

ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Целью статьи является синтез иерархии моделей предиктивной аналитики, реализуемых для объектов и субъектов, функционирующих в ОАО «РЖД». Выполнен синтез семантической сети моделей, вершиной которой является метаонтология на основе онтологий предметных областей и прикладных онтологий, применимых к железнодорожному транспорту. Приведены примеры, подтверждающих реализуемость предложенных иерархий.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы, прогнозирование, моделирование

EDN: ANLBHL



М.А. Кулагин



В.Г. Сидоренко

В Стратегии цифровой трансформации транспортной отрасли Российской Федерации поставлены задачи цифровизации управления транспортной системой Российской Федерации и транспортной безопасностью на базе использования цифровых двойников объектов транспортной инфраструктуры [1]. Решение этих задач может быть выполнено при создании развитого и взаимосвязанного множества интеллектуальных транспортных систем (ИТС), обеспечивающих заданный уровень мобильности населения, максимизацию показателей использования транспортной инфраструктуры, повышение безопасности и эффективности транспортного процесса, комфорта для работников и пользователей транспорта. Это достигается путем автоматизированного поиска и принятия к реализации

максимально эффективных сценариев управления на основе использования комбинации различных методов управления, оптимизации и машинного обучения.

Опыт создания ИТС позволил выявить общие черты и подходы к решению родственных задач применительно к различным объектам железнодорожного транспорта. Существует множество работ, посвященных созданию интеллектуальных систем, применяемых при решении задач предиктивной аналитики, внедрение которых оказывает значительное влияние на безопасность движения и эффективность использования имеющихся ресурсов.

Выполненный авторами анализ этих работ, а также личный опыт создания методов и средств предиктивной аналитики позволил формулировать цель статьи,

Кулагин Максим Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)), начальник центра искусственного интеллекта Акционерного общества «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»). Область научных интересов: применение технологий искусственного интеллекта при построении систем предиктивной аналитики и видеоаналитики на транспорте, построение языковых моделей. Автор 33 научных работ. Имеет один патент на изобретение.

Сидоренко Валентина Геннадьевна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управление и защита информации» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)), Почетный работник сферы образования Российской Федерации, действительный член Российской академии транспорта и Академии электротехнических наук Российской Федерации. Область научных интересов: внедрение цифровых технологий в управление технологическими процессами и бизнес-процессами планирования, управления и обучения на транспорте, создание интеллектуальных систем управления с целью повышения эффективности автоматизированного управления этими процессами, создание цифровых двойников транспортных систем. Автор 265 научных работ. Имеет один патент на изобретение.

которая заключается в синтезе иерархии моделей предиктивной аналитики, реализуемых для объектов и субъектов, функционирующих в ОАО «РЖД».

Решение задач предиктивной аналитики можно считать частью процессов планирования, если ее результаты должны быть учтены при создании планов (графиков) работ конкретных объектов или частью оперативного управления, если ее результаты получают и применяются в режиме реального времени в ходе управления конкретными объектами.

Авторы считают также значимым показать взаимосвязь трех классов объектов: люди, техника, документы.

Материалы и методы

Основными задачами управления транспортной системой страны и ее составляющими, а также транспортной безопасностью наряду с удовлетворением потребностей заказчиков и развитием производственного потенциала являются предотвращение инцидентов безопасности и минимизация их последствий. Рассмотрим задачи предиктивной аналитики — действенного средства предотвращения инцидентов безопасности и построения соответствующих моделей.

Одним из способов снижения вероятности возникновения различных опасных событий, предотвращения инцидентов, является прогнозирование их возникновения, решение задач предиктивной аналитики с целью выявления предостерегающих состояний или таких состояний, достижение которых повышает риск возникновения опасного события.

Проведенные исследования позволили выявить общие подходы к решению подобных задач применительно к различным классам объектов, оказывающих влияние на функционирование железнодорожного транспорта. Авторами построена иерархия моделей, позволяющая объединить накопленный в этом направлении опыт (рис. 1).

Такие различные родительские классы объектов, как люди, техника и документы, предлагается объединить в единый метакласс и создать метаонтологию, описывающую наиболее общие понятия, которые не зависят от предметных областей. Синтез метаонтологии проводится на основе анализа уже существующих и проверенных временем онтологий предметных областей и прикладных онтологий (онтологий конкретных задач) применительно к железнодорожному транспорту. Исследования показали, что для решения задач предиктивной аналитики во всех случаях используется аналогичная последовательность действий. На метаклассе (надобъектном уровне) она может быть представлена замкнутой системой управления, аналогичной циклу Деминга (рис. 2). При переходе к менее обобщенным уровням моделирования действия в рамках этого цикла конкретизируются и модифицируются с учетом особенностей конкретного объекта. С точки зрения объектно-ориентированного подхода к программированию это соответствует принципам наследования и полиморфизма. Примеры адаптации этого цикла к решению задач прогнозирования совершения нарушений машинистами приведены в работах [2;3].



Рис. 1. Иерархия моделей предиктивной аналитики

Классификация по родительским классам (люди, техника и документы) влияет на выбор словаря, языка описания задач с точки зрения предметно-ориентированного подхода к проектированию (domain-driven design, DDD), что нашло отражение в табл. 1 в строках «Целевая функция», «Примеры признаков», «Примеры управленческих решений». Выполненный авторами анализ работ в области применения цифровых технологий на транспорте нашел отражение в строке «Примеры применения цифровых технологий» и стал фундаментом для построения данной таблицы, проектирование которой велось снизу вверх: от частного к общему.

Различие между такими типами объектов, как «Прогнозируемые» и «Наблюдаемые» заключается в следующем. В отношении «Прогнозируемых» объектов возможно проведение аналитических и предиктивных действий до момента начала их функционирования (выхода в рейс, отправления с конкретной станции) с целью выявления предотказных состояний с последующим учетом полученных прогнозов на

этапе планирования. В отношении «Наблюдаемых» такое предсказание затруднено, так как отсутствует статистика в отношении конкретных объектов и возможно только наблюдение в режиме реального времени и индикация тех состояний, наступление которых повышает вероятность наступления неблагоприятного исхода. Поскольку для таких объектов могут быть определены действия, которые позволяют вывести их в такие состояния, при которых вероятность возникновения инцидента ниже, то решающие такие задачи системы также предлагается отнести к классу систем предиктивной аналитики. Решение задач предиктивной аналитики по отношению к подобным объектам является частью процесса оперативного управления. Этот уровень классификации оказывает влияние на постановку задачи и выбор целевой функции.

Указанные два уровня классификации задают некоторую матричную структуру моделей и могут меняться между собой местами в предложенной иерархии. Это можно проиллюстрировать табл. 2.

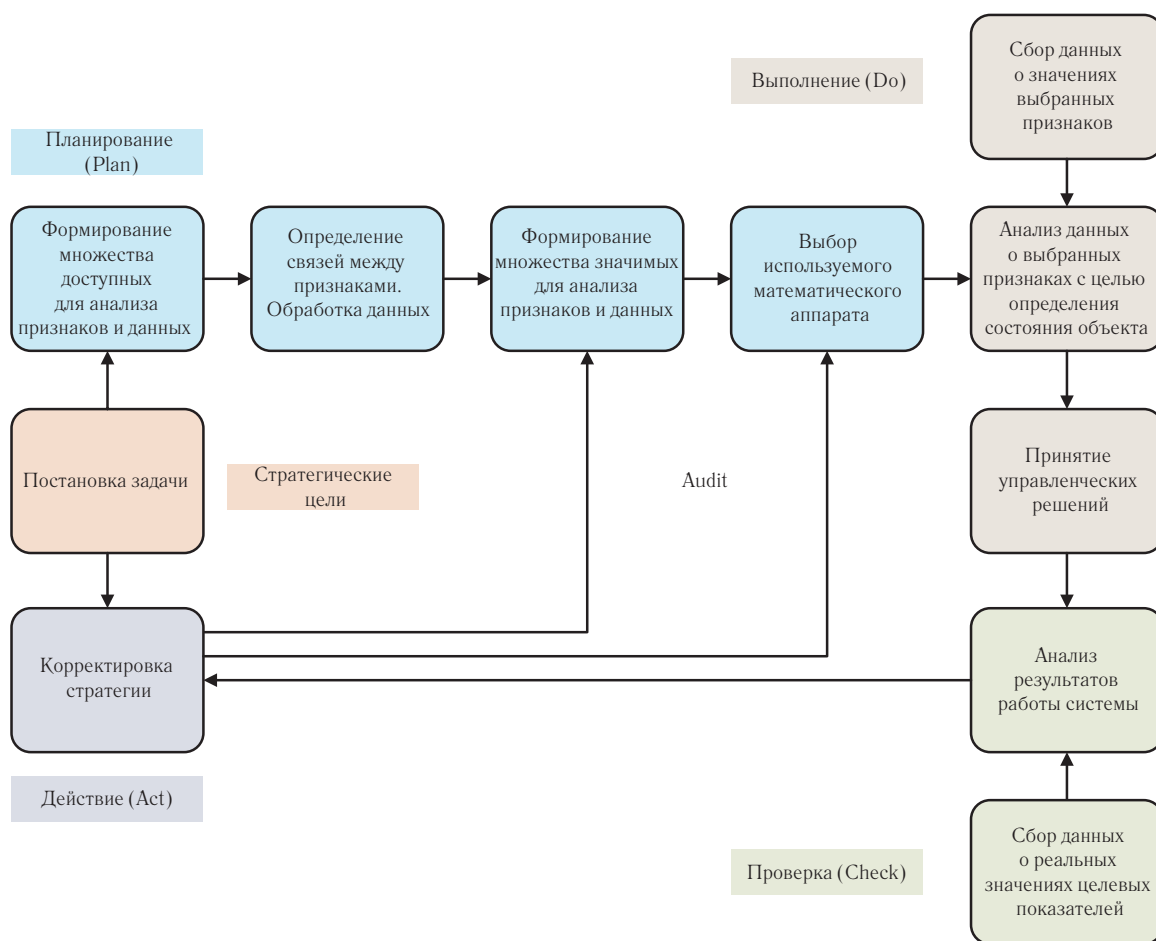


Рис. 2. Обобщенный алгоритм функционирования системы предиктивной аналитики

Таблица 1

Классификация объектов и субъектов предиктивной аналитики

Мета объект						
Класс объекта	Люди		Техника, инфраструктура			Документы
1	2		3			4
Тип объекта Прогнозируемые /Наблюдаемые объекты	Прогнозируемые	Наблюдаемые	Прогнозируемые			Прогнозируемые
Серия объектов внутри типа Род занятий человека/ Тип техники /Тип документа	Машинист	Посторонний человек на путях/ переезде	Сотрудник на путях на рабочем месте		Подвижной состав	«Путевой лист», График испол- ненного движе- ния
			Электровозы	Тепловозы	Мотор- вагонный подвижной состав	
Экземпляры данной серии объ- ектов	Поездки машинистов/ Состояние работы машини- ста на конкретный момент времени	Кадр с человеком на путях/ переездах	Кадр с сотрудниками на рабочем месте	Серия электровозов	Серия тепловозов	Документ задан- ного типа с уни- кальным иден- тификационным номером
				Оборудование на секции	Оборудование на секции	
Целевая функция	Прогнозирование возникновения нарушений в работе	Прогнозирование своевременности освобождения переезда	Наличие спецодежды	Прогнозирование возникновения аномалий в функциональном состоянии тяговых электродвигателей и выхода из строя		Отслеживание соблюдения маршрута и кор- ректировка по мере продвиже- ния груза (со- става), про- гнозирование возможных от- клонений от за- данной точки назначения или запаздываний относительно за- данного срока доставки (при- бытия)

Табл. 1. Продолжение

1	2			3		4	
	Статистика поездок и нарушений	Видео-изображение	Видео-изображение	Результаты измерений электрических и других параметров	Видео-изображение	Информация о выполненном и планируемом маршруте, графике исполнения движения	Информация о соответствующем смарт-контакте
Примеры управленческих решений	Проведение профилактических мероприятий	Включение звуковой сигнализации на переезде	Предупреждение о нарушении техники безопасности	Проведение осмотра/ремонта	Включение звуковой сигнализации на переезде	Проверка и корректировка маршрута (сопоставление оптимизированного графика движения), уведомление заинтересованных лиц	Проверка сохранности груза и правильности документации
Примеры применения цифровых технологий	[2–4]	[5;6]	[7;8]	[9–19]	[20;21]	[1;22;23]	[24]

Таблица 2

Классификация задач предиктивной диагностики

Тип	Родительский класс		
	Люди	Техника, инфраструктура	Документы
Прогнозируемый	Прогнозирование возникновения отклонений поведения от нормы (плана)		
Наблюдаемый	Анализ допустимости нахождения в заданном месте в заданное время в текущем состоянии (наличие спецодежды или содержание документа)		

Схожесть подходов к решению задач предиктивной диагностики заданного типа вне зависимости от родительского класса объекта отражает содержание табл. 3.

Следующий уровень иерархии — классы объектов в зависимости от особенностей их конструкции (тип техники и конкретная серия) или участия в производственном процессе транспортной системы (посторонний человек или работник определенной специальности). Этот уровень классификации определяет множество признаков, доступных для анализа.

В табл. 1 приведены лишь некоторые примеры направлений предиктивной аналитики, которые иллюстрируют предложенную классификацию объектов и иерархию объектов. В табл. 1 даны ссылки на объекты цифровизации железнодорожного транспорта, функционирование которых показало эффективность использования рассматриваемых подходов. Применительно к прогнозированию аномалий в работе и опасных состояний транспортной техники и инфраструктуры известны работы по прогнозированию отказов в системе электроснабжения и путевом хозяйстве, опасных состояний сооружений. Во всех рассмотренных примерах широко применяются методы машинного обучения и анализа временных рядов.

На основе выполненного обобщающего анализа накопленного опыта и выявления общих черт процессов предиктивной аналитики, реализуемых применительно к различным видам ресурсов, возможно

выделение и построение шаблонов проектирования программного обеспечения соответствующих интеллектуальных систем. Одновременно в ходе сбора данных и выполнения экспериментов происходит наполнение баз данных и баз знаний интеллектуальных транспортных систем.

Определенные в работе запросы к системам предиктивной аналитики (см. табл. 2) нацелены на получение положительного эффекта от внедрения соответствующих интеллектуальных систем.

Обсуждение и заключение (общие выводы, область применения)

В статье выполнено обобщение опыта, накопленного в ходе выполненных авторами исследований в части построения интеллектуальных систем предиктивной аналитики на железнодорожном транспорте. Научная новизна полученных в статье результатов заключается в следующем:

- построена иерархия моделей объектов предиктивной аналитики, отражающая выявленные общие и отличительные черты производственных и человеческих ресурсов разных классов с точки зрения задач предиктивной аналитики и управления, что позволило интегрировать результаты практического использования известных авторам интеллектуальных систем предиктивной аналитики;
- выявлены общность требований к системам предиктивной аналитики для ресурсов разных типов и подходов к постановке и решению поставленных

Таблица 3

Подходы к решению задач предиктивной диагностики

Вопрос	Объект		Документальное сопровождение, подверженное опасности
	Работник/Оборудование		
	Несет опасность	Подвержен опасности	
Через какой промежуток времени произойдет опасное событие заданного типа с заданной вероятностью?	Задача регрессии (например, градиентный бустинг)	Задача трекинга (алгоритмы компьютерного зрения)	—
Какова вероятность того, что опасное событие заданного типа произойдет на заданном пользователю горизонте времени?	Задача классификации (например, градиентный бустинг или наивный байесовский классификатор)	—	—
Детектированы ли аномалии у объекта (в поведении человека или работе оборудования)?	Анализ временных рядов (например, автокодировщики)	Задача детектирования и распознавания (алгоритмы компьютерного зрения)	Использование смарт-контрактов

задач, а также особенности этих требований в зависимости от класса анализируемого объекта, что позволит адаптировать накопленную базу знаний методов предиктивной аналитики к особенностям конкретного объекта.

Практическая ценность полученных результатов заключается в том, что эти результаты могут стать основой единой методологии создания и развития разветвленной сети интеллектуальных транспортных систем: позволят создать инструменты, облегчающие разработку подобных систем, задающие их типовую структуру (фреймворк) и множество шаблонов проектирования программного обеспечения таких систем. 

Литература

1. Опыт и перспективы автоматизации управления перевозочным процессом скоростного транспорта городских агломераций / В. Г. Сидоренко, Е. В. Копылова, А. И. Сафронов, М. А. Туманов. - Текст : непосредственный // Автоматика на транспорте. - 2023. - Т. 9, № 1. - С. 33-48.
2. Kulagin, M. Transport workers activities analysis using an artificial neural network / M. Kulagin, V. Sidorenko // International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry. - 2018. - P. 308-316.
3. Kulagin, M. A Recommender Subsystem Construction for Calculating the Probability of a Violation by a Locomotive Driver using Machine-learning Algorithms / M. Kulagin, V. Sidorenko // 2020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). - 2020. - P. 1-5.
4. Кулагин, М. А. Оценка экономической эффективности профилактических мероприятий по сокращению числа нарушений при управлении подвижным составом / М. А. Кулагин, В. Г. Сидоренко. - Текст : непосредственный // Надежность. - 2022. - Т. 22, № 4. - С. 37-44.
5. Ивашевский М. Р. Системы видеонаблюдения на железнодорожном транспорте / М. Р. Ивашевский. - Текст : непосредственный // Мир транспорта. - 2019. - Т. 17, № 5. - С. 298-314.
6. Журавлёва, Л. М. Снижение аварийных рисков с помощью систем интеллектуального видеонаблюдения / Л. М. Журавлёва, А. П. Богачёв, Н. В. Яцкиевский. - Текст : непосредственный // Мир транспорта. - 2017. - № 3. - С. 206-212.
7. Сенников, А. В. Разработка алгоритма детектирования средств индивидуальной защиты на видеоданных / А. В. Сенников, А. Ф. Стефаниди. - Текст : непосредственный // Новые информационные технологии и системы (НИТиС-2021). Пенза, 24-26 ноября 2021 года : сборник научных статей по материалам XVIII Международной научно-технической конференции. - Пенза : Пензенский государственный университет. - С. 150-155.
8. Современный метод детектирования средств индивидуальной защиты для лица с использованием технического зрения и глубокого машинного обучения / Ларичев Д. В. [и др.]. - Текст : непосредственный // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Техническое зрение и распознавание образов» : сборник статей II Всероссийской научно-технической конференции. Том 2. Военный инновационный технополис «ЭРА». Анапа : 22 октября 2020 года. - Анапа : Федеральное государственное автономное учреждение «Военный инновационный технополис «ЭРА»», 2020. - С. 183-189.
9. Kulagin M. A., Sidorenko V. G. Predicting the failure of traction electric motors of electric rolling stock of railways using deep neural networks // Russian Electrical Engineering. 2021. Т. 92, № 9. - С. 515-519.
10. Bodnar B., Ochkasov O., Serdiuk V., Ochkasov M. Signal Analysis of the Armature Rotation Irregularities in the Traction Electric Motor by Unsupervised Anomaly Detection Methods. Transport Means 2022 // Proc. of the 26th Intern. Sci. Conf. (05-07 Oct., 2022, Kaunas, Lithuania). Kaunas, 2022. Pt. II. - P. 761-766.
11. Доманов, К. И. Оценка технического состояния тяговых электрических двигателей электровозов серии 2ЭС6 / К. И. Доманов. - Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции, посвященной Дню российской науки. Омск, 08 февраля 2018 года. - Омск: Омский государственный университет путей сообщения. - С. 338-343.
12. Обухов, А. Д. Организация предиктивного технического обслуживания локомотивов / А. Д. Обухов. - Текст : непосредственный // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. - 2020. - № 4. - С. 86-88.

13. Хромов, И. Ю. Обоснование влияния нарушений режимов эксплуатации на ухудшение технического состояния локомотивов / И. Ю. Хромов. - Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - 2020. - № 2. - С. 62-68.
14. Диагностика тяговых электродвигателей электроподвижного состава с использованием искусственных нейронных сетей / А. С. Космодамианский, Ю. М. Иньков, И. А. Менщиков, С. И. Баташов. - Текст : непосредственный // Электротехника. - 2022, № 9. - С. 26-34.
15. Sidorenko V. G., Kulagin M. A., Mikhailov S. V. Approach to Predicting Failures of Traction Electric Motors // Russian Electrical Engineering. - 2022. - Т. 93, № 9. - С. 592-595.
16. Анализ состояния существующего технологического процесса ремонта тяговых электродвигателей грузовых электровазозов постоянного тока с помощью теории сетевого планирования и управления / В. В. Бублик, О. В. Гателюк, Н. В. Есин [и др.]. - Текст : непосредственный // Транспорт Урала. - 2020. - № 2 (65). - С. 70-74.
17. Проневич, О. Б. Интеллектуальные методы повышения точности прогнозирования редких опасных событий на железнодорожном транспорте / О. Б. Проневич, М. В. Зайцев. - Текст : непосредственный // Надежность. - 2021. - Т. 21. - № 3. - С. 54-64.
18. Гречишников, В. А. Использование квалификационной способности нейронных сетей для определения аварийных режимов в тяговой сети / В. А. Гречишников, Н. Д. Куров, Д. А. Куров. - Текст : непосредственный // Электротехника. - 2020. - № 9. - С. 20-25.
19. Применение методов машинного обучения для прогнозирования опасных отказов объектов железнодорожного пути / И. Б. Шубинский [и др.]. - Текст : непосредственный // Надежность. - 2020. - Т. 20, № 2. - С. 43-53.
20. Альтман, Е. А. Применение алгоритмов компьютерного зрения для детектирования объектов на железнодорожном переезде / Е. А. Альтман, Н. Г. Ананьева, Н. А. Тихонова. - Текст : непосредственный // Известия Транссиба. - 2016. - № 1 (25). - С. 70-76.
21. Вережинская Е. А. Исследование и разработка оптико-электронной системы предотвращения аварийных ситуаций на железнодорожных переездах / Е. А. Вережинская. - Текст : непосредственный // Сборник трудов IV Всероссийского конгресса молодых ученых. Санкт-Петербург, 07-10 апреля 2015 года. - Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2015. - С. 72-76.
22. Подходы к оценке качества планирования и управления движением пассажирских поездов метрополитена / Т. А. Исаков, А. И. Сафронов, В. Г. Сидоренко, М. А. Чжо. - Текст : непосредственный // Автоматика на транспорте. - 2020. - Т. 6, № 1. - С. 38-63.
23. Baranov L. A., Balakina E. P., Safronov A. I., Sidorenko V. G. Minimization of energy consumption for urban rapid-transit traction // Russian Electrical Engineering. - 2021. - Т. 92, № 9. - С. 492-498. - DOI: 10.3-103/S1068371221090030.
24. Харин О. В., Хомяков С. В., Кулагин М. А., Идиатулин Р. Ф., Зайнуллин С. Ф. Автоматизированная система «Сервис мониторинга смарт-контрактов грузовых перевозок на платформе Распределенный реестр данных». Очередь 2020 г.» (РРД ГП. Очередь 2020) Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 202-2614877, 28.03.2022. Заявка № 2022614021 от 21.03.2022.