

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 656.222.4

В. И. БОБРОВСКИЙ^{1*}, Р. Г. КОРОБЬЕВА^{2*}, В. О. БАЛАНОВ^{3*}

^{1*}Каф. «Транспортные узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (068) 444 63 95, эл. почта 1973bvi@gmail.com, ORCID 0000-0001-8622-2920

^{2*}Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, эл. почта rgkorobyova@outlook.com, ORCID 0000-0002-6424-1079

^{3*}Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, эл. почта vobalanov@gmail.com, ORCID 0000-0002-6137-3420

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Цель. Основной целью статьи является совершенствование имитационной модели железнодорожного направления для оценки использования пропускной способности отдельными поездами. **Методика.** В работе рассмотрены вопросы оценки пропускной способности железных дорог Украины, Европейского Союза, США. Отмечено, что реформирование рынка железнодорожных перевозок вызовет рост требований к качеству оценки пропускной способности, используемой поездами различных перевозчиков. В качестве основного метода для оценки пропускной способности в работе использованы методы тяговых расчетов, организации движения на железнодорожном транспорте и имитационного моделирования. **Результаты.** Разработана имитационная модель железнодорожного направления, которая отражает как структуру, так и взаимодействие отдельных её элементов. Модель включает: поездную модель, модель железнодорожной инфраструктуры, модель управления движением, информационную модель. Моделирование функционирования железнодорожного направления осуществляют поэтапно. На первом этапе выполняют моделирование движения одиночных поездов. На втором этапе выполняют согласование занятия железнодорожной инфраструктуры станций и перегонов поездами. Отправление поездов на перегон осуществляют при возможности обеспечения допустимых интервалов между данным, а также предшествующими и последующими поездами, разработанная модель реализована в виде программы «График движения». **Научная новизна** работы состоит в том, что в ней предложена усовершенствованная имитационная модель железнодорожного направления, которая отражает процесс пропуска поездов по участкам и через железнодорожные станции и позволяет оценивать влияние степени использования пропускной способности на продолжительность движения поездов. **Практическая значимость.** Полученные в работе результаты позволяют оценить влияние поездов, следующих по расписанию, на условия пропуска поездов, следующих без расписания движения.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт; график движения; пропускная способность; имитационное моделирование

Введение

Железнодорожный транспорт является основным перевозчиком грузов и одним из основных перевозчиков пассажиров в Украине.

Инфраструктура железных дорог Украины была создана во времена СССР для обеспечения потребностей его экономики. В то же время были разработаны и методы оценки ее пропускной способности, которые не претерпели

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

существенных изменений до настоящего времени. Однако происходящие сейчас изменения связанные с имплементацией Директив Европейского Союза, которые регламентируют организацию рынка железнодорожных перевозок, требуют совершенствования методов оценки пропускной способности железных дорог.

Цель

Основной целью статьи является совершенствование имитационной модели железнодорожного направления для оценки использования пропускной способности отдельными поездами.

Методика

В работе рассмотрены вопросы оценки пропускной способности железных дорог, используемых на железных дорогах Украины, Европейского Союза, США. Отмечено, что реформирование рынка железнодорожных перевозок вызовет рост требований к качеству оценки пропускной способности, используемой поездами различных перевозчиков. В качестве основного метода для оценки пропускной способности в работе использованы методы тяговых расчетов, организации движения на железнодорожном транспорте и имитационного моделирования.

Результаты

Оценку пропускной способности железных дорог Украины выполняют в соответствии с инструкцией [5]. В данном документе действительной пропускной способностью железнодорожного участка на перегонах называется максимальное количество грузовых поездов (пар поездов) установленной массы и длины, которое может быть пропущено через этот участок за единицу времени в соответствии с его технической оснащённостью и принятым способом организации движения. Величина пропускной способности определяется с помощью аналитического выражения:

$$n_{гр} = n_{нал}^{пар} - \varepsilon_{пс}^{ск} n_{пс}^{ск} - \varepsilon_{пс} n_{пс} - \varepsilon_{пр} n_{пр} - (\varepsilon_{уск} - 1) n_{уск} - (\varepsilon_{сб} - 1) n_{сб}, \quad (1)$$

где $n_{нал}^{пар}$ – наличная пропускная способность при параллельном графике движения поездов; $n_{пс}^{ск}, n_{пс}, n_{пр}, n_{уск}, n_{сб}$ – количество поездов, соответственно, скорых пассажирских, пассажирских, пригородных, укоренных грузовых и сборных; $\varepsilon_{пс}^{ск}, \varepsilon_{пс}, \varepsilon_{пр}, \varepsilon_{уск}, \varepsilon_{сб}$ – коэффициенты съема грузовых поездов, соответственно, скорыми пассажирскими, пассажирскими, пригородными, укоренными грузовыми и сборными поездами.

Несмотря на длительный период применения выражения (1) для оценки пропускной способности железных дорог, оно имеет ряд недостатков. Во-первых, величина коэффициентов съема грузовых поездов поездами различных категорий зависит от соотношения скоростей движения этих поездов, параметров железнодорожных линий и взаимной прокладки поездов на графике. Необходимо отметить, что существует большое количество научных работ, содержащих на оценку величины коэффициентов съема для различных категорий поездов [1, 7, 11], а также их сочетаний. Однако рост количества вариантов расчета коэффициентов съема приводит к тому, что трудозатраты, связанные с аналитическим расчетом пропускной способности железнодорожных участков, приближаются к трудозатратам на ее графическое определение на основании построения максимальных графиков движения. Во-вторых, даже в пределах одной категории параметры поездов существенно отличаются. Так, поезда отличаются массой, числом вагонов, техническим состоянием локомотивов, уровнем подготовки локомотивной бригады и др. [9, 10]. Указанные факторы приводят к тому, что скорости движения разных поездов в потоке отличаются, что также вызывает уменьшение пропускной способности.

Необходимо отметить, что в Украине Укрзалізниця является одновременно и оператором инфраструктуры, и единственным перевозчиком. Стоимость ее услуг регламентирует государство. В этих условиях расчет пропускной способности выполняют в основном на этапе построения графика движения поездов с целью оценки достаточности имеющихся технических средств для освоения плановых

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

объемов перевозок. В случае недостатка пропускной способности железнодорожной инфраструктуры в процессе выполнения перевозок диспетчерский аппарат использует различные организационные мероприятия для ее увеличения, что, как правило, достигается за счет ухудшения показателей использования подвижного состава, но не вызывает экономических расчетов между участниками перевозочного процесса.

В настоящее время одним из основных направлений реформирования отрасли железнодорожных перевозок является разделение деятельности по эксплуатации инфраструктуры и выполнению перевозок. В этом случае выделение пропускной способности является услугой, которую предоставляет оператор инфраструктуры перевозчикам, что повышает требования к оценке пропускной способности, используемой поездами различных перевозчиков.

После реформирования функционирование железных дорог Украины будет происходить в условиях, близких к работе железных дорог Европейского Союза и США, где инфраструктуру используют разные перевозчики.

В Европейском Союзе реализована модель вертикального разделения рынка железнодорожных перевозок. В этой модели пропускную способность операторы предоставляют перевозчикам её как услугу железнодорожной инфраструктуры. Другой особенностью работы железных дорог Европейского Союза, характерной для большинства государств – его членов, является преобладание пассажирских перевозок и организация движения по расписанию как грузовых, так и пассажирских поездов.

Основными методами оценки пропускной способности железных дорог при этом являются используемый в Великобритании метод CUI [15, 19], а также разработанный МСЖД и принятый 19 государствами метод UIC 406 [15, 16]. Оба метода основываются на сжатии расписаний, при котором выполняется перенос действующих ниток графика в пределах рассматриваемого временного интервала U таким образом, чтобы межпоездные интервалы были сокращены до минимально допустимых значений. Степень заполнения пропускной способности оценивают соотношением времени занятия ин-

фраструктуры при сжатом графике и продолжительности интервала U .

При повышении степени заполнения пропускной способности усиливается влияние задержек поездов одних перевозчиков на пунктуальность графика движения поездов других перевозчиков, а также влияние на величину задержек поездов сбоев, вызванных отказами элементов инфраструктуры и мероприятиями, связанными с ее содержанием. В этой связи в странах, где движение всех поездов выполняется по расписанию, значительное количество исследований посвящено построению графиков движения, устойчивых к помехам [13, 14], а также изменению расписания движения поездов в случае сбоев [18].

Сравнение подходов к оценке пропускной способности на железных дорогах Украины и государств ЕС выполнено в [12]. Однако необходимо отметить дополнительную черту, отличающую условия работы железных дорог Украины от железных дорог государств ЕС, которая состоит в том, что на железных дорогах ЕС организовано движение поездов по расписанию от станций формирования до станций расформирования. В то же время на отечественных железных дорогах пропуск поездов по расписанию преимущественно рассматривают только в пределах отдельных участков с целью оптимизации использования локомотивов. Выход на рынок независимых перевозчиков приведет к необходимости организации пропуска их поездов на всем маршруте следования по расписанию [8]. В этой связи возникает задача оценки пропускной способности железнодорожных направлений, учитывающей взаимосвязь процессов, происходящих на участках и технических станциях.

Условия функционирования железных дорог США имеют существенные отличия от условий работы железных дорог Европейского Союза. Характерной особенностью железных дорог США является преобладание грузовых перевозок над пассажирскими. При этом железнодорожная инфраструктура, как правило, принадлежит частным, вертикально интегрированным железнодорожным компаниям, которые содержат сеть и оказывают услуги по перевозке грузов. Учитывая, что основной грузопоток желез-

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

ных дорог формируют массовые грузы, то накопление поездов происходит до достижения ими максимальной массы или длины, а их движение осуществляется без соблюдения жесткого расписания. При этом конфликтные ситуации разрешает оперативно диспетчерский персонал. Перевозки пассажиров в США выполняет компания AMTRAK, обеспечивающая дальнейшее сообщение, а также ряд компаний, выполняющих местные и пригородные пассажирские перевозки. Особенностью пассажирских перевозок в США является то, что, как правило, их выполняют на инфраструктуре грузовых железных дорог. В этих условиях актуальной является задача исследования влияния неоднородности транспортного потока на расходы железных дорог, связанные с его пропуском по инфраструктуре. В качестве критерия для оценки уровня заполнения пропускной способности элемента транспортной инфраструктуры используют разницу времени проследования поезда при движении в потоке по сравнению с чистым временем проследования поездом данного элемента. Для оценки пропускной способности в США разработан ряд эмпирических, аналитических и имитационных моделей [17]. Учитывая сложность транспортного процесса, наличие значительного числа взаимосвязей между отдельными поездами в потоке, основным методом, применяемым для оценки пропускной способности железных дорог в США, является метод имитационного моделирования. Одним из наиболее часто используемых программных продуктов при этом является Rail Traffic Controller (RTC). Программный комплекс RTC включает следующие основные модули:

- модуль формирования случайного расписания движения поездов;
- модуль моделирования движения поездов;
- модуль разрешения конфликтных ситуаций.

Выбор очередности пропуска поездов при этом осуществляют в соответствии с заданной системой приоритетов.

Учитывая то, что грузовые железнодорожные перевозки в Украине связаны в основном с доставкой массовых грузов, значительную долю грузовых поездов как в настоящее время,

так и после реформирования отрасли будут отправлять без соблюдения жесткого расписания. Поэтому характер использования пропускной способности железнодорожной инфраструктуры в Украине будет иметь больше общих черт с работой железных дорог США, чем железных дорог стран Европейского Союза. В этих условиях в качестве основного метода оценки пропускной способности железных дорог целесообразно использовать имитационное моделирование.

Проблемы моделирования движения поездов исследуют в большом количестве научных работ как в Украине, так и в других постсоветских государствах, имеющих сходные с Украиной принципы организации движения поездов.

По железнодорожным путям поезда следуют не независимо, а в потоке. При этом скорость движения отдельного поезда является случайной величиной, зависящей как от его параметров, так и от параметров движения смежных поездов. В [10] установлено существование оптимальной загрузки перегона поездами, превышение которой приводит к падению величины пропускной способности.

В работе [2] рассмотрена задача построения имитационной модели развязки железнодорожных линий на подходе к станции. Функциональная модель развязки имеет иерархическую структуру и разделена на три уровня. На метаровне модель развязки рассматривают как СМО, предназначенную для обслуживания (пропуска) потоков поездов на примыкающих линиях. На макроуровне в качестве элементов в модель развязки включены две взаимосвязанные функциональные модели: модель движения потока поездов и модель системы регулирования движения поездов и их пропуска через пункты пересечения (система автоблокировки на перегонах и электрической централизации в пунктах пересечения/слияния). На микроуровне осуществляется имитационное моделирование движения отдельных поездов, которое реализовано на основе решения дифференциальных уравнений движения [2]. Система управления светофорами формализована с использованием конечных автоматов. В [3] отмечено, что железнодорожная развязка является управляемой СМО. Поэтому для оценки пока-

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

зателей работы развязки предложено использовать два режима – автоматический со специализированным управляющим алгоритмом и интерактивный, где приоритет пропуска поездов через развязку устанавливает лицо, выполняющее моделирование.

В [6] представлена имитационная модель работы железнодорожного направления, которое рассматривают как многофазную, многоканальную систему массового обслуживания, в которой обрабатывают заявки двух типов – пассажирские и грузовые поезда. При этом пассажирские поезда имеют приоритет над грузовыми. Разработанная модель позволяет оценивать время пропуска поездов по участку в зависимости от структуры поездопотока.

Таким образом, основным методом исследования процессов движения потоков поездов на железнодорожных направлениях и оценки пропускной способности железнодорожной инфраструктуры является имитационное моделирование. Разработанные модели позволяют адекватно моделировать существующие процессы движения потоков поездов и определять величину действительной и необходимой пропускной способности. Однако уже в настоящее время процессы реструктуризации Укрзалізничці привели к созданию Украинской железнодорожной скоростной компании, которая является перевозчиком пассажиров; также создан центр транспортного сервиса «Ліски», одной из целей которого является организация перевозок грузов в составе контейнерных поездов, движущихся по расписанию. Дальнейшее реформирование рынка железнодорожных перевозок приведет к созданию независимых перевозчиков грузов и пассажиров. В этих условиях возникает проблема распределения пропускной способности железнодорожной инфраструктуры между перевозчиками, что требует исследования вопросов использования пропускной способности отдельными поездами и оценки влияния отдельных поездов на условия пропуска других поездов.

Железнодорожное направление в модели рассматривают как сложную, динамическую, стохастическую и эргатическую систему массового обслуживания, состоящую из множества различных элементов, которые в процессе ра-

боты влияют друг на друга. Модель функционирования железнодорожного направления (МФН) должна отражать как структуру, так и взаимодействие отдельных ее элементов. В этой связи МФН включает:

- поездную модель, в которой представлены характеристики поездов, следующих по направлению;

- модель железнодорожной инфраструктуры, в которой представлены данные о геометрических параметрах перегонов и станций, описана система управления движением поездов на перегонах и станциях, а также содержатся данные о занятии поездами путей перегонов и станций;

- модель управления движением, которая обеспечивает выбор порядка занятия элементов инфраструктуры отдельными поездами;

- информационную модель, которую использует выполняющее моделирование лицо для контроля текущего состояния железнодорожного направления и подачи управляющих команд.

Отдельный поезд в модели представлен структурой данных

$$t_n = \{n_n, q_n, m_n, f_n, v_n, k_n, r_n, s_{no}, s_{nn}, t_n, \rho_n, T_p, T_c\},$$

где n_n – номер поезда; q_n, m_n – соответственно масса и число вагонов в поезде; f_n – тип локомотива или моторвагонного подвижного состава; v_n – скорость движения поезда; k_n – уровень приоритета пропуска поезда; r_n – режим движения поезда; s_{no}, s_{nn} – соответственно номер станции отправления и назначения поезда; t_n – время появления поезда в модели; ρ_n – коэффициент реализации мощности локомотива; T_p – расписание движения поезда; T_c – матрица значений времени движения поезда между станциями направления.

Параметры q_n, m_n и ρ_n моделируют как случайные величины с заданными законами распределения.

Расписание движения поезда задают в виде вектора T_p , каждый элемент которого описывают структурой:

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

$$\mathbf{T}_p = \{s, t_o, t_{пр}, \mathbf{f}_c\},$$

где s – станция, на которой предусматривают остановку поезда; t_o – предусмотренное расписанием время отправления поезда со станции; $t_{пр}$ – минимальная продолжительность простоя поезда на станции; \mathbf{f}_c – параметры случайной величины продолжительности технического обслуживания поезда на станции.

Модель железнодорожной инфраструктуры представлена двусвязным списком $R_{и}$ элементов инфраструктуры $r_{и}$. При этом каждый элемент списка представлен структурой

$$r_{и} = \{\mathbf{D}_{и}, p_{и}, n_{и}\},$$

где $\mathbf{D}_{и}$ – список параметров инфраструктуры; $p_{и}, n_{и}$ – предшествующий и следующий элементы инфраструктуры.

В качестве элементов инфраструктуры рассматриваются перегоны b_i и станции s_j , представляющие собой множества участков путей w . При этом каждый отдельный путь представляется структурой

$$w = \{n_k, d_k, l_k, i_k, r_{вк}, r_{гк}, v_k, d_{п1}, d_{п2}\}.$$

где n_k – номер пути; d_k – номер рельсовой цепи; l_k, i_k – длина и уклон участка пути; $r_{вк}, r_{гк}$ – радиусы вертикальной кривой и кривой в плане; v_k – ограничение скорости движения; $d_{п1}, d_{п2}$ – номера первой и второй рельсовых цепей участка удаления.

Перегоны b_i в модели представляются списками участков путей

$$b_i = \{w_i\}.$$

Станции s_j – это множества станционных путей \mathbf{b}_i , каждый из которых представлен списком участков путей, а также номера бригад пунктов технического обслуживания $\mathbf{p}_{ПТОi}$

$$s_j = \{\mathbf{b}_i, \mathbf{p}_{ПТОi}\}.$$

Для моделирования движения отдельного поезда используют дифференциальное уравнение второго порядка $S'' = f(t, S, S')$, в котором

в качестве независимой переменной выбрано время t :

$$S'' = \frac{d^2 S}{dt^2} = g'(f_k - w_k - b_t) \cdot 10^{-3},$$

где g' – ускорение силы тяжести с учетом инерции вращающихся масс; f_k – удельная касательная сила тяги локомотива; w_k – общее удельное сопротивление движению поезда; b_t – удельная тормозная сила поезда.

Моделирование функционирования железнодорожного направления осуществляют поэтапно.

На первом этапе выполняют моделирование движения одиночных поездов и заполняются матрицы \mathbf{T}_c , каждый элемент которых соответствует продолжительности движения поездов между станциями с учетом затрат времени на разгон и торможение.

На втором этапе выполняют согласование занятия железнодорожной инфраструктуры станций и перегонов поездами. Прокладку поездов на графике осуществляют в порядке увеличения параметров $k_{п}$.

Отправление поездов на перегон осуществляют при возможности обеспечения допустимых интервалов между данным, а также предшествующими и последующими поездами.

Каждую станцию в модели рассматривают как двухфазную многоканальную систему массового обслуживания с отказами. Входящий и исходящий потоки при этом образуют поезда, прибывающие на станцию и отправляющиеся с неё. Аппаратами обслуживания в первой фазе являются бригады ПТО, во второй – перегон, на который отправляют поезд.

При необходимости обслуживания поезда на станции бригадой ПТО его продолжительность моделируют как случайную величину в соответствии с параметрами \mathbf{f}_c .

Очередь образуют поезда, простаивающие на станционных путях в ожидании обслуживания бригадой ПТО и отправления на перегон.

В качестве основных типов поездов, обращающихся на сети, выбраны:

– пассажирские и грузовые поезда, которые следуют по жесткому расписанию;

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

– грузовые поезда, которые следуют без расписания движения.

Расписание движения поездов первого типа формирует выполняющее моделирование лицо. Момент поступления в модель i -го поезда второго типа ($i = 1 \dots N, N$ – число поездов второго типа) устанавливают как:

$$t_i = t_{i-1} + \Delta t_i,$$

где t_{i-1} – момент поступления в модель предыдущего поезда второго типа ($t_0 = -I_{\min}$); Δt_i – случайный интервал времени между данным и предыдущим поездами; I_{\min} – минимальный интервал поступления поездов в модель.

Величину интервала Δt поступления поездов моделируют как:

$$\Delta t_i^* = \frac{I_{\min} - M[\Delta t_i]}{k} \ln \prod_{j=1}^k R_j + I_{\min},$$

где R_j – случайное число, равномерно распределенное в интервале $[0, 1]$; $M[\Delta t_i]$ – математическое

ожидание интервала между i -м поездом и предыдущим; k – параметр Эрланга.

Математическое ожидание интервала между поездами на каждом шаге определяют как:

$$M[\Delta t_i] = \frac{T_M - t_{i-1}}{N - i + 1},$$

где T_M – период моделирования.

После расчета значения Δt_i^* для i -го поезда величину интервала окончательно корректируют из условия возможности поступления оставшихся $N - i$ поездов:

$$\Delta t_i = \min(\Delta t_i^*, T_M - t_{i-1} - (N - i)I_{\min}).$$

Критерием для оценки степени использования пропускной способности направления может быть средняя продолжительность задержки грузового поезда, следующего без расписания.

Предложенная модель реализована в виде программы «График движения», главное окно которой представлено на рис. 1.

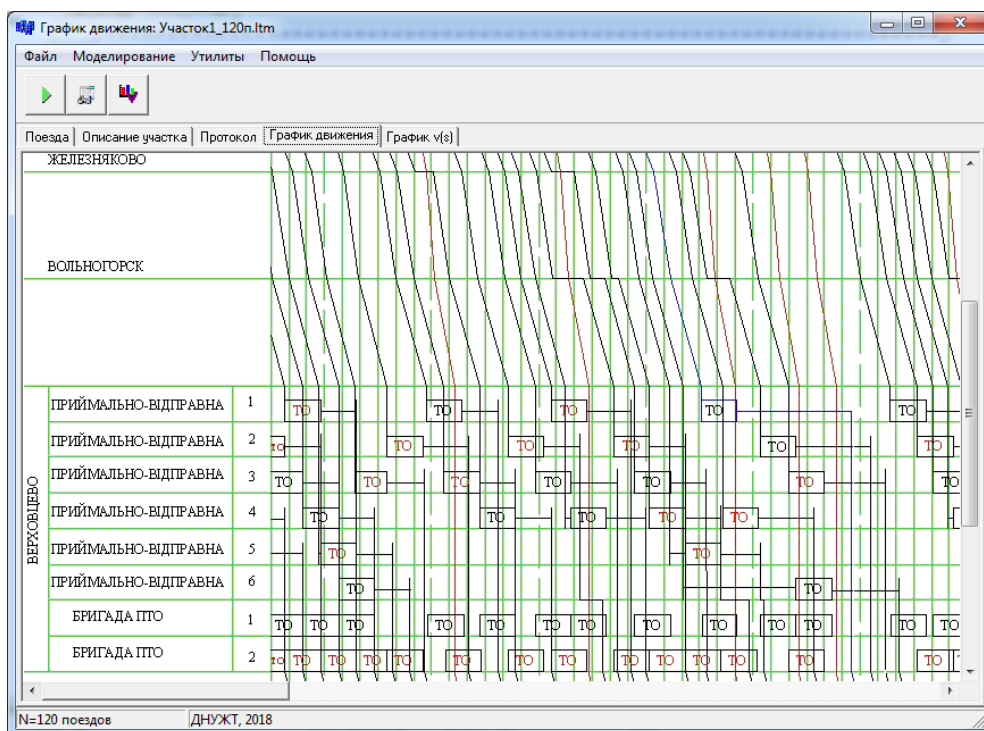


Рис. 1. Главное окно программы «График движения»

Fig. 1. Main window of the «Traffic Schedule» program

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

Исходными данными для моделирования служат характеристики железнодорожной линии и потока поездов. Результатами моделирования являются графики скорости движения поездов $v(s)$, расходы топлива (электроэнергии), величина работы механических сил R_m , сил сопротивления R_c и торможения R_t по каждому поезду, график движения поездов, а также продолжительность их движения по направлению. Расчет показателей осуществлен в соответствии с методикой, изложенной в [4].

В качестве примера рассмотрена двухпутная железнодорожная линия длиной 120 км, на которой расположена одна участковая и 12 грузовых и промежуточных станций. На участковой станции работают две бригады ПТО, которые выполняют техническое обслуживание транзитных грузовых поездов. По расписанию выполняют пропуск 15 пассажирских и 4 грузовых поездов. Для оценки влияния степени заполнения пропускной способности участка на условия движения поездов выполнена серия имитационных экспериментов с разработанной моделью. В результате получена зависимость $t_d(N)$, характеризующая дополнительные потери времени при движении поезда в потоке по сравнению с чистым временем движения поезда. Указанная зависимость приведена на рис. 2.

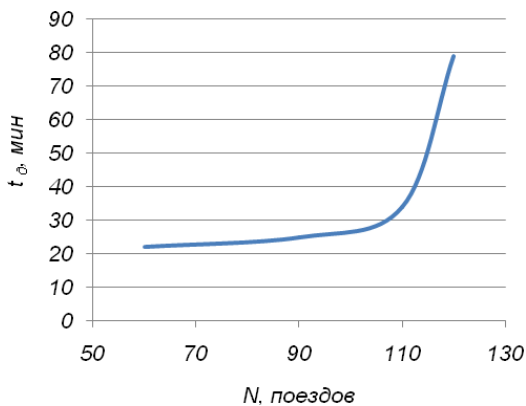


Рис. 2. Зависимость дополнительного времени при движении поезда в потоке по сравнению с чистым временем движения поезда от числа поездов

Fig. 2. The dependence of extra time when a train moves in the flow compared to the net time of train movement on the number of trains

Научная новизна и практическая значимость

Научная новизна работы состоит в том, что в ней предложена усовершенствованная имитационная модель железнодорожного направления, которая отражает процесс пропуска поездов по участкам и через железнодорожные станции и позволяет оценивать влияние степени использования пропускной способности на продолжительность движения поездов.

Полученные в ней результаты позволяют оценить влияние поездов, следующих по расписанию на условия пропуска поездов, следующих без расписания движения.

Выводы

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Реформирование рынка железнодорожных перевозок в Украине вызывает необходимость распределения пропускной способности железнодорожной инфраструктуры между перевозчиками, что требует исследования вопросов использования пропускной способности отдельными поездами и оценки влияния отдельных поездов на условия пропуска других поездов.

2. Предложенная модель железнодорожного направления позволяет имитировать пропуск потока поездов разных категорий через железнодорожные станции и участки и оценивать продолжительность движения в потоке поездов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Биленко, Г. М. Аналитическая оценка коэффициентов съема грузовых поездов «поездами-скороходами» при различных схемах прокладки на графике / Г. М. Биленко, Е. А. Попова // Наука и техника транспорта. – 2010. – № 1. – С. 43–51.
2. Бобровский, В. И. Имитационная модель развязки линий в железнодорожном узле / В. И. Бобровский // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків, 1999. – Вип. 38 : Концепція підвищення ефективності вантажних перевезень на залізничному транспорті. – С. 35–42.
3. Бобровский, В. И. Моделирование системы управления пропуском поездов через пересечения / В. И. Бобровский // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків, 1998. – Вип. 33 : Концепція підвищення ефективності вантажних перевезень на залізничному транспорті. – С. 71–79.
4. Бобровский, В. И. Оценка расходов на передвижение поездов в проектируемых развязках железнодорожных линий с использованием имитационного моделирования / В. И. Бобровский // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1999. – № 2. – С. 48–51.
5. Інструкція з розрахунку наявної пропускної спроможності залізниць України : ЦД 0036. – Київ : Транспорт України, 2002. – 376 с.
6. Карасёв, С. В. Оценка задержек поездов на железнодорожной сети методом моделирования в условиях случайного образования заявок на перевозку / С. В. Карасёв, М. Е. Корягин // Вестн. Сибир. гос. ун-та путей сообщения. – 2018. – № 2 (45). – С. 43–51.
7. Козаченко, Д. М. Дослідження коефіцієнтів зйому в умовах прискореного та швидкісного руху пасажирських поїздів / Д. М. Козаченко, О. Ю. Папахов, Н. О. Логвінова // Вісник Академії митної служби України. Серія: Технічні науки. – 2014. – № 2. – С. 110–116.
8. Козаченко, Д. М. Моделювання роботи залізничного напрямку / Д. М. Козаченко, Г. Я. Мозолевич, О. В. Власюк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 28. – С. 144–148.
9. Левин, Д. Ю. Оптимизация потоков поездов / Д. Ю. Левин. – Москва : Транспорт, 1988. – 175 с.
10. Попова, Е. А. Аналитическая оценка коэффициентов съема грузовых поездов «поездами-тихоходами» при их прокладке с обгонами / Е. А. Попова // Наука и техника транспорта. – 2009. – № 4. – С. 47–52.
11. Прохорченко, А. В. Проблеми розрахунку пропускної спроможності залізничної інфраструктури в умовах ринкових відносин / А. В. Прохорченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2014. – № 4. – С. 36–41.
12. Резервы времени при организации движения грузовых поездов по расписанию / Д. Н. Козаченко, Н. И. Березовый, В. О. Баланов, В. В. Журавель // Наука та прогрес транспорту. – 2015. – № 2 (56). – С. 105–115. doi: 10.15802/stp2015/42170
13. Fischetti, M. Fast Approaches to Improve the Robustness of a Railway Timetable / M. Fischetti, D. Salvagnin, A. Zanette // Transportation Science. – 2009. – Vol. 43. – Iss. 3. – P. 321–335. doi: 10.1287/trsc.1090.0264
14. Gibson, S. Developments in Transport Policy: The Evolution of Capacity Charges on the UK Rail Network / S. Gibson, G. Cooper, B. Ball // Journal of Transport Economics and Policy. – 2002. – Vol. 36. – No. 2. – P. 341–354.
15. Pouryousef, H. Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe / H. Pouryousef, P. Lautala, T. White // Journal of Modern Transportation. – 2015. – Vol. 23. – Iss. 1. – P. 30–42. doi: 10.1007/s40534-015-0069-z
16. Robust railway station planning: An interaction between routing, timetabling and platforming / T. Dewilde, P. Sels, D. Cattrysse, P. Vansteenwegen // Journal of Rail Transport Planning & Management. – 2013. – Vol. 3. – Iss. 3. – P. 68–77. doi: 10.1016/j.jrtpm.2013.11.002
17. Rotoli, F. Capacity Assessment of Railway Infrastructure: Tools, Methodologies and Policy Relevance in the EU Context : JRC Technical Report / F. Rotoli, E. N. Cawood, A. Soria ; European Commission. – Seville, 2016. – 62 p.
18. Törnquist, J. N-tracked railway traffic re-scheduling during disturbances / J. Törnquist, J. A. Persson // Transportation Research. Part B: Methodological. – 2007. – Vol. 41. – Iss. 3. – P. 342–362. doi: 10.1016/j.trb.2006.06.001
19. UIC leaflet 406 R. Capacity [Электронный ресурс] / UIC International Union of Railways. – 2e éd. – [s. l.], 2013. – 56 p. – Режим доступа: <http://clc.am/gqqlzw> – Загл. с экрана. – Проверено: 09.01.2019.

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

В. І. БОБРОВСЬКИЙ^{1*}, Р. Г. КОРОБЬОВА^{2*}, В. О. БАЛАНОВ^{3*}

^{1*}Каф. «Транспортні вузли», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (068) 444 63 95, ел. пошта 1973bvi@gmail.com, ORCID 0000-0001-8622-2920

^{2*}Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, ел. пошта rgkorobyova@outlook.com, ORCID 0000-0002-6424-1079

^{3*}Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, ел. пошта vobalanov@gmail.com, ORCID 0000-0002-6137-3420

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ЗАЛІЗНИЦЬ

Мета. Основною метою статті є вдосконалення імітаційної моделі залізничного напрямку для оцінки використання пропускної здатності окремими поїздами. **Методика.** У роботі розглянуті питання оцінки пропускної здатності залізниць України, Європейського Союзу, США. Відзначено, що реформування ринку залізничних перевезень призведе до зростання вимог до якості оцінки пропускної здатності, яку використовують поїзди різних перевізників. Як основний метод для оцінки пропускної здатності використані методи тягових розрахунків, організації руху на залізничному транспорті й імітаційного моделювання. **Результати.** Розроблено імітаційну модель залізничного напрямку, яка відображає як структуру, так і взаємодію окремих її елементів. Модель містить: поїзну модель, модель залізничної інфраструктури, модель управління рухом, інформаційну модель. Моделювання функціонування залізничного напрямку здійснюють поетапно. На першому етапі проводять моделювання руху одиночних поїздів. На другому етапі виконують узгодження зайнятості залізничної інфраструктури станцій і перегонів поїздами. Відправлення поїздів на перегін здійснюють за можливості забезпечення допустимих інтервалів між даним, а також попередніми й наступними поїздами; розроблена модель реалізована у вигляді програми «Графік руху». **Наукова новизна** роботи полягає в тому, що в ній запропоновано вдосконалену імітаційну модель залізничного напрямку, яка відображає процес пропуску поїздів по ділянках і через залізничні станції й дозволяє оцінювати вплив ступеня використання пропускної здатності на тривалість руху поїздів. **Практична значимість.** Отримані в роботі результати дозволяють оцінити вплив поїздів, що прямують за розкладом, на умови пропуску поїздів, що прямують без розкладу руху.

Ключеві слова: залізничний транспорт; графік руху; пропускна здатність; імітаційне моделювання

V. I. BOBROVSKIY^{1*}, R. G. KOROBKOVA^{2*}, V. O. BALANOV^{3*}

^{1*}Dep. «Transport Nodes», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (068) 444 63 95, e-mail 1973bvi@gmail.com, ORCID 0000-0001-8622-2920

^{2*}Dep. «Operation Management», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 70, e-mail rgkorobyova@outlook.com, ORCID 0000-0002-6424-1079

^{3*}Dep. «Operation Management», Dnipropetrovsk National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 70, e-mail vobalanov@gmail.com, ORCID 0000-0002-6137-3420

SIMULATION MODEL FOR EVALUATING THE CARRYING CAPACITY OF RAILWAYS

Purpose. The main purpose of the article is to improve the simulation model of railway direction to evaluate the use of carrying capacity by separate trains. **Methodology.** The paper deals with the evaluation of the carrying capacity of railways used at the railways of Ukraine, the European Union, and the USA. It is noted that the reform of the railway transportation market will cause an increase in the quality requirements for the evaluation of the carrying capacity used by trains of various carriers. As the main method for evaluating the carrying capacity in the work, the methods of traction calculations, the organization of movement at railway transport and simulation modeling were

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

used. **Findings.** The authors developed a simulation model of the railway direction, which reflects both the structure and the interaction of its individual elements. The model includes train model, model of railway infrastructure, model of traffic management, information model. Simulation of the direction functioning is carried out by stages. At the first stage, the movement simulation of single trains is performed. At the second stage, occupation coordination of the railway infrastructure of stations and runs by trains is carried out. Departure of trains to the run is carried out with the possibility of ensuring the permissible intervals between the data, as well as the previous and subsequent trains, the developed model is implemented in the form of the «Traffic Schedule» program. **Originality** of the work lies in the fact that it proposes an improved simulation model of the railway direction, which reflects the process of trains passing through the sections and railway stations and makes it possible to evaluate the influence of the carrying capacity use degree on the train movement duration. **Practical value.** The results obtained in this work allow us to estimate the influence of trains that run according to schedule on the conditions for passing the trains that run without schedule.

Keywords: railway transport; time-schedule; carrying capacity; simulation modeling

REFERENCES

1. Bilenko, G. M., & Popova, E. A. (2010). Analytical estimation of group of freight trains' coefficient by quick-running trains at various schemes of their routing on the train diagram. *Science and Technology in Transport, 1*, 43-51. (in Russian)
2. Bobrovskiy, V. I. (1999). Imitatsionnaya model razvyazki liniy v zheleznodorozhnom uzle. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport, 38*, 35-42. (in Russian)
3. Bobrovskiy, V. I. (1998). Modelyrovanye systemy upravleniya propuskom poezdov cherez peresecheniya. *Collected Scientific Works of Ukrainian State University of Railway Transport, 33*, 71-79. (in Russian)
4. Bobrovskiy, V. I. (1999). Otsenka raskhodov na peredvizhenie poezdov v proektiruemyykh razvyazkakh zheleznodorozhnykh liniy s ispolzovaniem imitatsionnogo modelirovaniya. *Information and Management Systems of Railway Transport, 2*, 48-51. (in Russian)
5. *Instruktsiia z rozrakhunku naiavnoi propusknoi spromozhnosti zaliznyts Ukrainy.* (2002). Kyiv: Transport Ukrainy. (in Ukrainian)
6. Karasev, S. V., & Koryagin, M. Y. (2018). Estimation of Train Delays on the Railway Network by Modeling on the Conditions of Stochastic Train Flow. *The Siberian Transport University Bulletin, 2(45)*, 43-51. (in Russian)
7. Kozachenko, D. M., Papakhov, O. Y., & Lohvinova, N. O. (2014). Doslidzhennia koefitsientiv ziomu v umovakh pryskorenoho ta shvydkisnogo rukhu pasazhyrskykh poizdiv. *Visnyk Akademii mynoi sluzhby Ukrainy. Seriya: Tekhnichni nauky, 2*, 110-116. (in Ukrainian)
8. Kozachenko, D. M., Mozolevych, H. Y., & Vlasiuk, O. V. (2009). Simulation of Rail Directions Work. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, 28*, 143-148. (in Ukrainian)
9. Levin, D. Y. (1988). *Optimizatsiya potokov poezdov.* Moscow: Transport. (in Russian)
10. Popova, E. A. (2009). Analytical estimation of group of freight trains' coefficient by slow-acting trains at their operation with overtaking. *Science and Technology in Transport, 4*, 47-52. (in Russian)
11. Prokhorchenko, A. V. (2014). Problemy rozrakhunku propusknoi spromozhnosti zaliznychnoi infrastruktury v umovakh rynkovykh vidnosyn. *Information and Management Systems of Railway Transport, 4*, 36-41. (in Ukrainian)
12. Kozachenko, D. M., Berezovyi, M. I., Balanov, V. O., & Zhuravel, V. V. (2015). Time Reserves During the Organisation of Freight Train Movement on Schedule. *Science and Transport Progress, 2(56)*, 105-115. doi: 10.15802/stp2015/42170 (in Russian)
13. Fischetti, M., Salvagnin, D., & Zanette, A. (2009). Fast Approaches to Improve the Robustness of a Railway Timetable. *Transportation Science, 43(3)*, 321-335. doi: 10.1287/trsc.1090.0264 (in English)
14. Gibson, S. (2002). Developments in Transport Policy: The Evolution of Capacity Charges on the UK Rail Network. *Journal of Transport Economics and Policy, 36(2)*, 341-354. (in English)
15. Pouryousef, H., Lautala, P., & White, T. (2015). Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe. *Journal of Modern Transportation, 23(1)*, 30-42. doi: 10.1007/s40534-015-0069-z (in English)
16. Dewilde, T., Sels, P., Cattrysse, D., & Vansteenwegen, P. (2013). Robust railway station planning: An interaction between routing, timetabling and platforming. *Journal of Rail Transport Planning & Management, 3(3)*, 68-77. doi: 10.1016/j.jrtpm.2013.11.002 (in English)

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НА ТРАНСПОРТІ

17. Rotoli, F., Cawood, E. N., & Soria, A. (2016). *Capacity Assessment of Railway Infrastructure: Tools, Methodologies and Policy Relevance in the EU Context: JRC Technical Report*. Seville. (in English)
18. Törnquist, J., & Persson, J. A. (2007). N-tracked railway traffic re-scheduling during disturbances. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(3), 342-362. doi: 10.1016/j.trb.2006.06.001 (in English)
19. *UIC leaflet 406 R. Capacity: UIC International Union of Railways*. (2013). Retrieved from <http://clc.am/gqq1zw> (in English)

Поступила в редколлегию: 08.08.2018

Принята к печати: 30.11.2018