УДК 656.022

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-5-194-198

© И. А. Иванов, соискатель

© I. A. Ivanov, competitor

© А. В. Терентьев, д-р техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

© A. V. Terent'ev, Dr. Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: igivanov@cit29.com, aleksej.terentev.67@bk.ru

E-mail: igivanov@cit29.com, aleksej.terentev.67@bk.ru

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ АВТОБУСНЫХ МАРШРУТОВ В ЦИФРОВОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ЭКОСИСТЕМЕ

ANALYTICAL MODEL FOR THE FORMATION OF BUS ROUTES IN THE DIGITAL TRANSPORT ECOSYSTEM

Приводится аналитическая модель построения автобусных маршрутов в сложной пассажирской транспортной системе, являющаяся основным элементом в концепции развития цифровых транспортах экосистем на основе объектно-ориентированного подхода. Разработанная модель управления объектами в транспортной пассажирской системе базируется на решении многокритериальной задачи динамического программирования, при этом технология синтеза полных совокупностей эффективных оценок обеспечивается определением частных Парето-оптимальных оценок.

Ключевые слова: автобусный маршрут, транспортная система, динамическое программирование, оптимальная траектория, многокритериальная задача.

The article presents an analytical model of planning bus routes in the complex passenger transport system. This model is the main element in the concept of the digital ecosystem transport development based on an object-oriented approach. The developed model of facilities management in the transport passenger system is based on solving the multi-criteria task of dynamic programming, while the technology of synthesis of effective estimates' aggregate is provided by the determination of private Pareto-optimal estimates.

Keywords: public bus route, transport system, dynamic programming, optimal trajectory, multi-criteria task.

Аналитическая модель построения автобусных маршрутов является основным элементом в концепции развития цифровой пассажирской транспортной экосистемы (ЦТЭС), а завершённый процесс управления в ЦТЭС должен осуществляться за счет:

- формирования моделицентричной системы на базе создания единой коммуникационной сети управления информационными потоками;
- разработки и применения объектно-ориентированных моделей управления перемещения физическими объектами (пассажирами) в ЦТЭС, формирующих оптимальные траектории перемещения последних;
- определения мощности объектов инфраструктуры ЦТЭС, парков транспортных средств и т. д. исходя из полученной совокупности опти-

мальных траекторий перемещений отдельных пассажиров;

- разработки математических алгоритмов поддержки отношения целостности между объектами ЦТЭС.

Можно сделать вывод о необходимости глубокой перестройки структуры организации и управления региональными и муниципальными пассажирскими перевозками с учетом новых технологий, основанных на принципах цифровой трансформации, а не постепенная модернизация существующих решений, которая требует больших затрат на всех стадиях от разработки до эксплуатации и снижает показатели качества, экономические показатели, безопасность и другие параметры эффективности функционирования системы перевозок.

Технологическими инструментами цифровой трансформации (цифровые технологии (ЦТ)) пассажирских транспортных систем являются «цифровые сервисы» (ЦС), каждый из которых реализуется из функциональных аппаратно-программных и программных модулей (АПМ и ПМ). Особенности применения ЦТ объясняются рядом преимуществ свойств информации, преобразованной в цифровой формат:

1) возможностью передачи кодированной информации с применением современных средств обмена данными, а также на материальных носителях;

2) возможностью распространять информацию посредством копирования без потери ее качества и точности;

3) возможностью многократного увеличения скорости передачи информации за счет увеличения плотности записи и т. д.

Развитие цифровых форматов записи больших объемов данных и качественные преобразования в процессе передачи информации обусловили появление нового научного направления «digital economics» [1].

В настоящее время появилось множество определений «цифровой экономики». Большинство из них опираются на активное внедрение возможностей интернета, мобильных сетей доступа к информации, а также возможности работы в онлайн-режиме, что позволяет вводить в практику электронный документооборот, создавать новые бизнес-модели, реструктурировать механизмы взаимодействия рынков и потребителей и т. д. Анализ данных подходов к определению «цифровой экономики» показывает, что перечисленные нововведения (инновации) — это лишь результат процесса «цифровизации», каждый из которых выделяет и подчеркивает ее существенные преимущества. Кстати, впервые термин «цифровизация» был введен американским ученым Николасом Негропonte из Массачусетского университета в 1995 г. [2], однако процессы цифровизации информации и обработки данных в новом формате активно использовались, например, в США еще в 50-е годы прошлого века, по крайней мере в экономике [3, 4]. Но главным содержанием понятия «цифровая экономика» является определение ее как новой системы социальных отношений [5], охватывающей всю сферу общественной жизни людей:

науку, производство, транспорт, менеджмент и т. д. Основными признаками новой социально-экономической системы, отражающими ее специфику, являются [6]:

1. Возможность обработки огромного количества данных, которые генерируются в используемых информационных системах и преобразуются в новую полезную информацию, применяемую для повышения эффективности и конкурентоспособности в условиях глобального доминирования интернет-ресурсов, становится жизненной необходимостью.

2. Активное использование инновационных цифровых информационно-коммуникативных технологий (ИКТ), современных электронных каналов связи на базе мобильных носителей информации на создание новых управлений, новых бизнес-моделей, реструктуризирующих взаимоотношения рынков и потребителей.

3. Использование эффективных, специально разрабатываемых под новые задачи и условия применения математических методов и моделей переработки информации, основанных на возможности обработки цифровой формы информации (цифрового кодирования данных).

4. Создание и применение новых информационно-аналитических платформ, специализированных на отдельных отраслях экономики, но способных активно (проактивно) взаимодействовать с внешней средой в режиме онлайн мониторинга информационных ситуаций [7].

Повышение эффективности регионального и муниципального пассажирского транспорта, комфорта и безопасности перевозок может быть достигнуто за счет использования принципов цифровой трансформации технологических и управленческих процессов. Из типового набора цифровых сервисов и аппаратно-программных модулей формируется цифровая платформа, к которой подключаются региональные системы обеспечения мобильности населения, мобильные и внешние сервисы. Так формируется экосистема, в центре которой пассажиры, вокруг которых объединяются различные сервисы, обеспечивающие базовые целевые функции (комфорт, безопасность и эффективность) [8].

В таблице приведен актуальный для применения в ЦТЭС классификатор моделей организа-

Классификатор моделей организации маршрутов пассажирских перевозок

Тип маршрута	Требование идентификации пассажира при оформлении проездного документа	Требование идентификации маршрута при оформлении договора на перевозку	Требование идентификации АТС при оформлении договора с пассажиром
1. Регулярные автобусные маршруты	Нет (-)*	Да (-)	Нет (-)
2. Маршруты легковых автомобилей-такси	Нет (-)	Нет (+)	Да (+)
3. Регулярные маршруты автобусов-такси с остановками по требованию	Нет (-)	Да (-)	Нет (-)
4. Регулярные коммерческие маршруты автобусов-такси с безостановочным движением	Нет (-)	Да (-)	Нет (-)
5. Регулярные заказные маршруты автобусов с безостановочным движением	Да (+)	Нет (+)	Нет (-)
6. Автобусный маршрут в объектно-ориентированной модели управления	Да (+)	Нет (+)	Да (+)
Маршрут с гибким характером движения и обязательной идентификацией пассажиров и АТС.			

* (-/+) — фактор отрицательного или положительного влияния на эффективность процесса перевозок в количественных оценках.

ции маршрутов пассажирских перевозок.

Рассмотрим модель управления в ЦТЭС, основанную на интеграции методов решения оптимизационных многокритериальных задач и методов динамического программирования. Условная схема маршрутов и остановочных пунктов или транспортно-пересадочных узлов (ТПУ) приведена на рисунке.

Задача оптимизации в управляемой системе ЦТЭС с дискретными состояниями в однокритериальной постановке формализуется следующим образом:

$$\Omega = \{D; x_0; F; V(x), f(x, v), s(x, v)\}, \quad (1)$$

где D — множество возможных состояний ЦТЭС; F — множество состояний объектов в ЦТЭС, $x_0 \in D, x_0 \notin F, F \subset D$; $V(x)$ — множество управлений направлениями перемещения объектов в ЦТЭС ($x \in D|F$); $f(x, v)$ — функция переходов движения автобусов в ЦТЭС (из информационного состояния x при реализации управления; v — показатели движения автобусов в ЦТЭС преобразуются в $f(x, v)$, ($x \in D|F$), $v \in V(x)$, $f(x, v) \in D$; $s(x, v)$ — оптимизируемая функция ($x \in D|F$), $v \in V(x)$ с неотрицательными значениями.

Тогда оптимальной траектории движения автобусов (T) в ЦТЭС (Ω) соответствует конечная последовательность $T = \{x^0, x^1, x^2, \dots, x^n\}$ при выполнении условия

$$x^t = f(x^{t-1}, v^t),$$

где

$$v^t \in V(x^{t-1}), \quad t = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где x^0 — начало движения автобуса; x^n — конечное положение движения автобуса в траектории; $x^1, x^2, \dots, x^{n-1}$ — промежуточные положения движения автобуса в траектории.

Формирование оптимальной траектории движения автобусов в ЦТЭС основано на принципе Беллмана [9, 10, 11]:

$$B(x) = \min_{v \in V(x)} \{s(x, v) + B(f(x, v))\}, \quad (x \in D|F). \quad (3)$$

Тогда каждому дискретному положению автобуса в ЦТЭС соответствует множество результативных показателей движения автобусов, определяющих единый цикл транспортного процесса. При этом управление в ЦТЭС реализуется пошагово для отдельного автобуса. Моделирование конечного графа перемещения (оптимальных траекторий) для отдельных автобусов выполняется по условию

Структура системы с дискретными состояниями пассажира на проектируемом маршруте

$$\left\{ \begin{array}{l} B(x) = \max_{v \in V(x)} \left\{ D_{i(t)} + B \left(f \left(D_{i(t)} \right) \right) \right\}, \quad (x \in D | F); \\ D_{i(t)} = \sum_{j=1}^n b_{ij} A_j \rightarrow \max; \\ \sum_{j=1}^n A_j = 1, \quad 0 \leq c_j \leq 1, \quad c_j \geq c_{j+1}, \quad j = \overline{1, n-1}, \end{array} \right. \quad (4)$$

где D_i — эффективность перемещения автобуса в количественных оценках; b_{ij} — эффективность частных решений; c_j — значение весовых коэффициентов, определяющих приоритет возможных решений.

Полученные результаты решения поставленной задачи оптимизации методом динамического программирования оформляются в виде оптимальных траекторий движения автобусов в ЦТЭС.

Выводы

Приведенная модель управления движения автобусами в ЦТЭС основана на разработанной новой модели интеграции методов векторной оптимизации и метода динамического программирования. Важно отметить, что данная модель позволяет получать полную совокупность возможных эффективных оценок в ряду «Парето-оптимальных» решений. Разработанная аналитическая модель построения автобусных маршру-

тов в сложной транспортной экосистеме является основным элементом в концепции развития ЦТЭС на основе объектно-ориентированного подхода. В перспективе полученные математические модели оптимизации перемещения пассажиров в ЦТЭС можно будет использовать не только для определения оптимальных маршрутов автобусов, но и для перепроектирования и реструктуризации самой ЦТЭС с более упорядоченными параметрами эффективности. Данное аналитическое решение в совокупности с применением цифровых технологий позволяет проектировать и модернизировать ЦТЭС как подсистемы интеллектуальных транспортных систем.

Библиографический список

1. Козырев А. Н. Цифровая экономика и цифровизация в исторической ретроспективе. URL: <http://Medium.comCEMI-RAS>, ноябрь, № 11, 2017 (дата обращения: 10.05.2018).
2. Negroponte N. *Being Digital*. NY: Knopf, 1995. URL: <http://inance.ru/2017/09/cifrovaya-ekonomika/> (дата обращения: 11.05.2019).
3. Розина И. Н. Цифровизация образования. URL: <http://ito.lgb.ru/tezises/1027.doc> (дата обращения: 17.03.2019).

4. Халин В. Г., Чернова Г. В. Цифровизация и ее влияние на российскую экономику и общество: преимущества, вызовы, угрозы и риски // Власть и экономика: управление и риски. 2018. № 10. С. 46–63.

5. Глобальный отчет по информационным технологиям (The Global Information Technology Report). URL: <http://gtmarket.ru/ratings/networked-readiness-index/networkedreadiness-index-info> (дата обращения: 19.12.2018).

6. Асеев С. М., Кряжмский А. В. Принцип максимума Понтрягина и задачи оптимального экономического роста // Труды Математического института им. В. А. Стеклова. М.: Изд-во МИРОС - МАИК «Наука/Интерпериодика», 2007.

7. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление: пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 798 с.

8. Горелик С. Л., Иванов И. А., Лещинский В. В., Малахов А. А. Третье поколение территориальных пассажирских транспортных систем. Региональная информатика (РИ-2016). Юбилейная XV Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2016)». СПб., 26–28 октября 2016 г.: Секция 10: Вычислительная техника. Информационные системы и технологии.

9. Демин В. А., Карелина М. Ю., Терентьев А. В. Методика достижения динамического баланса между величинами пропускных способностей транспортно-складских комплексов и грузопотоков в логистических системах // Логистика. Агентство Маркет Гайд, 2018. № 2 (135). С. 32–36.

10. Evtiukov S., Karelina M., Terentyev A. A method for multi-criteria evaluation of the complex safety characteristic of a road vehicle characteristic of a road vehicle. *Transportation Research Procedia*, no 36, 2018, pp. 149–156. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.057>.

11. Подиновский В. В., В. Д. Ногин. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982. С. 9–64.

References

1. Kozyrev A. N. *Tsifrovaya ekonomika i tsifrovizatsiya v istoricheskoy retrospektive* [Digital economy and digitalization in historical retrospect]. Available at: <http://Medium.com/CEMI-RAS>, 2017, November, no. 11. (Accessed: 10.05.2018).

2. Negroponte N. *Being Digital*. NY, Knopf Publ., 1995. Available at: <http://inance.ru/2017/09/cifrovaya-ekonomika/> (accessed: 11.05.2019).

3. Rozina I. N. *Tsifrovizatsiya obrazovaniya* [Digitalization of education]. Available at: <http://ito.lgb.ru/tezises/1027.doc> (accessed: 17.03.2019).

4. Khalin V. G., Chernova G. V. *Tsifrovizatsiya i ee vliyanie na rossiyskuyu ekonomiku i obshchestvo: preimushchestva, vyzovy, ugrozy i riski* [Digitalization and its impact on the Russian economy and society: advantages, challenges, threats and risks]. *Vlast' i ekonomika: upravlenie i riski – Power and economy: management and risks*, 2018, no. 10, pp. 46–63.

5. *Global'niy otchet po informatsionnym tekhnologiyam* [The Global Information Technology Report]. Available at: <http://gtmarket.ru/ratings/networked-readiness-index/networkedreadiness-index-info> (accessed: 19.12.2018).

6. Aseev S. M., Kryazhimskiy A. V. *Printsip maksimuma Pontryagina i zadachi optimal'nogo ekonomicheskogo rost* [Pontryagin's maximum principle and optimal economic growth problems]. *Trudy Matematicheskogo instituta im. V. A. Steklova* [Proceedings of the Steklov Mathematical Institute]. Moscow, MIROS - MAIK Nauka/Interperiodika Publ., 2007.

7. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie* [Fuzzy modeling and control]. Transl. from English. Moscow, BINOM. Laboratory of knowledge Publ., 2009, 798 p.

8. Gorelik S. L., Ivanov I. A., Leshchinskiy V. V., Malakhov A. A. *Tret'e pokolenie territorial'nykh passazhirskikh transportnykh system* [The third generation of territorial passenger transport systems]. *Trudy Yubileynoy XV Sankt-Petersburgskoy mezhdunarodnoy konferentsii «Regional'naya informatika (RI-2016)»*. Sektsiya 10: Vychislitel'naya tekhnika. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii* [Proc. of the Jubilee XV St. Petersburg International conference “Regional Informatics (RI-2016)”. Section 10: Computer engineering. Information systems and technologies]. St. Petersburg, Oktober 26–28, 2016.

9. Demin V. A., Karelina M. Yu., Terent'ev A. V. *Metodika dostizheniya dinamicheskogo balansa mezhdu velichinami propusknykh sposobnostey transportno-skladskikh kompleksov i gruzopotokov v logisticheskikh sistemakh* [Methodology for achieving a dynamic balance between the values of throughput capacities of transport and warehouse complexes and cargo flows in logistics systems]. *Logistika. Agentstvo MarketGayd – Logistics. Marketguide Agency*, 2018, no. 2 (135), pp. 32–36.

10. Evtiukov S., Karelina M., Terentyev A. A method for multi-criteria evaluation of the complex safety characteristic of a road vehicle characteristic of a road vehicle. *Transportation Research Procedia*, 2018, no 36, pp. 149–156. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.057>.

11. Podinovskiy V. V., Nogin V. D. *Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach* [Pareto-optimal solutions to multi-criteria problems]. Moscow, Nauka Publ., 1982, pp. 9–64.