УДК 004.94:656.11

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ «ИНФОБУС»

Пролиско Е.Е., Шуть В.Н.
Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь

Предлагается математическая модель работы самоуправляемой транспортной системы перевозки пассажиров «Инфобус». Произведена оптимизация работы системы при известных параметрах маршрута движения и вероятностных характеристик потоков пассажиров. Результаты проверены методами имитационного моделирования.

Введение

Ранее предложенная модель транспортной системы «Инфобус» [1] рассматривала случай, при котором для любого момента времени на маршруте было не более одного поезда. Поставим задачу построения модели данной системы, если очередной поезд выходит в рейс в то время, когда предыдущий (предыдущие) еще не завершили свое движение.

Основные концепции, лежащие в основе функционирования данной транспортной системы и важные с точки зрения решаемой проблемы:

1) клиент (пассажир) на остановочном пункте во время оплаты через терминал указывает также и остановку, до которой желает ехать;

2) информация с терминалов поступает на диспетчерский пункт;

3) из депо по маршруту отправляется поезд из нескольких самоуправляемых вагонов, количество которых можно изменять;

4) емкость вагонов, интервалы времени движения между остановками и время стоянки на остановках для данной системы известны.

Рассмотрим основные этапы подготовки движения поезда:

1) при формировании состава в депо имеется как точная информация о пассажирах на станциях (сколько и до каких остановок едут), так и некоторая вероятностная информация о «будущих» пассажирах, которые подойдут на эти станции до прихода поезда;

2) если данный поезд не первый, то надо учитывать, что впереди идущие поезда также собирают пассажиров;

3) на основе всей этой информации формируется состав, т. е. определяется количество вагонов по какому-либо критерию, например, собрать всех пассажиров с заданной доверительной вероятностью.

Концептуальная модель данной системы должна учитывать следующие моменты:

1) будем считать, что оба направления движения имеют совершенно симметричные свойства, поэтому без потерь адекватности можно рассматривать только одну ветвь маршрута;

2) на маршруте имеется k станций;

3) интервал времени движения поезда от депо до 1-й станции равный Δt_1, а от $(i-1)$-й до i-й станции равные Δt_i $(i = 2,\ldots, k)$ считаем известными с любой точностью;

4) пассажиры начинают подходить на станции за некоторый интервал времени $\Delta t_{\text{доп}}$ до выхода первого поезда;

5) поезда выезжают из депо через равные интервалы времени τ;

6) известна интенсивность, с которой подходят новые пассажиры $\lambda_i(t)$, где $i = 1, \ldots, k$ – номер станции.

Критерием оптимальности выберем определение минимального количество вагонов, выходящих за одну поездку, которые «соберут всех» пассажиров на остановках с заданной доверительной вероятностью α.

1. Расчет загрузки поезда

На основе данных с терминалов на остановках на момент отправления поезда можно построить матрицу корреспонденций M

$$M = \begin{pmatrix} 0 & m_{1,2} & m_{1,3} & \cdots & \cdots & m_{1,j} & \cdots & m_{1,k} \\ 0 & 0 & m_{2,3} & \cdots & \cdots & m_{2,j} & \cdots & m_{2,k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & 0 & m_{i,i+1} & \cdots & m_{i,j} & \cdots & m_{i,k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & m_{k-1,k} \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \end{pmatrix}, \tag{1}$$

где k – количество остановок, $m_{i,j}$ – количество пассажиров, севших на i-й остановке с целью доехать до j-й остановки ($i, j = 1,\ldots,k$). Все элементы матрицы M на главной диагонали и под главной диагональю равны нулю (т.к. пассажир не может выйти на остановке, на которой сел в вагон, и не может ехать «назад»).

По матрице корреспонденций можно рассчитать общее количество пассажиров садящихся на i-й остановке $m_{i\cdot}$, которое определяется как сумма элементов i-й строки матрицы M

$$m_{i\cdot} = \sum_{j=1}^{k} m_{i,j} = \sum_{j=i+1}^{k} m_{i,j}, \quad i = 1,\ldots,k \tag{2}$$

и количество выходящих на i-й остановке $m_{\cdot i}$, как сумму элементов i-го столбца

$$m_{\cdot i} = \sum_{j=1}^{k} m_{j,i} = \sum_{j=1}^{i-1} m_{j,i}, \quad i = 1,\ldots,k\,. \tag{3}$$

Тогда после отъезда от остановки с номером r количество пассажиров в вагонах

$$s_r = \sum_{i=1}^{r} m_{i\cdot} - \sum_{i=1}^{r} m_{\cdot i} = \sum_{i=1}^{r} (m_{i\cdot} - m_{\cdot i}), \quad r = 1,\ldots,k\,. \tag{4}$$

Формулы (1) – (4) учитывают только пассажиров «известных» на момент выезда поезда из депо. Но за время движения поезда на остановки подходят новые пассажиры. Учет этих «дополнительных» пассажиров требует знания априорной вероятностной информации о режиме поступления этих пассажиров по каждой станции и о распределении вероятности их «пожеланий» доехать до какой-либо из последующих станций. Тогда, по, например, предварительным статистическим наблюдениям нам должны быть известны значения $p_{i,n}$ – вероятности того, что за заданное время на i-ю станцию подойдет ровно n пассажиров ($i = 1,\ldots,k-1$, $n = 0, 1, 2,\ldots$) и матрицу вероятностей Q, заданной как

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & q_{1,2} & q_{1,3} & \cdots & \cdots & q_{1,j} & \cdots & q_{1,k} \\ 0 & 0 & q_{2,3} & \cdots & \cdots & q_{2,j} & \cdots & q_{2,k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & 0 & q_{i,i+1} & \cdots & q_{i,j} & \cdots & q_{i,k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & q_{k-1,k} \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \end{pmatrix},$$

где $q_{i,j}$ – вероятность того, что пассажир, севший на i-й остановке, выйдет на j-й.

Очевидным является условие нормировки. Для каждой строки с номером i матрицы Q

$$\sum_{j=1}^{k} q_{i,j} = \sum_{j=i+1}^{k} q_{i,j} = 1, \quad i = 1,\ldots,k.$$

В частности, $q_{k-1,k} \equiv 1$, т.к. пассажир с предпоследней ($k-1$)-й станции достоверно едет на последнюю k-ю станцию.

Рассмотрим случай, когда потоки пассажиров являются пуассоновскими с известными интенсивностями $\lambda_i(t)$, $i = 1,\ldots,k-1$ (на последней k-й остановке, очевидно, никто не садится). Данное предположение является достаточно корректным, поскольку доказано, что сумма большого количества независимых ординарных случайных потоков стремится к пуассоновскому потоку [2]. При этом сумма пуассоновских потоков с известными интенсивностями является также пуассоновским потоком, интенсивность которого равна сумме интенсивностей потоков-слагаемых, а при прореживании пуассоновского потока получается также пуассоновский поток, интенсивность которого уменьшается в соответствующее количество раз.

Основной проблемой при построении математической модели является учет возможных пассажиров, которые могут остаться на станциях после отхода поезда. Их невозможно точно учесть, поскольку очередной поезд выезжает задолго до того, как данный поезд проезжает эти станции. Но из результатов, полученных в [1], известно, что для любой заданной доверительной вероятности «забрать всех» используемый алгоритм имеет некоторый «запас прочности». В результате если даже какой-либо поезд и оставит пассажиров на станции, то следующий за ним будет иметь ресурс их забрать с очень высокой вероятностью.

Введем величину ΔT_i, которая определяется как

$$\Delta T_i = \sum_{j=1}^{i} \Delta t_j, \quad i = 1,\ldots,k$$

интервал времени от выхода поезда из депо до отъезда от i-й станции.

Тогда количество дополнительных пассажиров на i-й остановке будет описываться распределением Пуассона с параметром Λ_i. Для первого поезда в прогоне данный параметр можно вычислить как [1]

$$\Lambda_i = \sum_{j=1}^{i-1}\left[\int_0^{\Delta T_j}\lambda_j(t)dt\cdot\prod_{l=j+1}^{i}(1-q_{j,l})\right]+\int_0^{\Delta T_i}\lambda_i(t)dt,\quad i=1,\dots,k-1.$$

Для каждого из последующих поездов

$$\Lambda_i = \sum_{j=1}^{i-1}\left[\int_0^{h_j}\lambda_j(t)dt\cdot\prod_{l=j+1}^{i}(1-q_{j,l})\right]+\int_0^{h_i}\lambda_i(t)dt,\quad i=1,\dots,k-1,$$

где верхний предел каждого из интегралов h_i $i=1,\dots,k-1$ определяется по правилу

$$\begin{cases} h_i = \Delta T_i, & \text{если } \Delta T_i \le \tau \\ h_i = \tau, & \text{если } \Delta T_i > \tau \end{cases}$$

Откуда можно получить распределение количества дополнительных пассажиров

$$p_{i,n} = \frac{(\Lambda_i)^n}{n!}e^{-\Lambda_i},\quad i=1,\dots,k-1,\quad n=0,1,2,\dots.$$

Т. к., была поставлена задача «собрать всех» пассажиров с заданной вероятностью α, то для каждой остановки с номером r определим такое число z_r, что вероятность появления на данной остановке дополнительных пассажиров в количестве, не превышающем z_r, равна α. Очевидно,

$$z_r = \min\left(i:\sum_{j=1}^{i}p_{r,j}\ge\alpha\right). \quad (5)$$

Тогда, учитывая известных на момент выезда из депо пассажиров, задаваемых формулой (4), и дополнительных пассажиров определяемых формулой (5) можно утверждать, что с заданной вероятностью α после выхода со станции с номером r в вагонах будет пассажиров не более чем

$$s'_r = s_r + z_r.$$

Получим $S' = \max_r(s'_r)$, а затем найдем необходимое число вагонов

$$W = \left[S'/V\right], \quad (6)$$

где V – ёмкость вагона, а квадратные скобки обозначают, в данном случае, округление вверх.

2. Проверка расчетов

Для проверки полученных соотношений были проведены имитационные эксперименты. Моделировалась транспортная система, имеющая $k = 10$ остановок; пассажиры начали подходить на станции за $\Delta t_{\text{доп}} = 10$ условных временных единиц до начала движения; все интервалы времени передвижения меду соседними станциями Δt_i, $i = 1,\dots,k$ одинаковые и равны Δt условным временным единицам; интенсивности появления дополнительных пассажиров не зависят от времени, одинаковые для всех остановок и получены оценки модели для значений от $\lambda = 0{,}01$ и до $\lambda = 5$, при этом каждый из пассажиров с равной вероятностью может ехать до любой из следующих остановок; емкость вагона $V = 50$; интервалы между выходами поездов τ; количество прогонов для каждого случая $N = 10^4$. Используя формулу (6) для каждого конкретного случая, оценивалось необходимое количество вагонов.

На рис. 1 и 2 приведены результаты имитационных экспериментов – доля «полностью обслуженных» рейсов, т. е. которые не оставляли пассажиров на станциях, при доверительной вероятности $\alpha = 70\%$. Поскольку для заданного критерия оптимизации количества вагонов возможны лишние вагоны, то пунктиром показана доля рейсов, в которых имеется хотя бы один пустой вагон. Штрихпунктирной линией на рисунках отображен уровень доверительной вероятности $\alpha = 70\%$

На рис.1 изображен случай, когда $\Delta t = 10$, а $\tau = 40$, т. е. в момент выхода очередного поезда предыдущий уже проехал часть станций. На рис. 2 – обратная ситуация $\Delta t = 40$, а $\tau = 10$, т. е. в момент выхода очередного поезда предыдущий еще не доехал даже до первой станции.

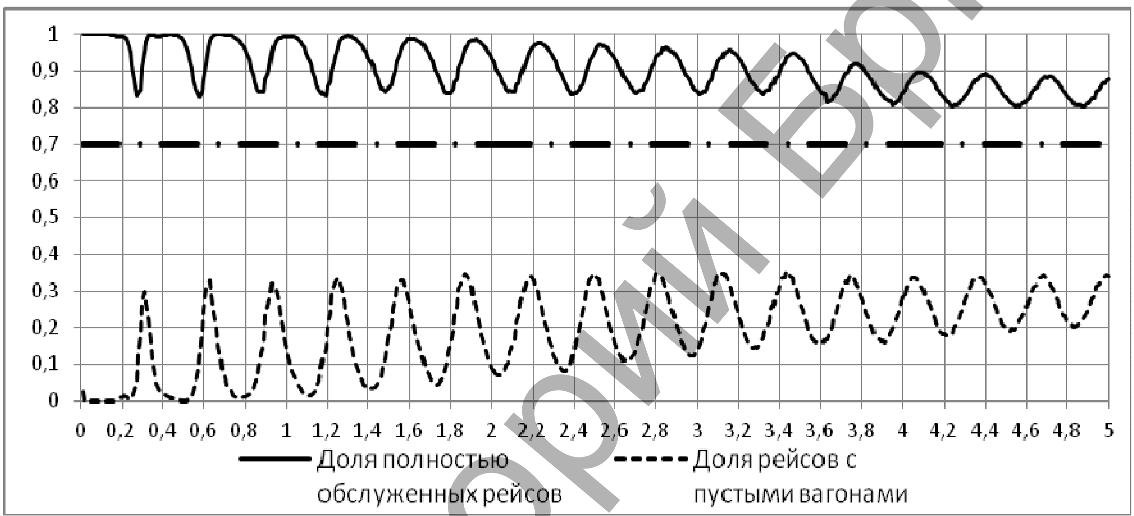

Рисунок 1 – Результаты моделирования при $\Delta t = 10$, $\tau = 40$

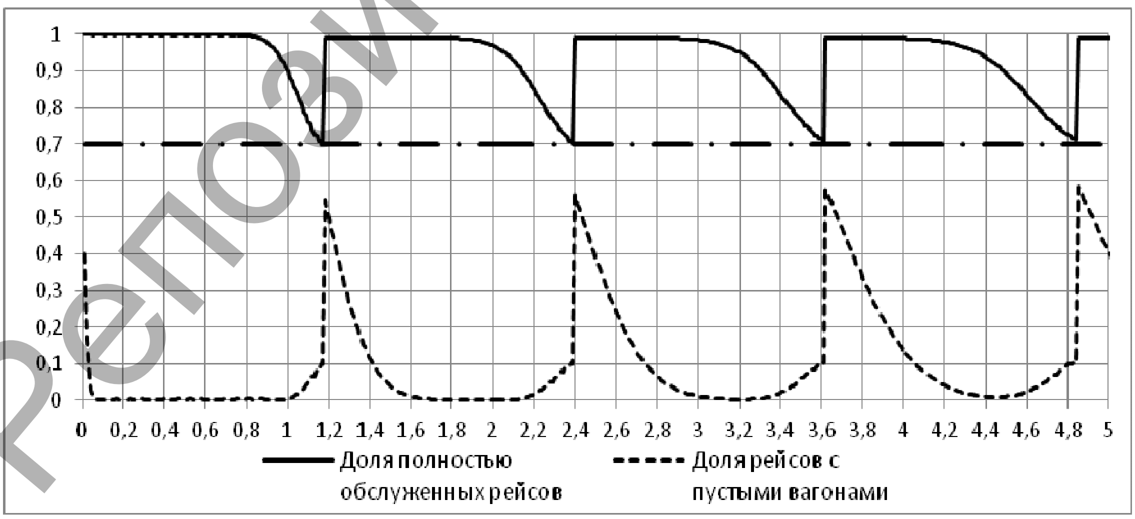

Рисунок 2 – Результаты моделирования при $\Delta t = 40$, $\tau = 10$

Из данных графиков видно, что предложенная методика расчета оптимального количества вагонов позволяет проделывать это с заданной надежностью.

Список литературы

1. Пролиско, Е.Е. Математическая модель работы «ИНФОБУСОВ» / Е.Е. Пролиско, В.Н. Шуть. Матеріли VII-ої Українсько-польскої науково-практычної конференції «Електроніка та інфармаційні технології (ЕлІТ-2015)», 27-30 серпня 2015 р., Львів-Чинадієво, 2015 – с. 59-62.
2. Большаков, И.А. Прикладная теория случайных потоков / И.А. Большаков, В.С. Ракощиц. М : Советское радио, 1978 – 248 с.

UDC 681.32

CITYMOBIL2 – CHALLENGES AND OPPORTUNITIES OF FULLY AUTOMATED MOBILITY

A.Alessandrini [1], A. Cattivera[1], C. Holguin[1], D. Stam[1]
[1]CTL – research Centre for Transport and Logistics of "Sapienza" University of Rome

Abstract

Main benefits of road automation will be obtained when cars will drive themselves with or without passengers on-board and on any kind of roads, especially urban areas. This will allow the creation of new transport services, forms of shared mobility, which will enable seamless mobility from door to door without the need of owning a vehicle. To enable this vision vehicles will not just need to become "autonomous" when automated, they will need to become part of an Automated Road Transport System (ARTS).

The CityMobil2 EC project mission is progressing toward this vision defining and demonstrating the legal and technical frameworks necessary to enable ARTSs on the roads. After a thorough revision of the literature allowing to state that automation will give its best when it will be full-automation and vehicles will be allowed to circulate in urban environments, the paper identifies where these transport systems perform at their best, with medium size vehicle as on-demand transport services feeding conventional mass transits in the suburbs of large cities, on radial corridors as complementary mass transits with large busses and platoons of them and as main public transport for small cities with personal vehicles; then defines the infrastructural requirements to insert safely automated vehicles and transport systems in urban areas. Finally it defines the vehicle technical requirements to do so.

1. Introduction

CityMobil2 is a European project which deals with automating mobility. The CityMobil2 vision can somehow clash with other based on the automation of the single vehicle which is supposed to bring all kinds of benefits without requiring neither communication nor the involvement of the infrastructure. The first section of this paper is dedicate to analysing the claims and quantifies the expected benefits of automation demonstrating that only driverless communicating vehicles which are capable of driving themselves out of the motorway can really provide the promised breakthrough.

Established that automating mobility is much more than just automating vehicles, not all automation forms are useful whenever and wherever; each environment has a best performing system and sometimes, though sustainable in the long term, the