

УДК 656.1 + 06

Г.Я. Мозолевич, Д.В. Риздванецкий

ОПТИМИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Введение

Задача качественного удовлетворения потребностей населения в перевозках в городах-миллионниках актуальна в условиях урбанизации, увеличения удельной доли затрат на горюче-смазочные материалы, наличия экологических проблем городских территорий.

Основными проблемами существующих систем городского транспорта в Украине являются:

- ухудшение условий безопасности движения;
- использование неэкологического подвижного состава малой пассажироемкости (50–80 % перевозок осуществляется маршрутными такси);
- использование эмпирических методов сбора и обработки статистической информации по пассажирообороту;
- отсутствие координации между частными перевозчиками (например, в Днепропетровске 25 из 27 существующих транспортных компаний, обслуживающих городские маршруты, являются частными);
- неоправданное увеличение величины рабочего парка маршрутных такси (вследствие неоптимальной организации перевозочного процесса).

К группам решений, нацеленных на модернизацию существующей транспортной системы, можно отнести градостроительные, технические и операционные. Выбор оптимальных, обоснованных решений является одним из важнейших резервов повышения качества обслуживания пассажиров и эффективности использования подвижного состава [1]. Высокой результативности при сравнительно малых издержках можно добиться, сочетая операционные и технические методы.

Примером такого сочетания является интеллектуальная транспортная система (ИТС) – телематическая транспортная система, обеспечивающая реализацию функций высокой сложности по обработке информации и выработке оптимальных (рациональных) решений и управляющих воздействий [2]. Использование ИТС в масштабах большого города с развитой сетью общественного транспорта часто подразумевает внедрение автоматизированной системы оплаты проезда (АСОП) и учета пассажиропотока (АСУП), что позволяет оптимизировать процессы перспективного, текущего и оперативного управления. Наиболее весомыми качественными результатами такой оптимизации являются: сокращение времени поездки и эксплуатационных затрат, уменьшение величины рабочего парка, повышение безопасности движения и улучшение экологии города.

Применение некоторых элементов АСОП может увеличить время посадки пассажиров (тур-

никеты), и количество безбилетников (замена кондукторов валидаторами). Для решения вышеперечисленных проблем в рамках данного исследования разработана модель системы, в которой устранены данные эффекты.

Системы городского транспорта средних и больших городов Украины имеют схожие недостатки, поэтому разрабатываемые в данной работе решения имеют большой потенциал применения, что свидетельствует об актуальности поставленной задачи. Для ее решения будут использованы методы теории массового обслуживания, искусственных нейронных сетей, нечетких множеств, математической статистики.

Основная часть

Объектом исследования была выбрана система городского транспорта Днепропетровска, которая представляет собой совокупность транспортных средств, инфраструктуры и управления и включает в себя 158 различных маршрутов (без учета пригородных), общей выгнантой протяженностью 2462,81 км, с более чем 600 уникальными остановками. В пределах правого берега действует 87 маршрутов и одна линия метро, левого – 12, связь между правым и левым берегом осуществляется 59 маршрутами. Один только электротранспорт обеспечивает перевозку более 600000 пассажиров в сутки. Перевозка пассажиров в границах города осуществляется 27 фирмами, включая КП «Днепропетровский метрополитен» и КП «Днепропетровский электротранспорт». Работа КП «Днепропетровский метрополитен» в данном исследовании не анализируется. Общий транспортный парк включает в себя: 260 трамваев, 124 троллейбуса, 73 автобуса и 2239 микроавтобусов.

Устойчивость систем городского транспорта зависит от трех параметров и может быть представлена в виде функции:

$$S = \varphi[Z, \overline{T_{ож}} + \overline{T_{пут}}, \mathcal{E}], \quad (1)$$

где Z – эксплуатационные затраты системы;

$\overline{T_{ож}} + \overline{T_{пут}}$ – среднее время ожидания пассажиром транспортной единицы и нахождения в пути соответственно (может быть заменено комплексным показателем уровня пассажирского сервиса [3]);

\mathcal{E} – экологический эффект от эксплуатации системы.

Эксплуатационные затраты системы можно оценить по формулам:

$$Z = \sum_i^n Z_i; \quad (2)$$

$$Z_i = 0,15 \frac{A_n (K_a + \varepsilon K_{мтб})}{365\alpha} + \Pi A_n K_г t_м + \frac{C_{пост} A_n}{365\alpha} + \sum_{i=1}^l C_{пер} \mathcal{G}_{эi} t_i A_i, \quad (3)$$

где Z_i – затраты системы на эксплуатацию i -го маршрута в расчете на один день работы, грн;

A_n – число транспортных единиц на маршруте в часы пик, ед.;

K_a – капиталовложения на приобретение одного автобуса данной вместимости, грн;

ε – коэффициент, дифференцирующий капиталовложения в зависимости от размеров транспортной системы;

$K_{мтб}$ – капиталовложения в материально-техническую базу по содержанию, ремонту и хранению, отнесенные на одну транспортную единицу, грн;

Π – часовая заработная плата водителя транспортной единицы с учетом различных доплат и отчислений, грн;

$K_г$ – количество водителей в системе, приходящееся на одну транспортную единицу, чел.;

$t_м$ – продолжительность работы маршрута в сутки, ч;

$C_{пост}$ – постоянные расходы на содержание транспортной единицы данной вместимости, грн;

α – коэффициент выпуска автобусов на линию;

l – количество периодов условного постоянства пассажиропотока, ед.;

$C_{пер}$ – переменные (на один автомобиле-километр) расходы, грн;

$\mathcal{G}_{эi}$ – эксплуатационная скорость в i -й период, км/ч;

A_i – количество транспортных единиц на маршруте в i -й период, ед.;

t_i – продолжительность i -й периода, ч;

n – количество маршрутов.

Среднее время ожидания пассажиром транспортной единицы:

$$\bar{T}_{ожж} = \frac{I}{2} + \frac{\sigma_j^2}{2I} + P_{откж} I, \quad (4)$$

где I – плановый интервал движения, $I = \varphi(A_i, \mathcal{G}_{zi})$, мин;

σ_j – среднее квадратическое отклонение интервала движения от расписания движения на j -й остановке, мин.;

$P_{откж}$ – вероятность отказа в посадке на j -й остановке маршрута, мин.

Вероятность отказа в посадке описывается законом Пуассона:

$$P_{откж} = \sum_{\mu}^{\omega} \left((T_{об} \lambda_j A_n^{-1})^{\mu} \right) \frac{\mu!}{\mu!} e^{-(T_{об} \lambda_j A_n^{-1})}, \quad (5)$$

где ω – вместимость транспортной единицы, пасс.;

μ – параметр закона Пуассона;

$T_{об}$ – время оборотного рейса на маршруте;

λ_j – интенсивность пассажиропотока на перегоне маршрута, начинающемся от j -й остановки, пасс/мин.

Время оборотного рейса рассчитывается по формуле $T_{об} = \frac{2L}{\mathcal{G}_3}$ для линейных и $T_{об} = \frac{L}{\mathcal{G}_3}$ для

кольцевых маршрутов, где L – длина рейса, км.

В рамках исследования принято, что затраты пассажира в пути $\bar{T}_{пут}$ оцениваются исходя из того, что система городского транспорта представляет собой систему массового обслуживания с простейшим входящим потоком пассажиров при нормальном законе продолжительности обслуживания (поездки).

Экологический эффект от эксплуатации системы можно оценить по удельному выбросу вредных веществ в атмосферу и ущербу от шумового воздействия, в соответствии с рекомендациями [4]. В рамках проводимого исследования можно ограничиться качественной оценкой экологического эффекта:

$$\mathcal{E} = \sum_k^n A_k \mathcal{E}_k^{-1}, \quad (6)$$

где A_k – рабочий парк транспортных единиц k -того типа (фактически соответствует числу транспортных единиц в пиковый период перевозок, умноженному на коэффициент резерва);

\mathcal{E}_k – экологический стандарт *euro* k -того типа транспорта [5];

n – количество используемых типов транспорта.

Проанализировав выражения (2)–(6) и подставив их в формулу (1), получим:

$$S = \varphi[A_k, \mathcal{G}_3, \omega, \lambda, \sigma, \mathcal{E}_k, K_a, K_{ммб}, K_в, C_{ност}, C_{неп}]. \quad (7)$$

Поскольку интенсивности пассажиропотоков являются исходными параметрами и не зависят от управленческой деятельности в системах городского транспорта, а капиталовложения на покупку транспортных средств, содержание материально-технической базы и постоянные расходы на содержание одной транспортной единицы прямо пропорциональны их количеству, получаем:

$$S = \varphi[A_k, \mathcal{G}_3, \omega, \sigma, \mathcal{E}_k, C_{неп}]. \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что резервы оптимизации могут иметь такие параметры, как: количество транспортных единиц и их качественный состав (вместимость каждой единицы и экологический

стандарт), эксплуатационная скорость на маршруте и среднее квадратическое отклонение интервала движения от расписания, а также переменные расходы в движении. Разрабатывая оптимизационные решения необходимо учитывать ряд нормативных и технических ограничений, а также нормы доходности предприятий перевозчиков. Кроме того, существенным является учет в моделях случайных факторов, вызывающих различные колебания исходных параметров [1].

Приоритетным направлением в улучшении показателей работы городского транспорта Днепропетровска является повышение эксплуатационной скорости. На рисунке 1 показаны составляющие затрат времени в движении (без учета простоя в пунктах оборота).

Движение с установленной скоростью	Простои на светофорах	Разгон - торможение	Простои на остановках

Рис. 1. Составляющие затрат времени в движении

Характеристики одного из самых пассажиронапряженных микроавтобусных маршрутов №101а, выбранного для тестирования системы, приведены в таблице.

Характеристики маршрута № 101а

Среднее время в пути, мин	Расстояние, км	Кол-во остановок	Минимальный интервал движения, мин	Максимальный интервал движения, мин	Средняя эксплуатационная скорость	Парк автомобилей
45	14,86	36	1	10	19,81 км/ч	90

Снижение затрат времени на движение с установленной скоростью априори невозможно, а уменьшение простоев на светофорах предполагает абсолютный приоритет общественного транспорта над другими видами, что может привести к негативным последствиям для транспортной системы города в целом.

Курсирование в режиме маршрутных такси классически подразумевает меньшее количество пассажирских остановок в пути сравнительно с автобусными маршрутами [6]. Это позволяет пассажирам, обычно за большую плату, доехать до пункта назначения быстрее. Однако г. Днепропетровск является исключением, так как движение автобусов строго регламентировано графиком, а в маршрутных такси, помимо основных остановок, предусмотрены остановки «по требованию». Нередкой является ситуация в пиковый момент перевозок, когда подобные остановки осуществляются на расстояниях, значительно меньших оптимальных перегонов [7]. Такая форма организации движения увеличивает затраты топлива и количество выбросов, время пассажиров в пути и оборота транспортной единицы, что ведет к снижению продуктивности маршрутного такси и увеличению их потребного количества для удовлетворения спроса пассажироперевозок. Кроме того, некоторые из остановок «по требованию» происходят перед пешеходными переходами в зонах ограниченной видимости, что ведет к снижению дорожной безопасности.

Суммарные простои на остановках и затраты времени на разгон и торможение можно найти по формулам:

$$T_{ост} = \sum_i^m t_{остij} ; \quad (9)$$

$$T_{pm} = (m + m') \overline{t_{pm}} , \quad (10)$$

где $t_{остij}$ – простой на j -й остановке, мин;

m – количество остановок на маршруте;

m' – количество остановок перед светофорами;

\bar{t}_{pt} – среднее время на разгон и торможение.

Из выражений (9), (10) следует, что повысить эксплуатационную скорость можно двумя путями: сократив количество остановок на маршруте и сократив продолжительность каждой остановки. Первый тип решения реализуем в рамках существующей системы и подразумевает отмену остановок «по требованию». Второй тип решения возможен при внедрении АСОП и подразумевает сокращение затрат времени, связанных с производением оплаты транспортных услуг.

Упрощенная схема разрабатываемой ИТС, в состав которой входит АСОП, представлена на рис. 2, схема клиентского модуля оборудования, устанавливаемого в транспортных единицах, изображена на рис. 3.



Рис. 2. Упрощенная схема взаимодействий элементов ИТС и её пользователей

ИВЦ представляет собой арендованный или физический сервер, на котором производится хранение, анализ и обработка информации, поступающей от клиентских модулей, расположенных в транспортных единицах, и от физических или виртуальных терминалов оплаты проезда. В качестве системы оплаты выбрана карточная система с использованием бумажных и пластиковых бесконтактных карт «mifare».



Рис. 3. Структурная схема оборудования, устанавливаемого в транспортных единицах

Регистрация проезда и снятие средств с карты происходит путем прикладывания карты к специальному устройству – валидатору. Датчики пассажиропотоков представляют собой комплекс устройств, реагирующих на движение и изменения в пределах инфракрасного спектра и микроконтроллеров, алгоритм работы которых построен с использованием искусственных нейронных се-

тей. Этот комплекс размещается в входной части транспортного средства. Сочетание нескольких датчиков обеспечивает необходимую для точных показаний избыточность. Интерпретация данных происходит согласно алгоритму с использованием теории нечетких множеств [8]. Размещение в горизонтальной плоскости двух параллельных непрерывных источников света позволяет определить, зашел пассажир или вышел, в зависимости от того, сигнал какого из источников раньше прервется. Выход или вход пассажира регистрируется только в том случае, если меняются показания датчика инфракрасного излучения. Данные о вошедших пассажирах передаются на интерфейс водителя в виде их численного количества и приравниваются к неоплаченным поездкам, параллельно в ЦК поступает информация об оплатах. В случае, если через заданное в системе время показания о количестве вошедших пассажиров и количестве оплаченных поездок не выравниваются, система подает звуковой и зрительный сигнал, который сигнализирует водителю о том, что не все пассажиры оплатили проезд. Несмотря на то что такая «антизайцевая» подсистема не исключает человеческого фактора в виде вмешательства водителя, она имеет высокую степень надежности и, в отличие от тех же турникетов, не замедляет процесс посадки.

Структура базы данных разрабатываемой ИТС приведена на рис. 4.

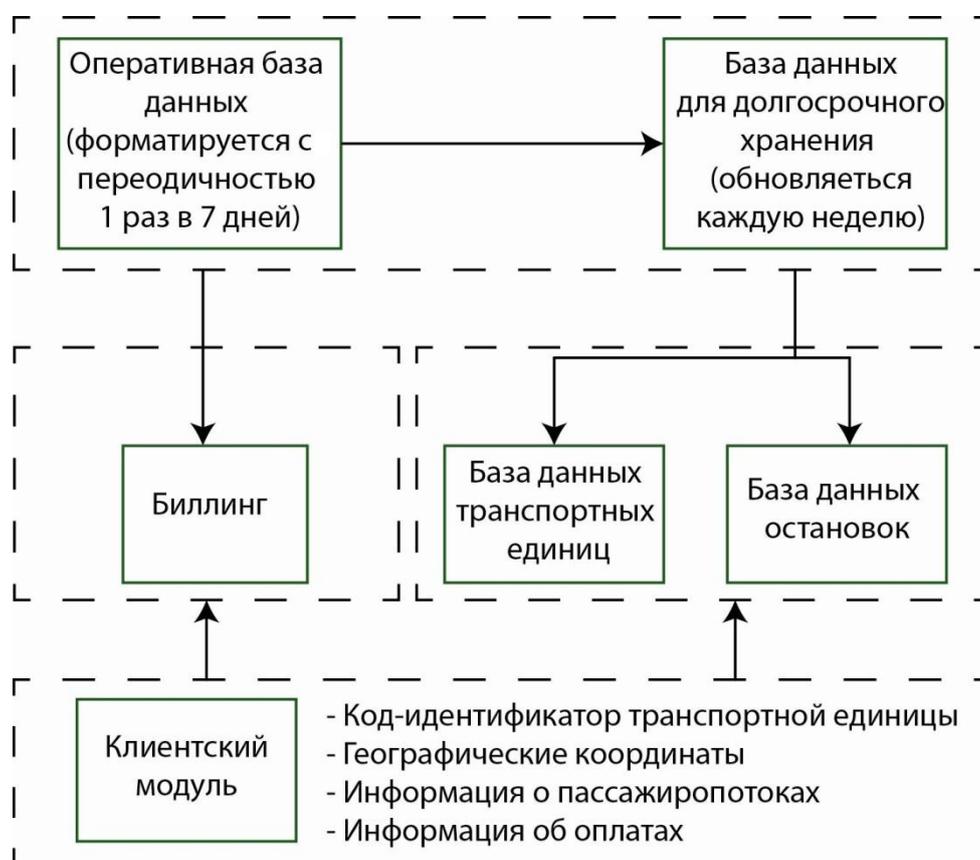


Рис. 4. Структура базы данных ИТС

Соединение с сервером происходит непрерывно, а информация передается дискретными пакетами. Создаются две технические базы данных (БД): транспортных единиц и остановок и служебная (биллинг). Оперативная БД содержит сведения о текущем состоянии системы, долгосрочная – статистические сводки. В БД транспортных единиц содержится информация о: номере маршрута, номере устройства (транспортной единицы), текущем положении и состоянии (движение, остановка перед светофором, пассажирская остановка), скорости, простоях, пассажирообороте. В БД остановок вносятся данные о пунктах погашения и зарождения пассажиропотоков в виде их суточного распределения.

Выводы

Практическая значимость работы заключается в разработке ИТС, позволяющей уменьшить простой транспортных средств на остановках, связанные с оплатой проезда. В сочетании с отменой

остановок «по требованию» предлагаемая технология значительно улучшает условия безопасности движения и повышает эксплуатационную скорость. Информация, полученная от КМ, может быть использована для перерасчета матриц пассажирских корреспонденций и создания точных графиков движения. Создание единого информационного пространства также послужит налаживанию партнерских отношений между перевозчиками и взаимовыгодному субсидированию пассажирского транспорта. В совокупности это дает возможность значительно сократить рабочий парк микроавтобусов, не уменьшая интервала хода. Внедрение ИТС не требует замены подвижного состава, однако средства, сэкономленные за счет оптимизации, рекомендуется направить на закупку новых транспортных единиц с более высокими стандартами *euro* и большей вместимости. Теоретическая значимость работы заключается в систематизации и актуализации задачи поиска оптимальных параметров функционирования системы городского транспорта.

Библиографический список

- 1 Антошвили, М.Е. Оптимизация городских автобусных перевозок / М.Е. Антошвили, С.Ю. Либерман, И.В. Спирин. – М. : Транспорт, 1985. – 102 с.
- 2 Комаров, В.В. Архитектура и стандартизация телематических и интеллектуальных транспортных систем. Зарубежный опыт и отечественная практика / В.В. Комаров, С.А. Гараган. – М. : НТБ «Энергия», 2012.
- 3 Шабанов, А.В. Региональные логистические системы общественного транспорта: методология формирования и механизм управления / А.В. Шабанов. – Ростов н/Д : Изд-во СКНЦ ВШ, 2001. – 205 с.
- 4 Аксенов, В.А. Экономическая эффективность рациональной организации дорожного движения / В.А. Аксенов, Е.П. Попова, О.А. Дивочкин. – М. : Транспорт, 1987. – 11 с.
- 5 Lindqvist Kajsa: Emission standards for light and heavy road vehicles / Kajsa Lindqvist // Air Pollution & Climate Secretariat. – Göteborg, Sweden, 2012. – P. 1–5.
- 6 Гузенко, А.В. Развитие городского пассажирского транспорта мегаполиса: проблемы и перспективы / А.В. Гузенко. – Томск : Изд-во ФГБОУ ВПО НТГУ, 2013. – С. 135–138.
- 7 Мозолевич, Г.Я. Оптимізація функціонування міського транспорту Дніпропетровська / Г.Я. Мозолевич, Д.В. Різдваєцький // Тези науково-практичної конференції «Розвиток теорії та практики функціонування залізничних станцій та вузлів». – Д. : ДНУЗТ, 2014. – С. 56–57.
- 8 Рыжов, А.П. Элементы теории нечетких множеств и ее приложений / А.П. Рыжов. – М. : Диалог – МГУ, 2003. – 81 с.