные наборы данных: NTHU-DDD с постановочной сонливостью при различном освещении и в очках [38] и UTA-RLDD с реальной сонливостью, размеченной по самооценке [39]. Оба сняты в автомобильных или лабораторных условиях; перенос на кабину локомотива требует отдельной проверки.

5. Акустические признаки

Речь машиниста при служебных переговорах с диспетчером и помощником — естественный источник данных, не требующий дополнительных действий. Утомление изменяет речь системно: снижается тонус мышц гортани и дыхательного аппарата, замедляется темп, уплощается интонационный контур, увеличиваются паузы.

Эти изменения количественно измерены. В эксперименте с 24-часовым бодрствованием у 18 человек возросли общее время речи, средняя длительность пауз и общее время сигнала на задачах чтения, а в спонтанной речи изменилось спектральное соотношение (альфа-отношение) [40]. Коэффициенты модели речеобразования изменялись синхронно с прямыми мерами утомления и временем бодрствования [41]. По признакам основной

частоты, интенсивности, пауз, формант и кепстральных коэффициентов метод опорных векторов распознал сонливость с точностью 86,1 % на 12 испытуемых в двухклассовой постановке [42]. Задача детекции сонливости по речи выносилась и на открытое соревнование Interspeech 2011 [43].

Набор признаков в подобных системах стандартен: мел-частотные кепстральные коэффициенты (MFCC, *mel-frequency cepstral coefficients*) для тембра; основная частота и её контур для интонации; меры нестабильности фонации — джиттер (*jitter*, вариация периода основной частоты) и шиммер (*shimmer*, вариация амплитуды); паузная структура и темп. Джиттер и шиммер характеризуют голосовой сигнал, а не аппаратуру, но чувствительны к качеству записи, поэтому в условиях кабины их следует оценивать с осторожностью.

Кабина локомотива акустически сложна: шумят тяговое и вспомогательное оборудование и ходовая часть, работает радиосвязь. Устойчивость признаков к шуму здесь принципиальна, и потребуются предварительное шумоподавление и нормализация признаков. Методика сбора аудиовизуального корпуса речи в кабине транспортного средства описана в работе [44]; для машинистов такого корпуса нет, и его создание составляет отдельную задачу с разметкой состояний по стандартизованным шкалам сонливости.

Речевой канал не заменяет видеоканал, а дополняет его: он работает, когда лицо не видно, и не даёт информации, пока машинист молчит. Эта несимметричность и делает два канала взаимодополняющими.

6. Концепция мультимодальной архитектуры

Предлагается система из двух параллельных ветвей и модуля слияния (рис. 2).

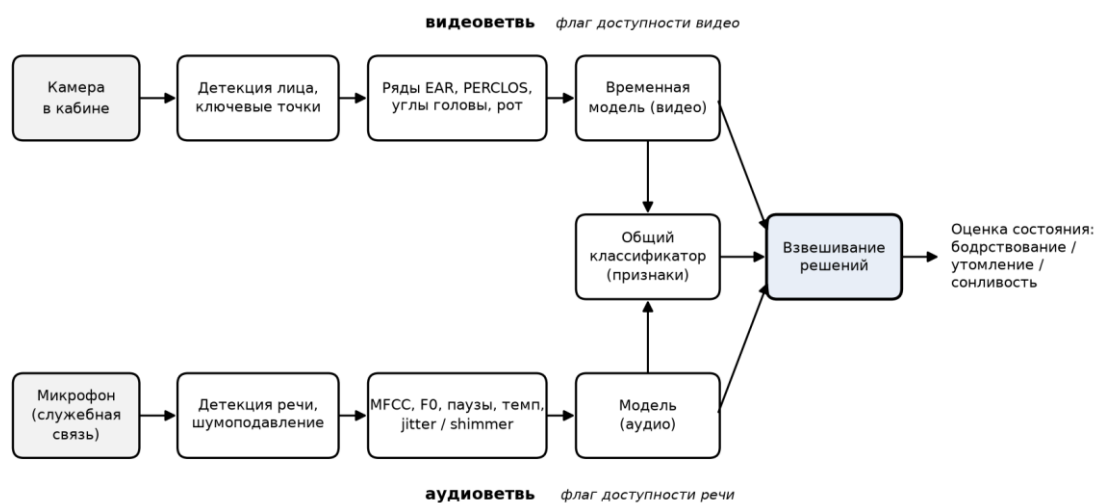


Рис. 2. Концепция мультимодальной системы контроля бдительности: видео- и аудиоветви, общий классификатор по признакам и взвешивание решений с учётом доступности модальностей

Видеоветвь включает детектор лица, локализацию ключевых точек и формирование временных рядов EAR, PERCLOS, углов наклона головы и раскрытия рта; над рядами работает временная нейросетевая модель, формирующая вектор признаков и собственную оценку состояния. Аудиоветвь включает детекцию речевой активности и вычисление MFCC, просодических и фонационных признаков по речевым фрагментам; над ними работает своя модель с вектором признаков и оценкой. Ветви функционируют независимо, и каждая формирует признак доступности своей модальности в текущем окне.

Известны два способа объединения. Слияние на уровне признаков (*feature-level fusion*) конкатенирует векторы ветвей до классификатора и позволяет модели выявлять связи между каналами, но требует синхронизации и плохо переносит пропуски данных. Слияние на уровне

решений (*decision-level fusion*) объединяет оценки ветвей взвешиванием, байесовским усреднением или обучаемым метаклассификатором и устойчиво к отказу одного канала. Опубликованные результаты свидетельствуют в пользу объединения. В каскадной схеме «PERCLOS по видео – доля вокализованных сегментов речи – подтверждение касанием» добавление речевого этапа повысило точность классификации сонливости с 86,66 до 93,33 % [45]. При слиянии на уровне признаков четырёх каналов (изображение лица, тепловизор, клавиатурная динамика, голос) на 60 испытуемых одномодальные точности 67,5–75 % возросли до 92,5 % [46]. Слияние на уровне признаков с персонализацией под конкретного водителя рассмотрено в работе [47]; связанное представление ЭЭГ, ЭКГ и лица дало 98,41 % против 94,87 % при простом объединении признаков [48]. Ни одна из этих работ не выполнена для кабины локомотива и не сочетает именно видео и речь в бортовом контуре, поэтому прирост для рассматриваемой задачи является предметом эксперимента, а не установленным фактом.

В предлагаемой архитектуре слияние гибридное: объединённый вектор признаков обеих ветвей поступает в общий классификатор, а его выход взвешивается с выходами ветвей с учётом признаков доступности модальностей. При отсутствии речи в окне вес аудиоветви обнуляется, при потере лица – вес видеоветви; при обучении пропуски модальностей моделируются явно. Классы состояния на первом этапе ограничены теми, для которых имеется разметка в доступных корпусах: бодрствование, утомление, выраженная сонливость. Распознавание стресса и когнитивной перегрузки по речи – отдельная задача, требующая собственного корпуса.

Практически это означает следующее: если камера временно не видит глаза из-за поворота головы, но машинист в этот момент говорит с замедленным темпом и длинными паузами, система сохраняет оценку по речи; при сильном шуме оценка удерживается на видеоканале. Для бортовой системы устойчивость к частичной деградации канала важнее максимальной точности в идеальных условиях.

7. Программа проверки и критерии эффективности

Проверку концепции планируется провести в три этапа: воспроизведение видеопризнаков на публичных наборах данных [38, 39]; сравнение стратегий слияния на публичных аудиовизуальных данных с искусственной деградацией каналов; стендовые испытания на собственном корпусе служебной речи и видео машинистов.

Оценивать систему предлагается по двум группам показателей. Функциональные: точность, полнота и F-мера по классам; доля ложных срабатываний, от которой прямо зависит доверие персонала; среднее время упреждения между первым устойчивым сигналом системы и наступлением выраженной сонливости по разметке; снижение показателей при отключении одного канала. Эксплуатационные: задержка вывода на бортовой платформе, энергопотребление и тепловыделение, работоспособность в температурном диапазоне кабины. Численные пороги по этим показателям до стендовых испытаний намеренно не задаются: требования к допустимой доле ложных срабатываний и времени упреждения должны быть согласованы с эксплуатирующей организацией и нормативной базой сертификации.

Кандидатами на бортовую платформу являются встраиваемые нейросетевые ускорители (NVIDIA Jetson, Intel Movidius) и отечественные микропроцессоры серии «Элвис». Выбор определяется соотношением производительности, энергопотребления и требований сертификации для подвижного состава; ориентация MediaPipe на мобильные устройства [36] и лёгкие сети из работы [16] показывают, что видеоветвь укладывается в такие ограничения.

8. Выводы

Штатные средства контроля бдительности на локомотиве — рукоятка бдительности, АЛСН, КЛУБ-У – реактивны и срабатывают после ошибки, а единственное серийное средство оценки состояния, ТСКБМ, контактно, одноканально и уязвимо для имитации сигнала, причём

для устройства того же класса независимая проверка чувствительности к сонливости не выявила. Переход к упреждающему контролю требует бесконтактной многоканальной оценки состояния машиниста.

Опубликованные результаты показывают, что видеоканал даёт проверенные маркеры (PERCLOS, длительность закрытия глаз, положение головы) и уже применялся к машинистам с точностью 95–97 % в лабораторных и постановочных условиях, а речевой канал позволяет распознавать сонливость с точностью порядка 86 % в лабораторных экспериментах. Объединение каналов в смежных задачах давало прирост от 7 до 20 процентных пунктов. Для кабины локомотива этот прирост не измерен, поэтому предложенная гибридная архитектура с явной обработкой пропусков модальностей подлежит проверке по сформулированной программе.

Дальнейшая работа включает воспроизведение видеобазлайнов на публичных наборах данных, сравнение стратегий слияния при деградации каналов, сбор и разметку корпуса служебной речи машинистов, стендовые испытания на бортовой платформе и оценку восприятия системы персоналом. Последний пункт определяет практическую пользу не в меньшей степени, чем точность: система, которой машинист не доверяет, безопасность не повысит.

Список литературы

1. Federal Railroad Administration. Railroad Operating Rules: Program of Operational Tests and In-spections; Railroad Operating Practices: Handling Equipment, Switches and Fixed Derails. Final rule / Federal Railroad Administration. – Federal Register, Vol. 73, No. 30, pp. 8442–8477, 2008. – URL: <https://www.govinfo.gov/link/fr/73/8442>.
2. U.S. Department of Transportation, Office of Inspector General. FRA Lacks Written Procedures and Formal Planning for Oversight of Railroad Hours of Service Compliance and the Passenger Railroad Fatigue Management Requirements / U.S. Department of Transportation, Office of Inspector General. – U.S. DOT Office of Inspector General, 2024. – URL: <https://www.oig.dot.gov/library-item/46212>.
3. European Union Agency for Railways. Report on Railway Safety and Interoperability in the EU 2024 / European Union Agency for Railways. – Luxembourg : European Union Agency for Railways; Publications Office of the European Union, 2024. – ISBN 978-92-9477-458-3. – DOI: 10.2821/64343.
4. **Fakhri, P.** Train driver drowsiness detection using deep learning approach / P. Fakhri, R. Fathi, A. Mirabadi // International Journal of Railway Research. – 2024. – Vol. 11, № 1. – P. 1–9. – DOI: 10.22068/ijrare.344.
5. ОАО «РЖД». Отчёт об устойчивом развитии за 2024 год. Раздел «Безопасность

References

1. Federal Railroad Administration. Railroad Operating Rules: Program of Operational Tests and In-spections; Railroad Operating Practices: Handling Equipment, Switches and Fixed Derails. Final rule / Federal Railroad Administration. – Federal Register, Vol. 73, No. 30, pp. 8442–8477, 2008. – URL: <https://www.govinfo.gov/link/fr/73/8442>.
2. U.S. Department of Transportation, Office of Inspector General. FRA Lacks Written Procedures and Formal Planning for Oversight of Railroad Hours of Service Compliance and the Passenger Railroad Fatigue Management Requirements / U.S. Department of Transportation, Office of Inspector General. – U.S. DOT Office of Inspector General, 2024. – URL: <https://www.oig.dot.gov/library-item/46212>.
3. European Union Agency for Railways. Report on Railway Safety and Interoperability in the EU 2024 / European Union Agency for Railways. – Luxembourg : European Union Agency for Railways; Publications Office of the European Union, 2024. – ISBN 978-92-9477-458-3. – DOI: 10.2821/64343.
4. **Fakhri, P.** Train driver drowsiness detection using deep learning approach / P. Fakhri, R. Fathi, A. Mirabadi // International Journal of Railway Research. – 2024. – Vol. 11, № 1. – P. 1–9. – DOI: 10.22068/ijrare.344.
5. Russian Railways (RZD). Sustainability Report 2024. Section "Traffic Safety" /

движения» / ОАО «РЖД». – 2025. – URL: <https://sr2024.rzd.ru/ru/social-aspect/health-safety/traffic-safety>.

6. **Венцевич, Л. Е.** Локомотивные устройства обеспечения безопасности движения поездов и расшифровка информационных данных их работы / Л. Е. Венцевич. – Москва : Маршрут, 2006. – 328 с. – ISBN 5-89035-339-X.

7. **Mikhailova, N. A.** Ergonomic design and implementation of a wakefulness control device for a railway train driver / N. A. Mikhailova, A. Yu. Nikolaev, O. G. Noskova // National Psychological Journal. – 2021. – Vol. 43, № 3. – P. 87–95. – DOI: 10.11621/npj.2021.0307.

8. **Dorrian, J.** The driver vigilance telemetric control system (DVTCS): Investigating sensitivity to experimentally induced sleep loss and fatigue / J. Dorrian, N. Lamond, K. Kozuchowski [et al.] // Behavior Research Methods. – 2008. – Vol. 40, № 4. – P. 1016–1025. – DOI: 10.3758/BRM.40.4.1016.

9. **Афанасьев, И.** На безопасность с прибором. Ревизоры РЖД в шоке: производители техники для локомотивов РЖД блокируют «обманки» машинистов / И. Афанасьев. – Vgudok, рубрика «Рельсы//Шпалы. Нам пишут», 2024. – URL: <https://vgudok.com/light/na-bezopasnost-s-priborom-revizory-rzhd-v-shoke-proizvoditeli-tehniki-dlya-lokomotivov-rzhd>.

10. **Максимов, В.** «Теперь я знаю, как выглядит Сатана!» – машинисты РЖД теряют сон от злости. Телемеханическая система контроля бодрствования ТСКБМ: жажда заработка или необходимость / В. Максимов. – Vgudok, рубрика «Стратегия. Безопасность», 2021. – URL: <https://vgudok.com/lenta/teper-ya-znayu-kak-vyglyadit-satana-mashinisty-rzhd-teryayut-son-ot-zlosti-telemehanicheskaya>.

11. **Zhang, X.** Design of a fatigue detection system for high-speed trains based on driver vigilance using a wireless wearable EEG / X. Zhang, J. Li, Y. Liu [et al.] // Sensors. – 2017. – Vol. 17, № 3. – P. 486. – DOI: 10.3390/s17030486.

12. **Wang, L.** EEG and ECG-Based Multi-Sensor Fusion Computing for Real-Time

Russian Railways. – 2025. – URL: <https://sr2024.rzd.ru/ru/social-aspect/health-safety/traffic-safety>.

6. **Ventsevich, L. E.** Locomotive-based train safety systems and the analysis of their operational data / L. E. Ventsevich. – Moscow : Marshrut, 2006. – 328 p. – ISBN 5-89035-339-X.

7. **Mikhailova, N. A.** Ergonomic design and implementation of a wakefulness control device for a railway train driver / N. A. Mikhailova, A. Yu. Nikolaev, O. G. Noskova // National Psychological Journal. – 2021. – Vol. 43, № 3. – P. 87–95. – DOI: 10.11621/npj.2021.0307.

8. **Dorrian, J.** The driver vigilance telemetric control system (DVTCS): Investigating sensitivity to experimentally induced sleep loss and fatigue / J. Dorrian, N. Lamond, K. Kozuchowski [et al.] // Behavior Research Methods. – 2008. – Vol. 40, № 4. – P. 1016–1025. – DOI: 10.3758/BRM.40.4.1016.

9. **Afanasyev, I.** Taking a Device to Safety. RZD Inspectors Shocked: Manufacturers of RZD Locomotive Equipment Block Engineers' "Cheating Devices" / I. Afanasyev. – Vgudok, "Rails//Ties: Letters to the Editor" section, 2024. – URL: <https://vgudok.com/light/na-bezopasnost-s-priborom-revizory-rzhd-v-shoke-proizvoditeli-tehniki-dlya-lokomotivov-rzhd>.

10. **Maksimov, V.** "Now I Know What Satan Looks Like!" – RZD Train Drivers Lose Sleep from Anger. TSKBM Telemechanical Vigilance Monitoring System: A Quest for Earnings or a Necessity? / V. Maksimov. – Vgudok, "Strategy. Safety" section, 2021. – URL: <https://vgudok.com/lenta/teper-ya-znayu-kak-vyglyadit-satana-mashinisty-rzhd-teryayut-son-ot-zlosti-telemehanicheskaya>.

11. **Zhang, X.** Design of a fatigue detection system for high-speed trains based on driver vigilance using a wireless wearable EEG / X. Zhang, J. Li, Y. Liu [et al.] // Sensors. – 2017. – Vol. 17, № 3. – P. 486. – DOI: 10.3390/s17030486.

12. **Wang, L.** EEG and ECG-Based Multi-Sensor Fusion Computing for Real-Time

Fatigue Driving Recognition Based on Feedback Mechanism / L. Wang, F. Song, T. H. Zhou [et al.] // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, № 20. – P. 8386. – DOI: 10.3390/s23208386.

13. **Sikander, G.** Driver fatigue detection systems: A review / G. Sikander, S. Anwar // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2019. – Vol. 20, № 6. – P. 2339–2352. – DOI: 10.1109/TITS.2018.2868499.

14. **Kashevnik, A.** Driver distraction detection methods: A literature review and framework / A. Ka-shevnik, R. Shchedrin, C. Kaiser [et al.] // *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9. – P. 60063–60076. – DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3073599.

15. **Hao, Z.** Train driver fatigue detection based on facial multi-information fusion / Z. Hao, Y. Wang, X. Chen [et al.] // *Journal of Measurement Science and Instrumentation*. – 2023. – Vol. 14, № 4. – P. 493–500. – DOI: 10.62756/jmsi.1674-8042.2023054.

16. **Lozano-Reyes, G. S.** A vision-based drowsiness detection system for railway operators using lightweight convolutional neural networks / G. S. Lozano-Reyes, C. A. Mugruza-Vassallo // *Frontiers in Future Transportation*. – 2025. – Vol. 6. – P. 1677442. – DOI: 10.3389/ffutr.2025.1677442.

17. **Nocentini, O.** Graph-based online monitoring of train driver states via facial and skeletal features / O. Nocentini, M. Lagomarsino, G. Solak [et al.]. – 2025. – URL: <https://arxiv.org/abs/2505.08800>.

18. **Попов, П. А.** Применение технологий искусственного интеллекта для железнодорожного транспорта / П. А. Попов // *Техника железных дорог*. – 2024. – № 1 (65). – С. 22–25. – URL: <https://niias.ru/upload/iblock/385/qoq0tq4q4aen6rg08mf884o1yb19z3jo.pdf>.

19. **Озеров, А. В.** Техническое зрение в составе систем автоматического управления движением поездов / А. В. Озеров, А. С. Маршова // *Перспективные информационные технологии (ПИТ 2022): труды Международной научно-технической конференции (Самара, 18–21 апреля 2022 г.)* / под ред. С. А. Прохоров. – Самара : Издательство Самарского научного центра РАН. – 2022. – С. 201–205.

Fatigue Driving Recognition Based on Feedback Mechanism / L. Wang, F. Song, T. H. Zhou [et al.] // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23, № 20. – P. 8386. – DOI: 10.3390/s23208386.

13. **Sikander, G.** Driver fatigue detection systems: A review / G. Sikander, S. Anwar // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2019. – Vol. 20, № 6. – P. 2339–2352. – DOI: 10.1109/TITS.2018.2868499.

14. **Kashevnik, A.** Driver distraction detection methods: A literature review and framework / A. Ka-shevnik, R. Shchedrin, C. Kaiser [et al.] // *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9. – P. 60063–60076. – DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3073599.

15. **Hao, Z.** Train driver fatigue detection based on facial multi-information fusion / Z. Hao, Y. Wang, X. Chen [et al.] // *Journal of Measurement Science and Instrumentation*. – 2023. – Vol. 14, № 4. – P. 493–500. – DOI: 10.62756/jmsi.1674-8042.2023054.

16. **Lozano-Reyes, G. S.** A vision-based drowsiness detection system for railway operators using lightweight convolutional neural networks / G. S. Lozano-Reyes, C. A. Mugruza-Vassallo // *Frontiers in Future Transportation*. – 2025. – Vol. 6. – P. 1677442. – DOI: 10.3389/ffutr.2025.1677442.

17. **Nocentini, O.** Graph-based online monitoring of train driver states via facial and skeletal features / O. Nocentini, M. Lagomarsino, G. Solak [et al.]. – 2025. – URL: <https://arxiv.org/abs/2505.08800>.

18. **Попов, П. А.** Application of Artificial Intelligence Technologies in Railway Transport / P. A. Popov // *Railway Engineering*. – 2024. – No. 1 (65). – P. 22–25. – URL: <https://niias.ru/upload/iblock/385/qoq0tq4q4aen6rg08mf884o1yb19z3jo.pdf>.

19. **Ozerov, A. V.** Machine Vision in Automatic Train Movement Control Systems / A. V. Ozerov, A. S. Marshova // *Advanced Information Technologies (PIT 2022): Proceedings of the International Scientific and Technical Conference (Samara, April 18–21, 2022)* / Ed. by S. A. Prokhorov. – Samara : Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Publishing House. – 2022. – P. 201–205. – URL:

- URL: https://repo.ssau.ru/bitstream/Perspektivnye-informacionnye-tehnologii/TEHNICHESKOE-ZRENIE-V-SOSTAVE-SISTEM-AVTOMATICHESKOGO-UPRAVLENIYA-DVIZHENIEM-POEZDOV-101915/1/978-5-93424-880-3_2022_201-205.pdf.
20. **Баранов, А. Г.** Система управления движением поездов : патент / А. Г. Баранов, В. А. Воронин, Г. К. Кисельгоф [и др.]. — 2014. — URL: <https://patents.google.com/patent/RU2508218C1/ru>.
21. **Градусов, А. Н.** Устройство контроля за управлением локомотивом электропоезда и бдительностью машиниста : патент / А. Н. Градусов, В. Ф. Иванов, С. В. Кудряшов [и др.]. — 2025. — URL: <https://patents.google.com/patent/RU2851854C1/ru>.
22. **Wierwille, W. W.** Research on vehicle-based driver status/performance monitoring: development, validation, and refinement of algorithms for detection of driver drowsiness. Final report / W. W. Wierwille, S. S. Wreggit, C. L. Kirn [et al.]. — National Highway Traffic Safety Administration, 1994. — 247 p.
23. **Dinges, D. F.** PERCLOS: A valid psychophysiological measure of alertness as assessed by psychomotor vigilance / D. F. Dinges, R. Grace. — Federal Highway Administration, Office of Motor Carrier Research; Standards, 1998. — 4 p.
24. **Abe, T.** PERCLOS-based technologies for detecting drowsiness: current evidence and future directions / T. Abe // SLEEP Advances. — 2023. — Vol. 4, № 1. — P. zpad006. — DOI: 10.1093/sleepadvances/zpad006.
25. **Trutschel, U.** PERCLOS: An alertness measure of the past / U. Trutschel, B. Sirois, D. Sommer [et al.] // Proceedings of the Sixth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design. — 2011. — DOI: 10.17077/drivingassessment.1394.
26. **Bentivoglio, A. R.** Analysis of blink rate patterns in normal subjects / A. R. Bentivoglio, S. B. Bressman, E. Cassetta [et al.] // Movement Disorders. — 1997. — Vol. 12, № 6. — P. 1028–1034. — DOI: 10.1002/mds.870120629.
20. **Baranov, A. G.** Train traffic control system : patent / A. G. Baranov, V. A. Voronin, G. K. Kiselgof [et al.]. — 2014. — URL: <https://patents.google.com/patent/RU2508218C1/ru>.
21. **Gradusov, A. N.** Device for monitoring electric train locomotive control and driver vigilance : patent / A. N. Gradusov, V. F. Ivanov, S. V. Kudryashov [et al.]. — 2025. — URL: <https://patents.google.com/patent/RU2851854C1/ru>.
22. **Wierwille, W. W.** Research on vehicle-based driver status/performance monitoring: development, validation, and refinement of algorithms for detection of driver drowsiness. Final report / W. W. Wierwille, S. S. Wreggit, C. L. Kirn [et al.]. — National Highway Traffic Safety Administration, 1994. — 247 p.
23. **Dinges, D. F.** PERCLOS: A valid psychophysiological measure of alertness as assessed by psychomotor vigilance / D. F. Dinges, R. Grace. — Federal Highway Administration, Office of Motor Carrier Research; Standards, 1998. — 4 p.
24. **Abe, T.** PERCLOS-based technologies for detecting drowsiness: current evidence and future directions / T. Abe // SLEEP Advances. — 2023. — Vol. 4, № 1. — P. zpad006. — DOI: 10.1093/sleepadvances/zpad006.
25. **Trutschel, U.** PERCLOS: An alertness measure of the past / U. Trutschel, B. Sirois, D. Sommer [et al.] // Proceedings of the Sixth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design. — 2011. — DOI: 10.17077/drivingassessment.1394.
26. **Bentivoglio, A. R.** Analysis of blink rate patterns in normal subjects / A. R. Bentivoglio, S. B. Bressman, E. Cassetta [et al.] // Movement Disorders. — 1997. — Vol. 12, № 6. — P. 1028–1034. — DOI: 10.1002/mds.870120629.

27. **Tsubota, K.** Dry eyes and video display terminals / K. Tsubota, K. Nakamori // *New England Journal of Medicine*. — 1993. — Vol. 328, № 8. — P. 584. — DOI: 10.1056/NEJM199302253280817.

28. **Caffier, P. P.** Experimental evaluation of eye-blink parameters as a drowsiness measure / P. P. Caffier, U. Erdmann, P. Ullsperger // *European Journal of Applied Physiology*. — 2003. — Vol. 89, № 3. — P. 319–325. — DOI: 10.1007/s00421-003-0807-5.

29. **Schleicher, R.** Blinks and saccades as indicators of fatigue in sleepiness warnings: looking tired? / R. Schleicher, N. Galley, S. Briest [et al.] // *Ergonomics*. — 2008. — Vol. 51, № 7. — P. 982–1010. — DOI: 10.1080/00140130701817062.

30. **Buckley, R. J.** Attention lapses and behavioural microsleeps during tracking, psychomotor vigilance, and dual tasks / R. J. Buckley, W. S. Helton, C. R. H. Innes [et al.] // *Consciousness and Cognition*. — 2016. — Vol. 45. — P. 174–183. — DOI: 10.1016/j.concog.2016.09.002.

31. **Viola, P.** Rapid object detection using a boosted cascade of simple features / P. Viola, M. Jones // *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001)*. — 2001. — P. I-511-I-518. — DOI: 10.1109/CVPR.2001.990517.

32. **Zhang, K.** Joint face detection and alignment using multitask cascaded convolutional networks / K. Zhang, Z. Zhang, Z. Li [et al.] // *IEEE Signal Processing Letters*. — 2016. — Vol. 23, № 10. — P. 1499–1503. — DOI: 10.1109/LSP.2016.2603342. — URL: <https://arxiv.org/abs/1604.02878>.

33. **Deng, J.** RetinaFace: Single-shot multi-level face localisation in the wild / J. Deng, J. Guo, E. Ververas [et al.] // *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. — 2020. — P. 5202–5211. — DOI: 10.1109/CVPR42600.2020.00525.

34. **Sagonas, C.** 300 Faces in-the-wild challenge: The first facial landmark localization challenge / C. Sagonas, G. Tzimiropoulos, S. Zafeiriou [et al.] // *2013 IEEE International Conference on Computer*

27. **Tsubota, K.** Dry eyes and video display terminals / K. Tsubota, K. Nakamori // *New England Journal of Medicine*. — 1993. — Vol. 328, № 8. — P. 584. — DOI: 10.1056/NEJM199302253280817.

28. **Caffier, P. P.** Experimental evaluation of eye-blink parameters as a drowsiness measure / P. P. Caffier, U. Erdmann, P. Ullsperger // *European Journal of Applied Physiology*. — 2003. — Vol. 89, № 3. — P. 319–325. — DOI: 10.1007/s00421-003-0807-5.

29. **Schleicher, R.** Blinks and saccades as indicators of fatigue in sleepiness warnings: looking tired? / R. Schleicher, N. Galley, S. Briest [et al.] // *Ergonomics*. — 2008. — Vol. 51, № 7. — P. 982–1010. — DOI: 10.1080/00140130701817062.

30. **Buckley, R. J.** Attention lapses and behavioural microsleeps during tracking, psychomotor vigilance, and dual tasks / R. J. Buckley, W. S. Helton, C. R. H. Innes [et al.] // *Consciousness and Cognition*. — 2016. — Vol. 45. — P. 174–183. — DOI: 10.1016/j.concog.2016.09.002.

31. **Viola, P.** Rapid object detection using a boosted cascade of simple features / P. Viola, M. Jones // *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001)*. — 2001. — P. I-511-I-518. — DOI: 10.1109/CVPR.2001.990517.

32. **Zhang, K.** Joint face detection and alignment using multitask cascaded convolutional networks / K. Zhang, Z. Zhang, Z. Li [et al.] // *IEEE Signal Processing Letters*. — 2016. — Vol. 23, № 10. — P. 1499–1503. — DOI: 10.1109/LSP.2016.2603342. — URL: <https://arxiv.org/abs/1604.02878>.

33. **Deng, J.** RetinaFace: Single-shot multi-level face localisation in the wild / J. Deng, J. Guo, E. Ververas [et al.] // *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. — 2020. — P. 5202–5211. — DOI: 10.1109/CVPR42600.2020.00525.

34. **Sagonas, C.** 300 Faces in-the-wild challenge: The first facial landmark localization challenge / C. Sagonas, G. Tzimiropoulos, S. Zafeiriou [et al.] // *2013 IEEE International Conference on Computer*

Vision Workshops. — 2013. — P. 397–403. — DOI: 10.1109/ICCVW.2013.59.

35. **Kazemi, V.** One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees / V. Kazemi, J. Sullivan // 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2014. — P. 1867–1874. — DOI: 10.1109/CVPR.2014.241.

36. **Kartynnik, Y.** Real-time facial surface geometry from monocular video on mobile GPUs / Y. Kartynnik, A. Ablavatski, I. Grishchenko [et al.]. — 2019. — URL: <https://arxiv.org/abs/1907.06724>.

37. **Soukupová, T.** Real-time eye blink detection using facial landmarks / T. Soukupová, J. Čech // 21st Computer Vision Winter Workshop (CVWW 2016) / eds. L. Čehovin, R. Mandeljc, V. Štruc. — Rimske Toplice, Slovenia. — 2016. — URL: <https://cmp.felk.cvut.cz/ftp/articles/cech/Soukupova-CVWW-2016.pdf>.

38. **Weng, C.-H.** Driver drowsiness detection via a hierarchical temporal deep belief network / C.-H. Weng, Y.-H. Lai, S.-H. Lai // Computer Vision – ACCV 2016 Workshops. — Springer. — 2017. — P. 117–133. — DOI: 10.1007/978-3-319-54526-4_9.

39. **Ghoddosian, R.** A realistic dataset and baseline temporal model for early drowsiness detection / R. Ghoddosian, M. Galib, V. Athitsos // 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). — 2019. — P. 178–187. — DOI: 10.1109/CVPRW.2019.00027. — URL: <https://arxiv.org/abs/1904.07312>.

40. Vogel, A. P. Acoustic analysis of the effects of sustained wakefulness on speech / A. P. Vogel, J. Fletcher, P. Maruff // The Journal of the Acoustical Society of America. — 2010. — Vol. 128, № 6. — P. 3747–3756. — DOI: 10.1121/1.3506349.

41. **Greeley, H. P.** Fatigue estimation using voice analysis / H. P. Greeley, J. Berg, E. Friets [et al.] // Behavior Research Methods. — 2007. — Vol. 39, № 3. — P. 610–619. — DOI: 10.3758/BF03193033.

42. **Krajewski, J.** Acoustic sleepiness detection: Framework and validation of a speech-adapted pattern recognition approach / J. Krajewski, A. Batliner, M. Golz // Behavior Research Methods. — 2009. — Vol. 41, № 3.

Vision Workshops. — 2013. — P. 397–403. — DOI: 10.1109/ICCVW.2013.59.

35. **Kazemi, V.** One millisecond face alignment with an ensemble of regression trees / V. Kazemi, J. Sullivan // 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. — 2014. — P. 1867–1874. — DOI: 10.1109/CVPR.2014.241.

36. **Kartynnik, Y.** Real-time facial surface geometry from monocular video on mobile GPUs / Y. Kartynnik, A. Ablavatski, I. Grishchenko [et al.]. — 2019. — URL: <https://arxiv.org/abs/1907.06724>.

37. **Soukupová, T.** Real-time eye blink detection using facial landmarks / T. Soukupová, J. Čech // 21st Computer Vision Winter Workshop (CVWW 2016) / eds. L. Čehovin, R. Mandeljc, V. Štruc. — Rimske Toplice, Slovenia. — 2016. — URL: <https://cmp.felk.cvut.cz/ftp/articles/cech/Soukupova-CVWW-2016.pdf>.

38. **Weng, C.-H.** Driver drowsiness detection via a hierarchical temporal deep belief network / C.-H. Weng, Y.-H. Lai, S.-H. Lai // Computer Vision – ACCV 2016 Workshops. — Springer. — 2017. — P. 117–133. — DOI: 10.1007/978-3-319-54526-4_9.

39. **Ghoddosian, R.** A realistic dataset and baseline temporal model for early drowsiness detection / R. Ghoddosian, M. Galib, V. Athitsos // 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). — 2019. — P. 178–187. — DOI: 10.1109/CVPRW.2019.00027. — URL: <https://arxiv.org/abs/1904.07312>.

40. Vogel, A. P. Acoustic analysis of the effects of sustained wakefulness on speech / A. P. Vogel, J. Fletcher, P. Maruff // The Journal of the Acoustical Society of America. — 2010. — Vol. 128, № 6. — P. 3747–3756. — DOI: 10.1121/1.3506349.

41. **Greeley, H. P.** Fatigue estimation using voice analysis / H. P. Greeley, J. Berg, E. Friets [et al.] // Behavior Research Methods. — 2007. — Vol. 39, № 3. — P. 610–619. — DOI: 10.3758/BF03193033.

42. **Krajewski, J.** Acoustic sleepiness detection: Framework and validation of a speech-adapted pattern recognition approach / J. Krajewski, A. Batliner, M. Golz // Behavior Research Methods. — 2009. — Vol. 41, № 3.

— P. 795–804. — DOI: 10.3758/BRM.41.3.795.

43. **Schuller, B.** The INTERSPEECH 2011 speaker state challenge / B. Schuller, S. Steidl, A. Batliner [et al.] // Interspeech 2011. — 2011. — P. 3201–3204. — DOI: 10.21437/Interspeech.2011-801.

44. **Kashevnik, A.** Multimodal corpus design for audio-visual speech recognition in vehicle cabin / A. Kashevnik, I. Lashkov, A. Axyonov [et al.] // IEEE Access. — 2021. — Vol. 9. — P. 34986–35003. — DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3062752.

45. **Dasgupta, A.** A smartphone-based drowsiness detection and warning system for automotive drivers / A. Dasgupta, D. Rahman, A. Routray // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2019. — Vol. 20, № 11. — P. 4045–4054. — DOI: 10.1109/TITS.2018.2879609.

46. **Virk, J. S.** A multimodal feature fusion framework for sleep-deprived fatigue detection to prevent accidents / J. S. Virk, M. Singh, M. Singh [et al.] // Sensors. — 2023. — Vol. 23, № 8. — P. 4129. — DOI: 10.3390/s23084129.

47. **Jo, J.** Detecting driver drowsiness using feature-level fusion and user-specific classification / J. Jo, S. J. Lee, K. R. Park [et al.] // Expert Systems with Applications. — 2014. — Vol. 41, № 4. — P. 1139–1152. — DOI: 10.1016/j.eswa.2013.07.108.

48. **Cao, S.** Optimized driver fatigue detection method using multimodal neural networks / S. Cao, P. Feng, W. Kang [et al.] // Scientific Reports. — 2025. — Vol. 15. — P. 12240. — DOI: 10.1038/s41598-025-86709-1.

— P. 795–804. — DOI: 10.3758/BRM.41.3.795.

43. **Schuller, B.** The INTERSPEECH 2011 speaker state challenge / B. Schuller, S. Steidl, A. Batliner [et al.] // Interspeech 2011. — 2011. — P. 3201–3204. — DOI: 10.21437/Interspeech.2011-801.

44. **Kashevnik, A.** Multimodal corpus design for audio-visual speech recognition in vehicle cabin / A. Kashevnik, I. Lashkov, A. Axyonov [et al.] // IEEE Access. — 2021. — Vol. 9. — P. 34986–35003. — DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3062752.

45. **Dasgupta, A.** A smartphone-based drowsiness detection and warning system for automotive drivers / A. Dasgupta, D. Rahman, A. Routray // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2019. — Vol. 20, № 11. — P. 4045–4054. — DOI: 10.1109/TITS.2018.2879609.

46. **Virk, J. S.** A multimodal feature fusion framework for sleep-deprived fatigue detection to prevent accidents / J. S. Virk, M. Singh, M. Singh [et al.] // Sensors. — 2023. — Vol. 23, № 8. — P. 4129. — DOI: 10.3390/s23084129.

47. **Jo, J.** Detecting driver drowsiness using feature-level fusion and user-specific classification / J. Jo, S. J. Lee, K. R. Park [et al.] // Expert Systems with Applications. — 2014. — Vol. 41, № 4. — P. 1139–1152. — DOI: 10.1016/j.eswa.2013.07.108.

48. **Cao, S.** Optimized driver fatigue detection method using multimodal neural networks / S. Cao, P. Feng, W. Kang [et al.] // Scientific Reports. — 2025. — Vol. 15. — P. 12240. — DOI: 10.1038/s41598-025-86709-1.

M.V. Tchavychalov, I.I. Lubenets

NEURAL-NETWORK MONITORING OF TRAIN DRIVER VIGILANCE FROM VIDEO AND SPEECH: A REVIEW OF METHODS AND A CONCEPT OF A MULTIMODAL SYSTEM

Abstract. Standard train-driver vigilance devices (the vigilance handle, ALSN cab signalling, KLUB-U and the TSKBM electrodermal bracelet) are reviewed and shown to be either reactive, i.e. triggered only after control of the train has been lost, or contact-based and single-channel. Published evidence on contact-less markers of fatigue and drowsiness is systematised for video (blink dynamics, PERCLOS, head pose) and speech (tempo, pauses, fundamental frequency, cepstral coefficients), each with its source and the accuracy reported there. A concept of an on-board system that

fuses the video and speech channels with a neural-network model and a hybrid fusion strategy is proposed together with a validation programme: a metric set, on-board platform criteria and test stages.

Keywords: train driver occupational safety, safe operation of transport machines, human factor, vigilance, TSKBM, computer vision, PERCLOS, speech analysis, multimodal fusion, artificial neural networks.

For citation: Tchavychalov, M. V. Neural-Network Monitoring of Train Driver Vigilance from Video and Speech: a Review of Methods and a Concept of a Multimodal System / M. V. Tchavychalov, I. I. Lubenets // Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobseniya. – 2026. – № 2. – P. 115–128. – DOI 10.46973/1818-5509_2026_2_115.

Сведения об авторах

Чавычалов Максим Вячеславович

Научно-исследовательский институт
«Специализированные вычислительные
устройства защиты и автоматика»,
кандидат технических наук, заведующий
лабораторией,
e-mail: Chavychalov-maxim@yandex.ru

Лубенец Илья Игоревич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
Аспирант,
lubenets.ilya.igorevich@gmail.com

Information about the authors

Tchavychalov Maxim Vyacheslavovich

Research Institute «Spetsvuzavtomatika»
Candidate of Technical Sciences, Head of the
Laboratory,
e-mail: Chavychalov-maxim@yandex.ru

Lubenets Ilya Igorevich

Rostov State Transport University (RSTU),
Postgraduate Student,
lubenets.ilya.igorevich@gmail.com