

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

5(72)/2014

5(72)/2014

INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

REFEREED EDITION

Founder
«Information and Control Systems», Ltd.

Publisher
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation

Editor-in-Chief
M. Sergeev
Dr. Sc., Tech., Professor, St.-Petersburg, Russia

Deputy Editor-in-Chief
E. Krouk
Dr. Sc., Tech., Professor, St.-Petersburg, Russia

Executive secretary
O. Muravtsova

Editorial Council
L. Chubraeva
RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

L. Fortuna
PhD, Professor, Catania, Italy

A. Fradkov
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

V. Kozlov
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

C. Christodoulou
PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA

B. Meyer
Dr. Sc., Professor, Zurich, Switzerland

A. Ovodenko
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Y. Podoplyokin
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Yu. Shokin
RAS Academician, Dr. Sc., Phys.-Math., Novosibirsk, Russia

V. Simakov
Dr. Sc., Tech., Professor, Moscow, Russia

V. Vasilev
RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

R. Yusupov
RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Editorial Board
V. Anisimov
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

B. Bezruchko
Dr. Sc., Phys.-Math., Saratov, Russia

N. Blaunstein
Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, Beer-Sheva, Israel

A. Dudin
Dr. Sc., Tech., Professor, Minsk, Belarus

I. Dumer
PhD., Professor, Riverside, USA

V. Khimenko
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

G. Maltsev
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

V. Melekhin
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Shalyto
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Shepeta
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Smirnov
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Z. Yuldashev
Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Zeifman
Dr. Sc., Phys.-Math., Vologda, Russia

Editor: A. Larionova
Proofreader: T. Zvertanovskaia
Design: A. Koleshko, M. Chernenko
Layout and composition: N. Karavaeva

Contact information
The Editorial and Publishing Center, SUAI
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia
Website: <http://i-us.ru/en>, E-mail: ius.spb@gmail.com
Tel.: +7 - 812 494 70 02

INFORMATION PROCESSING AND CONTROL

- Balonin N. A., Seberry J.** *Remarks on extremal and maximum determinant matrices with moduli of real entries ≤ 1* 2
- Balonin N. A., Vostrikov A. A., Sergeev M. B.** *Two-circulant golden ratio matrices* 5
- Osipov V. Yu.** *Associative Machine with Three Signaling Systems* 12
- Gorodetskiy A. E., Tarasova I. L.** *Detection and Identification of Dangerous Space Objects Using Adaptive Matrix Radio Receivers* 18
- Nazarov A. V.** *Structural-Parametric Adaptation of Multilayer Information Processing Systems Using Local Quality Functionals* 25
- Tolmachev S. G.** *Design Decision Making Based on Fuzzy Preference Relations* 34
- Gorskiy O. V.** *Self-Heating Minimization of Implantable Devices with a Wireless Inductive Power Supply System* 40

INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS

- Branishtov S. A., Tumchenok D. A., Shirvanyan A. M.** *Railway Capacity Estimation Methods. Part I. Analytical Methods of Estimation and Capacity Utilization* 51
- Kobyakov A. A., Lapshin K. V., Novikova E. L., Yamshchikov Y. A.** *Robotic Complex Navigation Model in Multicomponent Information Environment* 58

HARDWARE AND SOFTWARE RESOURCES

- Shukalov A. V., Paramonov P. P., Kniga E. V., Zharinov I. O.** *Design of Computing Components for Integrated Modular Avionics Systems* 64

INFORMATION SECURITY

- Fedorchenko A. V., Chechulin A. A., Kotenko I. V.** *Open Vulnerability Bases and their Application in Security Analysis Systems of Computer Networks* 72

INFORMATION CODING AND TRANSMISSION

- Moldovyan N. A., Birichevskiy A. R., Mondikova Ya. A.** *Deniable Encryption Based on Block Ciphers* 80
- Cheprukov Yu. V., Socolov M. A.** *Correlation Characteristics of Some Binary R-4 Codes and Ensembles of Signals on Their Basis* 87

INFORMATION CHANNELS AND MEDIUM

- Zubok D. A., Maiatin A. V.** *Optimal Control of Queues in Queueing Systems with Limited Performance* 97

STOCHASTIC DYNAMICS AND CHAOS

- Rybalkin M. A.** *Permutation Polynomials of Small Length over Prime Finite Fields* 103

INFORMATION AND MEASURING SYSTEMS

- Huseynova R. O.** *Method of Adaptive Control of Calibration of Multispectral Photometric Systems of Atmospheric Measurements* 110

CONTROL IN MEDICAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS

- Omirova N. I., Paley M. N., Evsyukova H. V., Tishkov A. V.** *Composition of Decision Trees for Severity of Chronic Obstructive Pulmonary Disease Recognition* 115

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

119

Submitted for publication 02.09.14. Passed for printing 20.10.14. Format 60×84_{1/8}.
Offset paper. Phototype SchoolBookC. Offset printing.

Layout original is made at the Editorial and Publishing Center, SUAI,
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia
Printed from slides at the Editorial and Publishing Center, SUAI,
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia

The journal is distributed by subscription. Subscription can be made in the Editorial and publishing center, SUAI as well as in any post office based on «Rospechat» catalogue:
№ 48060 — annual subscript, № 15385 — semiannual subscript.

The Journal was registered in the Ministry of Press, Broadcasting and Mass Media of the Russian Federation. Registration Certificate JD № 77-12412 from April, 19, 2002. Re-registration in the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR) due to change of the founder: «Information and Control Systems», Ltd., JD № FS77-49181 from March, 30, 2012.

5(72)/2014

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Учредитель
ООО «Информационно-управляющие системы»

Издатель
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

Главный редактор
М. Б. Сергеев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Зам. главного редактора
Е. А. Крук,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Ответственный секретарь
О. В. Муравцова

Редакционный совет:

Председатель А. А. Оводенко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Н. Васильев,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. Н. Козлов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
К. Кривошолу,
д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США

Б. Мейер,
д-р наук, проф., Цюрих, Швейцария
Ю. Ф. Подоплекин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. В. Симаков,
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

Л. Фортун,
д-р наук, проф., Катания, Италия
А. Л. Фрадков,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Л. И. Чубраева,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, С.-Петербург, РФ
Ю. И. Шокин,
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ
Р. М. Юсупов,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редакционная коллегия:

В. Г. Анисимов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Б. П. Безручко,
д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ
Н. Блаунштейн,
д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль

А. Н. Дудин,
д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь
И. И. Думер,
д-р наук, профессор, Риверсайд, США

А. И. Зейфман,
д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ
Г. Н. Мальцев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. Ф. Мелехин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
А. В. Смирнов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. И. Хименко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
А. А. Шальто,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. П. Шепета,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
З. М. Юлдашев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редактор: А. Г. Ларионова
Корректор: Т. В. Звертановская
Дизайн: А. Н. Колешко, М. Л. Черненко
Компьютерная верстка: Н. Н. Караваева

Адрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ
Тел.: (812) 494-70-02, e-mail: ius.spb@gmail.com, сайт: <http://i-us.ru>

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.
Перерегистрирован в Роскомнадзоре.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-49181 от 30 марта 2012 г.

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации
на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

© Коллектив авторов, 2014

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

- Baloni N. A., Seberry J.** Remarks on extremal and maximum determinant matrices with moduli of real entries ≤ 1 2
- Baloni N. A., Vostrikov A. A., Sergeev M. B.** Two-circulant golden ratio matrices 5
- Осипов В. Ю.** Ассоциативная интеллектуальная машина с тремя сигнальными системами 12
- Городецкий А. Е., Тарасова И. Л.** Обнаружение и идентификация опасных космических объектов с использованием адаптивных матричных приемников радиоизлучения 18
- Назаров А. В.** Метод структурно-параметрической адаптации много-уровневых систем обработки информации с использованием локальных функционалов качества 25
- Толмачёв С. Г.** Принятие проектных решений на основе нечеткого отношения предпочтения 34
- Горский О. В.** Минимизация нагрева имплантируемых устройств с беспроводной индуктивной системой питания 40

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

- Браништов С. А., Ширванян А. М., Тумченко Д. А.** Методы оценки пропускной способности железных дорог. Часть 1. Аналитические методы оценки и анализа использования 51
- Кобяков А. А., Лапшин К. В., Новикова Е. Л., Ямщиков Ю. А.** Модель навигации робототехнического комплекса в многокомпонентной информационной среде 58

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

- Шукалов А. В., Парамонов П. П., Книга Е. В., Жаринов И. О.** Принципы построения вычислительных компонентов систем интегрированной модульной авионики 64

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

- Федорченко А. В., Чечулин А. А., Котенко И. В.** Исследование открытых баз уязвимостей и оценка возможности их применения в системах анализа защищенности компьютерных сетей 72

КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

- Молдовян Н. А., Биричевский А. Р., Мондикова Я. А.** Отрицаемое шифрование на основе блочных шифров 80
- Чепруков Ю. В., Соколов М. А.** Корреляционные характеристики некоторых бинарных R4-кодов и ансамблей сигналов на их основе 87

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

- Зубок Д. А., Маятин А. В.** Оптимальное управление очередью в системе массового обслуживания с ограниченной производительностью 97

СТОХАСТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА И ХАОС

- Рыбалкин М. А.** Перестановочные многочлены малой длины над простыми конечными полями 103

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

- Гусейнова Р. О.** Метод адаптивного управления калибровкой мульти-спектральных фотометрических систем атмосферных измерений 110

УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

- Омирова Н. И., Палей М. Н., Евсюкова Е. В., Тишков А. В.** Композиция деревьев решений для распознавания степени тяжести хронической обструктивной болезни легких 115

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

119

Сдано в набор 02.09.14. Подписано в печать 20.10.14. Формат 60×84/8.
Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookC. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 14.4. Уч.-изд. л. 18.1. Тираж 1000 экз. Заказ 533.

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Отпечатано с готовых диапозитивов в редакционно-издательском центре ГУАП.
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить
через редакцию, а также в любом отделении связи по каталогу «Роспечать»:
№ 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс.

УДК 656.22

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Часть 1: Аналитические методы оценки и анализа использования

С. А. Браништов^а, канд. техн. наук, исполняющий обязанности заведующего лабораторией

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 — важная характеристика участка железной дороги, показывающая его перевозочные возможности. Без ее учета невозможно безошибочно планировать грузовые перевозки по сети. Для получения этой характеристики в разных странах используют аналитические методы, основанные на моделях, которые включают в себя набор различных параметров, таких как интервал движения поездов; средний межпакетный интервал; коэффициент, учитывающий надежность работы технических средств, и др. В работе рассматриваются наиболее распространенные методы оценки пропускной способности. **Результаты:** приведены определения различных видов пропускной способности, используемых в данной отрасли: наличной, проектируемой, потребной и результативной; проведено сравнение аналитических методов анализа использования пропускной способности. Показано, что аналитические методы дают представление о пропускной способности сети, но не учитывают в совокупности все факторы, влияющие на пропускную способность. **Практическая значимость:** материалы статьи будут интересны работникам железнодорожных служб: диспетчерам, графистам, технологам и др., — так как применение аналитических методов при расчете самой пропускной способности и доли ее фактического использования поможет планировать грузовые и пассажирские перевозки более эффективно.

Ключевые слова — пропускная способность, железная дорога, сжатие расписания.

Введение

Задача определения пропускной способности (ПС) транспортных магистралей всегда актуальна, его результаты используются при планировании строительства новых дорог, развития инфраструктуры, заказов на перевозку грузов и пассажиров, при управлении перевозочным процессом. Понятие пропускной способности относят к той части железной дороги, возможности которой по обеспечению трафика хотят обозначить. Это может быть целый железнодорожный участок, отдельный перегон или станция. Более того, есть предложения рассчитывать ПС разветвленных полигонов и направлений [1]. В данной статье в основном рассматривается ПС участка железной дороги.

В литературе встречается большое разнообразие формулировок, касающихся ПС. Но не существует единого устоявшегося общепринятого определения понятия ПС, и нет даже однозначного понимания этого термина. Неоднозначность в определении ПС характерна не только для железнодорожного транспорта, но и для других видов транспорта [2].

Основное определение, которым руководствуются железнодорожники России, приведено в Инструкции по расчету наличной пропускной способности [3]: «Наличной пропускной способностью железнодорожного участка называется максимальное число грузовых поездов (пар поездов) установленных веса и длины, которое

может быть пропущено по этому участку за сутки в зависимости от его технической оснащенности и принятого способа организации движения поездов».

За рубежом наиболее часто ссылаются на определение, которое дал Крюгер (Krueger): «Пропускная способность — это возможность пропустить определенное количество поездов по заданной линии за единицу времени, при заданных ресурсах и графике движения» [4]. Есть и другие определения, например: «Способность объекта инфраструктуры обработать (пропустить) определенное количество поездов при соблюдении пунктуальности следования» [5].

Международный союз железных дорог (МСЖД (UIC)) в 2004 г. пришел к выводу, что однозначное определение пропускной способности давать не имеет смысла, поскольку ПС железнодорожного участка зависит от того, как используют железнодорожную инфраструктуру. Если железнодорожная инфраструктура задана, то значение ПС характеризуется четырьмя параметрами [6]. Число поездов — это общее количество поездов за заданный интервал времени (например, число поездов в сутки). Стабильность рассматривается как воздействие одной минуты задержки какого-либо поезда на движение последующих поездов. Гетерогенность движения определяется соотношением числа поездов различного типа. Средняя скорость характеризуется средней скоростью движения всех поездов.

Классификация пропускной способности

В соответствии с инструкцией [3] в России различаются следующие виды пропускной способности для участка дороги:

— наличная (максимальная) по ограничивающему перегону — характеризует текущие возможности инфраструктуры реализовать максимальные размеры движения в идеальных условиях;

— проектируемая при развитии технического оснащения инфраструктуры;

— потребная для обеспечения пропуска перспективных грузовых и пассажирских потоков при планировании инвестиций и проектировании новых линий;

— результативная — наименьшая среди ПС перегонов, станций, депоовского хозяйства, устройств электроснабжения.

За рубежом используют следующую классификацию видов пропускной способности участка железных дорог [4, 7]:

— теоретическая — максимальное возможное расчетное значение ПС;

— практическая — предел ПС, реализуемый на практике, при заданной инфраструктуре;

— использованная — фактический объем графика;

— доступная — разница между практической и использованной ПС, показывает резерв по графику.

Очевидно, что теоретическое значение ПС никогда не может быть достигнуто на практике, поэтому удобнее рассматривать практическую пропускную способность. Действительно, правильно определив практическую ПС и зная использованную ПС, можно получить величину доступной ПС.

Методы оценки и анализа использования пропускной способности

Все известные подходы к оценке и анализу использования пропускной способности делятся на:

— аналитические методы — используют математические зависимости ПС от параметров инфраструктуры и характера организации движения на участке [3, 6, 8];

— параметрические модели — предоставляют систему оценки эффекта изменения ПС при изменении параметров инфраструктуры и характера движения на участке [2, 9, 10];

— методы анализа использования ПС, основанные на оптимизации и регулировании параметров движения, ресурсов инфраструктуры, оптимизации операций с поездами. Применяются для задач планирования движения, например, формирования расписания, маршрутизации и

распределения вагонопотоков грузовых поездов [10–13];

— методы, основанные на моделировании — позволяют оценить максимальные размеры движения при различных условиях в эксперименте для заданных моделей участка железной дороги, поездов, расписания [14–16].

Аналитические методы оценки пропускной способности

С 1953 г. было разработано более 50 методик расчета и оценки использования ПС и создано более 40 программных пакетов моделирования и оптимизации [17]. В этой работе коснемся лишь некоторых, получивших наибольшее распространение за рубежом.

Впервые аналитическое выражение для ПС в зависимости от характера движения поездов предложил Поле (Poole) [8]. Пропускная способность (число поездов в сутки) при однородном графике движения поездов оценивается по выражению

$$C = 1440 \times 2 / (2 \times t + t/2 + m), \quad (1)$$

где 1440 — число минут в сутках; t — интервал между поездами, мин; $t/2$ — средний межпакетный интервал между встречными поездами; m — задержка для каждой пары поездов из-за возможного ускорения и торможения; 2 — число поездов в паре.

В России аналитические выражения и правила расчета ПС зафиксированы в инструкции [3]. Исходными данными для расчета наличной ПС являются:

- количество главных путей на перегоне;
- средства сигнализации и связи по движению поездов;
- путевое развитие промежуточных отдельных пунктов;
- принятый тип графика движения;
- времена хода поездов по перегонам;
- станционные и межпоездные интервалы;
- особые условия организации движения поездов (подталкивание или двойная тяга поездов, обслуживание примыканий на перегоне, порядок следования по сплетениям путей, перегонам с однопутными мостами на двухпутных линиях и др.).

Пропускная способность вычисляется по-разному в зависимости от принятого типа графика (непакетный, частично-пакетный, пакетный) и соотношения размеров движения в четном и нечетном направлениях.

Графики движения поездов классифицируются по следующим типам:

- по числу главных путей: однопутные, однопутно-двухпутные (однопутные участки с двухпутными вставками), двухпутные, многопутные;

— по используемым средствам сигнализации и связи: пакетные и частично-пакетные (когда на перегоне может находиться несколько поездов попутного направления; применяются на линиях с автоматической блокировкой), пачечные (применяются только на однопутных линиях, не оборудованных автоблокировкой, на перегоне может находиться только один поезд попутного направления);

— по соотношению скоростей движения поездов по участку и перегонам: параллельные (скорость всех поездов различных категорий одинаковая), непараллельные (поезда движутся с разными скоростями);

— по соотношению числа поездов по направлениям следования: парные и непарные.

Наличная ПС участка по перегонам определяется при параллельном графике движения поездов с округлением полученного результата до ближайшего целого значения в меньшую сторону. При этом на двухпутных линиях расчет ведется исходя из применения только пакетного графика движения поездов, а на однопутных линиях — при применении обоих типов графика в зависимости от средств сигнализации и связи по движению поездов [3].

Например, для двухпутного графика движения расчет ПС выполняется по формуле

$$N_{\text{нал}} = (1440 - t_{\text{тех}}) \times \alpha_{\text{н}} / J_{\text{р}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{нал}}$ — рассчитываемая наличная ПС; $t_{\text{тех}}$ — продолжительность суточного бюджета времени, выделяемого для производства плановых ремонтно-строительных работ (для двухпутных = 150 мин); $\alpha_{\text{н}}$ — коэффициент, учитывающий надежность работы технических средств (для двухпутных $\alpha_{\text{н}}$ принят 0,96 при электрической и 0,95 при тепловозной тяге); $J_{\text{р}}$ — расчетный межпоездной интервал между поездами попутного направления, определяемый в соответствии с положениями [3] по определению станционных и межпоездных интервалов.

Аналитические методы используют простые математические выражения и сжатие расписания для количественной оценки пропускной способности участка железной дороги. Между тем эти методы обладают рядом недостатков.

В формуле (2) отсутствует ограничение на величину межпоездного интервала. По сути это означает, что теоретически ПС может быть бесконечно большой.

Зависимость между ПС и межпоездным интервалом носит линейный характер. При этом результаты моделирования движения поездов показывают, что эта зависимость имеет линейный характер только в области небольшой загрузки участка (до точки насыщения на рис. 1). В точке насыщения эта зависимость становится нелиней-

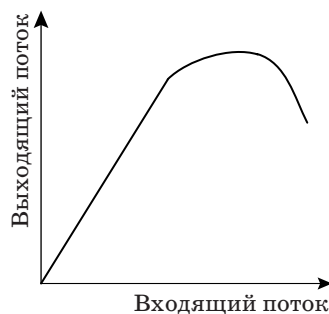
ной и начинается разрыв между интенсивностью потока поездов на входе и выходе с участка (между теоретической и фактической ПС).

Одним из явных недостатков аналитических методов расчета ПС является допущение о равномерной скорости движения на перегоне, что не может быть совсем правильным [1].

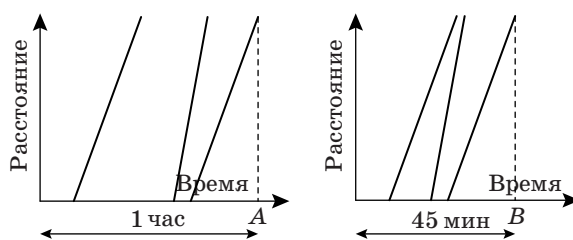
Пропускную способность необходимо определять не в конкретной точке, а на всем протяжении участка ввиду реакции участка на различные размеры движения поездов. При этом важно учесть ограничения на ПС границ участка и станций. Реакция показывает взаимосвязь между интенсивностью входного и выходного транспортных потоков (рис. 2). На рисунке видно, что при некотором входном потоке создается насыщение участка и далее при возрастании этого потока возможно даже сокращение интенсивности движения через участок. Это связано с тем, что принимающая станция не успевает пропускать поезда и на участке падает скорость движения.

В аналитических моделях пытаются учесть все условия движения, но это приводит к тому, что методика расчета усложняется настолько, что ею перестают пользоваться [1]. В аналитических методах используют средние величины, которые не учитывают многообразие особенностей движения поездов.

Существенным недостатком является то, что аналитическими методами не определяются мак-



■ Рис. 1. Влияние интенсивности движения поездов на входе участка на пропускную способность



■ Рис. 2. Сжатие расписания методом CUI (слева — до сжатия, справа — после сжатия)

симальные размеры движения поездов. Это приводит к тому, что пропускная способность, вычисленная аналитическими методами, отличается от практической ПС.

На Западе более распространена оценка использования пропускной способности железнодорожного участка. Этот параметр непосредственно показывает свободные ресурсы железной дороги при принятой организации движения на этом участке в данный период времени. Под использованием ПС понимают ту часть пропускной способности, которая была использована при заданном графике движения и заданной инфраструктуре.

Метод CUI

Этот метод является основным для анализа использования ПС, принятым в Великобритании.

Чтобы рассчитать индекс использования ПС, расписание подвергают «сжатию», сокращая все незанятые поездами промежутки времени из расписания. По сути, нитки графика располагают наиболее компактно друг к другу. При этом график после «сжатия» остается реализуемым и учитывает все необходимые ограничения на межпоездной интервал и пр. Индекс определяется отношением времени «сжатого» графика ко времени текущего графика:

$$I = B/A, \quad (3)$$

где A и B — периоды времени графика до и после «сжатия» при сохранении размеров движения.

В примере на рис. 2 индекс составляет 45 мин/60 мин = 75%.

Сжатие выполняют по каждому перегону отдельно, при этом сокращая (если это допустимо) или удлиняя время обработки (стоянки) поездов на станции. Следовательно, сдвиги ниток на перегоне при согласовании всего хода по участку могут быть выполнены различными вариантами. Метод обладает недостатками: в зависимости от способа сжатия получается разная ПС, к тому же результат довольно неточен — метод оценивает ПС участка железной дороги, опираясь только на свойства перегонов, и не учитывает ограничения станций.

Метод UIC 406

Наиболее распространенным методом анализа ПС в Европе является метод UIC 406. Он был разработан МСЖД [6] и принят в 19 европейских странах. В основе метода также лежит сжатие расписания, но имеется различие в способе разделения участка на сегменты, по которым сжатие выполняется отдельно. Согласно рекомендации в работе [6], нитки в графике должны наиболее плотно находиться друг к другу, не нарушая ин-

тервалы безопасности. Иными словами, расписание должно быть «сжато» так, чтобы в нем осталось как можно меньше времени между нитками графика. Как правило, запасное время вводят специально для уменьшения распространения задержек между поездами при нештатной ситуации. Это повышает надежность расписания, но существенно снижает ПС.

Пример сжатия расписания для однопутного и двухпутного перегонов методом UIC 406 показан на рис. 3.

Использованную пропускную способность определяют по формуле [5]

$$K = k \times 100/U [\%], \quad (4)$$

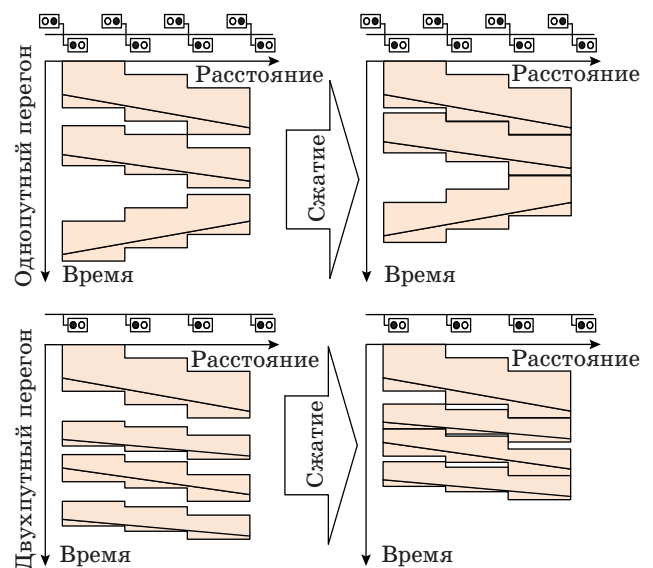
где U — рассматриваемый временной интервал, мин; k — суммарное время, мин:

$$k = A + B + C + D. \quad (5)$$

Здесь A — время занятости инфраструктуры поездами, мин; B — дополнительное время к межпоездному интервалу для снижения рисков распространения задержек, мин; C — межпакетный интервал (для однопутных перегонов), мин; D — продолжительность суточного бюджета времени, выделяемого для производства плановых ремонтно-строительных работ, мин.

Каас (Kaas) предложил [5] следующую формулу для расчета времени B из формулы (5) с учетом коэффициента использования ПС и межпоездного интервала:

$$\begin{aligned} K_{\max} &= \Delta T/t_{h \min}; \\ K_f &= u \times K_{\max}; \\ K_f &= u \times \Delta T/t_h, \end{aligned} \quad (6)$$



■ Рис. 3. Сжатие расписания методом UIC 406

где K_{\max} — теоретическая ПС, число поездов; ΔT — рассматриваемый временной интервал, мин; $t_{h \min}$ — минимальный межпоездной интервал, мин/поезд; u — процент использования теоретической пропускной способности; K_f — практическая ПС, число поездов:

$$K_f = \Delta T / (t_{h \min} + t_b). \quad (7)$$

Тогда из формул (6) и (7) можно выразить дополнительное время к межпоездному интервалу для снижения рисков распространения задержек t_b , мин/поезд:

$$K_f = u \times \Delta T / t_h = \Delta T / (t_{h \min} + t_b) \Rightarrow t_b = \Delta T / K_f - t_{h \min}.$$

Метод UIC 406 позволяет оценивать использование ПС для задач управления маршрутами поездов, но не для планирования развития инфраструктуры. Его возможности ограничены по следующим причинам:

- факторы стабильности и надежности движения, закладываемые в расписание, не принимаются во внимание, в то время как они в значительной степени влияют на используемую ПС. На станции тоже могут быть незапланированные операции, например перестыковка состава;

- все поезда считаются одинаковыми, хотя в действительности они имеют различные приоритеты;

- ПС больших станций не может быть найдена из-за отсутствия знаний о точных маршрутах поездов и операций на платформах [18];

- графики движения с различной комбинацией поездов, но приблизительно одинаковым использованием ПС не могут сравниваться друг с другом, так как ПС рассчитывается как невзвешенная сумма всех поездов;

— поскольку только короткие участки сети включены в анализ, то сетевые эффекты не учитываются.

Сравнение методов CUI и UIC 406

Эти два метода аналогичны в подходе, оба используют технику «сжатия расписания», но различаются по уровню детализации, на котором они применяются. Метод UIC 406 применяется на уровне блок-участков, а метод CUI — на более длинных участках сети и не рассматривает сжатие на отдельных блок-участках.

Сравнение методов CUI и UIC 406 было проведено в работе [19]. Эксперименты проводились на небольшом участке железной дороги на юге Великобритании между станциями Саутгемптон и Бейзингстоук. Сжатию подверглось расписание в утренний час-пик с 7:00 до 10:00. Результаты сжатия расписания представлены на рис. 4, а и б.

После сравнения результатов можно заметить, что средний индекс использования ПС методом CUI на 1,6 % больше, чем у метода UIC 406 (таблица). Это объясняется различным определением межпоездного интервала. Также при переходе с 4-колейной дороги на 2-колейную на станции Шоуфорд индекс использования ПС выше у метода CUI.

■ Сравнение результатов CUI и UIC 406

Метод	Значение индекса использования ПС, %	
	среднее	максимальное
CUI	33,2	42,7
UIC 406	31,6	40



■ Рис. 4. Сжатие расписания методом CUI (а) и UIC 406 (б)

Методы CUI и UIC 406 позволяют оценить использование ПС для управления поездами, но не для планирования развития инфраструктуры. Есть ряд существенных недостатков в методах:

— не учитываются стабильность и надежность расписания, в то время как они оказывают большое влияние на ПС;

— все поезда считаются одинаковыми, хотя они имеют различную скорость движения, приоритеты и другие характеристики;

— пропускная способность сложных станций не может быть оценена из-за отсутствия знаний о точных маршрутах поездов;

— используемая ПС вычисляется с помощью «невзвешенного» суммирования всех поездов. Это происходит из-за того, что не учитывается тип поездов;

— сетевые эффекты не рассматриваются, потому что в анализ включены только короткие участки сети.

Аналитические методы могут легко и быстро дать представление о ПС линий или сети, но не охватывают в совокупности все факторы, влияющие на ПС. Большое число факторов усложняет моделируемый процесс. Чем сложнее процесс, тем менее точной получается описывающая его теоретическая функция. Результат, получаемый аналитическими методами, приближенный и не показывает ПС, которую можно реализовать на практике.

В последние годы наметились следующие тенденции исследований и развития аналитических методов:

1) расширение области применения аналитических методов оценки ПС:

— для станций [18, 20];

— для железнодорожных полигонов [21];

— отдельно для грузового транспорта [22];

2) автоматизация аналитических методов:

— метод UIC 406 в новой версии RailSys [14];

— метод UIC 406 для огромных сетей [23];

— метод CUI [21];

3) развитие методологии UIC 406 — исследование характера изменения CUI при добавлении (удалении) поездов в расписание [19].

Заключение

В этой части работы рассмотрены распространенные аналитические методы анализа использования пропускной способности, применяемые в Европе, а именно методы CUI и UIC 406. Дана характеристика каждого из методов и общая оценка аналитических методов. Показано, что аналитические методы, описывающие железнодорожную инфраструктуру с помощью математических выражений, позволяют оценить пропускную способность участка лишь приблизительно. Приведены тенденции исследований и развития аналитических методов. Во второй части статьи будут обсуждаться методы, основанные на моделировании и оптимизации.

Литература

1. Левин Д. Ю., Павлов В. Л. Расчет и использование пропускной способности железных дорог: монография. — М.: ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. — 364 с.
2. Козлов И. Т. Пропускная способность транспортных систем. — М.: Транспорт, 1985. — 214 с.
3. Инструкция по расчету наличной пропускной способности железных дорог /ОАО «РЖД». — М., 2010. — 305 с.
4. Krueger H. Parametric Modeling in Rail Capacity Planning //Proc. of 1999 Winter Simulation Conf., Piscataway, 1999. P. 1194–2000.
5. Kaas A. H. Methods to Calculate Capacity of Railways (Metoder Til Beregning af Jernbanekapacitet): PhD-thesis / Technical University of Denmark, 1998. — 182 p.
6. UIC 2004. Capacity (UIC Code 406)/ International Union of Railways (UIC). — Paris, 2004. — 56 p.
7. Hansen I. A., Pahl J. Railway Timetable and Traffic. — Hamburg: Eurailpress, 2008. — 332 p.
8. Poole E. C. Costs — A Tool for Railroad Management. — N. Y.: Simmons Boardman, 1962. — 175 p.
9. Lai Y. C. Increasing Railway Efficiency and Capacity Through Improved Operations, Control and Planning: PhD-thesis / University of Illinois at Urbana-Champaign, 2008. — 184 p.
10. Lusby R., Larsen J., Ehrgott M., Ryan D. Railway Track Allocation: Models and Methods //OR Spectrum. 2009. N 3. P. 843–883.
11. Assad A. A. Models for Rail Transportation// Transportation Research. Part A: General. 1980. Vol. 14. N 4. P. 205–220.
12. 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.
13. Yuan J., Hansen I. A. Optimizing Capacity Utilization of Stations by Estimating Knock-on Train Delays// Transportation Research. Part B: Methodological. 2007. Vol. 41. N 2. P. 202–217.
14. RMCON, 2009. RailSys Information Brochure [Online]. <http://www.rmcon.de> (дата обращения: 03.06.2014).
15. Pahl J. Railway Operation and Control, Mountlake Terrace (USA). — VTD Rail Publishing, 2009. — 275 p.
16. Confessore G. et al. A Simulation-Based Approach for Estimating the Commercial Capacity of Railways // Proc. of 2009 Winter Simulation Conf., Austin, Texas, USA, 2009. P. 2542–2552.

17. Kontaxi E., Ricci S. Techniques and Methodologies for Railway Capacity Analysis: Comparative Studies and Integration Perspectives// 3rd Intern. Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, Rail-Zurich, 2009. P. 1051–1080.
18. Landex A. Station Capacity// 4th Intern. Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, Rome, Italy, 2011. P. 379–386.
19. KhademSameni M., Landex A., Preston J. Developing the UIC 406 Method for Capacity Analysis// 4th Intern. Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, Rome, Italy, 2011. P. 371–378.
20. Lindner T. Applicability of the Analytical Compression Method for Evaluating Node Capacity// 4th Intern. Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, Rome, Italy, 2011. P. 457–461.
21. Armstrong J., Blainey S., Preston J. Developing a CUI-Based Approach to Network Capacity Assessment// 4th Intern. Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, Rome, Italy, 2011. P. 57–63.
22. Lindner T., Pachtl J. Recommendations for Enhancing UIC Code 406 Method to Evaluate Railroad Infrastructure Capacity// 89th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, USA, 2010. P. 120–127.
23. Kuckelberg A., Wendler E., Groger T. A UIC 406 Compliant, Practically Relevant Capacity-Consumption Evaluation Algorithm// 4th Intern. Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, Rome, Italy, 2011. P. 520–525.

UDC 656.22

Railway Capacity Estimation Methods. Part I. Analytical Methods of Estimation and Capacity Utilization

Branishtov S. A.^a, PhD., Tech., Acting Head of Labs, pochta-na@mail.ru

Shirvanyan A. M.^a, Junior Researcher, Post-Graduate Student, artshirvanyan@mail.ru

Tumchenok 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 an important characteristic of a railway track which determines its conveyance opportunities. Without taking it into account, you cannot plan freight transportation via a rail network. To get this characteristic, different countries use various analytical methods based on models including a set of parameters like the railway traffic interval, the average inter-packet gap, the coefficient of equipment reliability, etc. In this paper, we discuss the most popular methods of capacity evaluation. **Results:** In the first part of the work, we discuss various concepts of capacity term used in railway industry, describe and compare the methods of capacity usage analysis. In the second part, we discuss parametric methods, simulation methods and schedule optimization. **Practical relevance:** This work will interest rail service specialists: dispatchers, managers, engineers and others, as analytical methods applied to the calculation of the capacity itself or the portion of its actual usage can help them plan the rail traffic more efficiently.

Keywords Railway Capacity, Railroad, Schedule Compression.

References

1. Levin D. Ju., Pavlov V. L. *Raschet i ispol'zovanie propusknoi sposobnosti zheleznykh dorog* [Calculation and Using of Railway Capacity]. Moscow, FGOU «Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte» Publ., 2011. 364 p. (In Russian).
2. Kozlov I. T. *Propusknaia sposobnost' transportnykh sistem* [The Capacity of the Transport Systems]. Moscow, Transport Publ., 1985. 214 p. (In Russian).
3. *Instruktsiia po raschetu nalichnoi propusknoi sposobnosti zheleznykh dorog* [Instruction for Calculating the Capacity]. Moscow, OAO «RZhD» Publ., 2010. 305 p. (In Russian).
4. Krueger H. Parametric Modelling in Rail Capacity Planning. *Proc. of 1999 Winter Simulation Conf.*, Piscataway, 1999, pp. 1194–2000.
5. Kaas A. H. *Methods to Calculate Capacity of Railways (Metoder Til Beregning af Jernbanekapacitet)*. PhD-thesis. Technical University of Denmark, 1998. 143 p.
6. *UIC 2004. Capacity (UIC Code 406)*. Paris, France, International Union of Railways (UIC), 2004. 56 p.
7. Hansen I. A., Pachtl J. *Railway Timetable and Traffic*. Hamburg, Eurailpress, 2008. 332 p.
8. Poole E. C. *Costs — A Tool for Railroad Management*. New York, Simmons Boardman, 1962. 175 p.
9. Lai Y. C. *Increasing Railway Efficiency and Capacity Through Improved Operations, Control and Planning*. PhD-thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2008. 184 p.
10. Lusby R., Larsen J., Ehrgott M., Ryan D. Railway Track Allocation: Models and Methods. *OR Spectrum*, 2009, no. 5, pp. 843–883.
11. Assad A. A. Models for Rail Transportation. *Transportation Research. Part A. General*, 1980, vol. 14, iss. 4, pp. 205–220.
12. 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.
13. Yuan J., Hansen I. A. Optimizing Capacity Utilization of Stations by Estimating Knock-on Train Delays. *Transportation Research. Part B. Methodological*, 2007, vol. 41, no. 2, pp. 202–217.
14. *RMCON, 2009. RailSys Information Brochure* [Online]. Available at: <http://www.rmcon.de> (accessed 3 June 2014).
15. Pachtl J. *Railway Operation and Control, Mountlake Terrace (USA)*. VTD Rail Publishing, 2009. 275 p.
16. Confessore G., Cicini P., De Luca P., Liotta G., Rondinone F. A Simulation-Based Approach for Estimating the Commercial Capacity of Railways. *Proc. of 2009 Winter Simulation Conf.*, Austin, TX, USA, 2009, pp. 2542–2552.
17. Kontaxi E., Ricci S. Techniques and Methodologies for Railway Capacity Analysis: Comparative Studies and Integration Perspectives. *3rd Intern. Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*. RailZurich, 2009, pp. 1051–1080.
18. Landex A. Station capacity. *4th Intern. Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*. Rome, Italy, 2011, pp. 379–386.
19. KhademSameni M., Landex A., Preston J. Developing the UIC 406 Method for Capacity Analysis. *4th Intern. Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*. Rome, Italy, 2011, pp. 371–378.
20. Lindner T. Applicability of the Analytical Compression Method for Evaluating Node Capacity. *4th Intern. Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*. Rome, Italy, 2011, pp. 457–461.
21. Armstrong J., Blainey S., Preston J. Developing a CUI-based Approach to Network Capacity Assessment. *4th Intern. Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*. Rome, Italy, 2011, pp. 57–63.
22. Lindner T., Pachtl J. Recommendations for Enhancing UIC Code 406 Method to Evaluate Railroad Infrastructure Capacity. *89th Transportation Research Board Annual Meeting*. Washington, USA, 2010, pp. 120–127.
23. Kuckelberg A., Wendler E., Groger T. A UIC 406 Compliant, Practically Relevant Capacity-Consumption Evaluation Algorithm. *4th Intern. Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*. Rome, Italy, 2011, pp. 520–525.