УДК 656.135

Е.Е. ПРОЛИСКО, В.Н. ШУТЬ
Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь
А.А. КОЗИНСКИЙ
Брестский государственный университет им. А.С. Пушкина, Брест, Беларусь

УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕВОЗОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ В ГОРОДСКОЙ ПАССАЖИРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ

Существующая система составления расписания для городского общественного транспорта (автобус, троллейбус, трамвай и т.д.) не является оптимальной. Не редки случаи, когда пассажиры в часы пик не могут попасть в транспортное средство из-за нехватки там места, а также случаи, когда транспортное средство на всем маршруте движения полупустое.

Предлагается метод оптимизации расписания движения городского общественного транспорта. Оптимальным будем считать такое расписание, при котором будут собраны все пассажиры на остановках с заданной вероятностью и максимальное количество пассажиров в каждом общественном транспортном средстве было бы близко (но не превышало) к емкости этого транспортного средства. Управляемым параметром при такой оптимизации, в данной работе, выбран момент отправки транспортного средства по маршруту.

Предполагается, что все остановки в населенном пункте снабжены регистраторами, с помощью которых пассажир, придя на остановку, должен указать конечный пункт своего движения. Все эти «заявки» автоматически регистрируются и используются для определения момента выезда транспортного средства. При этом необходимо учитывать, что за время движения этого транспортного средства по маршруту, на остановки могут приходить дополнительные пассажиры, количество и конечные остановки которых, на момент отправки, не известны и могут быть представлены как случайные.

Данная оптимизация возможна если известны или могут быть оценены вероятностные характеристики пассажиропотоков. Известные распределения случайных величин, задающих количество пассажиров в транспортном средстве, позволяют оценить верхнюю границу этого количества с заданной вероятностью. В работе показано, что достаточно иметь оценки распределений количества пассажиров, приходящих на каждую остановку за заданное время, и вероятности того, что пришедший пассажир выберет одну из остановок по маршруту движения.

Математическая модель такой транспортной системы основана на предлагаемых методах оценки распределения всех других случайных величин, характеризующих проезд транспортного средства по маршруту (количество пассажиров в транспортном средстве и количество пассажиров, оставшихся на остановке).

Ключевые слова: транспорт, расписание движения, оптимизационная задача, план развозок, алгоритм.

Е.Е. ПРОЛІСКО, В.Н. ШУТЬ
Брестський державний технічний університет, Брест, Білорусь
А.А. КОЗИНСЬКИЙ
Брестський державний університет ім. А.С. Пушкіна, Брест, Білорусь

УПРАВЛІННЯ ПЕРЕВІЗНИМ ПРОЦЕСОМ В МІСЬКІЙ ПАСАЖИРСЬКІЙ ТРАНСПОРТНІЙ СИСТЕМІ

10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.20

Існуюча система складання розкладу для міського громадського транспорту (автобус, тролейбус, трамвай і т.д.) не є оптимальною. Не рідкісні випадки, коли пасажири в години пік не можуть потрапити в транспортний засіб через брак там місця, а також випадки, коли транспортний засіб на всьому маршруті руху напівпорожнє.

Пропонується метод оптимізації розкладу руху міського громадського транспорту. Оптимальним будемо вважати такий розклад, при якому будуть зібрані всі пасажири на зупинках із заданою вірогідністю і максимальна кількість пасажирів в кожному громадському транспортному засобі було б близько (але не перевищувало) до ємності цього транспортного засобу. Керованим параметром при такій оптимізації, в даній роботі, обраний момент відправки транспортного засобу за маршрутом.

Передбачається, що всі зупинки в населеному пункті забезпечені реєстраторами, за допомогою яких пасажир, прийшовши на зупинку, повинен вказати кінцевий пункт свого руху. Всі ці «заявки» автоматично реєструються і використовуються для визначення моменту виїзду транспортного засобу. При цьому необхідно враховувати, що за час руху цього транспортного засобу за маршрутом, на зупинки можуть приходити додаткові пасажири, кількість і кінцеві зупинки яких, на момент відправки, не відомі і можуть бути представлені як випадкові.

Дана оптимізація можлива якщо відомі або можуть бути оцінені ймовірні характеристики пасажиропотоків. Відомі розподілу випадкових величин, які задають кількість пасажирів в транспортному засобі, дозволяють оцінити верхню межу цієї кількості із заданою вірогідністю. В роботі показано, що достатньо мати оцінки розподілів кількості пасажирів, що приходять на кожну зупинку за заданий час, і ймовірності того, що прийшов пасажир вибере одну із зупинок по маршруту руху.

Математична модель такої транспортної системи заснована на пропонованих методах оцінки розподілу всіх інших випадкових величин, що характеризують проїзд транспортного засобу за маршрутом (кількість пасажирів в транспортному засобі і кількість пасажирів, що залишилися на зупинці).

Ключові слова: транспорт, розклад руху, оптимізаційна задача, план розвозок, алгоритм.

E.E. PROLISKO, V.N. SHUTS
Brest state technical University, Brest, Belarus
A.A. KOZINSKY
Brest State University A.S. Pushkin, Brest, Belarus

MANAGING THE TRANSPORTATION PROCESS IN THE CITY PASSENGER TRANSPORT SYSTEM

The current scheduling system for urban public transport (bus, trolleybus, tram, etc.) is not optimal. It is not uncommon for passengers to get into a vehicle during rush hours due to lack of space, as well as cases when the vehicle is half empty along the entire route.

A method for optimizing the timetable for urban public transport is proposed. We will consider the optimal schedule when all passengers at stops will be collected with a given probability and the maximum number of passengers in each public transport vehicle would be close (but not exceed) to the capacity of this vehicle. The controlled parameter with such optimization, in this work, is the moment of sending the vehicle along the route.

It is assumed that all stops in the settlement are equipped with registrars, with the help of which the passenger, upon arriving at the stop, must indicate the destination of his movement. All these “requests” are automatically registered and used to determine when the vehicle leaves. It should be borne in mind that during the movement of this vehicle along the

10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.20

route, additional passengers may come to stops, the number and final stops of which, at the time of departure, are not known and can be presented as random.

This optimization is possible if the probabilistic characteristics of passenger traffic are known or can be estimated. The known distributions of random variables specifying the number of passengers in a vehicle allow us to estimate the upper bound of this number with a given probability. It is shown in the paper that it is sufficient to have estimates of the distributions of the number of passengers arriving at each stop in a given time, and the probability that the arriving passenger will choose one of the stops along the route.

The mathematical model of such a transport system is based on the proposed methods for assessing the distribution of all other random variables characterizing the passage of a vehicle along a route (the number of passengers in the vehicle and the number of passengers remaining at the stop).

Keywords: transport, traffic schedule, optimization problem, delivery plan, algorithm.

Постановка проблемы

Наблюдаемый в последнее время количественный рост личного транспорта в мегаполисах опережает рост дорожной инфраструктуры. Это ведет к возникновению дорожных заторов, загрязнению воздуха выхлопными газами и т.п. Возможным решением данной проблемы является оптимальное использование общественного транспорта.

Применяемая в настоящее время система составления расписания движения *транспортного средства* (ТС) по перевозке пассажиров не оптимальная. Оптимальной считаем такую поездку, при которой будут «собраны» все пассажиры со всех остановок с заданной вероятностью α, т.е., с вероятностью (1 – α) хотя бы одному пассажиру на всем маршруте не хватит места.

Цель исследований

Целью работы системы является определение момента времени выезда ТС на маршрут, при котором будет решена поставленная задача оптимизации. Основная проблема состоит в необходимости учета пассажиров, которые могут подойти на остановки после выезда ТС на маршрут.

Изложение основного материала исследования

Пусть по маршруту движения ТС расположены k остановок (рис. 1), каждая из которых снабжена системой фиксации появления пассажира и приема от него указания на конечный пункт своей поездки [1–2].

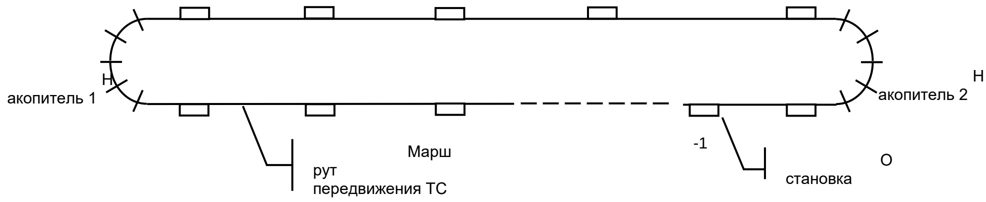

Рис. 1. Схема маршрута общественного транспорта.

Время переезда от $(i-1)$-й до i-й остановки обозначим как Δt_i, $i = 1,\ldots,k$. При этом Δt_1 это либо время доезда до первой остановки, если ТС отправляется из некоторого накопителя, либо $\Delta t_1 \equiv 0$ если ТС дожидается выезда на первой остановке.

Остановки оборудованы пультами, на которых каждый из пассажиров указывает конечную остановку своей поездки. Данные со всех остановок поступают на управляющий компьютер. На этом компьютере для каждого маршрута создаем два одномерных целочисленных массива (вектора) «вектор-откуда» – $V^{(o)}$ и «вектор-куда» – $V^{(\kappa)}$. Эти векторы имеют индексы от 1 до k. В момент, когда пассажир на i-й остановке указывает на пульте свою цель – j-ю остановку, компьютер добавляет по 1 в i-ю ячейку вектора $V^{(o)}$ и в j-ю ячейку вектора $V^{(\kappa)}$. Эти данные собираются до выезда ТС и составляют «известную» информацию. На момент выезда ТС количество «известных» пассажиров в ТС на i-й остановке составит

$$n_i = \sum_{j=1}^{i}\left(V_j^{(o)} - V_j^{(\kappa)}\right), \quad i = 1,\ldots,k\,. \tag{1}$$

За время движения ТС по маршруту на остановки могут еще подходить пассажиры, моменты прихода и конечные остановки которых, на момент начала движения ТС, не известны. Количество этих «неизвестных» пассажиров можно представить как *дискретную случайную величину* (ДСВ). Но, при этом, считаем известными распределение этих ДСВ за заданный интервал времени для каждой остановки. Т.е. для интервала $[t_1, t_2]$ величина $p_{i,j}(t_1, t_2)$ равна вероятности того, что на i-ой остановке за этот интервал подойдет ровно j пассажиров ($i = 1,\ldots,k-1$, $j = 0,1,2,\ldots$). Если понятно о каком временном интервале идет речь, то его можно опустить и писать просто $p_{i,j}$. Например, если поток пассажиров на i-ой остановке является пуассоновским с известной интенсивностью $\lambda_i(t)$, то все вероятностные характеристики определяются через интегральный параметр $\Lambda_i(t_1, t_2)$ [3]

$$\Lambda_i(t_1,t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \lambda_i(t)\,dt\,. \tag{2}$$

Тогда вероятность появления за этот интервал на данной остановке ровно j пассажиров определяется как

$$p_{i,j}(t_1,t_2) = \frac{\Lambda_i^j(t_1,t_2)}{j!}\exp\left(-\Lambda_i(t_1,t_2)\right), \quad i = 1,\ldots,k, \quad j = 0,1,2,\ldots$$

Обычно используют рекуррентное соотношение:

$$p_{i,0}(t_1,t_2) = \exp\left(-\Lambda_i(t_1,t_2)\right), \quad p_{i,j}(t_1,t_2) = p_{i,j-1}(t_1,t_2)\cdot\Lambda_i(t_1,t_2)\,/\,j. \tag{3}$$

Известной считаем также матрицу $Q = [q_{i,j}]$, где $q_{i,j}$, $i, j = 1,\ldots,k$, – вероятность того, что пассажир, севший на i-й остановке, едет до j-й.

Математическая модель

Для обеспечения работы математической модели необходимо уметь:

- находить распределение суммы двух ДСВ;
- оценивать изменение распределения ДСВ при условии, что каждый элемент выбывает из множества (пассажир выходит на остановке) с заданной вероятностью;
- оценивать распределение оставшихся на остановке пассажиров, которым не хватило места в ТС.

При известных распределениях двух ДСВ X и Y распределение их суммы описывается известной операцией свертки, которая в нашем случае примет вид

$$p_i^{(\Sigma)} = \sum_{j=\max(0,i-MY)}^{\min(i,MX)} p_j^{(X)} \cdot p_{i-j}^{(Y)}, \quad i = 0,\ldots, MX + MY, \tag{4}$$

где MX и MY – соответственно максимальные индексы для ДСВ X и Y.

Распределение ДСВ p_i, $i = 0, \ldots, M$, после случайного прореживания с вероятностью q можно описать как [4–5]

$$p_i' = p_i - \sum_{r=1}^{i} C_i^{i-r} \cdot p_i \cdot q^r \cdot (1-q)^{i-r} + \sum_{r=i+1}^{M} C_r^{r-i} \cdot p_r \cdot q^{r-i} \cdot (1-q)^i, \; i = 0,\ldots, M, \tag{5}$$

где M – максимальный индекс в исходном распределении; C_i^j – количество сочетаний из i элементов по j; p_i – исходная вероятность.

Можно использовать рекуррентные соотношения. Для первой суммы

$$a_1 = C_i^{i-1} \cdot p_i \cdot q^i \cdot (1-q)^{i-1} = i \cdot p_i \cdot q^i \cdot (1-q)^{i-1},$$
$$a_r = a_{r-1} \cdot q \cdot (i - r + 1) / \big(r \cdot (1-q)\big), \quad r = 2,\ldots, i.$$

Для второй суммы, соответственно

$$b_{i+1} = C_{i+1}^{i+1-i} \cdot p_{i+1} \cdot q^{i+1-i} \cdot (1-q)^i = (i+1) \cdot p_{i+1} \cdot q \cdot (1-q)^i,$$
$$b_r = b_{r-1} \cdot r \cdot p_r \cdot q / \big((r-1) \cdot p_{r-1}\big), \quad r = i+2,\ldots, M.$$

Надо учитывать, что условная вероятность потери элемента, при продвижении ТС по маршруту, изменяется. Так для пассажиров, садящихся на i-ой остановке $q_{i,i+1}' = q_{i,i+1}$, а для всех последующих остановок

$$q_{i,j}' = \frac{q_{i,j}}{\sum_{m=j}^{k} q_{i,m}}, \quad j = i+2,\ldots, k. \tag{6}$$

После проезда i-й остановки распределение количества «неизвестных» пассажиров, оставшихся в ТС запишется как

$$p_j^{(TC)} = p_{i,j}, \quad j = 0,\ldots, N - n_i - 1, \quad p_{N-n_i}^{(TC)} = \sum_{r=N-n_i}^{M} p_{i,r}, \tag{7}$$

а распределение оставшихся на остановке пассажиров примет вид

$$p_0^{(ocm)} = \sum_{r=0}^{N-n_i} p_{i,r}, \quad p_j^{(ocm)} = p_{i,j+N-n_i}, \quad j = 1,\ldots, M - (N - n_i), \tag{8}$$

где N – количество мест в ТС; n_i – количество «известных» пассажиров в ТС определяемое по формуле (1); M – максимальное количество пассажиров на остановке.

10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.20

Для «неизвестных» пассажиров, поступающих в ТС на i-й остановке, введем функцию распределения $F_{i,j}$

$$F_{i,j} = \sum_{r=0}^{j} p_{i,r}, \quad i = 1, \dots, k-1, \quad j = 0, 1, 2, \dots, \tag{9}$$

которая задает вероятность того, что в ТС на i-ой остановке пытаются попасть не более чем j «неизвестных» пассажиров. Тогда величину P, задающую вероятность того, что ТС при проходе по маршруту соберет всех пассажиров, определим, как

$$P = \prod_{i=1}^{k-1} F_{i,N-n_i}\,. \tag{10}$$

Алгоритм оценки пассажиром времени ожидания транспортного средства

Алгоритм оценки времени ожидания ТС состоит из 10 шагов:

шаг 1. вначале ТС – пустое. Распределение количества пассажиров имеет единственное, нулевое, значение с вероятностью 1. Текущее время системы $t = 0$ и «известных» пассажиров на остановках нет. Очередная остановка – первая. Переход к шагу 2;

шаг 2. получаем распределение количества пассажиров на очередной остановке за время доезда. Если полагаем возможным использования пуассоновской модели, то можно воспользоваться формулами (2) и (3). Переход к шагу 3;

шаг 3. если данное ТС не первое, то суммируем ДСВ количества пришедших пассажиров и ДСВ пассажиров, оставшихся после предыдущего ТС по формуле (4). Переход к шагу 4;

шаг 4. оцениваем распределение количества пассажиров в ТС для очередной остановки: производим прореживание распределения по формуле (5) с учетом (6). Переход к шагу 5;

шаг 5. находим сумму ДСВ количества пассажиров в ТС и на остановке по формуле (4) и вычисляем функцию распределения по формуле (9). Переход к шагу 6;

шаг 6. преобразуем распределение количества пассажиров в ТС по формуле (7) и определяем распределение оставшихся на остановке пассажиров по формуле (8). Переход к шагу 7;

шаг 7. если очередная остановка не предпоследняя, то номер очередной остановки увеличиваем на 1 и переход к шагу 2, иначе переход к шагу 8;

шаг 8. получаем величину P по формуле (10). Переход к шагу 9;

шаг 9. если $P \le \alpha$, то текущее время t считаем моментом выезда ТС по маршруту. Конец. Иначе переход к шагу 10;

шаг 10. система ожидает приход очередного пассажира. Текущее время t считаем равным этому моменту. Изменяем состояния векторов $V^{(o)}$ и $V^{(\kappa)}$ и получаем оценки количества «известных» пассажиров по формуле (1). Переход к шагу 2.

Выводы

Все теоретические выкладки были проверены с использованием аппарата имитационного моделирования. Цель работы (определение момента времени выезда ТС на маршрут) достигнута. При этом решена поставленная задача оптимизации и учтены все пассажиры, которые могут подойти на остановки после выезда ТС на маршрут.

10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.20

Список использованной литературы

1. Пролиско Е. Е., Шуть В. Н. Адаптивная модель транспортной системы «ИНФОБУС». *Актульні проблеми фундаментальних наук* (*АПФН'2017*)», *присвячено пам'яті Нормана Роберта Кемпбелла та Еррола Е. Гарріса*: Матеріали ІІ міжнардної наукової конференції. (м. Луцьк, 30 травня-5 червня 2017 р.). Луцьк: Вежа-Друк, 2017. С. 202–205.
2. Капский Д. В., Пролиско Е. Е., Шуть В. Н. Система городского общественного транспорта будущего. *Международная юбилейная научно-техническая конференция «Автомобильные дороги безопасность и надежность» посвященная 90-летию Белорусской дорожной науки*: Сборник докладов. Часть 1. (г. Минск, 22-23 ноября 2018 г.). Минск, 2018. С. 194–202.
3. Большаков И. А., Ракощиц В. С. Прикладная теория случайных потоков. М: Советское радио, 1978. 248 с.
4. Пролиско Е. Е., Шуть В. Н. Возможности и перспективы беспилотного городского общественного транспорта. *Математические методы в технике и технологиях*: сборник трудов Международной научной конференции. Т. 9. (Санкт-Петербург, 10– 14 сентября 2018 г.). С-Пб.: издательство Политехнического университета, 2018. С. 16–23.
5. Shuts V., Kasyanik V. Mobile Autonomous Robots – a New Type of City Public Transport. *Transport and Telecommunication*. 2011. Vol. 12. № 4. P. 52–60.

References

1. Prolisko, E. E., & Shuts, V. N. (2017) Adaptivnaya model transportnoy sistemyi «INFOBUS». Proceedings of the *Aktulny problemy fundamentalnykh nauk (APFN2017): Materialy II mizhnardnoi naukovoi konferentsii* (Lutsk, May 30–June 5, 2017), Lutsk: Vezha-Druk, pp. 202–205.
2. Kapskiy, D. V., Prolisko, E. E., & Shuts, V. N. (2018). Sistema gorodskogo obschestvennogo transporta buduschego. Proceedings of the Avtomobilnyie dorogi bezopasnost i nadezhnost, posvyaschennaya 90-letiyu Belorusskoy dorozhnoy nauki. Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy yubileynoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii. Part 1. (Minsk, November 22-23, 2018), pp. 194–202.
3. Bolshakov, I. A., & Rakoshchits, V. S. (1978). Prikladnaya teoriya sluchaynyih potokov. M : Sovetskoe radio.
4. Prolisko, E. E., & Shuts, V. N. (2018). Vozmozhnosti i perspektivyi bespilotnogo gorodskogo obschestvennogo transporta. Proceedings of the *Matematicheskie metodyi v tehnike i tehnologiyah : Sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. Vol. 9. (St. Petersburg, September 10-14, 2018). S-Pb.: izdatelstvo Politehnicheskogo universiteta, pp. 16–23.
5. Shuts, V., & Kasyanik, V. (2011). Mobile Autonomous Robots – a New Type of City Public Transport. *Transport and Telecommunication*. **12**, 4, 52–60.

10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.20

Пролиско Евгений Евгеньевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры интеллектуальных информационных технологий Брестского государственного технического университета, Беларусь. e-mail: prolisko55@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5426-7400.

Шуть Василий Николаевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры интеллектуальных информационных технологий Брестского государственного технического университета, Беларусь. e-mail: lucking@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7979-6157.

Козинский Андрей Андреевич – к.п.н., доцент, доцент кафедры прикладной математики и информатики Брестского государственного университета им. А.С. Пушкина, Беларусь. e-mail: kaa1964@bk.ru, ORCID: 0000-0002-2949-4724.

10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.20