

УДК: 001.895, 004.8, 004.85, 625

# Современные системы технической диагностики и мониторинга на железнодорожном транспорте

## Advanced diagnostic and monitoring systems for railways

**Озеров А.В.**, Начальник Международного управления АО «НИИАС»,  
E-mail: a.ozеров@vniias.ru, Москва, Россия

**Ozerov A.V.**, Head of International Department, JSC NIAS,  
E-mail: a.ozеров@vniias.ru, Moscow, Russia

**Куроптева А.П.**, Главный специалист Международного управления АО «НИИАС»,  
E-mail: a.kuropteva@vniias.ru, Москва, Россия

**Kuropteva A.P.**, Chief Specialist of International Department, JSC «NIAS»,  
E-mail: a.kuropteva@vniias.ru, Moscow, Russia



### Аннотация

В статье представлен обзор современных средств контроля состояния пути и сооружений на основе перспективных цифровых технологий, предложена общая структура перспективной системы управления движением поездов с интегрированной в нее средствами диагностики и мониторинга. Приведены практические примеры внедрения различных технологий с использованием интеллектуальных средств диагностики и мониторинга.

**Ключевые слова:** Транспорт, системы диагностики и мониторинга, машинное обучение, аналитика больших данных, цифровой двойник, моделирование, интернет вещей, ВСМ.

### Abstract

The article presents an overview of modern systems for monitoring the condition of tracks and structures based on advanced digital technologies, the general structure of a promising train control system with integrated diagnostic and monitoring tools is proposed. Best world practices of implementation of various technologies using intelligent diagnostic and monitoring tools are given.

**Keywords:** Transport, diagnostic and monitoring systems, machine learning, big data analytics, digital twin, simulation, high-speed rail.



На железнодорожном транспорте большое внимание уделяется мерам по обеспечению высокого уровня эксплуатационной надежности подвижного состава и объектов инфраструктуры, от которой напрямую зависит безопасность перевозочного процесса. Большинство систем железнодорожной автоматики, эксплуатируемых в настоящее время, характеризуются достаточно простыми и жесткими логическими функциями безопасности и базируются на анализе текущей, а в ряде случаев и предшествующей, поездной обстановки, а также текущего состояния элементов инфраструктуры железнодорожной автоматики и телемеханики.

На современном этапе развития систем железнодорожной автоматики исходят из того, что при построении системы управления движением поездов должен учитываться широкий спектр рисков и должны предусматриваться встроенные механизмы раннего обнаружения и предупреждения угроз, до перехода системы в опасное состояние. Это может достигаться за счет создания единого информационного пространства технологического процесса контроля и управления движением поездов, обеспечения интероперабельности отдельных существующих и эксплуатируемых в настоящее время подсистем, использования цифровых моделей и технологии больших данных. В едином информационном пространстве появляется возможность выявлять не только различные дефекты железнодорожной инфраструктуры, но и прогнозировать изменение ее состояния во времени, и на этой основе разрабатывать политику технического обслуживания и ремонта.

Основным источником информации о внешней среде и текущем состоянии инфраструктуры железнодорожного транспорта, задействованной в ответственном технологическом процессе и оказывающей влияние на уровень его безопасности, следует считать системы технической диагностики и мониторинга. Под системами технической диагностики и мониторинга следует понимать не только привычные системы диагностики и мониторинга аппаратных и программных средств железнодорожной автоматики, но и системы мониторинга транспортной безопасности, системы обнаружения признаков асоциального поведения пассажиров и иные системы, позволяющие обнаруживать потенциальные источники дестабилизирующих в отношении штатного протекания ответственного технологического процесса движения поездов факторов.

Существующие системы технической диагностики и мониторинга применяются преимущественно для контроля технического состояния оборудования при организации его обслуживания и ремонта по состоянию. Как правило, при этом речь идет об объектах инфраструктуры железных дорог [1]. Реже системы мониторинга используются для контроля полноты и правильности выполнения процесса технического обслуживания и ремонта сложных систем и устройств железнодорожной автоматики. Анализ тенденций развития систем технической диагностики и мониторинга указывает на расширение перечня контролируемых ими параметров. Ведутся работы по реализации программно-аппаратных комплексов для прогнозирования технического состояния объектов инфраструктуры, а также работы по созданию комплексных систем, контролирующих несколько разнородных объектов, принимающих участие в процессе движения поездов [2].

Средства диагностики и мониторинга (мобильные, съемные, стационарные) проделали значительный эволюционный путь от механизации к электронике, от аналога к «цифре», через автоматизацию к цифровизации и интеллекту. Первые этапы развития систем диагностики и мониторинга заключались в интенсивном наращивании функциональности, повышении степени автоматизации процессов измерений, в цифровой обработке и анализе полученных данных. Последующие этапы были переходными, сочетающими в себе функциональность, автоматизацию, адаптивность и компактность исполнения, получение данных в реальных условиях взаимодействия инфраструктуры и подвижного состава. На современном этапе, определяющем новое поколение средств диагностики, ко всем накопленным возможностям добавляются возможности встроенного интеллекта, автономность работы и интегрированность в системы подвижного состава [3].

Средства последнего поколения уже реализуют в своей конструкции элементы интернета вещей. Локальная бортовая сеть объединяет датчики, электрическое и энергетическое оборудование, контроллеры и вычислительные комплексы в сложную интегрированную систему. Мониторинг состояния железнодорожного пути включает в себя наблюдение за верхним и нижним строением пути, геометрией рельсового пути, а также наблюдение за изменением



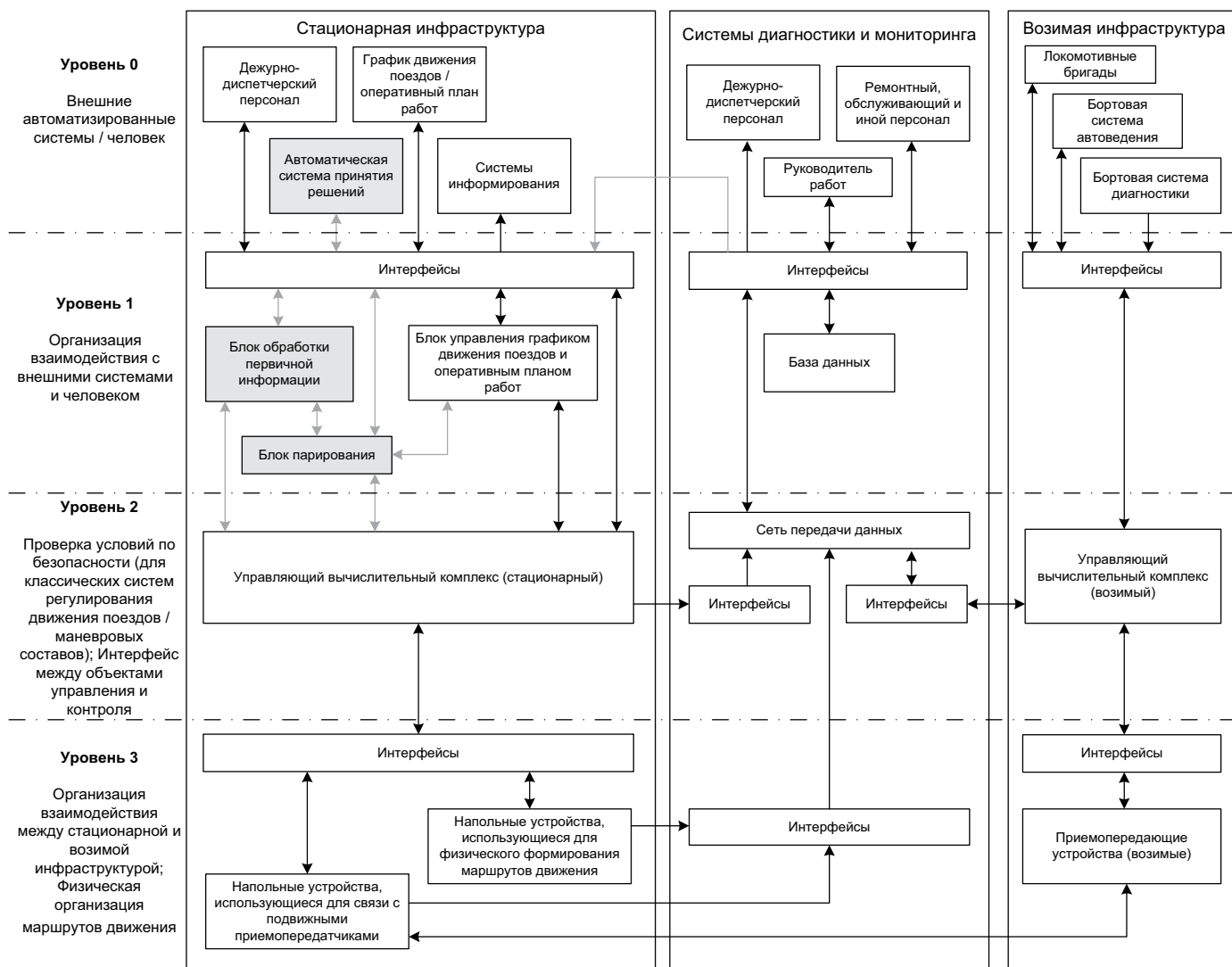


Рисунок 1. Архитектура перспективной системы управления движением поездов с интегрированной в нее системой диагностики и мониторинга

пути во времени. Методы контроля элементов железнодорожной инфраструктуры выбирают в зависимости от того, какие элементы подлежат контролю. Наиболее часто используемыми датчиками для мониторинга состояния пути являются инерциальные (акселерометры и гироскопы), оптические (камеры и лазеры), акустические (в основном ультразвуковые) и магнитные (вихревые датчики) [4].

При построении перспективной системы управления движением поездов исходят из необходимости интеграции в нее подсистем комплексной технической диагностики и мониторинга. На Рис. 1 показана общая структура перспективной системы управления движением поездов с интегрированными в нее средствами диагностики и мониторинга [5].

На основе анализа материалов, изложенных в открытых источниках, можно выделить следующие основные системы технической диагностики и мониторинга, эксплуатируемые и/или планируемые к применению на железнодорожном транспорте, обеспечивающие контроль состояния объектов инфраструктуры железнодорожного транспорта, состояния подвижного состава, возимых технических средств автоматики и связи, которые также могут быть использованы в перспективной системе управления движением поездов:

- мониторинг технического состояния путевых устройств железнодорожной автоматики и телемеханики;
- мониторинг технического состояния локомотивных устройств безопасности;



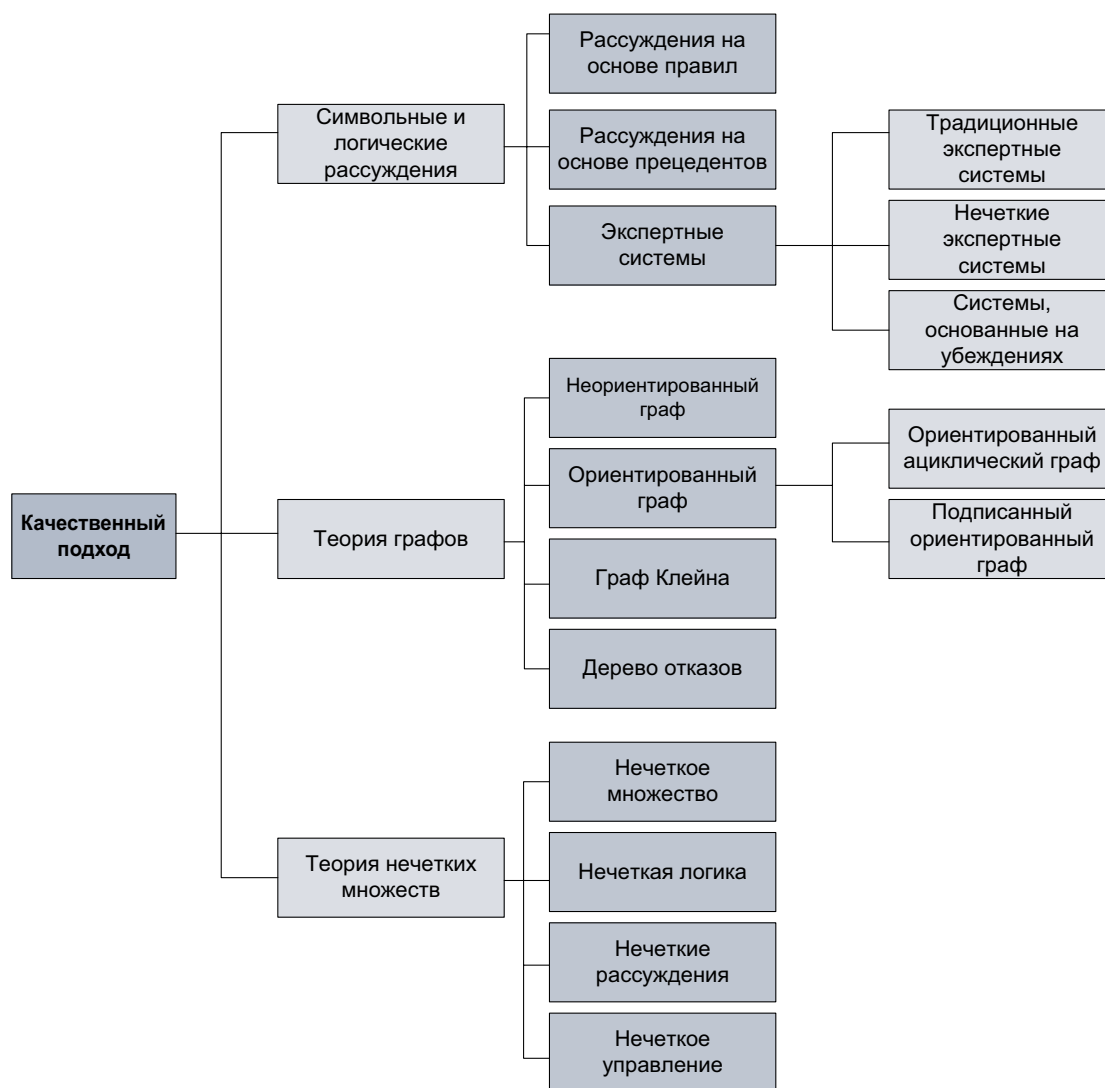


Рисунок 2. Классификация качественных методов интеллектуальной диагностики отказов, которые могут применяться на ВСМ

- мониторинг технического состояния пути;
- мониторинг технического состояния мостов и тоннелей;
- мониторинг технического состояния устройств энергоснабжения;
- мониторинг технического состояния связи;
- мониторинг технического состояния нетягового подвижного состава;
- мониторинг технического состояния тягового подвижного состава;
- мониторинг выполнения технологии обслуживания и ремонта путевой инфраструктуры;
- мониторинг выполнения технологии обслуживания и ремонта тягового подвижного состава;
- мониторинг выполнения технологии обслуживания и ремонта нетягового подвижного состава;
- мониторинг выполнения технологии обслуживания и ремонта устройств связи;
- мониторинг выполнения технологии обслуживания и ремонта локомотивных устройств безопасности и возимых радиостанций;
- система мониторинга доступа на объекты железнодорожного транспорта;
- система определения признаков асоциального поведения в салонах железнодорожного подвижного состава;
- система определения признаков асоциального поведения на пассажирских остановочных пунктах.



При реализации предложенной структуры появится возможность, с одной стороны, обеспечить более высокий уровень функциональной безопасности системы регулирования движения поездов, а с другой стороны, обеспечить повышение эксплуатационных характеристик перевозочного процесса за счет более гибкого подхода к организации графика движения поездов и оперативного плана работ.

В настоящее время многими железнодорожными и технологическими компаниями проводятся работы по внедрению современных средств контроля состояния пути и сооружений на основе перспективных цифровых технологий. К таким технологиям можно отнести инструменты для сбора и анализа данных на основе интернета вещей, качественные методы интеллектуальной диагностики отказов, аналитика больших данных, технологии машинного обучения и др.

Новые технологии, внедряемые на железной дороге, требуют обработки больших объемов данных в режиме реального времени. Например, поезда должны иметь возможность непрерывно надежно и с абсолютной точностью определять свое местоположение и передавать его другим системам в режиме реального времени. Для решения возникающих задач создается новая и безопасная инфраструктура обработки данных. Решение основано на последних тенденциях в области облачных вычислений, но по-прежнему соответствует строгим железнодорожным стандартам.

Такое облако должно представлять собой размещенную в защищенной облачной среде сертифицированную ИТ-платформу, на базе которой могут быть реализованы ответственные железнодорожные приложения, и которая должна соответствовать требованиям различных участников процесса. Облачная платформа может включать в себя инфраструктуру, состоящую из нескольких центров обработки данных, защищенной линии связи между ними с возможностью резервирования, а также из сетевых соединений между центрами обработки данных и централизованно управляемых напольных элементов. Кроме того, должен быть гарантирован низкий уровень задержек и масштабируемость для большого количества подключенных напольных элементов [6].

Традиционные методы диагностики отказов не позволяют выявлять некоторые неисправности на высокоскоростных поездах, поэтому все

чаще используются интеллектуальные методы диагностики отказов, представленные на Рис. 2 [7]:

Аналитика больших данных представляет собой подходы, инструменты, а также методы обработки структурированных и неструктурированных данных, которые характеризуются значительными объемами, высокой скоростью поступления, а также вариативностью. Технология также служит в качестве инструмента анализа и прогноза рисков, связанных с надежностью и безопасностью. Ключевая сложность аналитики больших данных состоит в их высоком разнообразии, гетерогенности, неструктурированности, зашумленности и избыточности [8].

Представляет интерес проект, в рамках которого китайскими специалистами разрабатывается платформа для диагностики неисправностей высокоскоростных поездов, основанная на технологии больших данных (Рис. 3). В рамках платформы применяется комбинация облачных и периферийных вычислений, а также двухуровневая архитектура, с помощью которой обрабатываются большие объемы данных. В качестве базовой платформы используется Hadoop. Системы HDFS, HBase, Redis и базы данных MySQL служат в качестве платформы для хранения данных. В целях решения различных задач анализа данных для диагностики и прогнозирования неисправностей, платформа объединяет онлайн-вычисления, автономные вычисления, потоковые вычисления, вычисления в реальном времени и др. [9].

Следует также выделить технологию машинного обучения, которая позволяет строить математическую модель на основе собранных данных для построения прогнозов и принятия решений. Методы машинного обучения можно разделить на классические методы обучения и методы глубокого обучения. Основное различие между этими методами заключается в уровне их представления. К классическим методам обучения относятся метод главных компонент, метод опорных векторов, деревья решений, случайный лес, логистическая регрессия и метод ближайших соседей.

Машинное обучение на основе имеющихся исторических данных позволяет строить гораздо более точные предсказательные модели. Стандартная практика машинного обучения предполагает построение модели в два этапа: извлечение признаков и формирование обучающей матрицы; применение к полученной обучающей матрице некоторого общего алгоритма машинно- >>>

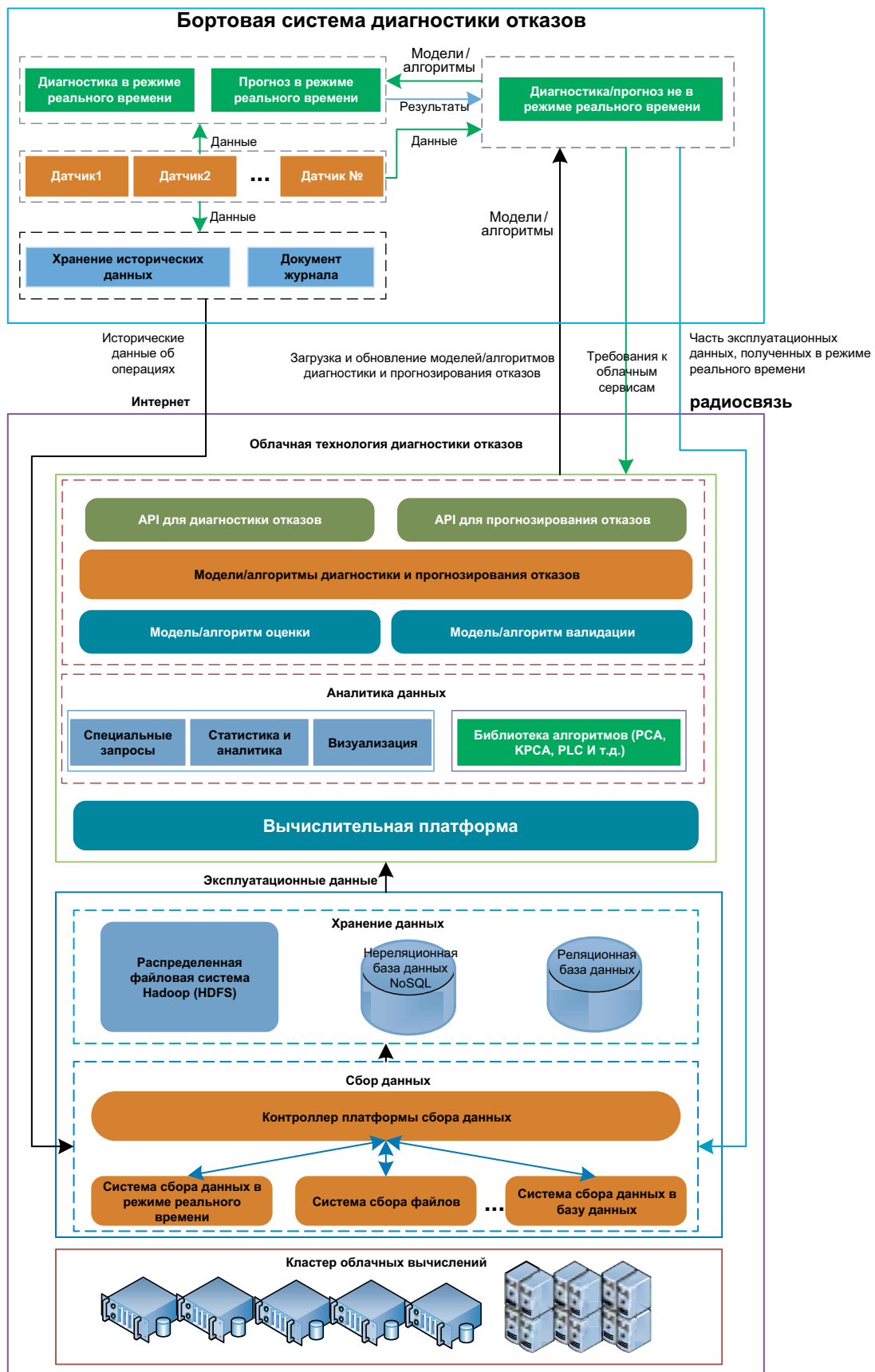


Рисунок 3. Системная архитектура платформы и поток данных



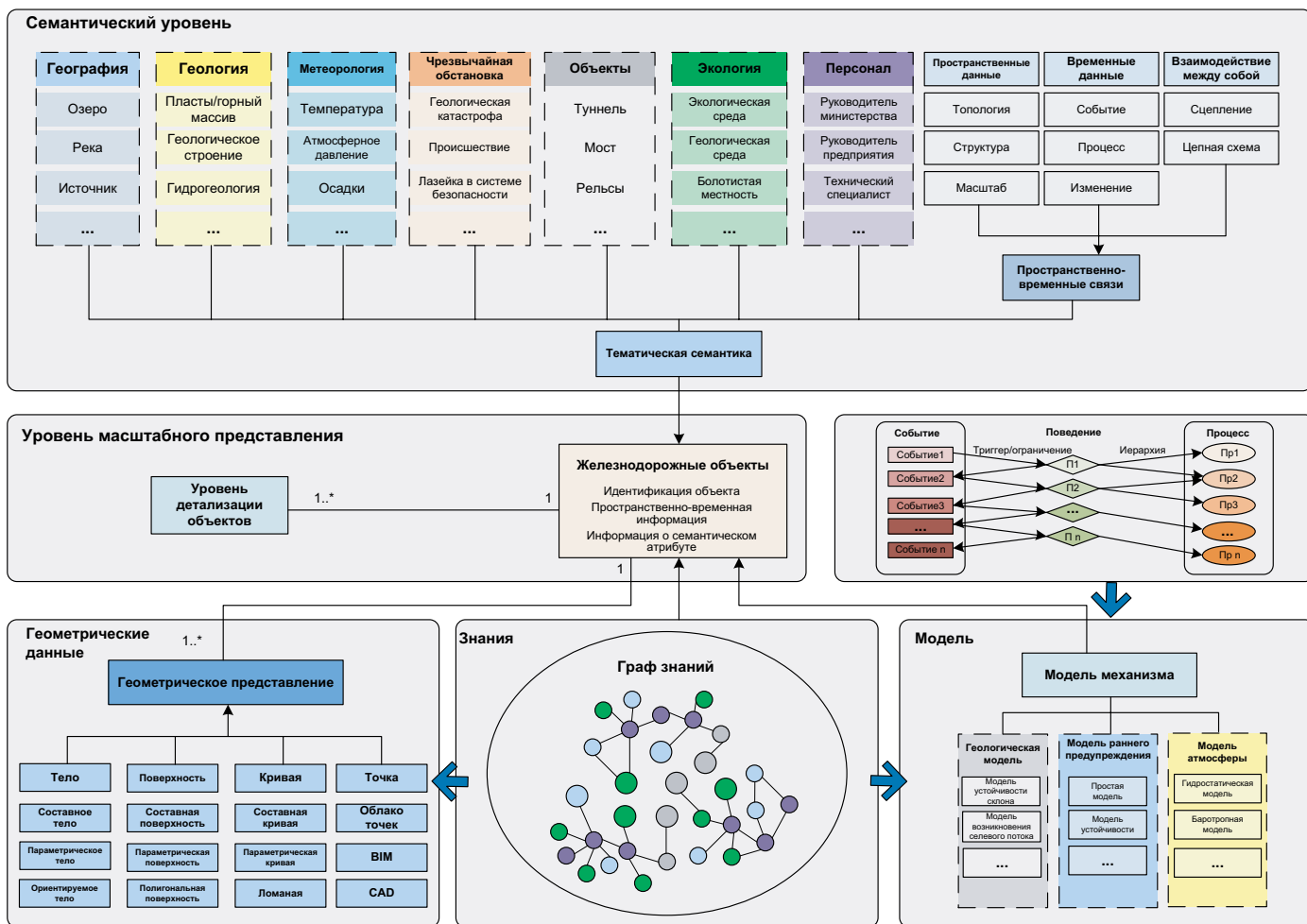


Рисунок 4. Концептуальная модель интегрированного представления «данные-модель-знание»

го обучения. Применение технологии машинного обучения в настоящее время является исследовательским процессом, включающим в себя этапы:

- анализ источников информации о состоянии железнодорожного пути;
- подготовка данных к машинному обучению;
- постановка задачи машинного обучения;
- обучение моделей;
- выбор лучшей модели;
- применение модели [10].

Миланский технический университет (Италия) и Королевский технологический институт (Швеция) предлагают классификаторы неисправностей на основе машинного обучения для мониторинга состояния неровностей пути. Классификаторы обучаются на наборе данных, состоящем из результатов численного моделирования, и проверяются на наборе данных измерений, полученных диагностическим транс-

портным средством на прямолинейных участках высокоскоростной линии (300 км/ч) [11].

Цифровые двойники или цифровые модели являются универсальным средством цифрового представления объектов инфраструктуры, что позволяет использовать их при проектировании, строительстве и мониторинге инженерных сооружений. Одним из средств цифрового моделирования является технология информационного моделирования зданий (Building Information Modeling, BIM), охватывающая все этапы жизненного цикла объекта: планирование, составление технического задания, проектирование и анализ, выдача рабочей документации, производство, строительство, эксплуатация и ремонт, демонтаж. На этапе эксплуатации и ремонта основной задачей является формирование и поддержание в рабочем состоянии цифрового двойника объекта (комплексной электронной копии объекта, состоящего из субъектов). >>>

Можно выделить три направления данного этапа: постоянный сбор данных о состоянии субъектов с возможностью хранения и обработки больших данных для мониторинга объекта и управления его жизненным циклом; предиктивный анализ – прогнозирование будущего поведения и технического состояния объектов и субъектов с целью принятия оптимальных решений; имитационное моделирование – подбор оптимального режима работы объекта, повышение производительности [12].

Авторы [13] предлагают создать пространственно-временную модель данных для описания геометрии, масштаба, топологии, атрибутов, характеристик поведения и взаимодействия объектов железной дороги с высокой степенью детализации в рамках единой пространственно-временной структуры. Модель состоит из пяти уровней (Рис. 4):

- семантический уровень расширяет и интегрирует соответствующие объекты железнодорожного пространства, формируя тематическую семантику семи основных типов объектов (география, геология, метеорология, объект, стихийные бедствия, экология и персонал), и представляет высокоуровневую семантическую информацию между объектами посредством временных и пространственных связей и взаимодействий;
- уровень масштабного представления данных представляет железнодорожные объекты на нескольких уровнях детализации;
- уровень геометрических данных реализует унифицированное выражение геометрической модели объектов железнодорожного пространства с помощью комбинации точек, кривых, поверхностей и твердых тел;
- уровень знаний устанавливает графы знаний предметной области, такие как графы знаний о геологических опасностях, графы знаний об инженерной безопасности и о качестве;
- уровень модели объединяет модели механизмов различных сценариев применения, таких как модель возникновения селевого потока, используемая для предупреждения о селевом потоке, для формирования базы модели.

В этой связи следует отметить ряд европейских проектов и инициатив (RailTopoModel, RailSystemModel, OntoRail, Linx4Rail), в рамках которых ведутся работы по созданию единого же-

лезнодорожного стандарта с унифицированным описанием инфраструктуры (единая онтология, один язык) и единой универсальной схемой классификации железнодорожных объектов, что, как ожидается, обеспечит формирование единой среды данных и значительно облегчит взаимодействие различных подсистем и подразделений компании.

Одним из решений также служат модифицированные поезда, которые сочетают в себе стандартные свойства эксплуатируемого подвижного состава и комплексы специального оборудования. Такие поезда могут представлять собой специализированные составы, как например итальянский Diamante 2.0, французский Iris 320, британский New Measurement Train (NMT), японский Dr.Yellow, китайский Comprehensive Inspection Train (CIT), либо обычные поезда, укомплектованные необходимыми диагностическими средствами. Используемые в таких поездах бортовые системы диагностических средств непрерывно контролирует различные параметры инфраструктуры, а система позиционирования осуществляет точную геоинформационную привязку, после чего бортовой комплекс обработки данных передает данные в соответствующую службу для планирования работ по текущему содержанию и ремонту с учетом фактического состояния.

Размещение средств диагностики непосредственно на регулярных поездах позволяет максимально полно обеспечить достоверность получаемой информации, что особенно актуально ввиду более жестких требований нормативов содержания высокоскоростных магистралей. При этом важным требованием, предъявляемыми к подобным техническим средствам, является скорость проведения исследований, которая должна быть равна скорости движения на соответствующей линии.

Примером диагностических средств, размещаемых на регулярном подвижном составе, является автоматизированная система диагностики компании Esimgroup (Италия). Система позволяет оценивать геометрию пути в автоматическом режиме без обслуживающего персонала [14]. Общая структура системы диагностики компании Esimgroup представлена на Рис. 5. Также данная компания предлагает систему обследования туннелей, которая измеряет внутренний профиль железнодорожных туннелей. Используемая технология позволяет точно реконструировать галерею благодаря большому количеству >>>

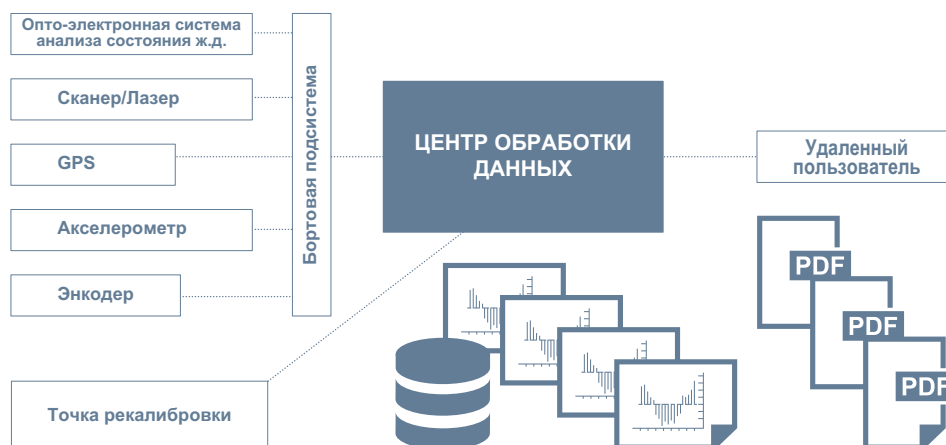


Рисунок 5. Общая структура системы диагностики компании Esimgroup

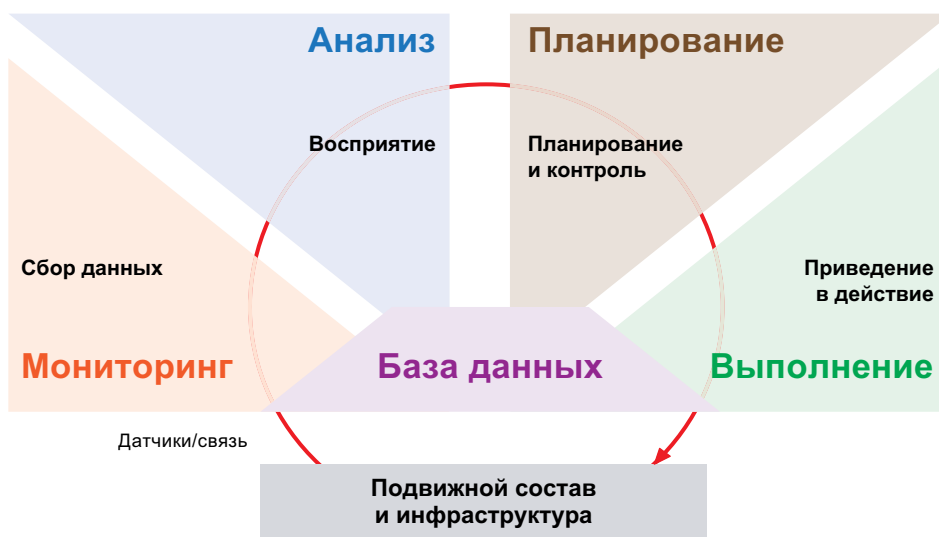


Рисунок 6. Алгоритм MAPE-K

полученных поперечных сечений. Такие системы включают в себя различные системы сбора информации, включая датчики, установленные на подвижной состав, затем полученные данные передаются в центр обработки данных, где обрабатываются в автоматическом режиме.

Применение различных технологий с использованием интеллектуальных средств диагностики и мониторинга представляет собой алгоритм типа MAPE-K (мониторинг, анализ, планирование и выполнение управления движением на основе разделения знаний) (Рис. 6). Для реализации алгоритма должны собираться и обрабатываться данные, поступающие от специальных датчиков различных типов (видеокамер, акселерометров

и т.д.), информация от других поездов или напольного оборудования, и внутренняя информация о работе подсистем поезда, поступающая от его бортовых датчиков. Эти данные в сочетании с уже хранящейся информацией представляют собой массив данных одного поезда, подвергающийся анализу для оценки окружающей обстановки.

Речь идёт об анализе информации о посторонних предметах на путях, значениях сигналов, технического состояния оборудования поезда в целях принятия решений о выполнении соответствующих действий. Последний блок схемы «Выполнение» обеспечивает физическое приведение в действие решений, принятых



во время планирования. Необходимо уточнить, что окружающая обстановка и информация, поступающая от бортовых датчиков, а также от других транспортных средств, постоянно меняется. Искусственный интеллект может играть центральную роль в процессе анализа, поскольку интеллектуальные системы имеют очень высокую эффективность применительно к выявлению изменений в потоке данных.

В целом следует отметить, что современный подход к развитию систем диагностики и мониторинга характеризуется внедрением предиктивных систем диагностики, которые обеспечивают удаленный мониторинг технического состояния железнодорожной инфраструктуры, прогноз ее технического состояния, определение потенциальных угроз безопасности движения поездов и выдача рекомендаций по устранению потенциальных неисправностей инфраструктуры, в ре-

зультате чего владелец инфраструктуры может заблаговременно предпринять действия до появления отказов или смягчить их неблагоприятный эффект. На основе проделанного обзора можно сделать вывод, что современные системы диагностики и мониторинга основываются на вариантных расчетах с использованием многоуровневых моделей и наложением на модели реальных данных эксплуатационного процесса. Процесс включает в себя сбор, подготовку и аналитику данных для извлечения знаний о текущем состоянии инфраструктуры. Далее с помощью цифрового двойника и моделирования определяется будущее состояние инфраструктуры. Затем извлеченные знания используются в системе поддержки принятия решений для автоматической приоритизации мероприятий по управлению инфраструктурой с применением логики оптимизации и операционных ограничений. ■



## Список литературы

1. Шарко, А. В. Автоматизация организации работ повысит эффективность / А. В. Шарко // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 2. С. 34-38.
2. Комплексные системы диагностирования грузового подвижного состава / А.Е. Хатламаджиян, В.В. Шаповалов, В.В. Кудюкин [и др.] // Труды АО «НИИАС»: Сборник статей. Москва: Типография АО «Т 8 Издательские Технологии», 2021. С. 108-117.
3. Диагностика – составная часть цифровой железной дороги [Электронный ресурс] / URL: <http://eav.ru/publ1.php?publid=2019-08a07> (дата обращения: 09.11.2023).
4. Peinado Gonzalo, A. Railway Track and Vehicle Onboard Monitoring: A Review [Text] / Alfredo Peinado Gonzalo, Mani Entezami, Paul Weston, Clive Roberts, Fausto Pedro Garcia Marquez; International Conference on Management Science and Engineering Management, Cape Town, South Africa. // E3S Web Conf. – 2023. – Vol. 409. – pp. 3-4.
5. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Тематический блок «Безопасность железнодорожного транспорта». Научные основы функциональной безопасности железнодорожного транспорта. Научный руководитель член-корреспондент РАН Махутов Н.А. – М.: МГОФ «Знание», 2023. – 560 с.
6. Долгий, А.И. Облачные технологии для ответственных систем железнодорожного транспорта / А.И. Долгий, Е.Н. Розенберг, А.В. Озеров. – Текст: непосредственный // Железнодорожный транспорт: Ежемесячный научно-теоретический технико-экономический журнал. – 2023. – № 11.
7. Cheng, C. [Text] / Wang, J., Chen, H., Chen, Z., Luo, H., Xie, P. A Review of Intelligent Fault Diagnosis for HighSpeed Trains: Qualitative Approaches // Entropy. – 2021. – No.23,1. – pp. 1-33.
8. Озеров, А. В. Предиктивная аналитика с использованием Data Science на железнодорожном транспорте / А. В. Озеров, А. М. Ольшанский, А. П. Куроптева // Наука и технологии железных дорог. – 2020. – Т. 4, № 4(16). – С. 63-76.
9. Quan, X. A Platform for Fault Diagnosis of High-Speed Train based on Big Data [Text] / Xu Q., Zhang P., Liu W., Liu Q., Liu C., Wang L., Toprac A., Qin S. J. // IFAC PapersOnLine. – 2018. – pp. 309-314.
10. Применение методов машинного обучения для прогнозирования опасных отказов объектов железнодорожного пути / И. Б. Шубинский, А. М. Замышляев, О. Б. Проневич [и др.] // Надежность. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 43-53.
11. A De Rosa, R Kulkarni, A Qazizadeh, M Berg, E Di Gialleonardo, A Facchinetti, S Bruni. Monitoring of lateral and cross level track geometry irregularities through onboard vehicle dynamics measurements using machine learning classification algorithms. [Электронный ресурс] / URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0954409720906649#con2> (дата обращения: 13.11.2023).
12. Павловский, А.А. К концепции внедрения информационного моделирования в железнодорожном транспортном комплексе / А.А. Павловский, А.В. Озеров, А.П. Куроптева // Наука и технологии железных дорог. – 2022. – Т. 6, № 3(23). – С. 20-31.
13. Hankan, L. Integrated representation of geospatial data, model, and knowledge for digital twin railway [Text] / Hankan L. Qing Z., Liguoz Z., Yulin D., Yongxin G., Haoyu W., Qiang W., Runfang Z., Mingwei L., Yan Z. // International journal of digital earth. – 2022, Vol. 15 (No. 1). – pp. 1657-1675.
14. Каталог продукции Esimgroup. [Электронный ресурс] / URL: [http://www.esimgroup.net/wp-content/uploads/2017/02/Esimgroup\\_sistemi\\_diagnostica\\_ENG\\_web.pdf](http://www.esimgroup.net/wp-content/uploads/2017/02/Esimgroup_sistemi_diagnostica_ENG_web.pdf) (дата обращения: 08.11.2023).