

УДК 656.22

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ. Часть 2: Параметрические модели, оптимизация, моделирование

С. А. Браништов^а, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

А. М. Ширванян^а, младший научный сотрудник, аспирант

Д. А. Тумченко^а, младший научный сотрудник, аспирант

^аИнститут проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, РФ

Введение: пропускная способность железных дорог — основная характеристика, отражающая перевозочные возможности железнодорожного участка, знание которой позволяет точнее планировать грузовые перевозки и эффективнее использовать возможности инфраструктуры и подвижного состава. Для получения этой характеристики применяют аналитические методы, параметрические модели, используют имитационное моделирование. Целью исследований является анализ и сравнение этих подходов. **Результаты:** показано, что оценка пропускной способности железнодорожных участков с помощью параметрических моделей позволяет находить возможные пути развития инфраструктуры в зависимости от стоимости строительства. Приведены три существующие оптимизации для повышения пропускной способности участков: параметрическая, структурная и функциональная. Параметрическая подразумевает оптимизацию и регулирование параметров элементов железнодорожной сети, структурная — оптимизацию путем замены (изменения) отдельных элементов схемы путевого развития сети, препятствующих ее эффективному функционированию, функциональная — изменение характеристик операций, выполняемых на различных элементах путевого развития. Сравнительный обзор программных инструментов моделирования железнодорожного движения, имеющих функции анализа пропускной способности, показал, что не многие программные инструменты реализуют все функции оценки и анализа пропускной способности. **Практическая значимость:** материалы статьи будут полезны работникам железнодорожных служб при планировании грузовых и пассажирских перевозок.

Ключевые слова — пропускная способность, перевозочная возможность, железная дорога, железнодорожная инфраструктура.

Введение

В первой части статьи [1] рассмотрены применяемые в Европе аналитические методы оценки пропускной способности (ПС) железнодорожного участка и анализа ее использования. Были исследованы особенности каждого метода и дана общая характеристика аналитических методов. Отмечено, что аналитические методы, описывающие железнодорожную инфраструктуру с помощью математических выражений, позволяют оценить пропускную способность участка лишь в той мере, насколько точно и подробно учтены в формулах все свойства инфраструктуры и особенности движения на этом участке.

В данной статье, в дополнение к предыдущей, рассматриваются другие подходы к оценке ПС — это методы, основанные на параметрических моделях и на моделировании железнодорожной инфраструктуры и движения; показана роль оптимизации для повышения ПС.

Параметрические модели

По сложности применения и точности получаемого результата параметрические модели находятся между простым расчетом с помощью аналитических методов и комплексной оценкой с помощью моделирования. Они могут быстро выделить «узкие места» [2]. Чаще всего параме-

трические модели применяются для стратегического планирования. Были разработаны различные параметрические модели, которые отражают изменения ПС. Как правило, параметрические модели построены на формулах, отражающих зависимость задержки поездов от ПС. Формулы определяются путем многопараметрического регрессионного анализа многих различных симуляций.

Параметрическая модель позволяет оценить изменение пропускной способности железных дорог в зависимости от различных параметров. Результаты отображаются в виде отношения задержки поездов к объему движения (поездов в сутки). При расчете во внимание берутся некоторые ключевые параметры, влияющие на движение поездов на участке. Их можно разделить на три категории:

- параметры инфраструктуры;
- параметры движения;
- эксплуатационные параметры.

Например, при разработке параметрической модели Крюгер [2] включил в состав модели следующие *параметры инфраструктуры*:

SL — длины участков;

MPPP — количество точек пересечения обгонных путей с главными путями;

MPPPS — среднее расстояние между точками обгонных путей. Обгонные пути имеют важное значение для организации движения поездов:

$$MPPPS = \frac{SL}{(MPPP + 1)};$$

$MPPPU$ — равномерность распределения точек обгонных путей, рассчитывается как отношение среднеквадратичного отклонения среднего расстояния между точками обгона к среднему расстоянию между точками обгона:

$$MPPPU = \frac{\sigma(MPPPS)}{MPPPS}.$$

Значение среднеквадратичного отклонения, равное нулю, означает равномерное распределение точек обгонных путей. Чем ближе $MPPPU$ к нулю, тем выше ПС участка;

NS — число светофоров;

$ISSR$ — коэффициент равномерности расстояний между светофорами. Наличие светофоров уменьшает расстояние между поездами, тем самым увеличивает ПС. Вычисляется как отношение среднего расстояния между светофорами к среднему расстоянию между точками обгонных путей:

$$ISSR = \left(\frac{SL}{MPPP + 1 + NS} \right) \times 100;$$

SLD — протяженность двухпутных линий. Добавление второй линии имеет значительное влияние на ПС (может увеличивать ПС однопутной линии более чем в 2 раза);

$\%DT$ — процент двухпутных линий; рассчитывается как отношение длин участков с двухпутными линиями к общей длине участков:

$$\%DT = \frac{SLD}{SL} \times 100.$$

Параметры движения включают в себя следующие характеристики:

MT — максимальное число поездов за 4 ч;

AT — среднее число поездов за 4 ч;

TPF — параметр, отражающий пиковую интенсивность движения. TPF учитывает наличие «часов пик» в графике движения. Оказывает существенное влияние на ПС. Любая, даже самая незначительная задержка в период высокой интенсивности вызывает длительные цепные задержки в расписании, а восстановление штатного режима может оказаться довольно длительным. Вычисляется как отношение максимального числа поездов в течение 4 ч к среднему числу поездов в течение этого же интервала времени:

$$TPF = \frac{MT}{AT};$$

DPF — параметр диспетчерского приоритета. Диспетчерские приоритеты для разных типов поездов предписывают, какие поезда будут иметь приоритет перемещения. Поезда меньшего приоритета пропускают поезда более высокого приоритета. Так, например, может быть задержан

пассажирский поезд ради пропуска скоростного. Как правило, чем больше классов приоритетов поездов, тем меньше ПС. DPF — вероятностная величина, рассчитывается по формуле

$$DPF = \frac{1}{T} \sum_{i=2}^N \left(\frac{C_i}{(T-1)} \sum_{j=1}^{i-1} C_j \right),$$

где N — количество классов приоритетности (пассажирский, скоростной, экспресс, грузовой); T — ежедневное количество поездов; C_i — число поездов i -го класса приоритетности; C_j — число поездов j -го класса приоритетности;

FTS — скорость самого быстрого поезда;

LTS — скорость самого медленного поезда;

SR — скоростной коэффициент. Как и DPF , скоростной коэффициент — это еще один параметр, отражающий гетерогенность трафика. Разница в скорости может существенно увеличить задержку. Рассчитывается как отношение скорости самого быстрого поезда к скорости самого медленного:

$$SR = \frac{FTS}{LTS};$$

AS — средняя скорость. Средняя скорость движения поездов напрямую влияет на ПС. Вычисляется как минимальное среднее время движения всех поездов в каждом из направлений:

$$AS = \frac{\sum_{i=1}^N n_i V_i}{\sum_{i=1}^N n_i},$$

где n_i — число поездов i -го класса приоритетности; V_i — скорость поездов i -го класса приоритетности.

Эксплуатационные параметры рассчитываются следующим образом:

TO — перебой в работе (вывод из строя) пути. Недоступность путей может быть обусловлена как запланированными работами, так и поломкой (выходом из строя). TO снижает время, доступное для движения поездов. ПС очень чувствительна к продолжительности TO . Этот параметр определяется общим нерабочим временем участка и рассчитывается следующим образом:

$$TO = \frac{TDO}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{n_T d_i}},$$

где TDO — общее нерабочее время; n_T — общее число перебоев в сутки; d_i — продолжительность i -го перебои, ч;

TSO — временное ограничение скорости. Оказывает негативное влияние на ПС по двум

причинам: 1) непосредственно в связи с уменьшением средней скорости; 2) косвенно из-за дополнительных разгонов и торможений (V_{time}). Такое ограничение, как правило, вводится при проведении ремонтных работ как на пути, так и на других элементах инфраструктуры (например, стрелках). Вычисляется следующим образом:

$$T_{SO} = V_{time} + TT;$$

$$V_{time} = \frac{(V_{max}K - V_{T_{SO}})}{A} + \frac{(V_{max}K - V_{T_{SO}})}{D};$$

$$TT = \left(\frac{L}{V_{T_{SO}}} + \frac{L}{V_{max}K} \right) \times 60,$$

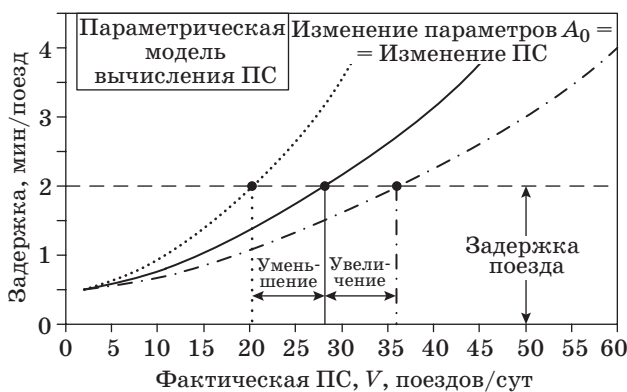
где TT — время движения поездов; V_{max} — максимальная скорость грузовых поездов/с; $V_{T_{SO}}$ — временное ограничение скорости, м/с; K — процент времени движения поездов на максимальной скорости (85 %); A — величина ускорения (0,15 м/с²); D — величина торможения (0,22 м/с²); L — сумма длин участка с ограничением скорости и средней длины поезда.

Соотношение между задержкой поезда и объемами трафика лучше всего выражается экспоненциальной формулой

$$TD = A_0 e^{B_0 V},$$

где TD — задержка; A_0 — параметрический коэффициент (параметры инфраструктуры, параметры движения, эксплуатационные параметры); B_0 — константа; V — объем трафика, поездов/сут.

Коэффициент A_0 определяет скорость роста задержки при увеличении ПС (рисунок). Значение этого коэффициента показывает разницу между задержками поездов и параметрическими значениями при одинаковой ПС. A_0 представляет собой уникальное значение для каждой комбинации параметров. Сплошной линией на рисунке пока-



■ Зависимость задержки от пропускной способности

зан график изменения задержки в зависимости от объемов движения. Увеличение объемов движения увеличивает задержки поездов. Добиться увеличения ПС при сохранении прежнего уровня задержек возможно при изменении параметра A_0 .

Три наиболее важные особенности модели:

1) возможность калибровать каждый параметр в зависимости от сценария моделирования;
2) представление зависимости задержки от объемов движения в графическом, а не числовом виде;

3) функция «что-если», которая позволяет оценить влияние на ПС как отдельных параметров, так и их комбинации.

В сравнении с результатами имитационного моделирования эта параметрическая модель показала 10 %-е расхождение в точности.

Идеи Крюгера получили развитие в новой модели поддержки принятия решений RCET (Railway Capacity Evaluation Tool), которая позволяет находить возможные пути развития инфраструктуры в зависимости от стоимости строительства; способна находить баланс между вложениями, задержками и эксплуатационными расходами. Здесь входными данными в модель являются параметры инфраструктуры, доступный бюджет и прогнозируемый спрос. Модель предлагает все возможные варианты увеличения пропускной способности и рассчитывает стоимость и прирост для каждого варианта. Затем модель находит лучшее соотношение между капиталовложениями и штрафами за опоздания [3, 4]. Выходными данными модели являются графики зависимости задержек от объемов движения, влияние на ПС разнообразных мер по развитию инфраструктуры, рентабельность каждого варианта развития. Таким образом, на основе отдельных параметров модели, предполагаемого спроса на перевозки и имеющегося бюджета на строительство модель RCET помогает найти наиболее выгодный вариант развития инфраструктуры.

Исследования в области параметрических моделей не получили широкого распространения в тех странах, где владелец инфраструктуры и организация, управляющая движением поездов, — разные юридические лица, в силу трудности обеспечить взаимное удовлетворение всех сторон и разделение зон ответственности.

Оптимизация

Для повышения перевозочных возможностей железной дороги применяются разнообразные методы оптимизации в следующих направлениях: оптимизация расписания движения поездов, организация движения, планирование составообразования, погрузо-разгрузочных операций, работ локомотивных бригад и пр.

Процесс оптимизации осуществляется за счет изменения параметров схемы путевого развития, функций и структуры системы организации движения и может проходить в нескольких направлениях.

1. Параметрическая оптимизация. Данное направление подразумевает оптимизацию и регулирование параметров элементов железнодорожной сети. Этот этап реализуется без изменения структуры схемы железнодорожной сети, воздействие направлено на конкретные параметры сети. Изменяется длина приемоотправочных путей, съездов, количество прибывших и отправленных составов, время оборота состава, среднесуточный пробег состава, интервалы скрепления поездов и др. Целью данной оптимизации является возможность установить, за счет изменения каких параметров максимально увеличится ПС сети при минимальных капитальных вложениях.

2. Структурная оптимизация. Данное направление оптимизации производится путем замены (изменения) отдельных элементов схемы путевого развития сети, препятствующих ее эффективному функционированию. Изменяется количество путей на станции или перегоне, определяется необходимость добавления стрелочных переводов и съездов, т. е. оптимизации подвергается непосредственно существующая схема путевого развития, ее структура.

3. Функциональная оптимизация. Суть ее заключается в регулировании функциональной части работы сети за счет изменения характеристик операций, выполняемых на различных элементах путевого развития. Например, объединение парка приема поездов и парка отправления в один приемоотправочный парк подразумевает совмещение их функций воедино, изменяя характер работы станции и структуру схемы путевого развития в целом [5].

Целесообразность применения всех направлений определяется эффективностью каждого из них. Оптимизация расписания, планирование и динамическое оперативное перепланирование находятся в центре внимания исследований уже очень давно. В работах [6, 7–9] описаны современные методики проектирования расписания, методы анализа его стабильности, а также представлены оптимизационные модели для составления железнодорожного расписания и методы оценки эффективности. Уделено внимание применению имитационного моделирования, представлены микро- и макроскопические подходы к моделированию инфраструктуры. Также затронуты вопросы перепланирования, распознавания конфликтов и методы их решения. В работе [10] исследованы различные математические модели для оптимизации железнодорожных перевозок. В статье [11] проведен комплексный обзор

методов планирования и перепланирования расписания движения поездов. В работе [12] дан обзор исследований в области железнодорожного планирования расписания и диспетчеризации.

Моделирование

Имитационное моделирование движения поездов и функционирования железнодорожной инфраструктуры позволяет учитывать не только заданные параметры (эксплуатационные, инфраструктуры, движения) в совокупности, но и такие особенности, как взаимодействие поездов, зависимости стрелок, профиль пути, ограничения скорости по состоянию стрелок и пр. Благодаря этому моделирование позволяет получить величину ПС моделируемого участка, максимально близкую к реальной. Кроме того, имитационное моделирование позволяет проводить анализ графика движения поездов и находить возможности его оптимизации, проводить тесты надежности графика, определять влияние задержек поездов и прогнозировать возможные конфликты; позволяет рассчитывать и планировать оборот локомотивов и локомотивных бригад. По результатам моделирования могут быть получены различные статистические данные, например, степень использования участков инфраструктуры, уровень загруженности железнодорожных направлений и пр. В преимуществах моделирования имеется возможность изменять входные параметры и быстро получать результат, т. е. можно проводить различные эксперименты и получать оценку влияния разных параметров движения и инфраструктуры на ПС.

Методы, основанные на моделировании, оценивают общее время задержки для всех поездов в расписании. Выделяется два типа моделирования [13] — синхронное и асинхронное. При асинхронном моделировании каждая операция в расписании симулируется отдельно в порядке следования и в соответствии с технологическим регламентом; искусственно генерируются случайные задержки, а разрешаются в соответствии с диспетчерскими правилами. Синхронное — это такое моделирование, в котором все операции на железной дороге имитируются в реальном времени. Данный тип является более сложным, но дает более точные результаты.

Ряд методов моделирования нашли свое применение в коммерческих программных продуктах. Эти инструменты оснащаются графическим интерфейсом пользователя и имитируют движение и операции по обработке поездов на моделях реальных объектов железнодорожной инфраструктуры. Комплексному анализу используемых пакетов моделирования железных дорог уделено немало внимания [3, 14]. Известно около 37 различных

■ Сравнение программного обеспечения для моделирования железнодорожных операций¹

Данные	Критерии сравнения		CAPRES	CASSANDRA	CMS	DEMIURGE	FAST TRACKII	IRCIM	MOM MALLAS	OPENTIMETABLE	RAILCAP	RAILNET II	RAILPLAN	RAILSIM	RAILSYS	RASIM	SAMFOST	SIMONE	
Параметры инфраструктуры	Однопутные/двухпутные перегоны																		
	Системы блокировки и сигнализации																		
	Структура путей и скоростные ограничения																		
Параметры движения	Межпоездной интервал																		
	Межпоездной интервал, допустимый системой сигнализации																		
	Резервное время																		
	Добавка к времени движения																		
	Время простоя																		
	Общее время использования ж/д сети																		
	Типы поездов																		
	Пики интенсивности движения																		
	Приоритетность поездов																		
	Время остановки поезда																		
Эксплуатационные параметры	Пороговое время движения поезда																		
	Построение маршрутов																		
	Занятость секций или время занятости																		
Выходные	Перебой в работе путей																		
	Качество обслуживания, надежность, робастность																		
	Анализ ПС	Теоретическая																	
		Практическая																	
		Использованная																	
		Доступная																	
	Основные функции	График локомотивных бригад																	
		Менеджер инфраструктуры																	
		Менеджер станции																	
		Менеджер расписания																	
Оптимизация расписания																			
Экономический расчет																			
Анализ чувствительности																			
Статистический анализ	Моделирование/симулирование																		
	По элементам																		
	Интервалы между поездами в форме диаграммы																		
	Интервалы между поездами в форме списка																		
	По направлениям																		
	Обнаружение конфликтов																		
Расписание занятости платформ																			

¹ ■ — функция имеется; ■ — нет точного описания; □ — функции не имеется

программных продуктов, предназначенных для моделирования и анализа железнодорожных операций [14]. Среди них малое количество продуктов имеют средства и инструменты оценки ПС и анализа ее использования (таблица).

Из таблицы видно, что не многие программные инструменты реализуют все функции оценки и анализа ПС. Ряд из них выполняет расчет только теоретической (наличной) ПС, используя для этого аналитические методы в соответствии со стандартом UIC 406. Некоторые инструменты, опираясь на результаты имитационного моделирования, могут оценить практическую (результативную) ПС для заданной инфраструктуры. Отдельные программные продукты выполняют анализ доступной ПС.

За рубежом наиболее широко используется пакет программного обеспечения фирмы Rmcon (Германия) RAILSYS [15]. Этот продукт учитывает весь набор входных параметров (из представленных в таблице) и предоставляет самый полный набор функций по сравнению с другими известными продуктами. Пакет RAILSYS обеспечивает необходимые возможности для анализа ПС в соответствии с требованиями европейских железных дорог и позволяет сделать оценку всех четырех видов ПС.

Заключение

Параметрические модели позволяют оценить ПС с учетом различных параметров (инфраструктуры, движения, эксплуатационных параметров). По сравнению с аналитическими методами они дают более точную оценку ПС, поскольку учитывают большее число параметров и имеют возможность подстраивать отдельные параметры и оценивать их влияние на ПС. Параметрические модели позволяют легко получать искомые зависимости, например, влияние объемов движения на вероятность задержек поездов и представлять их в графическом виде. Недостаток параметрических моделей в том, что при учете большого количества параметров они становятся очень сложными и практически не применимыми.

Известны программные инструменты, которые позволяют оценить и проанализировать степень использования ПС при имитационном моделировании движения и операций по обработке поездов на заданном железнодорожном участке или полигоне. Некоторые из них обладают рядом оптимизационных функций: составление графика локомотивных бригад, генерация расписания, обнаружение конфликтов и пр.

Литература

1. **Браништов С. А., Ширванян А. М., Тумченко Д. А.** Обзор методов оценки пропускной способности железных дорог. Ч. 1: Классификация и аналитические методы // Информационно-управляющие системы. 2014. № 5. С. 51–57.
2. **Krueger H.** Parametric Modelling in Rail Capacity Planning // Proc. of 1999 Winter Simulation Conf., Piscataway, 1999. P. 1194–2000.
3. **An Assessment of Railway Capacity/** M. Abril, F. Barber, L. Ingolotti, M. A. Salido, P. Tormos, A. Lova // Transportation Research. Part E: Logistics and Transportation Review. 2008. Vol. 44. N 5. P. 774–806.
4. **Lai Y. C., Barkan C. P. L.** An Enhanced Parametric Railway Capacity Evaluation Tool (RCET) // 88th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, USA, 2009. P. 33–40.
5. Анализ методов оптимизации путевого развития станций. <http://www.sworld.com.ua/konfer34/398.pdf> (дата обращения: 09.10.2014).
6. **Hansen I. A., Pahl J.** Railway Timetable and Traffic. — Hamburg: Eurailpress, 2008. — 332 p.
7. **Vromans M. J. C. M., Dekker R., Kroon L. G.** Reliability and Heterogeneity of Railway Services // European Journal of Operational Research. 2006. Vol. 172. N 2. P. 647–665.
8. **Goverde R. M. P.** Railway Timetable Stability Analysis Using Max-plus System Theory. Transportation Research. Part B: Methodological. 2007. Vol. 41. N 2. P. 179–201.
9. **Tornquist J.** Railway Traffic Disturbance Management-An Experimental Analysis of Disturbance Complexity, Management Objectives and Limitations in Planning Horizon // Transportation Research. Part A: Policy and Practice. 2007. Vol. 41. N 3. P. 249–266.
10. **Assad A. A.** Models for Rail Transportation // Transportation Research. Part A: General. 1980. Vol. 14. N 4. P. 205–220.
11. **Cordeau J. F., Toth P., Vigo D.** A Survey of Optimization Models for Train Routing and Scheduling // Transportation Science. 1998. Vol. 32. N 4. P. 380–420.
12. **Tornquist J.** Computer-Based Decision Support for Railway Traffic Scheduling and Dispatching: A review of Models and Algorithms // 5th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways, Palma de Mallorca, Spain, 2005. P. 1–23.
13. **Pahl J.** Railway Operation and Control. — Mountlake Terrace: VTD Rail Publishing, 2009. — 275 p.
14. **Kontaxi E. K., Ricci S.** Calculation of Railway Network Capacity: Comparing Methodologies for Lines and Nodes // 4th Intern. Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, Rome, Italy, 2011. P. 1051–1080.
15. **RMCON, 2009.** RailSys Information Brochure [Online]. <http://www.rmcon.de> (дата обращения: 09.10.2014).

UDC 656.22

Railway Capacity Estimation Methods. Part II. Parametric Models, Optimization, SimulationBranishtov S. A.^a, PhD, Tech., Senior Researcher, pochta-na@mail.ruShirvanyan A. M.^a, Junior Researcher, Post-Graduate Student, artshirvanyan@mail.ruTumchenok D. A.^a, Junior Researcher, Post-Graduate Student, dmitriy_tumchenok@mail.ru^aV. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, 65, Profsoiuznaia St., 117342, Moscow, Russian Federation

Purpose: Capacity is the main characteristic of a railway track, vital to accurately plan freight transportation and efficiently use the infrastructure and rolling stock. To obtain this characteristic, we use analytical methods, parametric models and simulation. The goal of the research is the analysis and comparison of these approaches. **Results:** It is shown that rail track capacity evaluation via parametric models allows you to find possible ways of infrastructure development depending on the construction cost. There are three types of optimization increasing the track capacity: parametric, structural and functional. You can adjust the parameters of the railway network elements (parametric optimization), replace or change certain problematic elements of the road development scheme (structural optimization) or alter the characteristics of the operations performed at various stages of the road development (functional optimization). A comparative review of railway traffic modeling software tools with capacity analysis functions has shown that not many of them fully exploit all the functions of capacity evaluation and analysis. **Practical relevance:** This work will be helpful for rail service workers: dispatchers, managers, engineers and others.

Keywords — Railway Capacity, Railroad, Schedule Compression.

References

1. Branishtov S. A., Shirvanyan A. M., Tumchenok D. A. Railway Capacity Estimation Methods. Part I. Analytical Methods of Estimation and Capacity Utilization. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2014, no. 5, pp. 51–57 (In Russian).
2. Krueger H. Parametric Modelling in Rail Capacity Planning. *Proc. of 1999 Winter Simulation Conf.* Piscataway, 1999, pp. 1194–2000.
3. Abril M., Barber F., Ingolotti L., Salido M. A., Tormos P., Lova A. An Assessment of Railway Capacity. *Transportation Research. Part E. Logistics and Transportation Review*, 2008, vol. 44, no. 5, pp. 774–806.
4. Lai Y. C., Barkan C. P. L. An Enhanced Parametric Railway Capacity Evaluation Tool (RCET). *88th Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington, USA, 2009, pp. 33–40.
5. *Analiz metodov optimizatsii putevogo razvitiia stantsii* [Analysis of Methods of Optimization of Traveling Development of Stations]. Available at: <http://www.sworld.com.ua/konfer34/398.pdf> (accessed 9 October 2014).
6. Hansen I. A., Pacht J. *Railway Timetable and Traffic*. Hamburg, Eurailpress, 2008. 332 p.
7. Vromans M. J. C. M., Dekker R., Kroon L. G. Reliability and Heterogeneity of Railway Services. *European Journal of Operational Research*, 2006, vol. 172, no. 2, pp. 647–665.
8. Goverde R. M. P. Railway Timetable Stability Analysis Using Max-plus System Theory. *Transportation Research. Part B. Methodological*, 2007, vol. 41, no. 2, pp. 179–201.
9. Tornquist J. Railway Traffic Disturbance Management-an Experimental Analysis of Disturbance Complexity, Management Objectives and Limitations in Planning Horizon. *Transportation Research. Part A. Policy and Practice*, 2007, vol. 41, no. 3, pp. 249–266.
10. Assad A. A. Models for Rail Transportation. *Transportation Research. Part A. General*, 1980, vol. 14, no. 4, pp. 205–220.
11. Cordeau J. F., Toth P., Vigo D. A Survey of Optimization Models for Train Routing and Scheduling. *Transportation Science*, 1998, vol. 32, no. 4, pp. 380–420.
12. Tornquist J. Computer-based Decision Support for Railway Traffic Scheduling and Dispatching: a Review of Models and Algorithms. *5th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways*. Palma de Mallorca, Spain, 2005, pp. 1–23.
13. Pacht J. *Railway Operation and Control*. Mountlake Terrace, USA, VTD Rail Publishing, 2009. 275 p.
14. Kontaxi E. K., Ricci S. Calculation of Railway Network Capacity: Comparing Methodologies for Lines and Nodes. *4th Intern. Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*. Rome, Italy, 2011, pp. 1051–1080.
15. *RMCON, 2009. RailSys Information Brochure* [Online]. Available at: <http://www.rmcon.de> (accessed 9 October 2014).