

О ВЫБОРЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛИГОННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

ДОЛГИЙ Александр Игоревич, канд. техн. наук, генеральный директор; e-mail: a.dolgiy@vniias.ru

РОЗЕНБЕРГ Ефим Наумович, д-р техн. наук, первый заместитель генерального директора; e-mail: info@vniias.ru

ОЛЬШАНСКИЙ Алексей Михайлович, канд. техн. наук, Центр математического, компьютерного моделирования и когнитивных исследований; e-mail: a.olshanskiy@vniias.ru

ОЗЕРОВ Алексей Валерьевич, Международное управление — Центр управления интеллектуальной собственностью; e-mail: a.ozеров@vniias.ru

АО «НИИАС», Москва

Статья посвящена рассмотрению некоторых аспектов обеспечения управления перевозочным процессом на магистральном железнодорожном транспорте в условиях роста масштабов внедрения цифровых технологий. Несмотря на высокий уровень автоматизации сбора данных и рутинных операций, ключевые решения при отказах и нештатных ситуациях по-прежнему зависят от опыта диспетчера, а универсальные модели для таких случаев отсутствуют. В статье рассмотрены тренды развития центров управления перевозками (облачные вычисления, адаптивное планирование с применением искусственного интеллекта, интеграция систем), выявлена проблема недостаточной формализации управления при отказах на крупных полигонах, предложена общая модель оценки состояний в ситуации реагирования на отказы, рассмотрена роль информационного временного резерва при восстановлении полигонных систем управления.

Ключевые слова: граф событий; искусственные нейронные сети; марковская модель; перевозочный процесс; полигон управления; центр управления перевозками; железнодорожная автоматика и телемеханика.

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-303-312

▼ Введение

Современная система управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте характеризуется фрагментарной автоматизацией цикла управления, при которой ключевые функции выбора и принятия управляющего решения по-прежнему остаются за диспетчером и зависят от его личного опыта и не до конца формализованных знаний (эвристических правил).

Одновременно с этим присутствует отчетливый тренд на укрупнение диспетчерских участков управления и переход на полигонные модели управления. Так, если в начале XX в. протяженность диспетчерского участка под управлением одного диспетчера составляла от 30 до 50 км, то в начале XXI в. она выросла до 250–300 км и продолжает увеличиваться.

Современная концепция центров управления перевозками (ЦУП) на железных дорогах

сложилась в конце 1990-х — начале 2000-х гг. в связи с масштабным переводом железнодорожных систем железнодорожной автоматики и телемеханики на микропроцессорную технику, массовым внедрением автоматизированных рабочих мест на базе высокопроизводительных персональных компьютеров и строительством сетей передачи данных с высокой пропускной способностью на основе волоконно-оптических линий. Последнее обеспечило принципиально иной уровень автоматизации сбора и передачи информации и, как следствие, позволило добиться значительно большей централизации диспетчерского контроля и управления с концентрацией оперативного диспетчерского персонала в дорожных (региональных) центрах, объединяющих диспетчерские участки в рамках одной или нескольких дорог. Эволюция центров управления на железнодорожном транспорте подробно

изложена в [1], где новое целевое состояние характеризуется целым рядом отличительных черт, среди которых:

- применение облачного хранения и обработки данных;
- внедрение адаптивного планирования перевозочного процесса с применением подходов, включающих элементы машинного обучения и цифровых двойников;
- единая мультиагентная программно-аппаратная платформа с тесной программной интеграцией модулей планирования, построения, ведения и корректировки графика движения поездов с учетом конфликтов и сбойных ситуаций, управления тяговыми ресурсами, локомотивными бригадами, инфраструктурой и т. д.;
- реализация режима оперативного управления за счет интеграции с системами автоматической установки маршрутов;
- интеграция с бортовыми локомотивными средствами автоведения и системами самодиагностики подвижного состава.

Вычислительные возможности современных программно-аппаратных средств позволяют оперировать гораздо большим объемом данных с гораздо большей скоростью и автоматизировать все большее количество операций диспетчерского управления, относящихся к его основным задачам. Последние включают оперативный контроль, принятие оперативных и упреждающих решений по организации перевозочной деятельности на сети железных дорог, предупреждение и решение конфликтных ситуаций, координацию работ по устранению нештатных ситуаций, взаимодействие со смежными железнодорожными администрациями и другими видами транспорта, планирование и анализ показателей перевозочного процесса.

Следует отметить, что при активном внедрении режима автоматической установки маршрутов и беспилотного вождения поездов все большая часть функций ответственной системы, связанной с безопасностью движения поездов, может переноситься в ЦУП. В связи с этим может возникать вопрос о необходимости обеспечения соответствующего уровня функциональной безопасности управляющего программно-аппаратного комплекса.

Анализ функциональной безопасности таких комплексов — отдельное, потенциально перспективное направление исследований [2]. При формировании концепции функциональной безопасности данной сложной системы управления, объединяющей в своем составе большое количество подсистем, должны учитываться все риски, связанные с виртуализацией системы управления и распределением уровней полноты обеспечения безопасности между подсистемами [3].

Между тем оперативному персоналу приходится принимать решения в отношении ниток графика движения поездов и при отказах и предотказных состояниях транспортной инфраструктуры в рамках протяженных полигонов управления. Для таких случаев в настоящее время общая модель ситуации не выработана, управление сводится к выполнению последовательности регламентных действий, причем последствия принятого управляющего воздействия существенно отличаются в зависимости от того, в каком порядке и насколько качественно были реализованы необходимые шаги, а также в зависимости от технического оснащения разных участков железных дорог, от опыта диспетчеров и от сложившейся поездной обстановки.

Таким образом, проблема выстраивания системы достаточного по временным, технологическим и экономическим критериям управления работой полигонов в условиях действия сценарных возмущений и отказных ситуаций сводится к учету не только надежности аппаратных и программных средств, но и к анализу надежности управленческого контура, включая процесс выбора альтернативы и реализации управленческих решений.

Под управленческими решениями в данном случае понимается набор дискретных команд на выполнение вполне конкретных технологических операций.

Целью настоящей статьи является построение рациональной стратегии при восстановлении полигонных систем управления и предложение сценариев к решению задачи управления состоянием сложных систем на транспорте с точки зрения ведения эксплуатационной работы.

В отличие от задач по анализу исправности различных систем, вопросы оценки рисков и последствий для области управления движением с позиций марковских и полумарковских цепей рассмотрены в недостаточной степени.

1. Базовая модель оценки состояний

В рамках данного подхода была разработана одна из моделей сценариев угроз для подвижного состава, в которой предложен базовый набор эксплуатационных сценариев типов «известные безопасные» и «известные небезопасные», которые должны учитываться при построении модели безопасности с формированием общей библиотеки сценариев [4].

Недостатком предложенного подхода можно назвать то, что такая модель преимущественно ориентирована на замкнутые полигоны типа Московского центрального кольца с ограниченным количеством задействованных элементов (главным образом подвижного состава).

Для формализации стандартного управления и минимизации технико-экономических последствий (в частности, задержек поездов) требуется вывести общую модель оценки состояний в ситуации реагирования на отказы. Такая модель впоследствии ляжет в основу типовых рекомендаций и программных решений для реагирования на отклонения в работе полигонов и направлений.

При формировании такой модели следует принять ряд допущений:

1. Основным измерителем затрат на реагирование становится время в натуральном (час) или условно-натуральном статистическом формате (поездо-час).

2. В качестве типовой реакции на случившийся отказ или появление неблагоприятного состояния в системе выступает определенный сценарий реагирования (заранее просчитанный или требующий своего расчета).

3. С ростом линейных размеров полигона и его насыщения объектами управления существует некоторая общая функция временных затрат вида:

$$Z(C, L) = \frac{t(C, L)}{C} + b(C, L), \quad (1)$$

где $Z(C, L)$ — функция затрат на реагирование для C состояний в системе и L км полигона; $t(C, L)$ — некоторый первоначальный лимит времени реагирования; $b(C, L)$ — функция удельной временной сложности на 1 сценарий.

Для элементарной системы, в которой все сценарии заранее просчитаны, доля второго компонента (1) в пределе равна 0, и затраты на принятие решений и корректировку полностью определяются заданными сценариями реагирования. Очевидно, что с ростом сложности полигона растут и затраты на принятие решения и корректировку работы. Исходим из того, что существует рациональное число сценариев C^* , при котором разработка детальных сценариев с номерами, превышающими C^* , становится избыточной.

Для каждого из семейств функций $b(C, L)$, $t(C, L)$ данное количество можно определить из условия:

$$C^* : \frac{dZ(C, L)}{dC} = 0. \quad (2)$$

В случае $b(C, L) = \text{const}$ мы приходим к формуле Вильсона, что в общем случае не помогает в решении задачи, поскольку подлежит уточнению конкретный характер функций $b(C, L)$, $t(C, L)$.

Дальнейшие выкладки будем производить в предположении о знании рационального количества сценариев C^* .

Рассмотрим элементарный граф системы (рис. 1) с шестью состояниями.

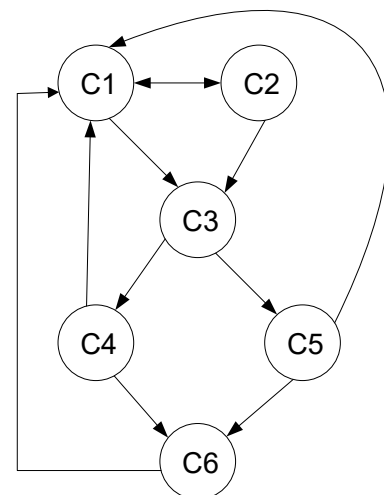


Рис. 1. Элементарный граф состояний системы

Данный граф включает в себя состояния:

- С1. Все компоненты (поезда) полигона исправны и работают штатно в составе системы, поезд движется по графику.
- С2. Поезд исправен, но движется с отставанием от графика по внешним причинам.
- С3. Какой-либо компонент поезда неисправен, при этом информация об этом в ЦУП отсутствует.
- С4. Какой-либо компонент поезда неисправен, в ЦУП об этом известно, решение ситуации нетиповое, может повлечь задержку на его поиск.
- С5. Какой-либо компонент поезда неисправен, в ЦУП об этом известно, сотрудник применяет типовое решение первой категории (регулировка, мелкий ремонт через машиниста-оператора).
- С6. Какой-либо компонент поезда неисправен, в ЦУП об этом известно, типовое решение второй категории — съём поезда по невозможности устранения неисправности. В этом случае также возможно возникновение поиска решения.

В графе на рис. 1 предполагается, что возможны задержки в каждом из состояний, и это будет отражено в модели.

Природа состояний С4 и С6, а также С2 позволяет предположить два варианта развития ситуации.

2. Варианты (сценарии) решения задачи нахождения состояний системы

Вариант 1. Процессы в системе можно укрупненно представить как марковские и применить аппарат марковских случайных процессов [5].

Вариант 2. Процессы, связанные с указанными состояниями, немарковские, в таком случае возможно применение обучения с подкреплением для поиска рациональной стратегии исправления ситуации.

Рассмотрим подробнее данные варианты.

Вариант 1. Марковская модель. В этом случае процессы в системе могут быть описаны по примеру процессов в крупномасштабных системах [6].

Матрица переходов между состояниями, отраженными на рис. 1, может быть записана как:

$$\begin{pmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{33} & \lambda_{34} & \lambda_{35} & 0 \\ \lambda_{41} & 0 & 0 & \lambda_{44} & 0 & \lambda_{46} \\ \lambda_{51} & 0 & 0 & 0 & \lambda_{55} & \lambda_{56} \\ \lambda_{61} & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{66} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Предположим, что потоки переходов из состояния в состояние являются пуассоновскими с фиксированными интенсивностями перехода λ_{ij} из состояния с номером i в состояние с номером j . Такое предположение допустимо в силу того, что на рассматриваемом полигоне происходит значительное число независимых событий с различными техническими системами [7, 8].

В этом случае динамика вероятностей нахождения системы в каждом из состояний определяется системой дифференциальных уравнений А. Н. Колмогорова (4) при задании начальных значений вероятностей $(P_0(0), \dots, P_6(0))$ с соблюдением условия нормировки

$$\sum_{i=1}^6 P_i(t) = 1 :$$

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -\lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{41}P_4(t) + \\ + \lambda_{51}P_5(t) + \lambda_{61}P_6(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = -\lambda_{21}P_2(t) - \lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{12}P_1(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = -\lambda_{34}P_3(t) - \lambda_{35}P_3(t) + \lambda_{13}P_1(t) + \\ + \lambda_{23}P_2(t), \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = -\lambda_{41}P_4(t) - \lambda_{46}P_4(t) + \lambda_{34}P_3(t), \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = -\lambda_{51}P_5(t) - \lambda_{56}P_5(t), \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = -\lambda_{61}P_6(t) + \lambda_{46}P_4(t) + \lambda_{56}P_5(t). \end{cases} \quad (4)$$

При составлении системы дифференциальных уравнений (4) применялось известное мнемоническое правило составления уравнений А. Н. Колмогорова [6].

Финальные вероятности нахождения в каждом из шести состояний по приведенному на

рис. 1 графу можно определить, решая систему уравнений (5) с учетом условия нормировки:

$$\begin{cases} 0 = -\lambda_{12}P_1(t) - \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{41}P_4(t) + \\ + \lambda_{51}P_5(t) + \lambda_{61}P_6(t), \\ 0 = -\lambda_{21}P_2(t) - \lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{12}P_1(t), \\ 0 = -\lambda_{34}P_3(t) - \lambda_{35}P_3(t) + \lambda_{13}P_1(t) + \lambda_{23}P_2(t), \\ 0 = -\lambda_{41}P_4(t) - \lambda_{46}P_4(t) + \lambda_{34}P_3(t), \\ 0 = -\lambda_{51}P_5(t) - \lambda_{56}P_5(t), \\ 0 = -\lambda_{61}P_6(t) + \lambda_{46}P_4(t) + \lambda_{56}P_5(t). \end{cases} \quad (5)$$

Система уравнений (5) может быть решена любым методом решения систем линейных алгебраических уравнений.

Отметим, что значения интенсивностей перехода в матрице (3) определяются исходя из практики работы железнодорожных систем с похожими характеристиками, паспортных характеристик использованных решений и других источников. В качестве таких источников могут выступать внедренные системы КАСАТ и КАСАНТ (для полигонов Московского центрального кольца и Московских центральных диаметров).

При этом в случае получения по итогам решения (5) преобладания вероятности заданного финального состояния над остальными состояниями требуется разработать стратегию по резервированию системы в этом состоянии или по отражению соответствующих решений в составе некоторого информационного запаса, представляющего собой набор готовых действий для оперативного персонала.

Вариант 2. Процессы, связанные с указанными состояниями, немарковские.

В этом случае прибегнем к стратегии поиска оптимальной схемы действия с помощью Q -обучения или принципа оптимальности Р. Беллмана. Согласно этому принципу, независимо от текущего состояния системы и принимаемого на данном шаге решения оптимальная стратегия для перевода системы в исправное состояние обладает свойством: оставшаяся часть пути к исправному состоянию также должна быть оптимальной по тому же критерию.

Для каждого перехода из состояния в состояние в соответствии с матрицей (3) задается

некоторая стоимость перехода $c_{ij} = \gamma^n f(i, g_{ij}, j)$, где i, j — номера состояний, g_{ij} — некоторое действие над системой, которое побудило перейти из состояния i в состояние j , f — некоторая заданная функция (аналитическая или табличная), γ^n — дисконтный множитель, зависящий от номера шага n и принимающий значения от 0 (система не обладает свойством предвидения и видит только настоящее) до 1 (система полностью ориентирована на будущие значения и не придает значения настоящим затратам).

С позиций содержания постановки задачи функция затрат может быть временной, временно-стоимостной, учитывать технологические операции и задержки, а также возможные потери провозной способности при переходе системы по графу состояний (рис. 1).

Стратегия $\pi = \{\mu_0, \mu_1, \mu_2, \dots\}$ представляет собой последовательность действий для диспетчера ЦУП, при котором $\exists \mu_i : C_i \rightarrow G_n = f$ для моментов времени $n = 0, 1, 2, \dots$, то есть это набор функций отображения состояний системы в действия, которые обладают соответствующей стоимостью c_{ij} , введенной выше.

Если функции μ_i на каждом из n шагов принадлежат множеству A допустимых управлений на данном шаге, то такая стратегия π называется допустимой стратегией.

Очевидно, что поиск должен производиться только на подмножестве допустимых стратегий, которое для диспетчера определяется исходя из особенностей работы систем железнодорожной автоматики линии, эксплуатационной нагрузки, уровня связи и других внешних параметров.

Введем в рассмотрение функционал (6) вида:

$$J^\pi(i) = M \left[\sum_{n=0}^{\infty} \gamma^n f(C_n, \mu_n((C_n, C_{n+1}) | C_0 = i)) \right] \rightarrow \min. \quad (6)$$

Данный функционал определяет математическое ожидание затрат при переходе по стратегии π из начального состояния i для графа состояния системы C_n и дискретного бесконечного времени $k = 0 \dots n$ при выборе функций

перехода μ_n . Функционал (6) необходимо минимизировать.

Таким образом, в процессе восстановления железнодорожной линии поставлена задача построения квазистационарной шаговой стратегии (так как в общем случае мы не гарантируем неизменности самих состояний и функций μ_n во времени) перехода к исправному состоянию. Данная задача, строго говоря, приводит к системе из N уравнений, в котором для каждого состояния приходится одна переменная стоимости [9].

Скажем несколько слов о решении задачи (6). Оно может быть получено с помощью итераций по стратегиям, когда на первом шаге вычисляются оценки стоимости переходов в составе некоторой стратегии π , а на втором шаге полученная функция стоимости улучшается (шаги повторяются до достижения требуемой области значений функции стоимости), становясь жадной по отношению к функции на первом шаге, или с помощью итерации по значениям, когда исходно выбирается некоторая оценка выражения (6) для всех состояний в стратегии и для N уравнений Беллмана, а далее происходит минимизация функций J^1, \dots, J^N , после чего на множестве данных минимальных функций выстраивается жадная стратегия по стоимости или по Q -фактору.

Q -фактор представляет собой обобщенную сумму стоимостей текущего перехода из состояния i в состояние j и сумму дисконтированных стоимостей всех дальнейших переходов μ_i в состояния для выбранной стратегии.

В целях сокращения временных и вычислительных затрат на решение задачи (6) возможно также перейти к нейродинамическому программированию, предоставив поиск субоптимального решения задачи (6) искусственной нейронной сети. Это также может быть полезным и потому, что знание значений в матрице переходов может отсутствовать или быть неполным, в особенности при принятии решения о применении технологических решений, приводящих к новому состоянию линии. Возможны также дополнительные факторы в виде элементов теоретико-игровых решений [10] — например, когда контроль состояния ведут два и более лица, принимающих решения

на разных иерархических уровнях (станция, дорога или представитель хозяйства перевозок и аппарата ревизоров по безопасности движения поездов). Очевидно, что в такой ситуации значения стоимостей перехода изменяются во времени и по величине.

Использование данных подходов возможно не только для задачи определения рациональной схемы поведения при эксплуатации сложных технологических систем на транспорте, но и для решения задач построения адаптивного плана формирования поездов и маршрутов.

3. Информационный запас как инструмент стратегии управления

Отдельно рассмотрим аспекты, описанные выше для моделирования процессов восстановления систем, с позиций теории надежности восстанавливаемых систем [11]. В отличие от систем, в которых применяются аппаратные запасы и принадлежности (ЗИП) как способ восстановления работоспособности, в системах управления работой ЦУП в качестве аналогов технических ЗИП выступают наборы дискретных команд — «информационный ЗИП» (*авторский термин*), отработанные ранее на тестовых полигонах или на практике.

Воспользуемся понятием временного резерва — отрезка времени, в течение которого может быть передан набор дискретных управляющих команд в области изменения технологического состояния анализируемой железнодорожной системы.

С увеличением сложности ЦУП и управляемой системы должна пропорционально расти и сложность применяемых управлений. Таким образом, естественно в качестве меры сложности применить индекс информационного разнообразия с применением, например, энтропийного подхода [12].

Рассматриваемая система классифицируется сложным образом, попадая в ряде случаев в несколько подмножеств для разного режима работы:

1. По степени иерархичности: система иерархическая, включающая в себя ЦУП, районы управления, поезда на диспетчерском участке.
2. По типу структуры информационного временного резерва: многоуровневая, так как

возможные команды могут затрагивать как поезда, так и районы управления, одновременно с этим район управления также обладает набором информационно-управляющих воздействий.

3. По типу подключения: система без корректировок в процессе действия (в штатном режиме работы), с корректировками в случае нехватки информационного запаса и началом создания очередей заявок (поездов).

4. По стратегии пополнения запасов: система непрерывного действия, с периодическим экстренным пополнением (пополнение фактически происходит в момент чрезвычайной ситуации).

5. По расчетам системы массового обслуживания: в устойчивом режиме интенсивность запросов совпадает с «потреблением» управляющих команд/ресурсов, в период превышения наблюдаются растущие задержки по времени в процессе оказания управляющих воздействий.

6. По степени инерции реагирования: в штатном режиме система с почти мгновенной реакцией, в нештатном режиме при наличии в составе «информационного ЗИП» той или иной отработанной команды степень безынерционности сохраняется.

7. По типу модели надежности (по степени доверия) система может относиться к марковским системам, в которых реализуется описанное выше состояние Сб — «Какой-либо компонент поезда неисправен, в ЦУП об этом известно; типовое решение второй категории — съём поезда по невозможности устранения неисправности».

Однако итоговое влияние на режим работы полигона определяется не только интенсивностями отказа и восстановления управленческого контура системы, но и количеством сорванных с графика и задержанных поездов.

Введем некоторые соображения по оценке численных характеристик систем с временным резервом, который выступает в виде защитных элементов в контуре принятия решений.

Известно, что применительно к обеспечению должной функциональной надежности систем управления структурное резервирование как способ повышения надежности не применяется, так как недочеты и ошибки в процессе выработки

управленческого решения нельзя устранить переключением на некоторый резерв, если данные ошибки связаны с неполнотой или ошибками во входных данных, случайными событиями и пр. Подобные ситуации чаще всего корректируются с помощью обеспечения информационной избыточности. Обеспечение такой избыточности достигается использованием временной, информационной, структурной избыточности в управляющем контуре, что корреспондирует с идеей максимизации информационного разнообразия управленческих решений [13].

Предлагаемый авторами информационный временной резерв обеспечивает адаптацию системы «ЦУП — линия» к частичным отказам. В случае, если мы работаем с ресурсом времени и минимизируем допустимое время перерыва в работе информационно-управляющих систем, можно записать, что:

$$P_{\text{инфЗИП}}(t < T_{\text{тг}}) = \int_0^{T_{\text{тг}}} f(t) dt, \quad (7)$$

где t — время перерыва;

$T_{\text{тг}}$ — максимально допустимое время перерыва;

$f(t)$ — плотность распределения случайного времени в системе.

Оценим вероятность того, что в системе в процессе эксплуатации функциональные отказы не возникли (вероятность p_1) либо будут нейтрализованы с помощью временного резерва, для чего введем событие A с вероятностью:

$$P(A) = p_{\text{БО}} p_1 + (1 - p_{\text{БО}}) p_1 P_{\text{инфЗИП}}, \quad (8)$$

где $p_{\text{БО}}$ — вероятность безотказного функционирования системы управления;

$P_{\text{инфЗИП}}$ — вероятность того, что решение из временного резерва нейтрализовало функциональный отказ.

Формула (8) определяет в итоге вероятность корректного выполнения задачи в управляющей системе ЦУП с наличием информационного временного резерва, при которой аппаратные средства защиты не привлекаются для решения задачи стабилизации системы параллельно с основными алгоритмами восстановления работоспособности.

В качестве дальнейшего исследования вопроса рассмотрим три варианта функционирования системы управления с информационным запасом:

B_1 — плановый режим,

B_2 — неплановый режим,

$\hat{A}_3 \subset \hat{A}_1$ — неплановый режим, функционирующий по алгоритму, содержащемуся в «информационном ЗИП».

Введем событие B — «функционирование системы».

Тогда

$$P(B) = P_{B_1} + P_{B_2} - P_{B_1}P_{B_2}, \quad (9)$$

а вероятность попадания в область, покрытую информационным запасом, оценивается как $P_3 = P_{B_1}P_{B_2}$.

При этом определение соответствующих вероятностей их соотношения (9) требует оценки потоков по И. Б. Шубинскому [14]. Оценку таких потоков логично провести через величины, обратные времени принятия решений. Время принятия решений в системе подчиняется следующему строгому двойному неравенству:

$$t_{\text{управл}} < t_{\text{управл}} + t_{\text{рз}} < t_{\text{чрезв}}, \quad (10)$$

где $t_{\text{управл}}$ — время принятия решений в системе при работе в плановом режиме;

$t_{\text{рз}}$ — время активации управления из ассортимента информационного запаса;

$t_{\text{чрезв}}$ — время принятия решений при отсутствии готовых вариантов и необходимости выработать решение в режиме реального времени.

Между вероятностью адаптации системы управления к функциональным отказам с помощью временного резерва и вероятностями возникновения функциональных отказов существует определенная зависимость: «при сравнительно небольшом объеме информационного временного резерва эффективность защиты наибольшая, по мере роста объема (и разнообразия) временного резерва увеличивается вероятность успешной адаптации».

Однако приведенный вывод носит общий характер: как именно изменится соотношение количества устраняемых отказов средствами отказоустойчивости и функциональных

отказов при конкретном топологическом рисунке ЦУП и полигона — заранее неясно. Это требует проведения, как минимум, имитационного моделирования работы полигона с учетом соответствующих вероятностных характеристик элементов системы управления.

Кроме того, в зависимости от категории ЦУП и прилегающих линий, точности графика и скорости движения поездов должна быть принята соответствующая пороговая величина допустимой ненадежности средств систем управления [15], а также допустимого времени на передачу дискретных управляющих команд.

Основываясь на теории применения средств защиты в традиционных системах, кратко остановимся на граничных условиях работы с информационным временным резервом. Базовым условием можно считать выполнение принципа необходимого разнообразия У. Эшби [10]. Для рассматриваемой ситуации это означает, что уровень разнообразия вариантов, заложенных в составе информационного временного резерва, должен быть не ниже уровня разнообразия защищаемой системы управления.

Кроме того, очевидно, что объем решений (кода, процедур) по обеспечению устойчивости к функциональным отказам — а с точки зрения колмогоровской сложности систем управления, объем информационного временного резерва (включая загрузку управленческих вертикалей) — не должен превышать объема (и сложности) самой системы управления, применяемой в ЦУП [16].

Чем выше сложность и разнообразие состояний, в которых может находиться управляемая система, тем больший объем управленческих и технических решений следует включать в состав комбинации решений в рамках временного резерва.

Заключение

Таким образом, в статье рассмотрены ключевые аспекты управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте в условиях распределенных объектов управления с позиций восстановления нормальной работоспособности системы с учетом роста уровня автоматизации процессов и укрупнения диспетчерских участков.

Выполнена начальная формализация задачи оценки состояния поезда на линии при отказах на основе марковских и полумарковских моделей, а также методов обучения с подкреплением для создания различных стратегий восстановления после отказов. Предложена модель оценки состояний системы с учетом времени реагирования, сложности сценариев и экономической эффективности их применения. Впервые введено понятие информационного временного резерва, который позволяет снизить зависимость от человеческого фактора и ускорить восстановление работоспособности системы за счет заранее подготовленных управленческих решений. Проведен анализ вероятностных характеристик системы «ЦУП — полигон» с позиций теории надежности.

С учетом описанных в статье начальных положений представляется перспективным проведение дальнейших исследований по следующим направлениям:

- Углубленный анализ немарковских процессов в управлении перевозками с применением методов искусственного интеллекта.
- Разработка адаптивных алгоритмов для динамического пополнения информационного временного резерва на основе данных о реальных сбоях и примененном корректирующем воздействии.
- Имитационное моделирование различных сценариев отказов для оценки эффективности предлагаемых стратегий.

Разработка и реализация предложенных подходов позволит повысить устойчивость и безопасность управления железнодорожными перевозками, сократить задержки поездов и оптимизировать затраты на эксплуатацию инфраструктуры.

Дальнейшее развитие исследований в этом направлении будет способствовать созданию систем диспетчерского управления железнодорожным транспортом с максимально высокой степенью автоматизации функций выбора рационального решения при самых различных, в том числе нештатных, сценариях перевозочного процесса, включая формирование планов действий с учетом искусственного интеллекта. ▲

Список источников

1. Розенберг Е. Н. Центры управления перевозками: эволюция и целевое состояние / Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров, Н. О. Бересток // Наука и технологии железных дорог. — 2021. — Т. 5. — № 3(19). — С. 9–14.
2. Озеров А. В. Технологии обеспечения функциональной безопасности и надежности железнодорожных систем управления / А. В. Озеров, И. Б. Шубинский // Комплексное взаимодействие лингвистических и выпускающих кафедр в техническом вузе: международная научно-практическая конференция, посвященная 125-летию РУТ (МИИТ), Москва, 27 мая 2021 года. — М.: Российский университет транспорта, 2021. — С. 259–264.
3. Долгий А. И. Облачные технологии для ответственных систем железнодорожного транспорта / А. И. Долгий, Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров // Железнодорожный транспорт. — 2023. — № 11. — С. 20–25.
4. Озеров А. В. О построении модели безопасности сложной автоматической системы транспортного обслуживания / А. В. Озеров, А. М. Ольшанский // Надежность. — 2021. — Т. 21. — № 2. — С. 31–37. — DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-2-31-37.
5. Шубинский И. Б. Структурная надежность информационных систем: методы анализа / И. Б. Шубинский. — М.: ООО «Журнал “Надежность”», 2012. — 216 с. — DOI: 10.21683/1729-2646-2013-0-2-145.
6. Марон А. И. Оптимизация управления процессами внедрения и обслуживания крупномасштабных информационных систем / А. И. Марон. — М.: ННРИУиЭ, 2008. — 80 с.
7. Хейт Ф. Математическая теория транспортных потоков / Ф. Хейт. — М.: Мир, 1966. — 288 с.
8. Breiman L. The Poisson tendency in traffic distribution / L. Breiman // Annals of Mathematical Statistics. — 1963. — Vol. 34. — Iss. 1. — Pp. 308–311.
9. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. — 2-е изд. — М.: Вильямс, 2006. — 1184 с.
10. Ольшанский А. М. Некоторые аспекты функционирования крупных вертикально интегрированных систем / А. М. Ольшанский, Н. В. Кондрахина // Железнодорожный транспорт на современном этапе. 70 лет аспирантуре ОАО ВНИИЖТ: сборник трудов ученых ОАО ВНИИЖТ / под ред. Б. М. Лапидуса, Г. В. Гогричиани. — М.: ОАО «ВНИИЖТ», 2014. — С. 52–56. — DOI: 10.30917/ATTPRINT-2018-4.
11. Черкесов Г. Н. Проблема ЗИП и задача формирования нового раздела теории надежности восстанавливаемых систем / Г. Н. Черкесов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2011. — № 6-1. — С. 136–153. — DOI: 10.21869/2223-1560-2021-25-4-201-219.
12. Шень А. Х. Колмогоровская сложность и математическая случайность / А. Х. Шень, Н. К. Верещагин, В. А. Успенский. — М.: МЦНМО, 2014. — 576 с.
13. Шубинский И. Б. Адаптивная гарантоспособность информационных систем управления / И. Б. Шубинский, А. М. Замышляев, Л. Р. Папич // Надежность. — 2018. — Т. 18. — № 4. — С. 3–9. — DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-4-3-9.

14. Шубинский И. Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза. — М.: Журнал «Надежность», 2016. — 545 с. — DOI: 10.21683/1729-2646-2015-0-4-97-101.
15. Шубинский И. Б. Функциональная надежность программного обеспечения информационных систем /

- И. Б. Шубинский, А. М. Замышляев, Г. Б. Прошин // Надежность. — 2011. — № 3(38). — С. 72–81.
16. Шубинский И. Б. Функциональная безопасность систем управления на железнодорожном транспорте / И. Б. Шубинский, Е. Н. Розенберг. — Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. — 320 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH, 2025, Vol. 11, No. 4, pp. 303–312

DOI: 10.20295/2412-9186-2025-11-04-303-312

Rational Strategy for the Rehabilitation of Polygonal Automated Control Systems

Information about authors

Dolgij A. I., PhD in Engineering, Director General. E-mail: a.dolgij@vniias.ru

Rozenberg E. N., Doctor of Engineering, First Deputy Director General.

E-mail: info@vniias.ru

Olshanskiy A. M., PhD in Engineering, Center for Mathematical, Computer Modelling and Cognitive Research. E-mail: a.olshanskiy@vniias.ru

Ozerov A. V., International Department — Intellectual Property Management Centre. E-mail: a.ozerov@vniias.ru

Abstract: This paper focuses on the challenges associated with managing the transportation processes within contemporary railways in the context of growing integration of digital technologies. Despite a significant degree of automation in data collection and routine operations, the responsibility for making critical decisions during failures and non-standard situations continues to rely on the expertise of dispatchers, as there are currently no universal models to guide these scenarios. The study explores emerging trends in the development of railway operation control centres, including advancements in cloud computing, AI-driven adaptive planning, and system integration. It also highlights the lack of formalized failure management protocols in large railway networks and proposes a comprehensive assessment model for responding to failure scenarios, ranging from normal operations to various forms of disruptions and delays. Additionally, the paper investigates the concept of information time reserve in the rehabilitation of railway operation control systems.

Keywords: event graph; artificial neural networks; Markov model; transportation process; operating domain; railway operation centre; automation and remote control on railways.

References

1. Rozenberg E. N., Ozerov A. V., Berestok N. O. Tsentry upravleniya perevozkami: evolyutsiya i tselovoe sostoyanie [Centers of transportation management: evolution and target state]. *Nauka i tekhnologii zheleznykh dorog* [Science and technologies of railways]. 2021, vol. 5, Iss. 3(19), pp. 9–14. (In Russian)
2. Ozerov A. V., Shubinskiy I. B. Tekhnologii obespecheniya funktsional'noy bezopasnosti i nadezhnosti zheleznodorozhnykh sistem upravleniya [Technologies for ensuring functional safety and reliability of railway control systems]. *Kompleksnoe vzaimodeystvie lingvisticheskikh i vypuskayushchikh kafedr v tekhnicheskoy vuzе: mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya, posvyashchennaya 125-letiyu RUT (MIIT), Moskva, 27 maya 2021 goda* [Complex interaction of linguistic and graduating departments in a technical university: international scientific and practical conference dedicated to the 125th anniversary of RUT (MIIT), Moscow, May 27, 2021]. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta Publ., 2021, pp. 259–264. (In Russian)
3. Dolgij A. I., Rozenberg E. N., Ozerov A. V. Oblachnye tekhnologii dlya otvetstvennykh sistem zheleznodorozhnogo transporta [Cloud technologies for critical systems of railway transport]. *Zheleznodorozhnyy transport* [Railway Transport]. 2023, Iss. 11, pp. 20–25. (In Russian)

4. Ozerov A. V., Olshanskiy A. M. O postroenii modeli bezopasnosti slozhnoy avtomaticheskoy sistemy transportnogo obsluzhivaniya [On building a safety model for a complex automatic transportation service system]. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2021, vol. 21, Iss. 2, pp. 31–37. DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-2-31-37. (In Russian)
5. Shubinskiy I. B. *Strukturnaya nadezhnost' informatsionnykh sistem: metody analiza* [Structural reliability of information systems: analysis methods]. Moscow: OOO "Zhurnal "Nadezhnost'", 2012, 216 p. DOI: 10.21683/1729-2646-2013-0-2-145. (In Russian)
6. Maron A. I. *Optimizatsiya upravleniya protsessami vnedreniya i obsluzhivaniya krupnomasshtabnykh informatsionnykh sistem* [Optimization of management of implementation and maintenance processes for large-scale information systems]. Moscow: NNRIUE Publ., 2008, 80 p. (In Russian)
7. Kheyf F. *Matematicheskaya teoriya transportnykh potokov* [Mathematical theory of traffic flows]. Moscow: Mir Publ., 1966, 288 p. (In Russian)
8. Breiman L. The Poisson tendency in traffic distribution. *Annals of Mathematical Statistics*, 1963, vol. 34, Iss. 1, pp. 308–311.
9. Khaykin S. *Neyronnye seti: polnyy kurs* [Neural networks: a comprehensive course]. 2nd ed. Moscow: Vil'yams Publ., 2006, 1184 p. (In Russian)
10. Olshanskiy A. M., Kondrakhina N. V. Nekotorye aspekty funktsionirovaniya krupnykh vertikal'no integrirovannykh sistem [Some aspects of functioning of large vertically integrated systems]. *Zheleznodorozhnyy transport na sovremennom etape. 70 let aspirantury OAO VNIIZhT: sbornik trudov uchenykh OAO VNIIZhT* [Railway transport at the present stage. 70 years of postgraduate studies at JSC VNIIZhT: collection of works by scientists of JSC VNIIZhT]. Ed. by B. M. Lapidus, G. V. Gogrichiani. Moscow: OAO "VNIIZhT", 2014, pp. 52–56. DOI: 10.30917/ATT-PRINT-2018-4. (In Russian)
11. Cherkesov G. N. Problema ZIP i zadacha formirovaniya novogo razdela teorii nadezhnosti vosstanavlivaemykh sistem [The ZIP problem and the task of forming a new section of the theory of reliability of recoverable systems]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [Scientific and Technical Bulletin of SPbSPU. Informatics. Telecommunications. Management]. 2011, Iss. 6-1, pp. 136–153. DOI: 10.21869/2223-1560-2021-25-4-201-219. (In Russian)
12. Shen' A. Kh., Vereshchagin N. K., Uspenskiy V. A. *Kolmogorovskaya slozhnost' i matematicheskaya sluchaynost'* [Kolmogorov complexity and mathematical randomness]. Moscow: MTsNMO Publ., 2014, 576 pp. (In Russian)
13. Shubinskiy I. B., Zamyshlyayev A. M., Papich L. R. Adaptivnaya garantospobnost' informatsionnykh sistem upravleniya [Adaptive guarantee capability of information management systems]. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2018, vol. 18, Iss. 4, pp. 3–9. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-4-3-9. (In Russian)
14. Shubinskiy I. B. *Nadezhnye otkazoustoychivye informatsionnye sistemy. Metody sinteza* [Reliable fault-tolerant information systems. Synthesis methods]. Moscow: Zhurnal "Nadezhnost'" Publ., 2016, 545 p. DOI: 10.21683/1729-2646-2015-0-4-97-101. (In Russian)
15. Shubinskiy I. B., Zamyshlyayev A. M., Proshin G. B. Funktsional'naya nadezhnost' programmogo obespecheniya informatsionnykh sistem [Functional reliability of software for information systems]. *Nadezhnost'* [Reliability]. 2011, Iss. 3(38), pp. 72–81. (In Russian)
16. Shubinskiy I. B., Rozenberg E. N. *Funktsional'naya bezopasnost' sistem upravleniya na zheleznodorozhnom transporte* [Functional safety of control systems in railway transport]. Vologda: Infra-Inzheneriya Publ., 2023, 320 p. (In Russian)