

УДК 681.5 (656.2)
DOI 10.52167/1609-1817-2025-140-5-234-247

Д. Джумабекова¹, Е. Майлыбаев², Н. Сарсенбаев¹, Г. Бекетова³, V. Lakhno⁴

¹Satbayev University, Алматы, Казахстан

²International University of Transport and Humanities, Алматы, Казахстан

³Energo University, Алматы, Казахстан

⁴National University of Bioresources and Environmental Management of Ukraine,
Киев, Украина

E-mail: ersaiyn.kurmanbaiuly@mtgu.edu.kz

ФОРМАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Аннотация. В статье изложена модель для автоматизированной системы управления (АСУ) эксплуатационными процессами (ЭП) на железнодорожном транспорте (ЖДТ). Предлагаемая модель, отличается от известных решений, интеграцией методов обработки нечеткой информации и прогнозирования надежности. Такой подход способствует адаптивному управлению перевозками. При этом, в отличие от традиционных детерминированных моделей, учитывает многовариантность логистических сценариев, временные ограничения и динамическое изменение эксплуатационных параметров. В совокупности применение методов нечеткой логики (НЛ), обеспечивает более точную оценку вероятности отказов и задержек при эксплуатации ПС и инфраструктуры ЖДТ. Также в ходе исследования был перечень целевых функций для вычислительного ядра интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР), интегрированной в АСУ ЭП ЖДТ. Модуль ИСППР учитывает коэффициент вариации задержек, уровень загруженности инфраструктуры, показатели перераспределения ресурсов, а также оценку готовности подвижного состава (ПС), что позволяет формализовать оптимизацию ЭП с учетом многокритериальности управления на ЖДТ.

Ключевые слова: автоматизированное управление, эксплуатационные процессы, железнодорожный транспорт, нечеткая логика, прогнозирование надежности, адаптивное управление, математическое моделирование.

Введение.

Автоматизированное управление эксплуатационными процессами (ЭП) на железнодорожном транспорте (ЖДТ) РК требует использования методов обработки нечеткой информации и прогнозирования надежности. В данном исследовании предлагается модель для АСУ ЭП. Предлагаемая модель, в отличие от известных решений, учитывает временные параметры, транспортные нормативы и многовариантность логистических сценариев при транспортировке грузов ЖДТ. Как гипотеза полагаем, что указанная модель может стать базой для алгоритма, задействованного в АСУ эксплуатационными процессами (или СУЭП).

Как показывает анализ научных публикаций [1, 2, 3] на последние десятилетие многие исследования в области автоматизированного управления ЭП на ЖДТ сконцентрированы на развитии интеллектуальных алгоритмов и моделей для АСУ. Такой подход объясняется учетом специалистами стохастической природы

транспортных потоков. А также, спецификой поддержания технического состояния подвижного состава (ПС) и инфраструктуры ЖД и загруженности узловых станций [1-9]. Как показал анализ рассмотренных работ классические модели управления ЭП на ЖДТ недостаточно отражают специфику работы в условиях, когда сказываются факторы неопределенности. Это, создало предпосылки для исследователей, задействовать математический аппарат нечеткой логики (НЛ) для работы в условиях неопределенности, Аналогичные подходы касаются и применения НЛ для задач прогнозирования надежности на ЖДТ [4-10]. В ряде научных публикаций, в частности [11-12], авторами были предложены математические модели на НЛ для управления железнодорожными перевозками, учитывающие временные нормативы, логистические ограничения и показатели надежности. Однако анализ указанных публикаций, свидетельствует, что они преимущественно фокусируются либо на временных параметрах эксплуатации, либо на оптимизации ресурсов. Исходя из этого, данное исследование, на развивает существующие методы. Но в отличие от уже известных работ, мы пытаемся интегрировать в одной модели нечеткие множества, параметры для прогнозирования надежности, а также анализ эксплуатационных показателей на ЖДТ. Полагаем, что описанный в работы подход позволит, используя АСУ, а также интеллектуальные системы, не только предсказывать вероятные задержки, но и разрабатывать гибкие стратегии управления ЭП. Кроме того, статен возможным, минимизация отклонения ЭП от нормативов. Основной посыл работы состоит в том, что задействование аппарата НЛ позволит адаптировать АСУ ЭП к условиям неопределенности. И в итоге снизит совокупное количество рисков и отказов. При это параллельно увеличится эффективность эксплуатации ЖДТ. Заметим, что предложенная в статье модель развивает существующие подходы к моделированию систем (АСУ и СППР) управления ЭП на ЖДТ. Схожие направления исследований были рассмотрены в работах [1-7]. Но в отличие от указанных работ, мы ходим объединить в одной модели использование НЛ и зависимостей для прогнозирования надежности перевозочного процесса. Основной предпосылкой для развития нашей модели стало то обстоятельство, что автоматизация управления ЭП на ЖДТ (причем не только в РК, но и других странах, развивающих ЖДТ) сталкивается с неопределенностями. Эти неопределенности связаны с динамическими изменениями в транспортных потоках. Поэтому, использование аппарата НЛ, на наш взгляд, позволит моделировать эти неопределенности и сформировать адаптивные решения.

Разработать модель для АСУ эксплуатационными процессами (ЭП) на ЖДТ, интегрирующую методы НЛ и прогнозирования надежности, для повышения адаптивности управления перевозками, минимизации временных отклонений и оптимизации сценариев транспортных процессов.

Материалы и методы.

Полагаем, что СУЭП представляется в виде множества взаимодействующих элементов. Приняты следующие элементы: ограничения и нормативы S - множество технологических нормативов, включая временные параметры T операций; объекты управления O -множество ПС (локомотивы, вагоны), характеризуемых параметрами P_0 ; процессы обработки грузов P - этапы технологического процесса (ТП) перевозки, характеризующиеся временем T_p ; показатели надежности R -характеристики системы, определяющие отказоустойчивость.

Например, временные нормативы операций типичных для ЭП, задают допустимые границы выполнения стандартных технологических процессов (ТП). Они могут быть заданы как жесткие (четкие) или адаптивные (нечеткие). То есть, например,

время обработки вагона на станции ($T_{process}$). Также, полагаем, что нормативное значение соответствует 2–6 часам. Соответственно, допустимый диапазон (нечеткие границы): быстро (0–2 ч); норма (2–6 ч); долго (6–12 ч); критически долго (>12 ч). Аналогично, время стоянки на узловой станции (T_{stop}). Нормативное значение 1–4 часа. Соответственно, ограничение – максимальная задержка не более 6 часов, иначе в АСУ инициируется в ручном режиме, автоматически (или комбинированный подход) пересмотр маршрута. Максимальная допустимая задержка в маршруте (T_{max_delay}): норма не более 12 часов; фактические пределы: нет задержки (0–3 ч); незначительная (3–6 ч); существенная (6–12 ч); критическая (>12 ч). Коэффициент порожнего пробега вагонов (K_{empty}) – целевой показатель, соответствующий норме ≤ 0.4 (40% порожних пробегов). Соответственно, ограничения – при значении >0.5 необходимо оптимизировать маршрутизацию. Допустимый интервал отклонения от плана ($\Delta T_{permissible}$) – норма: $\pm 5\%$ от расчетного времени в пути. При превышении 10% потребуются вмешательство диспетчерской системы.

Тогда зависимость ограничений и нормативов можно представить так:

$$T_{fact} \in \left| T_{norm} - \Delta T_{permissible}, T_{norm} + \Delta T_{permissible} \right|, \quad (1)$$

где T_{fact} – фактическое время выполнения операции.

Полагаем, что каждый объект $o \in O$ имеет параметры $P_o = \{T_c, T_f, \mu, \sigma\}$,

где T_c – нормативное время обработки;

T_f – фактическое время;

μ, σ – математическое ожидание и стандартное отклонение времени выполнения операции, соответственно.

Рассмотрим объекты управления, то есть, например, множество ПС, характеризующих своими параметрами. Полагаем, что объектами управления в моделируемой системе являются вагоны и локомотивы, каждый из которых имеет свои характеристики, влияющие на ЭП. Ниже приведены примеры параметров управления: категория вагона ($Wagon_type$) – полувагон, цистерна, крытый вагон, рефрижераторный и т. д. собственник вагона ($Wagon_owner$) – владельцы (станция ЖД, частный оператор, иностранная компания и др.); техническое состояние вагона ($Wagon_condition$). Например, используется оценка по нечеткой шкале: отличное (износ $<20\%$); хорошее (20–50%); удовлетворительное (50–80%); критическое ($>80\%$, вагон требует ремонта). Текущая загрузка локомотива ($Loco_load$). То есть параметр для оценки мощности в % от допустимого предела: низкая (0–50%); оптимальная (50–90%); перегрузка ($>90\%$).

Коэффициент исправности ПС ($Reliability_index$), в нашей модели рассчитываемый по формуле:

$$R = 1 - \frac{N_{failuser}}{N_{total}}, \quad (2)$$

где $N_{failuser}$ – число отказов за период (принимается в соответствии с техническим заданием на этапе проектирования АСУ), N_{total} – общее число вагонов.

Полагаем, что для каждого этапа перевозки определяется отклонение $\Delta T_i = T_f - T_c$. Если $\Delta T_i > \varepsilon$ (где ε – допустимый порог отклонения), принимаются корректирующие меры U .

Поскольку временные параметры операций на ЖДТ могут варьироваться, формулируется нечеткое множество (НМ) для временных интервалов:

$$\tilde{T} = \{(T_i, \mu_i, \sigma_i) | T \in T, \mu_i - \text{average time, } \sigma_i - \text{standard deviation}\} \quad (3)$$

Тогда НМ \tilde{T} используется в модели для прогнозирования и корректировки отклонений. Здесь μ_i, σ_i – среднее время и стандартное отклонение, соответственно. Рассмотрим систему в виде множества подмоделей, перечисленных ниже. Модель временного контроля транспортного процесса. Полагаем, что система состоит из множества вагонов V , движущихся по станциям S . Для каждого вагона $v_i \in V$ вводим набор таких временных характеристик: $t_{\text{arrival time}}(v_i, s_j)$ – время прибытия на станцию s_j ; $t_{\text{departure time}}(v_i, s_j)$ – время отправления со станции s_j ; $\Delta T(v_i, s_j) = T_{\text{departure time}}(v_i, s_j) - T_{\text{arrival time}}(v_i, s_j)$ – время обработки вагона.

Плановые (нормативные) временные характеристики заданы множеством контрольных временных точек KCT_{ij} , а отклонения:

$$\Delta T_{ij} = T_{\text{fact}}(v_i, s_j) - T_{\text{plan}}(v_i, s_j). \quad (4)$$

Далее рассмотрим нечеткую модель прогнозирования задержек. Введем лингвистические переменные: ΔT_{ij} – задержка вагона, выраженная в лингвистических терминах, например, минимальная, средняя, критическая; $R(v_i)$ – прогнозная оценка риска задержки вагона, $U(v_i)$ – управляющее воздействие диспетчерской системы. Тогда полагаем, что имеет место нечеткое правило вида:

$$\begin{aligned} & \text{IF } (\Delta T_{ij} \text{ is High}) \text{ AND } (R(v_i) \text{ is Critical}) \text{ THEN} \\ & (U(v_i) \text{ is Immediate Intervention}). \end{aligned} \quad (5)$$

Полагаем, что целевая функция минимизации временных отклонений может быть задана следующим выражением:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M w_{ij} \cdot |\Delta T_{ij}|, \quad (6)$$

где w_{ij} – весовые коэффициенты значимости станций.

Если абстрагироваться от надёжности ПС, а рассматривать только параметры надёжности перевозок, то согласно [12, с. 51], то можно использовать такое выражение для определения вероятности своевременной доставки груза:

$$P(T_{\text{delivery}} \leq T_{\text{nom}}) = \int_0^{T_{\text{nom}}} f(T) dt, \quad (7)$$

где $f(T)$ – плотность распределения времени доставки, определяемая на основе ретроспективных (т.е. предшествующих) данных.

Если говорить о надежности, как о параметре, определяющем отказоустойчивость системы, то можно воспользоваться зависимостями, предложенными в [9]:

Коэффициент готовности ПС (*Availability index, A*):

$$A = \frac{MTBR}{MTBR + MTTR}, \quad (8)$$

где *MTBR* – среднее время наработки на отказ (Mean Time Between Failures) [4, 12];

MTTR – среднее время восстановления (Mean Time To Repair) [10].

Вероятность нарушения графика (*P_{delay}*) [5, 10]:

$$P_{delay} = \frac{N_{late}}{N_{total}}, \quad (9)$$

где N_{late} – число поездов, опоздавших более чем на $\Delta T_{permissible}$.

Аналогичный показатель, можно использовать и для вагонов (*Failure_{rate}*), т.е.

$$\lambda = \frac{N_{failure}}{T_{operating}}, \quad (10)$$

где $T_{operating}$ – общее время эксплуатации ПС.

Также в модель была включена вероятность отказа элемента инфраструктуры ЖДТ [4, 10] (*P_{failure}*):

$$P_{failure}(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (11)$$

где λ – интенсивность отказов; t – время работы.

Дополнительно предлагается рассматривать критерий стабильности перевозок (или коэффициент вариации задержек):

$$CV_{delay} = \frac{\sigma_{delay}}{\mu_{delay}}, \quad (12)$$

где σ_{delay} – стандартное отклонение задержек; μ_{delay} – среднее значение задержек.

Полагаем, что для моделирования ЭП в рамках нашего исследования необходимо определить ключевые параметры. То есть эти параметры можно выразить через нечеткие переменные. Причем перечень параметров можно уточнять. А наш перечень в рамках статьи представлен для иллюстрации работы модели и последующей ее алгоритмизации и программной реализации).

Основные входные параметры рассматриваемые в процессе моделирования были такие: время прибытия вагона на станцию (*T_{arrival}*); время обработки вагона на станции (*T_{process}*); ожидаемая задержка в движении (*T_{delay}*); нагрузка на инфраструктуру (*Load_{station}*); техническое состояние ПС (*Wagon_{condition}*); ожидаемая надежность прогноза (*Prediction_{reliability}*); метеоусловия (*Weather_{conditions}*).

Тогда, справедливо предположить, что каждый из этих параметров может быть представлен в виде нечеткой переменной с лингвистическими значениями. То есть для каждого параметра определяется множество нечетких термов:

$T_{arrival} \rightarrow$ рано, вовремя, поздно, критическое опоздание;

$T_{process} \rightarrow$ быстро, средне, долго, аномально долго;

$T_{delay} \rightarrow$ нет задержки, незначительная, существенная, критическая;

$Load_{station} \rightarrow$ низкая, средняя, высокая, перегрузка;

$Wagon_{condition} \rightarrow$ отличное, хорошее, удовлетворительное, критическое;

$Prediction_{reliability} \rightarrow$ высокая, средняя, низкая;

$Weather_{conditions} \rightarrow$ хорошие, умеренные, плохие, экстремальные.

При программной реализации разрабатываемого модуля для АСУ ЭП на ЖДТ с использованием нечетких моделей и прогнозирования надежности каждое значение задается через соответствующую функцию принадлежности. Так, например, для параметра времени обработки вагона $T_{process}$ функцию принадлежности можно описать так:

$$\mu_{быстро}(t) = \begin{cases} 1, & t \leq 20 \\ \frac{40-t}{20}, & 20 < t \leq 40 \\ 0, & t > 40 \end{cases} \quad (13)$$

Или, другими словами, для параметра времени обработки вагона ($T_{process}$) вводятся функции принадлежности (13). Эта функция описывает степень соответствия значения параметра определенным качественным категориям. В данном случае нами рассматриваются три категории: "быстро", "среднее" и "медленно". Функция принадлежности $\mu_{быстро}(t)$ определяет степень принадлежности времени обработки вагона к категории "быстро". Она задается следующим так. Если время обработки не превышает 20 единиц времени (в общем случае минут), то степень принадлежности равна 1, что означает полное соответствие категории "быстро". При увеличении времени обработки от 20 до 40 единиц времени степень принадлежности линейно уменьшается до 0, отражая снижение соответствия данной категории. Для времени обработки, превышающего 40 единиц времени, степень принадлежности равна 0, указывая на отсутствие соответствия категории "быстро".

Аналогичным образом задается функция принадлежности $\mu_{среднее}(t)$, см. выражение (13) для категории "среднее". Тогда степень принадлежности равна 0 для времени обработки, не превышающего 20 единиц времени или превышающего 60 единиц времени. В интервале от 20 до 40 единиц времени степень принадлежности линейно увеличивается от 0 до 1, а в интервале от 40 до 60 единиц времени - линейно уменьшается от 1 до 0. Это позволяет описать ситуацию, когда время обработки вагона находится в промежуточном диапазоне, соответствующем категории "среднее". Заметим, что использование таких функций принадлежности позволяет при моделировании описывать параметры ЭП. При этом мы учитываем их нечеткость и изменчивость. А это, в свою очередь, повышает точность прогнозирования надежности и эффективности управления ЭП на ЖДТ.

После определения входных параметров и лингвистических переменных строится нечеткая продукционная модель управления ЭП на ЖДТ.

Ниже мы приводим фрагментарно некоторые из используемых правил для модуля АСУ.

If ($T_{-arrival}$ ="Поздно") & ($Load_{-station}$ ="Высокая") That ($T_{-process}$ ="Быстро").

If ($T_{-process}$ ="Аномально долго") or (T_{-delay} ="Критическая") That ($T_{-arrival}$ ="Критическое опоздание").

Для удобства восприятия правила могут быть формализованы в виде нечетких импликаций:

$$R_i : IF (X_1 = A_1) AND (X_2 = A_2) THEN (Y = B_i), \quad (14)$$

где X_1, X_2 – входные переменные; A_1, A_2 – лингвистические значения входных переменных; Y – выходная переменная, B_i – лингвистическое значение выходной переменной.

При поступлении входных данных проводится их фаззификация, после чего активируются продукционные правила. Вычисление значений выходных переменных выполняется по методам нечеткой логики.

Min-Max (Mamdani method) – выбирается минимальная степень принадлежности среди условий и максимальное значение результата.

Метод центра масс – используется для дефаззификации выхода системы.

Формально дефаззификация проводится по формуле:

$$Y = \frac{\sum_i \mu_{B_i}(y) \cdot y_i}{\sum_i \mu_{B_i}(y)},$$

где $\mu_{B_i}(y)$ – степень принадлежности выхода к B_i ; y_i – численное значение выхода.

Например, для рассматриваемого нами выше параметра T_{-delay} , если результат нечеткого вывода дал функции принадлежности значения: незначительная (0.2); существенная (0.5); критическая (0.3), то численный результат времени задержки будет вычислен как взвешенное среднее значений, соответствующих этим термам.

Аналогичные рассуждения справедливы и в целом для нечеткой СУЭП. И например, может применяться для прогнозирования вероятности задержек – выявления критических отклонений от графика. Или в целом для оценки надежности ПС, т.е. для определения вероятности отказа.

Дополнительно был рассмотрен такой параметр, как динамическое перераспределение ресурсов. Данный параметр, важен, поскольку способствует оптимизации движения на ЖДТ, перенаправлению маршрутов при перегрузке участков. Или, иными словами, эластичному регулированию нагрузки на станции (перенос времени отправления, перераспределение вагонов), сокращению порожних пробегов, снижению неэффективного использования ПС.

Полагаем, что тут целесообразно рассмотреть такие ключевые параметры: загруженность участка ($Load_{section}$) – низкая, средняя, высокая, критическая; наличие свободных путей на станциях ($Free_{tracks}$) – много, достаточно, недостаточно,

отсутствуют; доступность локомотивов ($Available_{locos}$) – достаточно, ограничено, дефицит; прогнозируемая задержка (P_{delay}) – нет, незначительная, существенная, критическая; перераспределение состава ($Reallocate_{trains}$) – не требуется, частичное, полное. Ниже в таблице 1, представлена база нечетких правил прогнозирования надежности и перераспределения ресурсов на ЖДТ.

Таблица 1 – Пример базы нечетких правил прогнозирования надежности и перераспределения ресурсов на ЖДТ (Составлена автором)

| № | Условия (ЕСЛИ...) | Выход (ТО...) |
|-----|--|-------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| 1 | $P_{failure} =$ «Высокая» & $Load_{section} =$ «Критическая» | $Reallocate_{trains} =$ «Полное» |
| 2 | $P_{delay} =$ «Критическая» & $Free_{tracks} =$ «Отсутствуют» | $Reallocate_{trains} =$ «Полное» |
| 3 | $P_{delay} =$ «Существенная» & $Available_{locos} =$ «Дефицит» | $Reallocate_{trains} =$ «Частичное» |
| ... | ... | ... |

В таблице 1 добавлена переменная, согласно [1, 5, 8, 11, 12]: $Wear_{infra}$ – динамическая оценка износа инфраструктуры, позволяющая предсказывать (прогнозировать) необходимость ремонта железнодорожных путей, станций, локомотивов и другого ПС, а также определяющая вероятность перегрузки инфраструктуры, влияющей на задержки и аварийность.

В рамках статьи принято, что СУЭП включает следующие основные компоненты: входные параметры (нечеткие переменные, характеризующие состояние системы); база правил (система нечетких продукционных правил для управления процессами); фаззификация (преобразование четких входных данных в нечеткие); механизм вывода решений (методы обработки нечетких данных); дефаззификация (преобразование нечетких выходных данных в четкие управляющие воздействия).

Прогнозирование времени \hat{T} на основе данных о предыдущих перевозках осуществляется с использованием регрессионной модели, как например, это было показано в исследовании [11] или в общем виде:

$$\hat{T}_f = \alpha \cdot T_c + \beta \cdot \mu + \gamma \cdot \delta, \quad (15)$$

где α, β, γ – коэффициенты регрессии, определяемые эмпирическим анализом (например, на стадии составления ТЗ на проектирование АСУ).

Задача оптимизации расписания перевозок формулируется как минимизация функции задержек [10]:

$$\min \sum_{i=1}^n (T_f^i - T_c^i)^2,$$

с учетом ограничений по ресурсам и технологическим нормативам.

Чтобы учесть прогнозирование надежности, добавим целевую функцию минимизации вероятности нарушения графика перевозок:

$$\min P_{delay} = \frac{N_{late}}{N_{total}}, \quad (16)$$

где N_{late} – число поездов, опоздавших более чем на $\Delta T_{permissible}$; N_{total} – общее число поездов.

Целевая функция (16) согласуется с задачей прогнозирования надежности, так как позволяет минимизировать долю опозданий и тем самым повысить точность расписания на ЖДТ РК.

Полагаем, что в модели следует учесть фактор максимизации коэффициента доступности вагонов и локомотивов:

$$\max A = \frac{MTBR}{MTBR + MTTR}, \quad (17)$$

где $MTBR$ – среднее время наработки на отказ; $MTTR$ – среднее время восстановления.

Перераспределение ПС в условиях загруженности инфраструктуры ЖДТ – это затратная операция. Соответственно, можно минимизировать количество таких корректировок:

$$\min \sum_{i=1}^M Rellocate, \quad (18)$$

где $Rellocate$ – бинарная переменная, принимающая значение 1, если требуется перераспределение состава на i -м участке, и 0 в противном случае.

Функция (18) согласуется с нечеткими моделями управления, поскольку при высоких уровнях загрузки инфраструктуры и задержек прогнозирование позволяет заранее корректировать маршруты ЖДТ.

И наконец, для стабильности перевозочного процесса целесообразно минимизировать коэффициент вариации задержек:

$$\min CV_{delay} = \frac{\sigma_{delay}}{\mu_{delay}}, \quad (19)$$

где σ_{delay} – стандартное отклонение задержек; μ_{delay} – среднее значение задержек.

Заметим, что включение дополнительных целевых функций (16)-(19) в предлагаемую ММ автоматизированного управления ЭП на ЖДТ является обоснованным с точки зрения комплексного учета факторов, влияющих на надежность и эффективность функционирования системы.

Результаты.

Внедрение интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР) в АСУ ЭП на ЖДТ потребует комплексного подхода к обработке и анализу данных, получаемых от различных источников. В целом, подобная интеграция будет направлена на повышение адаптивности, точности прогнозирования и эффективности управленческих решений в условиях неопределенности и динамических изменений эксплуатационных параметров объектов управления ЭП на ЖДТ. В основу такой системы заложена архитектура, где ключевыми компонентами являются информационное хранилище данных ЖДТ, технологии OLAP, системы анализа больших данных и операционные базы OLTP.

Обсуждение.

Архитектура системы включает следующие основные компоненты (на уровне концепции, схема может уточняться при составлении конкретного ТЗ), рисунок 1.

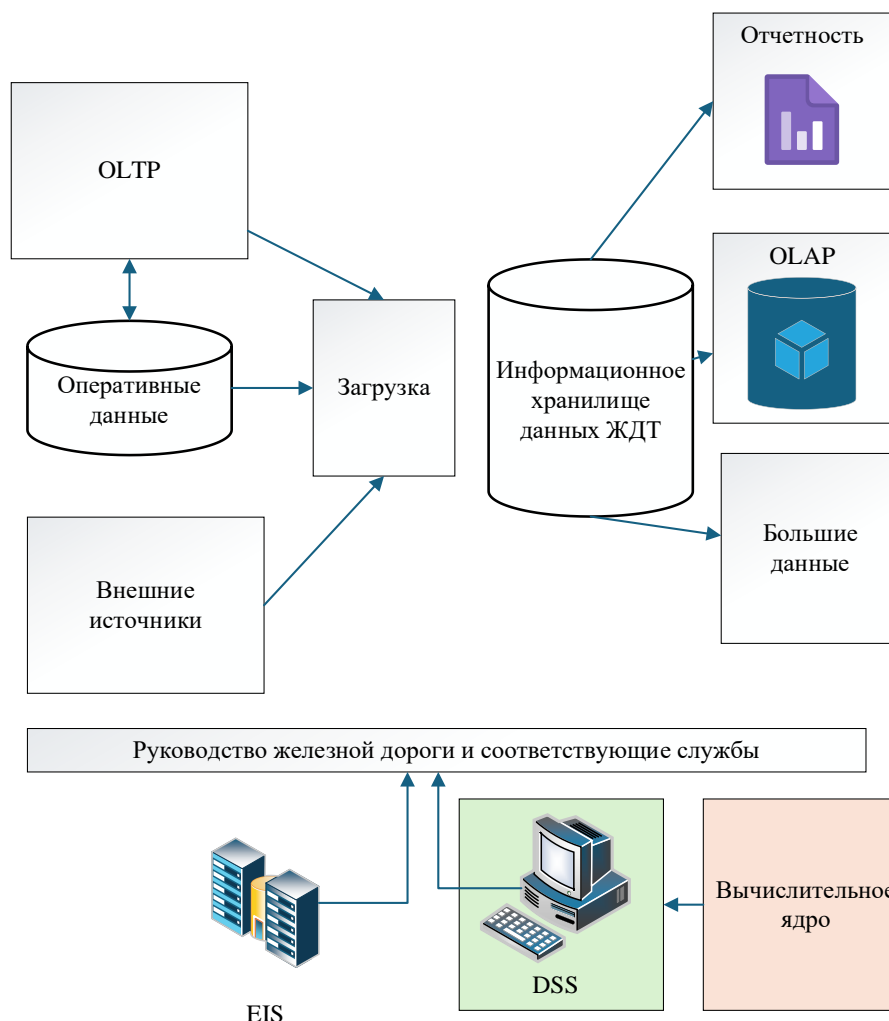


Рисунок 1 - Архитектура интеллектуальной СППР в АСУ для управления ЭП на ЖДТ

Операционные базы данных (OLTP) и оперативные данные – хранят первичную информацию о движении на железной дороге, инфраструктуре, расписаниях, загрузке составов и других эксплуатационных показателях. Эти данные поступают в информационное хранилище через процесс загрузки и трансформации в форматы для последующей обработки. Внешние источники данных – включают сведения о состоянии транспортной инфраструктуры, данные о пассажиропотоках и грузопотоках, а также информацию от логистических операторов и государственных регуляторов РК. Информационное хранилище данных ЖДТ (Data Warehouse) – центральный компонент, обеспечивающий хранение, обработку и интеграцию данных для дальнейшего анализа и принятия решений по вопросам, связанным с ЭП на ЖДТ. OLAP-системы (On-Line Analytical Processing) – позволяют выполнять многомерный анализ эксплуатационных показателей, выявлять закономерности, моделировать альтернативные сценарии развития ситуаций в ходе управления ЭП на ЖДТ.

Системы анализа больших данных (Big Data Analytics) – обеспечивают прогнозирование надежности ПС, инфраструктуры и ЭП на основе методов НЛ. Системы отчетности – формируют аналитические и прогнозные отчеты для различных уровней управления железнодорожным транспортом. EIS (Executive Information System) – информационные системы для руководителей высшего уровня управления, предоставляющие стратегическую аналитику и прогнозные модели для руководства ЖДТ РК. DSS (Decision Support System) – интеллектуальные алгоритмы и методы поддержки принятия решений, использующие НЛ и методы прогнозирования. По сути, это вычислительное ядро системы ИСППР, работа которого основана на модели, рассмотренной в статье, и реализация которого будет входить в перечень задач, решаемых в рамках наших исследований.

Заключение.

В результате исследований получены такие результаты и сделаны следующие выводы.

Разработана математическая модель (ММ) автоматизированного управления эксплуатационными процессами (ЭП) на железнодорожном транспорте (ЖДТ), отличающаяся от известных решений тем, что интегрирует методы обработки нечеткой информации и прогнозирования надежности для адаптивного управления перевозками. Предлагаемая модель, в отличие от известных решений, учитывает многовариантность логистических сценариев и динамическое изменение эксплуатационных параметров на ЖДТ. Дополнен перечень целевых функций для вычислительного ядра интеллектуальной СППР, интегрированной в АСУ, который, в отличие от известных решений, включает не только минимизацию временных отклонений и вероятность нарушения графика движения, но и коэффициент вариации задержек, уровень загруженности инфраструктуры.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Куныгина Л.В. Современные информационные технологии в управлении железнодорожным транспортом//Транспорт: наука, образование, производство. 2021. с. 111-115.

[2] Елисеев, С., Миронова, О. Совершенствование системы управления железнодорожным транспортом, обслуживания грузовладельцев и пассажиров// Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2016. №3, с. 29-43.

[3] Маликов, О.Б., Покровская, О.Д. Анализ системы нормирования на железнодорожном транспорте с позиций логистики и клиентоориентированности// Известия Петербургского университета путей сообщения. 2017. №2, 2796, с. 187-199.

[4] Апатцев, В. И. Показатели оценки качества технологических процессов работы железнодорожных станций // Наука и техника транспорта. 2013. №3, с. 44-47.

[5] Дудкин, Е.П., Рыбачок, В.М., Свинцов, Е.С. Проблемы и перспективы развития промышленного железнодорожного транспорта // Транспорт РФ. 2006. №7, с. 46-49.

[6] Вакуленко, С.П., Журавлев, Н.П., Савельев, М.Ю., Сидраков, А.А. Нормативное обеспечение разработки единых технологических процессов работы станций примыкания и железнодорожных путей необщего пользования // Фёдор Петрович Кочнев-выдающийся организатор транспортного образования и науки в России. 2021. с. 74-81.

[7] Валеев, Н.А. Управление эксплуатационными затратами железнодорожных компаний // Экономика железных дорог. 2017. №12, с. 26-36.

[8] Замышляев, А.М. Автоматизация процессов комплексного управления техническим содержанием инфраструктуры железнодорожного транспорта: дисс. на соискание доктора техн. наук. 2013. М.: МГУПС (МИИТ).

[9] Иатова, Р.К., Акимбаев, А.К. Способы развития железнодорожных пассажирских перевозок в Республике Казахстан//Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2014. №3, с. 273-279.

[10] Кириченко, А.И. Методика создания интеллектуальных автоматизированных систем управления доставкой грузов на железной дороге. Наука и прогресс транспорта // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2017. №2 (68), с. 46-55.

[11] Грудина, К.А. Оценка влияния объема перевозок и качества работы железных дорог на эксплуатационные расходы по видам деятельности. Дисс. на соис. уч. степени канд. экон. наук, 2005. 8(05), 154. М.: МГУПС (МИИТ).

[12] d'Ariano, A., Corman, F., Fujiyama, T., Meng, L., Pellegrini, P. Simulation and optimization for railway operations management // Journal of Advanced Transportation. 2018. p. 1-3. <https://doi.org/10.1155/2018/4896748>

REFERENCES

[1] Kunygina L.V. Sovremennye informacionnye tehnologii v upravlenii zheleznodorozhnym transportom//Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo. 2021. s. 111-115.

[2] Eliseev, S., Mironova, O. Sovershenstvovanie sistemy upravlenija zheleznodorozhnym transportom, obsluzhivaniya gruzovladel'cev i passazhirov// Transport: nauka, tehnika, upravlenie. Nauchnyj informacionnyj sbornik. 2016. №3, s. 29-43.

[3] Malikov, O.B., Pokrovskaja, O.D. Analiz sistemy normirovaniya na zheleznodorozhnom transporte s pozicij logistiki i klientoorientirovannosti// Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija. 2017. №2, 2796, s. 187-199.

[4] Apatcev, V. I. Pokazateli ocenki kachestva tehnologicheskikh processov raboty zheleznodorozhnyh stancij // Nauka i tehnika transporta. 2013. №3, s. 44-47.

[5] Dudkin, E.P., Rybachok, V.M., Svincov, E.S. Problemy i perspektivy razvitija promyshlennogo zheleznodorozhnogo transporta // Transport RF. 2006. №7, s. 46-49.

[6] Vakulenko, S.P., Zhuravlev, N.P., Savel'ev, M.Ju., Sidrakov, A.A. Normativnoe obespechenie razrabotki edinyh tehnologicheskikh processov raboty stancij primykaniya i zheleznodorozhnyh putej neobshhego pol'zovaniya // Fjodor Petrovich Kochnev-vydajushhij organizator transportnogo obrazovaniya i nauki v Rossii. 2021. s. 74-81.

[7] Valeev, N.A. Upravlenie jekspluatacionnymi zatratami zheleznodorozhnyh kompanij // Jekonomika zheleznyh dorog. 2017. №12, s. 26-36.

[8] Zamyshljaev, A.M. Avtomatizacija processov kompleksnogo upravlenija tehnicheskim sodержaniem infrastruktury zheleznodorozhnogo transporta: diss. na soiskanie doktora tehn. nauk. 2013. М.: МГУПС (МИИТ).

[9] Iatova, R.K., Akimbaev, A.K. Sposoby razvitija zheleznodorozhnyh passazhirskih perevozk v Respublike Kazahstan//Vestnik Kazahskoj akademii transporta i kommunikacij im. M. Tynyshpaeva. 2014. №3, s. 273-279.

[10] Kirichenko, A.I. Metodika sozdaniya intellektual'nyh avtomatizirovannyh sistem upravlenija dostavkoj gruzov na zheleznoj doroge. Nauka i progress transporta // Vestnik

Dnepropetrovskogo nacional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta. 2017. №2 (68), s. 46-55.

[11] Grudinina, K.A. Ocenka vliyanija obshchego perevozok i kachestva raboty zheleznih dorog na jekspluatacionnye rashody po vidam dejatel'nosti. Diss. na sois. uch. stepeni kand. jekon. nauk, 2005. 8(05), 154. M.: MGUPS (MIIT).

[12] d'Ariano, A., Corman, F., Fujiyama, T., Meng, L., Pellegrini, P. Simulation and optimization for railway operations management // Journal of Advanced Transportation. 2018. p. 1-3. <https://doi.org/10.1155/2018/4896748>

Дария Джумабекова, докторант, Satbayev University, Алматы, Қазақстан, 821213450252-D@stud.satbayev.university

Ерсайын Майлыбаев, PhD, International University of Transport and Humanities, Алматы, Қазақстан, ersaiyn.kurmanbaiuly@mtgu.edu.kz

Нурлан Сарсенбаев, кандидат технических наук, Satbayev University, Алматы, Казахстан, n.sarsenbayev@satbayev.university

Гулжанат Бекетова, PhD, Energo University, Алматы, Казахстан, g.beketova@aes.kz

Valerii Lakhno, doctor of technical sciences, professor, National University of Bioresources and Environmental Management of Ukraine, Kyiv, Ukraine, lva964@nubip.edu.ua

ТЕМІРЖОЛ КӨЛІГІНДЕГІ ЭКСПЛУАТАЦИЯЛАУ ҮРДІСТЕРІНІҢ АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН БАСҚАРУ МОДЕЛІН РӘСІМДЕУ

Андатпа. Мақалада теміржол көлігіндегі (ТЖК) эксплуатациялау үрдістерін (ЭҮ) басқарудың автоматтандырылған жүйесінің (БЖ) моделі көрсетілген. Ұсынылған модель белгілі шешімдерден, анық емес ақпаратты өңдеу әдістерін біріктіруден және сенімділікті болжаудан қалыптасқан. Бұл тәсіл тасымалдауды адаптивті басқаруға ықпал етеді. Дәстүрлі детерминирленген модельдерден айырмашылығы, логистикалық сценарийлердің көпварианттылығын, уақыт шектеулерін және пайдалану параметрлерінің динамикалық өзгеруін ескереді. Нақты емес логика (НЛ) әдістерін қолдану жылжымалы құрам және ТЖК инфрақұрылымын пайдалану кезінде сәтсіздіктер мен кідірістердің ықтималдығын дәлірек бағалауды қамтамасыз етеді. Шешім қабылдауды қолдаудың интеллектуалды жүйесі модулі кідірістердің вариация коэффициентін, инфрақұрылымның жүктелу деңгейін, ресурстарды қайта бөлу көрсеткіштерін, сондай-ақ жылжымалы құрамның (ЖК) дайындығын бағалауды ескереді, бұл ТЖК-да басқарудың көп критерийлігін ескере отырып, ЭҮ оңтайландыруды рәсімдеуге мүмкіндік береді.

Түйінді сөздер: автоматтандырылған басқару, эксплуатациялау үрдістері, теміржол көлігі, нақты емес логика, сенімділікті болжау, адаптивті басқару, математикалық модельдеу.

Dariya Jumabekova, doctoral student, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, 821213450252-D@stud.satbayev.university

Yersaiyn Mailybayev, PhD, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan, ersaiyn.kurmanbaiuly@mtgu.edu.kz

Nurlan Sarsenbayev, candidate of technical sciences, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, n.sarsenbayev@satbayev.university

Gulzhanat Beketova, PhD, Energo University, Almaty, Kazakhstan, g.beketova@aes.kz

Valerii Lakhno, doctor of technical sciences, professor, National University of Bioresources and Environmental Management of Ukraine, Kyiv, Ukraine, lva964@nubip.edu.ua

FORMALIZATION OF A MODEL OF AUTOMATED CONTROL OF OPERATIONAL PROCESSES IN RAILWAY TRANSPORT

Abstract. The article presents a model for an automated control system for operational processes in railway transport. The proposed model differs from known solutions by integrating methods for processing fuzzy information and predicting reliability. This approach contributes to adaptive transportation management. At the same time, unlike traditional deterministic models, it takes into account the variability of logistical scenarios, time constraints and dynamic changes in operational parameters. Together, the use of fuzzy logic methods provides a more accurate assessment of the probability of failures and delays in the operation of rolling stock and railway infrastructure. The module of the intelligent decision support system takes into account the coefficient of variation of delays, the level of infrastructure utilization, indicators of resource redistribution, as well as an assessment of the availability of rolling stock, which makes it possible to formalize the optimization of the operational process, taking into account the multi-criteria management in railway transport.

Keywords: automated control, operational processes, railway transport, fuzzy logic, reliability forecasting, adaptive management, mathematical modeling.

Дата принятия: 29 ноября 2024 года

Дата рецензирования: 01 августа 2025 года

Дата утверждения: 04 сентября 2025 года