

УДК 656.22

О. А. ТЕРЕЩЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Управление эксплуатационной работой», Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», ул. Кирова, 34, Гомель, Республика Беларусь, 246653, тел. +375 (232) 95 21 84, эл. почта i_am_@tut.by, ORCID 0000-0002-5598-9309

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАКОПЛЕНИЯ ВАГОНОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Цель. В статье предполагается рассмотреть создание методической основы моделирования процессов накопления вагонов при решении задач оперативного планирования в условиях неопределенности исходной информации для оценки устойчивости принятого планового сценария и расчета сопутствующих технологических рисков. **Методика.** Решение исследуемой задачи основано на использовании общенаучных подходов, аппарата теории вероятностей и теории нечетких множеств. Для достижения поставленной цели систематизированы факторы, влияющие на энтропию оперативных планов. Установлено, что при планировании эксплуатационной работы железнодорожных станций, участков и узлов наиболее значимыми факторами, обуславливающими неопределенность исходной информации, являются: а) внешние условия по отношению к рассматриваемому железнодорожному полигону, выражаемые неопределенностью моментов времени поступления вагонов; б) внешние трудно идентифицируемые цели функционирования других участников логистической цепи (прежде всего клиентов), выражаемые неопределенностью моментов времени завершения грузовых операций с вагонами. Данные факторы предложено учитывать при автоматизированном планировании посредством статистического анализа – установления и исследования остатков времени (ошибок прогнозирования). В результате предложены аналитические зависимости для рационального представления функций плотности вероятности распределения остатков времени в виде точечных, кусочно-заданных и непрерывных аналитических моделей. Далее представлены разработанные модели накопления вагонов, применение которых зависит от идентифицированных состояний прогнозируемого входящего потока вагонов в систему накопления. Кроме того, последняя предложенная модель является общим случаем модели процессов накопления с произвольным уровнем достоверности исходной информации при любой структуре входящего потока вагонов. В заключение предложена методика оценки результатов моделирования накопления вагонов для оптимизации перевозочного процесса в зависимости от выбранного критерия. **Результаты.** Разработанная методика моделирования процессов накопления вагонов нашла отражение в создаваемых с участием автора и внедряемых на Белорусской железной дороге на базе ИАС ПУР ГП (информационно-аналитическая система поддержки управленческих решений для грузовых перевозок) динамических моделях. Они предназначены для обеспечения оперативного планирования перевозочного процесса на основе методов, позволяющих оценивать технологические риски. **Научная новизна.** Инновационная составляющая работы обусловлена расширением существующих моделей накопления вагонов для случаев неопределенности исходной информации. Таким образом, существовавшие ранее детерминированные модели являются частными случаями предложенной. Также, в отличие от существующих, методика позволяет комплексно учитывать влияние случайных процессов. За счет этого могут дополнительно оцениваться технологические риски и оперативно осуществляться необходимые регулировочные мероприятия. В целом, полученные при моделировании предлагаемым способом результаты позволяют повысить качество выходных решений в системе сменного-суточного и текущего планирования эксплуатационной работы, увеличив достоверность оперативных планов. **Практическая значимость.** На сегодняшний день существует благоприятная возможность использования предложенной методики моделирования в существующих на железнодорожном транспорте системах автоматизированного оперативного планирования эксплуатационной работы, в том числе для оптимизации местных вагонопотоков и решения ряда актуальных задач поездообразования.

Ключевые слова: оперативное планирование; неопределенность информации; накопление вагонов; моделирование; технологические риски; автоматизация

Введение

Качество функционирования транспортной отрасли зависит от используемых и внедряемых инноваций, научное обеспечение которых направлено как на процесс создания, так и на снижение ресурсоемкости их внедрения и сопровождения.

Современные информационные технологии, применяемые на железнодорожном транспорте, создали виртуальную среду, динамично и адекватно отображающую перевозочный процесс. Наличие подобной интегрированной базы данных позволяет на ее основе разрабатывать и реализовывать алгоритмы прогнозирования перевозочного процесса на недоступном ранее уровне, включая модели реального времени [1, 12].

Планирование, как функция менеджмента, определяет программу регулировочных действий в расчетном интервале времени в совокупности с устанавливаемыми методами и средствами реализации. Оперативное планирование является важной составляющей эксплуатационной деятельности, от качества которого напрямую зависит как реализация долгосрочных планов и программ, так и уровень исполнения текущих производственных процессов [5, 8, 12]. Показатели оперативного плана устанавливаются на основе прогнозирования динамических процессов, параметры которых определяются в том числе другими участниками логистической цепи, что является источником неопределенности исходной информации, снижает достоверность получаемых результатов и усложняет процесс планирования на их основе.

Процессы, связанные с накоплением вагонов, широко распространены в станционной технологии и являются типичным предметом оперативного планирования. Их наличие обусловлено двумя основными факторами:

- необходимостью консолидации вагонопотока для обеспечения установленных значений массы и длины железнодорожных составов;
- присутствием в технологии операций, начало выполнения которых устанавливается расписанием.

В условиях неопределенности исходной информации автоматизированное моделирование

процесса накопления вагонов требует вероятностной оценки для набора возможных сценариев его реализации. При этом в системе моделирования должна учитываться не только энтропия исходной информации, но и точность модели, которая определяет продвижение вагонопотока в технологической цепи.

Применяемые в статье подходы предусматривают комплексное решение поставленной задачи в обозначенных условиях.

Цель

Целью работы является создание методической основы моделирования процессов накопления вагонов при решении задач оперативного планирования в условиях неопределенности исходной информации для оценки устойчивости принятого планового сценария и расчета технологических рисков.

Методика

Результатом неопределенности исходной информации в системах планирования транспортных процессов является неопределенность выходной информации. Таким образом, любое запланированное событие в приведенных условиях можно рассматривать, как совершаемое с определенной вероятностью или имеющее вероятностные параметры (количественные, качественные, временные и др.). Для описания таких процессов в статье использован специализированный аппарат теории вероятностей и теории нечетких множеств, позволяющий одновременно оценивать уровень достоверности плановых решений и создавать адекватные заданным условиям модели накопления вагонов.

Неопределенность исходной информации можно выразить через энтропию $H_{пер}$, которая применительно к задаче исследования зависит от:

- устойчивости перевозочного процесса, определяемой соответствием эксплуатационной нагрузки развитию инфраструктуры и имеющимся перевозочным ресурсам;
- наблюдаемости перевозочного процесса, которая зависит от группы факторов: удаленности операции во времени от момента принятия решения (планирования); удаленности операции в технологической цепи (количества про-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

межуточних операцій); удаленности операции в пространстве (фактора расстояния и присутствия различного рода административных границ); полноты и доступности воздействия на управляемую систему (административного и оперативное подчинения, удаленности, владельца, собственника);

- управляемости перевозочного процесса, как функции наблюдаемости и параметров управляющих ресурсов;

- координируемости перевозочного процесса, обусловленной уровнем согласованности взаимодействия организаций железнодорожного транспорта между собой, партнерами и клиентами.

Оценку источников энтропии информации в системе оперативного планирования можно провести на основе представленных ниже групп условий и факторов, влияющих на оперативный прогноз продвижения i -го вагона по технологической цепи на расчетном железнодорожном полигоне (участке, узле, станции):

1-я группа:

- нормативное время обработки в каждой подсистеме;

- способ использования производственных ресурсов, обеспечивающих обработку и продвижение вагонопотока;

- количественные характеристики и структура обрабатываемого вагонопотока (эксплуатационная нагрузка);

- установленное расписание выполнения выделенных операций;

2-я группа:

- неопределенность времени поступления вагонов на расчетный полигон;

- неопределенность времени завершения выполнения грузовых операций с вагонами.

Условия и факторы первой группы имеют природу констант или напрямую зависят от управления $u(t)$, или их воздействие корректируется управлением. То есть по результатам моделирования возможно запланировать изменение количества и способов применения производственных ресурсов, произвести корректировку расписания выделенных операций с целью достижения необходимых параметров эксплуатационной работы. При этом воздействие случайных факторов нивелируется возможно-

стью комплексной подготовки превентивных технических и технологических мер, максимальным уровнем наблюдаемости и управляемости перевозочного процесса на расчетном полигоне в сравнении с другими объектами, находящимися за пределами расчетного полигона.

Условия и факторы второй группы имеют в своей основе фундаментальную неопределенность:

- время поступления вагона на расчетный полигон в общем виде зависит от внешнего управления (в том числе от действий иностранных железнодорожных администраций, операторов подвижного состава, перевозчиков, грузоотправителей); энтропии в системе выполнения грузовых операций с вагонами в адрес станций расчетного полигона; случайных событий (возникающих неисправностей подвижного состава, нерегламентированных задержек, ограничений и запрещений, человеческого фактора в системе управления);

- время завершения выполнения с вагоном грузовых операций (включая места общего пользования, но в меньшей степени) зависит от управления, целей, задач и критериев эффективности работы клиента, что способствует снижению уровня наблюдаемости и управляемости исследуемых процессов.

Характер изменения неопределенности состояния перевозочного процесса при решении задач оперативного планирования в общем виде можно представить графически (рис. 1). Для расчетного железнодорожного полигона источники энтропии исходной для планирования информации укрупненно можно представить в виде совокупности всех внешних по отношению к расчетному полигону факторов и основного внутреннего фактора – сложного управленческого взаимодействия железной дороги и клиентов в процессе выполнения погрузки и выгрузки, что затрудняет достоверное прогнозирование времени освобождения вагонов после завершения грузовых операций.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

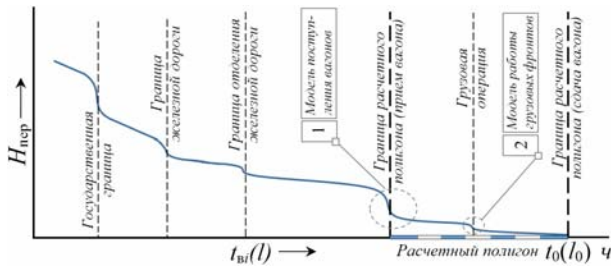


Рис. 1. Изменение энтропии перевозочного процесса при решении задач оперативного планирования

Fig. 1. Change in the entropy of the transportation process at solving the tasks of operational planning

Перевозочный процесс на железнодорожном транспорте подчиняется законам сложных систем [6, 7, 14]. Даже в условиях предоставления достоверных исходных данных на практике оказывается невозможным регулярное точное прогнозирование состояний перевозочного процесса из-за результирующего влияния множества малозначимых и случайных факторов, не нашедших по объективным причинам отражения в алгоритмах модели [9, 10, 17]. При оперативном планировании для одновременного учета неопределенности исходной информации и качества работы прогнозной модели предлагается использовать статистическую оценку [11, 12, 18], основанную на функциях плотности распределения вероятности остатков времени (ошибок прогнозирования), которые определяются сравнением результатов оперативного прогноза моментов времени прибытия вагонов на техническую станцию $f_{\text{оши}}^n(\Delta t_{ri}^n)$ и моментов времени завершения выполнения с вагонами грузовых операций $f_{\text{оши}}^r(\Delta t_{ri}^r)$ с фактически исполненными значениями.

Функция плотности распределения остатков времени $f_{\text{оши}}^n(\Delta t_{ri}^n)$, в зависимости от наличия резерва пропускной способности на примыкающем железнодорожном участке (насыщенности графика движения поездов), может быть аппроксимирована непрерывной функцией – при низком и среднем уровне использования пропускной способности, кусочно-заданной – при высоком уровне использования пропускной способности с большой долей пассажирских и других приоритетных поездов на графике, дискретной точечной – при полном использовании

пропускной способности с большой долей пассажирских и других приоритетных поездов на графике (рис. 2). Данный факт обусловлен степенью возможности регулирования поездным диспетчером нормативного графика движения в зависимости от уровня его насыщенности. Аналогично, вид функции $f_{\text{оши}}^r(\Delta t_{ri}^r)$ обусловлен уровнем загрузки и степенью соблюдения выполнения установленного расписания в подсистеме выполнения грузовых операций.

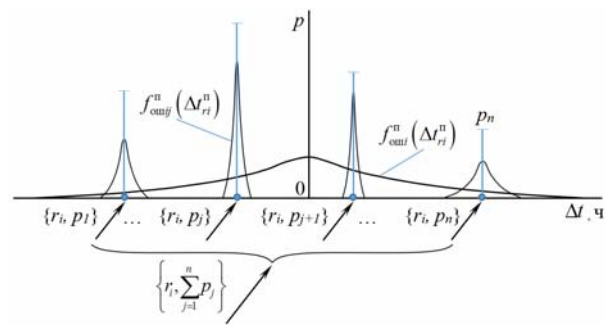


Рис. 2. Основные виды функции плотности распределения остатков времени (ошибок прогнозирования)

Fig. 2. Main types of density function of time residues distribution (predictive errors)

Наиболее сложным случаем является аналитическое представление кусочно-заданных функций плотности распределения остатков времени $f_{\text{оши}}^n(\Delta t_{ri}^n)$ и $f_{\text{оши}}^r(\Delta t_{ri}^r)$.

Для практической реализации процесса моделирования части кусочно-заданной функции плотности распределения остатков времени выбираются последовательно в порядке убывания соответствующих частям вероятностей, а общее количество используемых частей $n_{\text{кф}}$ определяется исходя из требования к установленной точности расчетов ϵ_M :

$$\sum_{j=1}^{n_{\text{кф}}} \int_{-\infty}^{+\infty} f_{\text{оши}j}^{n(r)}(\Delta t_{ri}^{n(r)}) d\Delta t_{ri}^{n(r)} \geq 1 - \epsilon'_M, \quad 0 < \epsilon'_M < \epsilon_M, \quad (1)$$

где $f_{\text{оши}j}^{n(r)}(\Delta t_{ri}^{n(r)})$ – используемая в модели функция $f_{\text{оши}}^n(\Delta t_{ri}^n)$ или $f_{\text{оши}}^r(\Delta t_{ri}^r)$; ϵ'_M – вспомогательный параметр, не превышающий по величине ϵ_M .

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

При установлении для практических целей конечных границ кусочно-заданных функций плотности распределения вероятности остатков моделирования ее правая и левая границы устанавливаются исходя из равенства интегралов отбрасываемых частей от установленной границы до соответствующей положительной или отрицательной бесконечности, а границы между соседними частями таких функций устанавливаются на основе решения интегрального уравнения:

$$\int_{\Delta t_{ri}^{n(r)-}}^{+\infty} f_{\text{оши}j}^{n(r)}(\Delta t_{ri}^{n(r)}) d\Delta t_{ri}^{n(r)} = \int_{-\infty}^{\Delta t_{ri}^{n(r)}} f_{\text{оши}j+1}^{n(r)}(\Delta t_{ri}^{n(r)}) d\Delta t_{ri}^{n(r)}. \quad (2)$$

Нормировка кусочно-заданной функции плотности распределения вероятностей, каждая часть которой определена в границах $(\Delta t_{ri}^{n(r)-}, \Delta t_{ri}^{n(r)+})$, до единицы суммарной площади интегралов частей производится за счет поправки на коэффициент:

$$k_{\text{кз}}^{n(r)} = \frac{1}{1 - \sum_{j=1}^{n_{\text{кз}}} \int_{\Delta t_{ri}^{n(r)-}}^{\Delta t_{ri}^{n(r)+}} f_{\text{оши}j}^{n(r)}(\Delta t_{ri}^{n(r)}) d\Delta t_{ri}^{n(r)}} \leq \frac{1}{1 - \varepsilon_{\text{м}}}. \quad (3)$$

При несоблюдении условия $k_{\text{кз}}^{n(r)} \leq \frac{1}{1 - \varepsilon_{\text{м}}}$, расчеты с применением формул (1–3) повторяются до выполнения данного условия, которое должно быть достигнуто за счет уменьшения величины $\varepsilon_{\text{м}}'$ умножением на поправочный коэффициент, не превышающий $\frac{1}{k_{\text{кз}}^{n(r)}(1 - \varepsilon_{\text{м}})}$.

Как результат, для железнодорожных станций, участков и узлов в динамических моделях перевозочного процесса [3, 6, 7], учитывающих неопределенность исходной информации, перевозочный процесс для i -го вагона предлагается представлять в виде набора вариантов возможных цепей технологических операций с переменными параметрами [2, 4, 13, 16]. При этом вероятность реализации для i -го вагона j -ой технологической цепи (или вариации параметров технологической цепи) определяется:

$$p_{\text{ви}j} = \left(\frac{1}{1 - p_{\text{ви}}^{\text{ост}}} \right) \int_{M[\Delta t_{ri}^n] + (t_{\text{ош}j+1}^n - t_{ri}^n)}^{M[\Delta t_{ri}^n] + (t_{\text{ош}j+1}^n - t_{ri}^n)} f_{\text{оши}}^n(\Delta t_{ri}^n) d\Delta t_{ri}^n \times \\ \times \int_{M[\Delta t_{ri}^r] + (t_{\text{ош}k+1}^r - t_{ri}^r)}^{M[\Delta t_{ri}^r] + (t_{\text{ош}k+1}^r - t_{ri}^r)} f_{\text{оши}}^r(\Delta t_{ri}^r) d\Delta t_{ri}^r, \quad (4)$$

где $\frac{1}{1 - p_{\text{ви}}^{\text{ост}}}$ – нормировочная поправка, связанная с приведением для практических целей бесконечной области определения функций $f_{\text{оши}}^n(\Delta t_{ri}^n)$, $f_{\text{оши}}^r(\Delta t_{ri}^r)$ к конечному промежутку; $M[\Delta t_{ri}^n]$, $M[\Delta t_{ri}^r]$ – математическое ожидание, соответственно, ошибки моделирования времени прибытия i -го вагона на техническую станцию и времени завершения с ним грузовых операций; $t_{\text{ош}j}^n$, $t_{\text{ош}j+1}^n$ – моменты времени, соответствующие особым состояниям динамической модели перевозочного процесса в подсистеме расчета параметров обработки вагонопотока на технической станции по прибытии; $t_{\text{ош}k}^r$, $t_{\text{ош}k+1}^r$ – моменты времени, соответствующие особым состояниям динамической модели перевозочного процесса в подсистеме моделирования обработки вагонопотока после выполнения грузовых операций.

Особые состояния динамической модели перевозочного процесса в подсистемах моделирования обработки вагонопотока на технической станции по прибытии и выполнения грузовых операций определяются, как установленные моменты времени: прибытия поездов, отправления поездов, подач вагонов к грузовым фронтам или на выставочные пути, уборок вагонов на станцию с грузовых фронтов или выставочных путей.

Результаты

Таким образом, при моделировании процессов накопления вагонов на состав [8, 9, 12] или в ожидании последующей обработки учет неопределенности исходной информации предполагает усовершенствование общепринятой модели накопления (рис. 3) за счет применения

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

математического аппарата теории вероятностей и нечетких множеств.

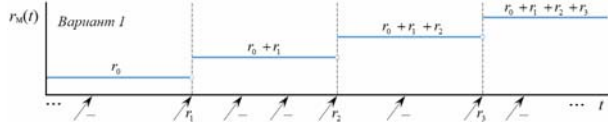


Рис. 3. Модель накопления вагонов в условиях наличия достоверной исходной информации

Fig. 3. Model of cars accumulation in conditions of reliable initial information availability

Представленную модель (рис. 3) предлагается использовать при наличии достоверной информации о времени поступления и продолжительности обработки вагонов. Для приведенных условий характерно применение постоянного расписания в предыдущих технологических цепях по отношению к прогнозируемому процессу и (или) использование короткого горизонта прогноза (в пределах ближайшего периода текущего планирования на 3–6 ч).

Второй вариант модели (рис. 4) предлагает использовать при поступлении вагонов в накопление по постоянному расписанию (устойчивым ниткам графика), но при вероятностном распределении поступления i -го вагона в накопление по заданным моментам расписания. Такие условия характерны при поступлении вагонов на станцию с участков с большой долей устойчивых ниток графика движения поездов или при высоком уровне использования пропускной способности пассажирскими и другими приоритетными поездами.

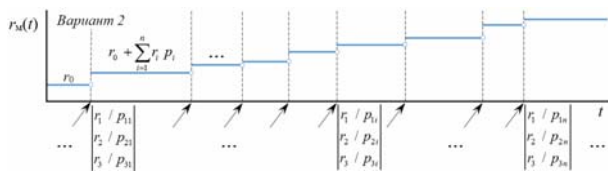


Рис. 4. Модель накопления вагонов в условиях неопределенности исходной информации при поступлении вагонов по постоянному расписанию

Fig. 4. Model of cars accumulation in conditions of initial information uncertainty under entry of cars according to a permanent schedule

В модели накопления вагонов в условиях неопределенности исходной информации при поступлении вагонов по постоянному расписанию (рис. 4) прибытие i -го вагона планируется

одновременно по нескольким ниткам (технологическим цепям) с определенной вероятностью для каждой. То есть каждой нитке (технологической цепи) соответствует некоторое нечеткое множество $\{r_i / p_{ij}\}$, состоящее из вагонов с сопоставленными вероятностями их включения (поступления по нитке).

Третий предлагаемый вариант (рис. 5) является обобщенным представлением процесса накопления вагонов и его возможно применять во всех остальных случаях (когда поступление вагонов описывается непрерывными или кусочно-заданными функциями). Первый и второй варианты являются частными случаями третьего варианта и используются как упрощенные модели.

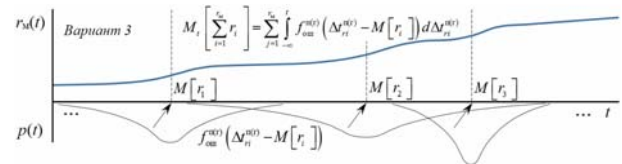


Рис. 5. Модель накопления вагонов в условиях неопределенности исходной информации в общем виде

Fig. 5. Model of cars accumulation of initial information uncertainty in general

При моделировании процессов накопления вагонов по третьему варианту математическое ожидание числа накопившихся вагонов $M_t \left[\sum_{i=1}^{r_n} r_i \right]$ в любой момент времени t пред-

ставляется как сумма интегралов плотности вероятности поступления всех учитываемых в модели вагонов в границах $(-\infty, t)$.

Результатом анализа прогнозной модели накопления вагонов (рис. 6) является корректировка ниток расписания $\{t_{scjk}\}$ за счет возможности создания вариантов $\{t_{scjk}^{bi}\}$.

Вариантность представлена следующими альтернативами:

- при обработке вагонопотока по постоянному расписанию варианты графика оцениваются с целью возможного его изменения в долгосрочной перспективе (по отношению к периоду оперативного планирования);
- в случае свободного или диспетчерского

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

расписания рассматриваются две возможные альтернативы:

1) формирование ниток расписания в моменты времени наиболее вероятного накопления вагонов до технологической нормы или технического ограничения (соответствует нитке t_{scjk}^{B1} на рис. 6) – применяется для расписаний, обеспечивающих общую оптимизацию использования производственных ресурсов;

2) формирование ниток расписания в моменты времени накопления вагонов до технологической нормы (технического ограничения) с заданным уровнем достоверности (соответствует нитке t_{scjk}^{B2} на рис. 6) – применяется для расписаний, когда наиболее важным фактором является полное использование тяговых ресурсов или существует необходимость обработки (отправления) контролируемых вагонов по заданной нитке.

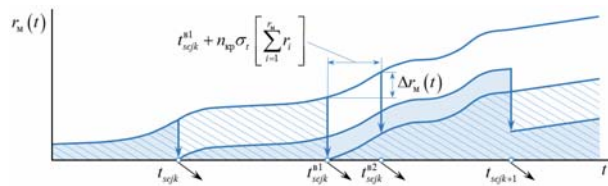


Рис. 6. Разработка вариантов расписания на основе предложенной прогнозной модели накопления вагонов

Fig. 6. Schedule options development on the base of the proposed forecast model of cars accumulation

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна работы состоит в расширении существующих моделей накопления вагонов для случаев неопределенности исходной информации. В отличие от разработок других авторов [4, 8, 9, 11, 14, 15], предлагаемая модель получена аналитически на основе фундаментальных закономерностей без привлечения эмпирики. Таким образом, значительная часть разработанных ранее детерминированных или

стохастических моделей являются частными случаями предложенной.

Полученные при моделировании предлагаемым способом результаты позволяют повысить качество выходных решений в системе сменного и текущего планирования эксплуатационной работы, увеличив достоверность оперативных планов.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования предложенной методики моделирования в существующих на железнодорожном транспорте системах автоматизированного оперативного планирования эксплуатационной работы, в том числе для оптимизации местных вагонопотоков и решения ряда актуальных задач поездообразования.

Разработанная методика моделирования процессов накопления вагонов нашла отражение в создаваемых с участием автора и внедряемых на Белорусской железной дороге на базе ИАС ПУР ГП динамических моделях, предназначенных для обеспечения оперативного планирования перевозочного процесса на основе методов, позволяющих оценивать технологические риски.

Вывод

Разработана методика построения прогнозных моделей накопления вагонов в процессе моделирования эксплуатационной работы. В методике идентифицированы возможные характеристики входящего вагонопотока и в соответствии с ними представлены адаптированные способы аналитического моделирования процессов накопления вагонов до технического ограничения или технологической нормы, а также в ожидании операции, выполняемой по расписанию. В отличие от существующих, методика позволяет комплексно учитывать влияние случайных процессов. За счет этого могут дополнительно оцениваться технологические риски и оперативно осуществляться необходимые регулировочные мероприятия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Автоматизированная система сменно-суточного планирования поездной и грузовой работы Белорусской железной дороги / В. Г. Кузнецов, О. А. Терещенко, Е. А. Федоров [и др.] // Вестн. Белорус. гос. ун-та транспорта: Наука и транспорт. – 2015. – № 2 (30). – С. 53–56.
2. Вол, М. Анализ транспортных систем : [сокращ. пер. с англ.] / М. Вол, Б. Мартин ; под ред. И. А. Молодых. – Москва : Транспорт, 1981. – 516 с.
3. Гершвальд, А. С. Оптимизация оперативного управления процессом грузовых перевозок на железнодорожном транспорте / А. С. Гершвальд. – Москва : Интекст, 2001. – 240 с.
4. Грунтов, П. С. Информационно-технологический подход к системе поездообразования / П. С. Грунтов, А. А. Ерофеев // Проблемы и перспективы развития трансп. систем и строит. комплекса : тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. / Белорус. гос. техн. ун-т. – Гомель, 2003. – Ч. II. – С. 17–19.
5. Грунтов, П. С. Прогнозирование показателей работы сортировочных станций методом моделирования на ЭВМ / П. С. Грунтов, В. А. Захаров. – Гомель : БелИИЖТ, 1981. – 60 с.
6. Долгополов, П. В. Удосконалення управління потоками у транспортному вузлі за допомогою апарату нечітких нейронних мереж / П. В. Долгополов, В. В. Петрушов // Східно-Європ. журн. передових технологій. – 2009. – Т. 1., № 3 (37). – С. 40–42.
7. Долгополов, П. В. Удосконалення місцевої роботи залізничного вузла на основі теорії розкладів / П. В. Долгополов, О. О. Бовкун // Східно-Європ. журн. передових технологій. – 2012. – Т. 2, № 11 (56). – С. 30–32.
8. Ерофеев, А. А. Планирование состава образования в системе интеллектуального управления перевозочным процессом / А. А. Ерофеев, Е. А. Федоров // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2016. – Вип. 12. – С. 16–24. doi: 10.15802/tstt2016/85881.
9. Кудрявцев, В. А. Закономерности состава образования на сортировочных станциях при отправлении поездов по твердому графику движения / В. А. Кудрявцев, А. А. Светашева // Изв. Петербург. ун-та путей сообщения. – 2015. – Вип. 2. – С. 5–14.
10. Кузнецов, В. Г. Комплексная система управления поездной работой на Белорусской железной дороге / В. Г. Кузнецов, А. А. Ерофеев // Проблемы и перспективы развития транспортной системы и строительного комплекса : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. / Белорус. гос. техн. ун-т. – Гомель, 2008. – С. 68–69.
11. Светашев, А. А. Процесс накопления вагонов на сортировочных станциях при твердом графике движения поездов / А. А. Светашев, Н. Ф. Светашева // Научно-техн. вестн. Брянск. гос. ун-та. – 2016. – № 4. – С. 117–123. doi: 10.22281/2413-9920-2016-02-04-117-123.
12. Терещенко, О. А. Оперативное планирование местной работы железнодорожных участков и узлов с использованием динамической модели перевозочного процесса / О. А. Терещенко // Транспортні системи та технології перевезень : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2016. – Вип. 12. – С. 80–89. doi: 10.15802/tstt2016/85889.
13. Banks, J. Discrete-event system simulation. Second edition / Jerry Banks, John S. Carson, Barry L. Nelson. – Upper Saddle River, N. J. : Published by Prentice Hall, 1996. – 594 p.
14. Erofeev, A. A. Intelligent Management of the Railway Transportation Process: Object Model / A. A. Erofeev, N. Erofeeva // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS–2017) : материалы междунар. науч.-техн. конф. (16.02–18.02.2017) / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – Минск, 2017. – С. 281–284.
15. Kazakov, N. Imitating modeling groups of multimodal cargo lines with participation of a sailing charter / N. Kazakov // Transportas (Transport Engineering). – Vilnius, 2006. – Vol. XIV, No. 3. – P. 74–82.
16. Osipov, G. S Fuzzy expert system of shipping companies safety assessment / G. S. Osipov, A. E. Sazonov // European Research. – 2016. – No. 3 (14). – P. 10–11. doi: 10.20861/2410-2873-2016-14-002.
17. Simplified Formulation of the Toll Design Problem / M. Chen, D. Bernstein, S. Chien, K. Mouskos // Transportation Research Record : J. of the Transportation Research Board. – 1999. – Vol. 1667. – P. 88–95. doi: 10.3141/1667-11.
18. Zharikova, M. Threat Assessment Method for Intelligent Disaster Decision Support System / M. Zharikova, V. Sherstjuk // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2016. – Vol. 512. – P. 81–99. doi: 10.1007/978-3-319-45991-2_6.

О. А. ТЕРЕЩЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Зклад освіти «Білоруський державний університет транспорту», вул. Кірова, 34, Гомель, Республіка Білорусь, 246653, тел. +375 (232) 95 21 84, ел. пошта i_am_@tut.by, ORCID 0000-0002-5598-9309

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ НАКОПИЧЕННЯ ВАГОНІВ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Мета. У статті передбачається розглянути розробку методичної основи моделювання процесів накопичення вагонів при вирішенні задач оперативного планування в умовах невизначеності вихідної інформації для оцінки стійкості прийнятого планового сценарію та розрахунку супутніх технологічних ризиків. **Методика.** Рішення досліджуваного завдання засноване на використанні загальнонаукових підходів, апарату теорії ймовірностей та теорії нечітких множин. Для досягнення поставленої мети систематизовано чинники, що впливають на ентропію оперативних планів. Встановлено, що при плануванні експлуатаційної роботи залізничних станцій, ділянок і вузлів найбільш значимими факторами, які зумовлюють невизначеність вихідної інформації, є: а) зовнішні умови стосовно розглянутого залізничного полігону, що виражаються невизначеністю моментів часу надходження вагонів; б) зовнішні важко ідентифіковані цілі функціонування інших учасників логістичного ланцюга (перш за все клієнтів), що виражаються невизначеністю моментів часу завершення вантажних операцій з вагонами. Дані фактори запропоновано враховувати при автоматизованому плануванні за допомогою статистичного аналізу – встановлення і дослідження залишків часу (помилки прогнозування). В результаті запропоновані аналітичні залежності для раціонального уявлення функцій щільності ймовірності розподілу залишків часу у вигляді точкових, кусково-заданих та безперервних аналітичних моделей. Далі представлені розроблені моделі накопичення вагонів, застосування яких залежить від ідентифікованих станів прогнозованого вхідного потоку вагонів у систему накопичення. Крім того, остання запропонована модель є загальним випадком моделі процесів накопичення з довільним рівнем достовірності попередньої інформації при будь-якій структурі вхідного потоку вагонів. На завершення запропонована методика оцінки результатів моделювання накопичення вагонів для оптимізації перевізного процесу в залежності від обраного критерію. **Результати.** Розроблена методика моделювання процесів накопичення вагонів знайшла відображення в створених за участю автора та впроваджуваних на Білоруській залізниці на базі ІАС ПУР ВП динамічних моделях. Вони призначені для забезпечення оперативного планування перевізного процесу на основі методів, що дозволяють оцінювати технологічні ризики. **Наукова новизна.** Інноваційна складова роботи обумовлена розширенням існуючих моделей накопичення вагонів для випадків невизначеності вихідної інформації. Таким чином, існуючі раніше детерміновані моделі є окремими випадками запропонованої. Також, на відміну від існуючих, методика дозволяє комплексно враховувати вплив випадкових процесів. За рахунок цього можуть додатково оцінюватися технологічні ризики та оперативно здійснюватися необхідні регулювальні заходи. В цілому, отримані при моделюванні запропонованим способом результати дозволяють підвищити якість вихідних рішень у системі змінно-добового та поточного планування експлуатаційної роботи, збільшивши достовірність оперативних планів. **Практична значимість.** На сьогоднішній день існує сприятлива можливість використання запропонованої методики моделювання в існуючих на залізничному транспорті системах автоматизованого оперативного планування експлуатаційної роботи, в тому числі для оптимізації місцевих вагонопотоків та рішення ряду актуальних завдань поїздоутворення.

Ключові слова: оперативне планування; невизначеність інформації; накопичення вагонів; моделювання; технологічні ризики; автоматизація

O. A. TERESHCHENKO^{1*}^{1*}Dep. «Management of Operational Work», Educational Institution «Belarusian State Transport University», Kirov St., 34, Gomel, Republic of Belarus, 246653, tel. +375 (232) 95 21 84, e-mail i_am_@tut.by, ORCID 0000-0002-5598-9309

SIMULATION OF CARS ACCUMULATION PROCESSES FOR SOLVING TASKS OF OPERATIONAL PLANNING IN CONDITIONS OF INITIAL INFORMATION UNCERTAINTY

Purpose. The article highlights development of the methodological basis for simulation the processes of cars accumulation in solving operational planning problems under conditions of initial information uncertainty for assessing the sustainability of the adopted planning scenario and calculating the associated technological risks. **Methodology.** The solution of the problem under investigation is based on the use of general scientific approaches, the apparatus of probability theory and the theory of fuzzy sets. To achieve this purpose, the factors influencing the entropy of operational plans are systematized. It is established that when planning the operational work of railway stations, sections and nodes, the most significant factors that cause uncertainty in the initial information are: a) external conditions with respect to the railway ground in question, expressed by the uncertainty of the timing of cars arrivals; b) external, hard-to-identify goals for the functioning of other participants in the logistics chain (primarily customers), expressed by the uncertainty of the completion of car loading time. These factors are suggested to be taken into account in automated planning through statistical analysis – determination and study of the remaining time (prediction errors). As a result, analytical dependencies are proposed for rational representation of the probability density functions of the remained time distribution in the form of point, piecewise-defined and continuous analytic models. Further the work presents the developed models of cars accumulation, the application of which depends on the identified states of the predicted incoming car flow to the accumulation system. In addition, the last proposed model is a general case of the accumulation process model with an arbitrary level of reliability of the initial information for any structure of the incoming flow of cars. In conclusion, a technique for estimating the results of simulation the cars accumulation was proposed to optimize the transportation process, depending on the chosen criterion. **Findings.** The developed methodology of simulation of cars accumulation process was reflected in the dynamic models created with the participation of the author and implemented at the Belarusian Railways on the basis of IAS SMD CT. They are designed to provide operational planning of the transportation process on the basis of methods that allow assessing technological risks. **Originality.** The innovative component of the work is based on the expansion of existing car accumulation models for cases of uncertainty of the initial information. Thus, the earlier deterministic models are particular cases of the proposed model. Also, unlike existing ones, the technique allows to take into account the influence of random processes in a complex manner. Due to this, technological risks can be further assessed and the necessary regulatory measures can be implemented promptly. In general, the results obtained by modeling the proposed method allow to improve the quality of output solutions in the system of shift and daily operational planning, increasing the reliability of operational plans. **Practical value.** To date, there is a favorable opportunity to use the proposed methodology of simulation in the automated operational planning systems existing in the railway transport, including the optimization of local railways and the solution of a number of urgent tasks when making up the trains.

Keywords: operational planning; uncertainty of information; car accumulation; simulation; technological risks; automation

REFERENCES

1. Kuznetsov, V. G., Tereshchenko, O. A., Fedorov, Y. A., Starinskaya, N. A., & Sakovich, S. Y. (2015). Avtomatizirovannaya sistema smenno-sutochnogo planirovaniya poyezdnoy i gruzovoy raboty Belorusskoy zheleznoy dorogi. *Bulletin BelGUTa: Science and Transportation*, 2 (30), 53-56.
2. Vol, M., & Martin, B. (1981). *Analiz transportnykh sistem*. Moscow: Transport.
3. Gershvald, A. S. (2001). *Optimizatsiya operativnogo upravleniya protsessom gruzovykh perevozok na zheleznodorozhnom transporte*. Moscow: Intekst.
4. Gruntov, P. S., & Erofeev, A. A. (2003). Informatsionno-tekhnologicheskii podkhod k sisteme poyezdoobrazovaniya. *Proceedings of the International Scientific-Practical Conference «Problems and Prospects of Development of Transport Systems and the Construction of the Complex»*, 2003, Gomel. 17-19. Gomel: BelGUT.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

5. Gruntov, P. S., & Zakharov, V. A. (1981). Prognozirovaniye pokazateley raboty sortirovochnykh stantsiy metodom modelirovaniya na EVM. Gomel: BelGUT.
6. Dolhopolov, P. V., & Petrushov, V. V. (2009). Udoskonalennia upravlinnia potokamy u transportnomu vuzli za dopomohoiu aparatu nechitkykh neironnykh mrezh. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (3(37)), 40-42.
7. Dolhopolov, P. V., & Bovkun, O. O. (2012). Improvement of local work of railway junction on the basis of time-tables theory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (11 (56)), 30-32.
8. Erofeev, A. A., & Fedorov, Y. A. (2016). Planning for the formation of trains in the system of intellectual management of transportation process. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 12, 16-24. doi: 10.15802/tstt2016/85881
9. Kudryavtsev, V. A., & Svetashev, A. A. (2015). Laws of train formation at the railroad yards with train departure under fixed schedule. *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2, 5-14.
10. Kuznetsov, V. G., & Erofeev, A. A. (2008). Kompleksnaya sistema upravleniya poezdnoy rabotoy na Belorusskoy zheleznoy doroge. *Proceedings of the II International Scientific-Practical Conference «Problems and Prospects of Development of Transport Systems and the Construction of the Complex»*, 2008, Gomel. 68-69. Gomel: BelGUT.
11. Svetashev, A. A., & Svetasheva, N. F. (2016). The process of accumulation wagons at marshalling yards with a firm timetable trains. *Scientific and Technical Journal of Bryansk State University*, 4, 117-123. doi: 10.22281/2413-9920-2016-02-04-117-123
12. Tereshchenko, O. A. (2016). Operational planning of local work organization of railway section and junction with use of dynamic model of transportation process. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 12, 80-89. doi: 10.15802/tstt2016/85889
13. Banks, J., Carson, II, J. S., & Barry, L. (1996). *Nelson Discrete-event system simulation* (2nd ed.). Upper Saddle River: Prentice Hall.
14. Erofeev, A. A., & Erofeeva, H. (2017). Intelligent Management of the Railway Transportation Process: Object Model. *Proceedings of the International Conference Open «Semantic Technologies for Intelligent Systems OSTIS-2017»*, February, 16-18, 2017, Minsk. 281-284. Minsk: Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.
15. Kazakov, N. (2006). Imitating modeling groups of multimodal cargo lines with participation of a sailing charter. *Transport Engineering*, XIV (3), 74-82.
16. Osipov, G. S., & Sazonov, A. E. (2016). Fuzzy expert system of shipping companies safety assessment. *European Research*, 3 (14), 10-11. doi: 10.20861/2410-2873-2016-14-002
17. Chen, M., Bernstein, D., Chien, S., & Mouskos, K. (1999). Simplified Formulation of the Toll Design Problem. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1667, 88-95. doi: 10.3141/1667-11
18. Zharikova, M., & Sherstjuk, V. (2016). Threat Assessment Method for Intelligent Disaster Decision Support System. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 512, 81-99. doi: 10.1007/978-3-319-45991-2_6

Стаття рекомендована к публікації д.т.н., проф. Д. Н. Козаченко (Україна); д.т.н., доц. А. К. Головничем (Республіка Біларусь)

Поступила в редколлегию: 10.02.2017

Принята к печати: 17.05.2017