

ment of new approaches to calculating the tariff for the supply and cleaning of wagons on the railway tracks of non-public use of the carrier's locomotive.

Получено 24.12.2020

ISSN 2664-5025. Проблемы перспективного развития
железнодорожных станций и узлов. Вып. 3. Гомель, 2021

УДК 656.224: 629.44

А. А. ЕРОФЕЕВ

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель
alerof@tut.by*

АПОСТЕРИОРНАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДИСПЕТЧЕРСКОЙ КОРРЕКТИРОВКИ ГРАФИКА ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Обоснована необходимость использования методов диспетчерского управления в интеллектуальной системе управления перевозочным процессом. Предложено при описании системы диспетчерского управления использовать апостериорные модели. Установлена структура гибридного решателя задач. С целью упорядочивания множества возможных вариантов диспетчерских корректировок и выбора рационального предлагается формирование дерева решений. Установлены возможные виды диспетчерской корректировки графиков и атрибуты эксплуатационных ситуаций. Сформулирована задача обобщения и классификации эксплуатационных обстановок при наличии темпоральных данных и предложен алгоритм ее решения.

Повышение эффективности организации перевозочного процесса в современных условиях неразрывно связано с внедрением интеллектуальных транспортных систем, обеспечивающих разработку эффективных управляющих решений (УР) и последующую их реализацию. На Белорусской железной дороге поэтапно создается интеллектуальная система управления перевозочным процессом (ИСУПП), которая предназначена для разработки гармонизированных планов эксплуатационной работы для всех уровней и объектов управления [1]. При этом недостаточно проработанным остается вопрос функционирования ИСУПП в случаях значительных отклонений эксплуатационной обстановки от плановых значений. В данной статье предложены методы и алгоритмы интеллектуального диспетчерского управления поездной работой и оперативной корректировки графика движения поездов (ГДП).

В соответствии с действующими нормативными документами [2] на большинстве железных дорог колеи 1520 организация поездной работы базируется на ГДП. Однако значительное влияние на пропуск поездов по участкам оказывает диспетчерское руководство, так как фактически грузовые поезда в значительном числе случаев продвигаются по диспетчерским

расписаниям. В результате график исполненного движения существенно отличается от нормативного.

Для примера рассмотрим данные о выполнении ГДП на участке Минск – Брест Белорусской железной дороги. Распределение следования грузовых поездов по участку показано на рисунке 1.

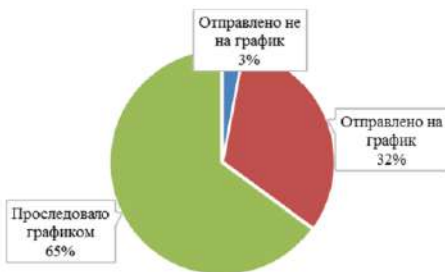


Рисунок 1 – Распределение следования сквозных и участковых поездов на участке Минск – Брест

Распределение отклонений от графика при следовании контейнерных, сквозных и участковых поездов приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Распределение отклонений от графика поездов по отправлению и прибытии

В процентах

Категория поезда	Отклонение от графика, мин		
	6–15	16–25	более 25
Контейнерные поезда по отправлению	43,0	16,7	40,3
Контейнерные поезда по прибытии	88,5	5,7	5,8
Сквозные и участковые поезда по отправлению	60,0	5,5	37,8
Сквозные и участковые поезда по прибытии	76,5	19,1	4,3

Организация движения поездов при таких отклонениях от нормативного ГДП возможно только в условиях применения системы диспетчерского управления.

Система диспетчеризации используется на большинстве железных дорог мира. При анализе систем диспетчерского управления следует учитывать эксплуатационные особенности ПП в разных странах. Для дорог колеи 1435 (Европейские страны, Японии) характерны более легкий, чем в США или дорог колеи 1520, подвижной состав, преобладание электрической тяги и пассажирских перевозок. Там обращаются преимущественно короткоставные грузовые поезда, следующие на небольшие расстояния, при этом

густота движения высокая (Франция – 29 поездов на 1 км эксплуатационной длины, Германия – 50, Англия – 56, Япония и Нидерланды – 66–67). Повышение эффективности диспетчерского управления в таких условиях достигается за счет использования резервов времени в перегонных временах хода поездов (от 3 до 8 % чистого времени). В Германии дополнительно предусматриваются резервы в ГДП, обеспечивающие возможность нагона опозданий и снижения влияния задержек отдельных поездов на выполнение графика. То есть повышается надежность выполнения ГДП за счет снижения его эффективности (участковых скоростей движения поездов) [3].

Однако даже при таких подходах не удается добиться 100 % выполнения нормативного ГДП. Например, по данным железных дорог Германии (одних из самых пунктуальных в Европе) точность прибытия и отправления всех видов пассажирских поездов составляет около 90 %, а для поездов, курсирующих в рамках согласованных расписаний, – около 93 %. [4]. При этом около 30 % поездов дальнего следования опаздывает на 4 и более минуты, каждый седьмой поезд – более чем на 10 мин. Из-за опозданий 25 % поездов, связанных с согласованным расписанием транспорта, не смогли своевременно доставить пассажиров к месту пересадки [4]. По итогам 2018 года точность соблюдения расписания движения пассажирских поездов DB и составила менее 75 % [5].

Для повышения эффективности организации движения поездов на ряде европейских железных дорог активно исследуется и находит применение стратегия динамического управления движением за счёт передачи большей части решений на этап диспетчерской регуляции – Концепция динамического управления движением (Railway Dynamic Traffic Management – RDTM). Основная ее цель – увеличение эластичности «твердого» ГДП при сбоях без вреда для пропускной способности.

В результате анализа установлено, что даже при условии организации движения всех категорий поездов по постоянному расписанию, возникают отклонения в ГДП, которые необходимо компенсировать за счет диспетчерских решений. При этом система диспетчерского управления характеризуется ярко выраженными встречными информационными потоками: прямой – распорядительный и обратный – фактический, определяющий перевозочный процесс. Для системы характерно наличие как алеаторной, так и эпистемологической неопределенностей. В связи с этим предлагается при описании процедур интеллектуального управления использовать апостериорные модели.

Апостериорная модель интеллектуальной диспетчерской корректировки ГДП предполагает решение задачи ситуационного моделирования:

- идентификация отклонений фактической нитки поезда от прогнозной;
- классификация;
- последующая ликвидация одним из имеющихся методов.

Предполагается, что на этапе разработки нормативного ГДП была проведена предварительная оптимизация графика и с ее учетом уже сформированы УР в смежных подсистемах ИСУПП. В качестве критерия эффективности в апостериорной модели предлагается использовать условия минимальных изменений ГДП относительно нормативного.

В таком случае гибридный решатель задачи (ГБРЗ) диспетчерской корректировки ГДП будет включать процедуры идентификации отклонений, выбора сценария ввода поезда в ГДП и реализации диспетчерской корректировки в соответствии с выбранным алгоритмом действия (рисунок 2).



Рисунок 2 – Укрупненная структура гибридного решателя задачи «Диспетчерская корректировка ГДП»

ИСУПП должна предполагать возможность обучения, т. е. формулировки новых диспетчерских управляющих решений (УР), новых сценариев корректировки и алгоритмов корректировки ГДП в зависимости от исходных сценариев.

С целью упорядочивания множества возможных вариантов диспетчерских корректировок и выбора рационального предлагается формирование дерева решений ГДП. Дерево решений – это метод представления решающих правил в иерархической структуре, состоящей из элементов двух типов: узлов (node) и листьев (leaf). В узлах находятся решающие правила и производится проверка соответствия примеров этому правилу по какому-либо атрибуту обучающего множества [6].

Дерево решений по диспетчерской корректировке ГДП формируется путем обобщения множества наблюдений за предметной областью и последующего упорядочивания различных вариантов эксплуатационной обстановки по установленным признакам.

В общем случае *предметная область* для решения рассматриваемой задачи ИСУПП будет включать возможные виды диспетчерской корректировки, в том числе:

- изменение порядка скрещения поездов;
- изменение пути приема поезда из-за несоответствия длины путей станции длине поезда при необходимости остановки поезда на станции, которую он согласно ГДП должен проходить без остановки;
- выбор свободных путей для приема поезда при необходимости остановки на станции, которую он согласно ГДП должен проходить без остановки;
- организация безостановочного проследования поездом станции, на которой согласно ГДП, у поезда есть остановка;

- изменение времени прибытия, отправления и проследования станций пассажирскими поездами;
- отмена нитки ГДП;
- прокладка дополнительной нитки в ГДП;
- выделение времени в ГДП для производства работ в «окно» и др.;
- изменение времени предоставления «окон» и др.

Множество диспетчерских корректировок ГДП можно свести к пяти возможным сценариям формирования УР:

- корректировка нитки ГДП с последующим изменением ГДП;
- изменение времени отправления поезда со станции;
- привязка поезда к другой ближайшей свободной нитке графика;
- разработка дополнительной нитки с учетом сохранения расписания других поездов;
- отмена нитки ГДП.

Каждый из возможных сценариев формирования УР может быть реализован различными способами. Например, корректировка нитки поезда может быть выполнена одним из пяти способов (рисунки 3–7).

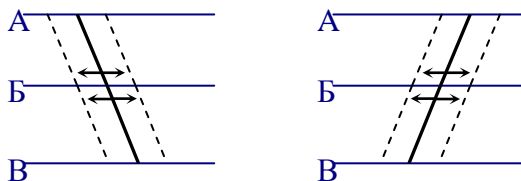


Рисунок 3 – Параллельный перенос всей нитки

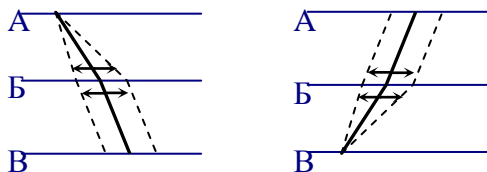


Рисунок 4 – Изменение времени движения по перегону с параллельным переносом на последующих перегонах

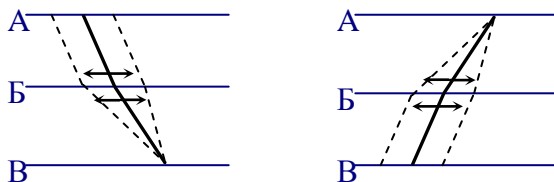


Рисунок 5 – Изменение времени движения по перегону с параллельным переносом на предыдущих перегонах



Рисунок 6 – Изменение времени движения по двум прилегающим перегонам

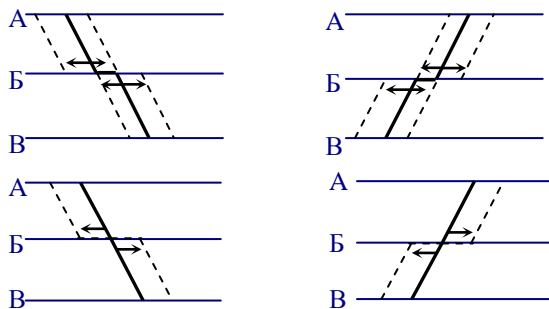


Рисунок 7 – Создание, удаление, изменение остановки с параллельным переносом соответствующей части нитки поезда

В процессе функционирования ИСУПП могут быть выделены иные виды и способы диспетчерских корректировок, сценарии формирования УР. То есть система диспетчерской корректировки должна быть развивающейся и обучающейся. Для этих целей предлагается использовать индуктивные правила, а сам процесс обучения будет являться индукцией деревьев.

Дерево решений ГДП является моделью, строящейся на основе обучения с учителем, а в обучающем множестве диспетчерских корректировок должны быть заданы целевые значения. При этом так как целевые переменные являются дискретными и могут быть описаны логическими отношениями (метками классов), то модель будет являться деревом классификации.

Ключевой особенностью интеллектуальной диспетчерской корректировки ГДП является то, что в отличие от используемых в других предметных областях моделей классификации, в которых в качестве листа рассматривается значение или функция, предлагается в качестве листа дерева рассматривать алгоритм выполнения действий по диспетчерской корректировке ГДП.

Тогда решаются следующие эксплуатационные задачи:

- определение для каждой эксплуатационной ситуации множества меток классов;
- выбор с использованием дерева классификации рационального алгоритма диспетчерской корректировки ГДП;
- реализация алгоритма диспетчерской корректировки для сложившейся эксплуатационной обстановки.

Предлагается следующий алгоритм индукции дерева классификации эксплуатационных ситуаций в ГДП.

Пусть задано обучающее множество эксплуатационных ситуаций S (расхождений между плановым и фактическим ГДП), содержащее n вариантов для каждого из которых задана метка класса C_i ($i = 1 \dots k$), и m атрибутов A_j ($j = 1 \dots m$), которые определяют принадлежность объекта к тому или иному классу. При этом для каждого класса C_i установлен алгоритм автоматической диспетчерской корректировки.

Цель индукции дерева ГДП – определить для любой эксплуатационной ситуации A_j класс C_i (алгоритм диспетчерской корректировки).

Возможны три случая.

1 Все примеры множества эксплуатационных ситуаций S имеют одинаковую метку класса C_i (т. е. все обучающие примеры относятся только к одному классу). Очевидно, что обучение в этом случае не имеет смысла, поскольку все примеры, предъявляемые модели, будут одного класса, который и «научится» распознавать модель. Само дерево решений в этом случае будет представлять собой лист, ассоциированный с классом C_i . Практическое использование такого дерева бессмысленно, поскольку любой новый объект оно будет относить только к этому классу.

2 Множество S вообще не содержит примеров, т. е. является пустым множеством. В этом случае для него тоже будет создан лист (чтобы создать узел, применять правило к пустому множеству бессмысленно), класс которого будет выбран из другого множества (например, класс, наиболее часто встречающийся в родительском множестве).

3 Множество S содержит обучающие примеры всех классов C_k . В этом случае требуется разбить множество S на подмножества, ассоциированные с классами. Для этого выбирается один из атрибутов A_j множества S , который содержит два и более уникальных значения (a_1, a_2, \dots, a_p), где p – число уникальных значений признака. Затем множество S разбивается на подмножества (S_1, S_2, S_p), каждое из которых включает примеры, содержащие соответствующее значение атрибута. Затем выбирается следующий атрибут и разбиение повторяется. Эта процедура будет рекурсивно повторяться до тех пор, пока все примеры в результирующих подмножествах не окажутся одного класса.

При использовании данной методики построение дерева решений будет происходить сверху вниз (от корневого узла к листьям). В настоящее время разработано значительное число алгоритмов обучения деревьев решений: ID3, CART, C4.5, C5.0, NewId, ITrule, CHAID, CN2 и т. д. [7]. В данной статье мы не оцениваем эффективность применения того или иного алгоритма, а рассматриваем особенности постановки задачи индукции дерева решения для системы диспетчерского управления.

Отличительной особенностью ГДП от традиционных объектов классификации является непрерывное его изменение во времени. В связи с этим предлагается рассматривать множество параметров, характеризующих нит-

ки ГДП, как темпоральные данные. Тогда задача обобщения и классификации эксплуатационных обстановок при наличии темпоральных данных формулируется следующим образом.

Пусть график исполненного движения (ГИД) строится на основании данных об изменении состояний блок-участков q при проследовании по ним поездов. Изменение состояний происходит в некоторые дискретные моменты времени: $t = 0, 1, 2, 3, \dots$. Тогда поездную обстановку на полигоне управления в некоторый момент времени i можно представить в виде вектора

$$s_i \leq x_1(t=i), \dots, x_2(t=i), \dots, x_q(t=i), t=i > 1. \quad (1)$$

Для того чтобы проследить динамику продвижения поездов по участку, возможные их отклонения от плановых ниток ГДП, динамику изменения отклонений (отставание или нагон), необходимо рассмотреть упорядоченное множество таких векторов, полученных на конечном временном интервале (t_i, t_{i+r-1}) $r > 1$.

Пусть рассматриваются q параметров на временном интервале длины r . Представим эти данные в виде матрицы (таблица 2).

Таблица 2 – Динамический объект обобщения (ГИР)

	Поезд 1	Поезд 2	...	Поезд g	Время t
(S_i)	$x_1(t=i)$	$x_2(t=i)$		$x_g(t=i)$	i
$(S_i + 1)$	$x_1(t=i+1)$	$x_2(t=i+1)$		$x_g(t=i+1)$	$i+1$
$(S_i + 2)$	$x_1(t=i+2)$	$x_2(t=i+2)$		$x_g(t=i+2)$	$i+2$
...
$(S_i + r - 1)$	$x_1(t=i+r-1)$	$x_2(t=i+r-1)$		$x_g(t=i+r-1)$	$i+r-1$

Каждая ячейка матрицы представляет собой значение места нахождения поезда q в момент времени i . Тогда каждый столбец матрицы будет описывать нитку графика исполненного движения, а каждая строка – поездное положение на участке в моменты времени соответственно $i, i+1, \dots, i+r-1$.

Однако эксплуатационная ситуация на перегоне характеризуется не только взаимным расположением поездов на участке, но и соблюдением ими планового ГДП. В связи с этим предлагается дополнить матрицу значениями поездов планового ГДП.

На основании данных о поездах ГИД и ВГДП формируется расчетная поездная обстановка (место дислокации каждого из поездов, находящихся в движении, в каждый момент планового периода). Расчетное значение места нахождения поезда на момент времени t_{i+r+v} определяется как

$$x_v(t=i+v+r) = x_q(t=i+v) + \Delta x_{r-q}^{\text{прогноз}} (\Delta t = r-q). \quad (2)$$

Тогда эксплуатационная ситуация на полигоне будет характеризоваться совокупностью массивов информации об исполненной, плановой и расчетной поездной обстановках (таблица 3).

Таблица 3 – Динамический объект обобщения эксплуатационной обстановки

	Поезд 1	Поезд 1 (план)	Поезд 2	Поезд 2 (план)	...	Поезд q	Поезд q (план)	Время t
S_i	ГИР	План						
S_{i+1}								
S_{i+2}								
...								
S_{i+y}								
...	Прогноз							
S_{i+r}								

Назовем структуру, представленную в таблице 3, динамическим объектом обобщения эксплуатационной обстановки. Тогда ставится задача отнесения соответствующей эксплуатационной обстановки к определенному классу в зависимости от реализуемых методов диспетчерской корректировки. Отнесение эксплуатационных обстановок к соответствующим классам выполняется с использованием дерева решений.

Формально дерево решений – это взвешенный ориентированный граф T . Из множества вершин V выделим вершину $v_0 \in V$ – корень дерева. Все вершины разделим на два класса:

$V_i \subset V$ – множество внутренних вершины (узлов) дерева; V_i включает в себя такие вершины, из которых выходят дуги;

$V_l \subset V$ – множество внешних, конечных, вершин дерева (листьев); V_l включает в себя такие вершины, из которых дуги не выходят; V_i и V_l образуют разбиение множества вершин V дерева решений T :

$$V_i \cap V_l = \emptyset; V_i \cup V_l = V.$$

Внутренние вершины V_i дерева соответствуют атрибутам, которые используются при классификации эксплуатационной обстановки. Вершины-листья V_l соответствуют алгоритмам диспетчерской корректировки ГДП.

Каждая дуга e дерева решений взвешена условием «атрибут = значение атрибута» (для качественных значений атрибутов) либо «атрибут σ значение атрибута» (для количественных значений атрибутов, $\sigma \in \{\geq, >, =\}$).

Общее правило выбора атрибута разбиения множества эксплуатационных ситуаций на подмножества можно сформулировать следующим образом: выбранный атрибут должен разбить множество наблюдений в узле так, чтобы результирующие подмножества содержали примеры с одинаковыми метками класса или были максимально приближены к этому, т. е. количество объектов из других классов («примесей») в каждом из этих множеств было как можно меньше. Для выбора атрибутов разбиения множества эксплуатационных обстановок на подмножества предлагается использовать теоретико-информационный критерий, который основан на понятии информационной энтропии.

$$H = -\sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N} \log\left(\frac{N_i}{N}\right), \quad (3)$$

где n – число классов в исходном подмножестве; N_i – число примеров i -го класса; N – общее число примеров в подмножестве.

Энтропия рассматривается как мера неоднородности подмножества по представленным в нём классам. Когда классы представлены в равных долях и неопределённость классификации наибольшая, энтропия также максимальна. Если все примеры в узле относятся к одному классу, т. е. $N = N_i$, логарифм от единицы обращает энтропию в ноль.

Таким образом, лучшим атрибутом разбиения A_i будет тот, который обеспечит максимальное снижение энтропии результирующего подмножества относительно родительского. На практике, однако, говорят не об энтропии, а о величине, обратной ей, которая называется информацией. Тогда лучшим атрибутом разбиения будет тот, который обеспечит максимальный прирост информации результирующего узла относительно исходного:

$$Gain(A) = Info(S) - Info(S_A), \quad (4)$$

где $Info(S)$ – значимая информация, связанная с подмножеством S до разбиения, $Info(S_A)$ – информация, связанная с подмножеством, полученным при разбиении по атрибуту A .

В результате проведенных исследований установлено, что при классификации эксплуатационных ситуаций и выборе алгоритмов диспетчерских корректировок ГДП целесообразно использовать следующие атрибуты A_j :

- для каждого из поездов – соответствие расчетного времени прибытия поезда на станцию плановому значению;
- для каждого из поездов – соответствие расчетного времени отправления поезда со станции плановому значению;
- для каждого из поездов – соответствие перегонных времен хода плановым значениям;
- для каждой из пар поездов, находящихся рядом в ГДП, – соблюдение станционных интервалов;
- для каждой из пар поездов, находящихся рядом в ГДП, – соблюдение межпоездных интервалов;
- наличие резервов в перегонных временах хода;
- наличие резервов в станционных и межпоездных интервалах;
- наличие резервов во временах стоянок поездов;
- наличие резервных ниток в ГДП;

– категория поезда, отклоненного от планового ГДП (пассажирский, пригородный, грузовой, длинносоставный, тяжеловесный и др.).

Таким образом, на основании дерева решений ГДП выбираются алгоритмы диспетчерских корректировок. Некоторые из таких алгоритмов описаны в [8]. Однако в дальнейшем в процессе «обучения» ИСУПП семейство алгоритмов будет расширяться, дополняться и, возможно, корректироваться.

Предложенная апостериорная модель диспетчерской корректировки ГДП позволит сформировать интеллектуальную систему автоматического диспетчерского управления, которая в дальнейшем должна интегрироваться с системами приготовления маршрутов на станциях и автоведения поездов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 *Ерофеев, А. А.* Разработка интеллектуальной системы управления перевозочным процессом на Белорусской железной дороге / А. А. Ерофеев, О. А. Терещенко, В. В. Лавицкий // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 6. – С. 74–77.

2 Правила технической эксплуатации железной дороги в Республике Беларусь : утв. постановлением М-ва трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь 25.11.2015, № 52 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://www.rw.by/corporate/normative_documents/rules-of-technical-operation-of-railways/. – Дата доступа : 31.08.2021.

3 *Сотников, Е. А.* История развития системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте (отечественный и зарубежный опыт) / Е. А. Сотников, Д. Ю. Левин, Г. А. Алексеев. – М. : Техинформ, 2007. – 237 с.

4. Fernzüge rollen dem Fahrplan hinterher / Deutsche Bahn // Stern. – 24 Jan. – 2008.

5 Железные дороги Германии: итоги 2018 года // Железные дороги мира. – 2019. – № 5. – С. 7.

6 *Quinlan, J. R.* Induction of decision trees / J. R. Quinlan // Machine Learning. – 1(1). – P. 81–106.

7 *Murthy, S.* Automatic construction of decision trees from data : A Multi-disciplinary survey / S. Murthy. – Boston, 1997. – 49 p.

8 *Ерофеев, А. А.* Интеллектуальная диспетчерская корректировка графика движения поездов / А. А. Ерофеев // Информационные технологии и системы 2016 (ИТС 2016) : материалы Междунар. науч. конф. / редкол. Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск : БГУИР, 2016. – С. 100–101.

A. A. EROFEEV

A POSTERIORI MODEL OF INTELLIGENT DISPATCHING ADJUSTMENT OF THE TRAIN SCHEDULE

The necessity of using the methods of dispatch control in the intelligent control system of the transportation process has been substantiated. It is proposed to use a posteriori models when describing the dispatch control system. The structure of the hybrid problem solv-