

## МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКИМИ АВТОБУСНЫМИ ПЕРЕВОЗКАМИ

Решена задача разработки математического обеспечения для интеллектуальной системы управления городскими автобусными перевозками. Объектом исследования является автоматизация процесса принятия решений интеллектуальными системами управления городскими транспортными потоками. Предмет исследования составляют модели диспетчерского управления транспортными потоками автобусных маршрутов. Цель работы: совершенствование моделей для интеллектуальных транспортных систем управляющих городскими потоками автобусов и маршрутных такси. Разработана модель для интеллектуальной транспортной системы управления с учетом влияния наиболее значимых факторов на график движения автобусов по маршруту. Модель позволяет оперативно оценивать влияние возмущающих действий на движение подвижной единицы, в частности, переполнение пассажирами автобусов на маршруте, их сход с линии, отклонение от расписания и др., на показатели качества обслуживания, а также, оптимизировать расписание движения. В качестве критерия оптимизации предложен показатель минимума времени ожидания пассажирами автобусов и маршрутных такси на остановках.

В ходе экспериментов проверена адекватность разработанной модели, которая оценивалась методом однофакторного дисперсионного анализа и полнофакторного эксперимента в реальных городских условиях. Результаты экспериментов позволяют рекомендовать предложенную модель для практического использования в интеллектуальных транспортных системах управления городскими автобусными маршрутами.

**Ключевые слова:** интеллектуальная транспортная система, управление автобусными перевозками, модель, алгоритм управления.

### НОМЕНКЛАТУРА

ВВ – возмущающее воздействие;  
ИТС – интеллектуальная транспортная система;  
КП – контрольный пункт;  
КТС – контур транспортной связи;  
ОП – остановочный пункт;  
ПЕ – подвижная единица;  
ТС – транспортное средство;  
ЭВМ – электронная вычислительная машина;  
 $A_i$  – вместимость  $i$ -й подвижной единицы;  
 $d_i^j$  – потребность в перевозке с  $j$ -го ОП в момент прибытия  $i$ -й ПЕ;  
 $g_i^j$  – количество пассажиров, не обслуженных  $i$ -й ПЕ  $j$ -го ОП;  
 $K_i$  – коэффициент наполнения ПЕ;  
 $l^j$  – расстояние между  $j$ -м и  $j+1$ -м остановочными пунктами;  
 $L$  – длина маршрута;  
 $m$  – количество подвижных единиц на маршруте;  
 $n$  – количество остановочных пунктов на маршруте;  
 $N$  – количество возможных вариантов распределения перевозок;  
 $N_{КП}$  – номер конечного КП;  
 $P_i$  – суммарный пассажиропоток, приходящийся на  $i$ -ю ПЕ за рейс;  
 $P_i^j$  – количество пассажиров, пришедших на  $j$ -й ОП за время между прибытием  $i$ -й и  $i-1$ -й ПЕ;  
 $\tilde{P}_i^j$  – количество вошедших на ОП пассажиров;  
 $q_i^j$  – количество вышедших на ОП пассажиров;  
 $Q_i^j$  – наполнение  $i$ -й ПЕ после обслуживания  $j$ -го ОП;

$r_i^j$  – резерв мест в  $i$ -й ПЕ на  $j$ -м ОП;  
 $S_i^j$  – средние затраты времени ожидания;  
 $t_{cj}$  – среднее время ожидания пассажиров на  $j$ -м временном отрезке при сходе на нем ПЕ;  
 $t_{nj}$  – среднее время ожидания пассажиров на  $j$ -м временном отрезке при переключении ПЕ на другой маршрут;  
 $t_i^j$  – время прибытия подвижной единицы на  $j$ -й остановочный пункт;  
 $t_i^{начр(k)}$  – время начала  $k$ -го рейса;  
 $t_{inn}^{КП}$  – время прибытия ПЕ на контрольный пункт;  
 $t_{nj}$  – среднее время ожидания пассажиров на  $j$ -м временном отрезке при работе «переключенной» на нем ПЕ;  
 $t_{oj}$  – среднее время ожидания пассажиров на  $j$ -м временном отрезке при движении ПЕ на нем с оперативным интервалом  $\tau_o$ ;  
 $t_{pj}$  – среднее время ожидания пассажиров при вводе резервной ПЕ на  $j$ -м временном отрезке;  
 $t_{uj}$  – среднее время ожидания пассажиров на  $j$ -м временном отрезке при увеличении интервала движения ПЕ на нем на величину  $\tau_u$ ;  
 $t_{yj}$  – среднее время ожидания пассажира на  $j$ -м временном отрезке при увеличении на нем пассажиропотока;  
 $t_{2j}$  – среднее время ожидания пассажиров на  $j$ -м временном отрезке без переключения ПЕ на другой маршрут;  
 $T$  – среднее время рейса;  
 $T_i$  – время рейса  $i$ -й ПЕ;  
 $T_i^{ос}$  – время, затрачиваемое на проезд по перегонам между ОП;

$T_i^{ocm}$  – суммарное время стоянок на ОП;

$W_{in}$  – закономерности распределения перевозок по часам суток, заданные в виде весовых оценок;

$Z$  – суммарные затраты времени для всех пассажиров на ожидание транспорта;

$\gamma$  – допустимая величина уменьшения времени  $t_0$  отстоя на конечном КП;

$\gamma_{kj}$  – допустимая величина уменьшения планового времени  $\tau_{kj}$  проезда на участке  $k-j$  маршрута;

$\gamma_{kN}$  – допустимая величина уменьшения планового времени проезда на участке  $k-N$  маршрута (времени  $\tau_{kN}$ );

$\delta_k$  – опоздание ПЕ на ОП;

$\Delta J$  – общее снижение времени ожидания пассажиров;

$\Delta \tau$  – интервал между ПЕ;

$\varepsilon$  – допустимая величина увеличения времени  $t_0$  отстоя на конечном КП;

$\varepsilon_{kj}$  – допустимая величина увеличения времени  $\tau_{kj}$  проезда на участке  $k-j$ ;

$\varepsilon_{kN}$  – допустимое увеличение планового времени проезда на участке  $k-N$ ;

$\eta_i$  – случайная величина, характеризующая интенсивность посадки и высадки для  $i$ -й ПЕ;

$\lambda_j$  – интенсивность пассажиропотока на  $j$ -м временном отрезке;

$v_i^j$  – случайная величина, характеризующая количество пассажиров, выходящих из  $i$ -й ПЕ на  $j$ -м ОП;

$v(U)$  – случайная величина, характеризующаяся законом распределения скорости движения ПЕ при данном признаке управления в ИТС;

$v_{cp}$  – средняя скорость движения ПЕ;

$\rho$  – суммарный результат пассажиропотока маршрута;

$\rho^j(t)$  – случайная величина, характеризующая плотность пассажиропотока на  $j$ -м ОП;

$\tau$  – интервал времени между приходами  $n$  ПЕ;

$\tau_{ni}^j$  – время, затрачиваемое на посадку и высадку пассажиров на  $j$ -м ОП  $i$ -й ПЕ;

$\tau_i^{t,j}$  – время движения между  $i-1$ -й и  $i$ -й ПЕ после прохождения  $j$ -го ОП;

$\tau_{i-1,i}^j$  – интервал между прибытиями  $i-1$ -й и  $i$ -й ПЕ;

$\tilde{\tau}_i^{j+1}$  – время, затраченное на движение по перегону маршрута между  $j$ -м и  $j+1$ -м ОП;

$\tau_j$  – плановый момент прибытия на  $j$ -й КП;

$\tau_j(t_c)$  – часть  $j$ -го временного отрезка, перекрываемая временем схода ПЕ;

$\tau_j(t_n)$  – часть  $j$ -го временного отрезка, перекрываемая временем переключения ПЕ (временем  $\tau_n$ );

$\tau_j(t_n)$  – часть  $j$ -го временного отрезка, на котором работает «переключенная» ПЕ;

$\tau_j(t_p)$  – часть  $j$ -го временного отрезка, заключенная между моментами схода ПЕ с линии и ввода резервной ПЕ;

$\tau_j(\tau_o)$  – часть  $j$ -го временного отрезка, на которой интервал движения ПЕ осуществляется с оперативным интервалом  $\tau_o$ ;

$\tau_j(\tau_u)$  – часть  $j$ -го временного отрезка, на которой интервал движения ПЕ увеличен на  $\tau_u$ ;

$\tau_j(U)$  – случайная величина, определяющая время задержки как функцию от признака управления в ИТС.

## ВВЕДЕНИЕ

Транспортный комплекс больших городов образуют множество пассажирских и грузовых средств, управляющий ими персонал и дорожно-информационно-коммуникационная инфраструктура. Современные интеллектуальные транспортные системы (ИТС) базируются на использовании наукоемких инфокоммуникационных технологий, востребованных необходимостью повышения эффективности дорожного движения [1, 2].

Объектом исследования является автоматизация процесса принятия решений интеллектуальными системами управления городскими транспортными потоками в современных мегаполисах. Следует отметить, что автоматизированные системы управления движением, базирующиеся на детерминированных математических моделях, часто оказываются неадекватными реальным процессам перевозки пассажиров [1–6].

Предмет исследования составляют модели диспетчерского управления транспортными потоками автобусных маршрутов.

Цель работы – совершенствование математических моделей для интеллектуальных транспортных систем управляющих городскими потоками автобусов и маршрутных такси.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В моделировании транспортных потоков существуют две противоположные тенденции. С одной стороны, стремятся, как можно точнее описать исследуемый объект, чтобы добиться полной адекватности объекта и модели. А с другой, – упростить модель, привести ее к виду, удобному для нахождения решения одним из известных методов [3, 4, 6]. Однако, в большинстве задач управления городскими транспортными потоками приходится иметь дело со случайными величинами, что значительно усложняет математическую обработку моделей [7–9].

В этих случаях используется стохастическое моделирование. Его сущность состоит в том, что процессу функционирования объекта ставится в соответствие процесс вычисления функционала  $\bar{y} = F(x)$ , задаваемого математической моделью объекта.

Элементарным звеном функционирования системы является технологический процесс работы отдельной подвижной единицы (ПЕ), например, городского автобуса или маршрутного такси. Он состоит из выхода ПЕ на маршрут, работы на маршруте и заезда на стоянку. Работа на маршруте разбивается на выполнение рейсов и отстоя [10].

Основная задача ИТС управления движением ПЕ – это удовлетворение потребности пассажиров в поездках. Она решается за счет выполнения расписания, а также подключения в случае необходимости резервных транспортных средств. Критерием качества удовлетворения потребности в поездках является минимизация времени ожидания пассажирами автобуса или маршрутного такси.

## 2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В [6, 7] говорится, что включение ИТС в систему управления городскими перевозками требует от разработчика: 1) наполнить ее программами, связанными с технологией управления; 2) согласовать ее динамические характеристики с динамикой работы реальных объектов; 3) согласовать сигналы (например, от сенсоров движения, системы GPS и т.п.), поступающие от объекта к ИТС и выдаваемые ИТС на объект.

Если же алгоритм управления транспортным потоком не носит жесткого характера, если в процессе принятия решения о выдаче сигналов на объект управления решаются различные оптимизационные задачи, если, наконец, на первом этапе экспериментальной проверки ИТС происходит накопление новой информации, ранее неизвестной заказчику или разработчику, то применение ЭВМ становится оправданным [4, 8, 9].

С учетом вышесказанного, целью исследования является разработка и совершенствование моделей для ИТС управляющих городскими транспортными потоками.

## 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Все нарушения движения транспорта – отклонения от расписания, переполнения, являющиеся следствием неравномерной скорости движения отдельных ПЕ и флуктуаций пассажиропотока, – вызывают увеличение времени ожидания. Поэтому и эффективность управляющих воздействий имеет смысл оценивать по тому же критерию.

Управляющие воздействия данного уровня можно разделить на две категории. Первые из них вызваны нарушениями расписания отдельными ПЕ и имеют индивидуальный характер: увеличение скорости (нагон в пути), сокращение отстоя и т.п. Во вторую категорию входят воздействия, вызванные как индивидуальными, так и групповыми нарушениями, сходами, ухудшениями условий движения, выполняемые группой ПЕ или резервными ПЕ: раздвижка интервала, вход резерва, переход на оперативный интервал и т.д. Функцию управления на этом уровне может выполнять ИТС. Для этого необходим объем информации о состоянии транспортной городской системы. При имеющемся контуре транспортной связи (КТС) информация в ИТС поступает с каждой ПЕ в контрольных точках маршрута [10].

Модель функционирования маршрута для разрабатываемой ИТС описывается следующей системой уравнений. Система моделирует временные характеристики движения подвижной единицы (ПЕ) по маршруту и процесс пассажирообразования:

$$\left. \begin{aligned}
 t_i^1 &= t_i^{нчр(k)}; \\
 Q_i^0 &= 0; \\
 q_i^1 &= 0; \\
 v_i^j &= \frac{i}{n} \eta_i \rho^j(t); \\
 q_i^j &= v_i^j Q_i^{j-1}; \\
 r_i^j &= A_i - (Q_i^{j-1} - q_i^j); \\
 P_i^j &= \int_{t_{i-1}^j}^{t_i^j} \rho^j(t) dt; \\
 d_i^j &= P_i^j + g_{i-1}^j; \\
 Q_i^j &= \min \left\{ A_i, A_i + d_i^j - r_i^j \right\}; \\
 g_i^j &= \max \left\{ 0, d_i^j - r_i^j \right\}; \\
 \tilde{P}_i^j &= d_i^j - g_i^j; \\
 q_i^n &= Q_i^{n-1}; \\
 P_i^n &= 0; \\
 \tau_{ni}^j &= \eta_i (\tilde{P}_i^j + q_i^j); \\
 \tau_{zi}^j &= \tau_z(U); \\
 \tau_i^j &= \begin{cases} \tau_{ni}^j, & \text{если } \tau_{zi}^j \leq \tau_{ni}^j, \\ \tau_{zi}^j, & \text{если } \tau_{zi}^j > \tau_{ni}^j; \end{cases} \\
 v_i^j &= v(U); \\
 \tilde{\tau}_i^{j+1} &= l^j / v_i^j; \\
 t_i^{j+1} &= t_i^j + \tilde{\tau}_i^{j+1} + \tau_i^j; \\
 \tau_i'^j &= t_i^j - t_{i-1}^j.
 \end{aligned} \right\} i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}, (1)$$

Исходными данными для моделирования являются величины  $m; n; l^j; t_i^{нчр(k)}; A_i; v(U); \tau_z(U); \eta_i; \rho^j(t)$ . Остальные величины вычисляются рекурсивно в процессе функционирования модели. Случайные величины  $\eta_i$  и  $\rho^j(t)$  определяются в результате проведения исследования пассажиропотоков.

Характеристики плотности пассажиропотока формируются на основании суточных объемов перевозок на маршруте  $A^j$  и известных общих закономерностей распределения перевозок по часам суток, заданных в виде весовых оценок  $W_{in}$ , таких, что  $\sum_i W_{in} = 1, i = \overline{1, T}, n = \overline{1, N}$ .

Для вычисления величины  $W_{in}$  можно использовать алгоритм, описанный в [4, 7].

Моделирование системы сбора информации заключается в присвоении некоторым ОП признаков контрольного пункта (КП). При переходе модели в состояние, в котором  $i$ -я ПЕ находится на КП, вычисляются

величины:  $t_{inn}^{KI}$ ;  $K_i = 25\%$ ; (здесь  $[ ]$  – «целая часть»), являющийся аналогом информации, получаемой ИТС при данном КТС, который вместе с номерами ПЕ и КП поступают на вход модели ДУ движением ПЕ.

Цель ИТС – обеспечить выполнение расписания движения с минимальными отклонениями от запланированного с помощью использования соответствующих диспетчерских воздействий. Поэтому алгоритмы ИТС ориентированы на выбор диспетчерского воздействия (ДВ), компенсирующих возмущающие воздействия (ВВ). Выбор оптимальных алгоритмов управления движением является важнейшей задачей построения ИТС.

Входной информацией для модели ИТС служат плановое расписание движения, а также информация, поступающая из модели маршрута: момент прохода подвижной единицы КП, коэффициенты наполнения ПЕ, сообщения о сходах ПЕ с линии. В [9, 10] установлено взаимное соответствие между видами нарушений движения и управляющими воздействиями, которые могут быть направлены на восстановление движения.

Как видно из данных [2, 4, 6, 8, 9], одни и те же нарушения могут устраняться различными управляющими воздействиями. Важнейшей задачей моделирования является количественный анализ управления движением. Модель позволяет оценивать качество управления по выбранному критерию.

Основным критерием качества удовлетворения потребности в поездках принимаем время ожидания пассажирами транспорта. Структура модели позволяет непосредственно оценивать эту величину. Заметим, что в реальных условиях возможна только приблизительная оценка времени ожидания пассажирами транспорта.

Будем считать, что поток пассажиров на остановке является пуассоновским с параметром  $\rho$ . Тогда за время  $\tau$  на остановку в среднем приходят  $\rho\tau$  пассажиров. Время ожидания пассажиром автобуса (ПЕ) в среднем равно половине интервала ожидания. Тогда суммарные затраты времени для всех пассажиров на ожидание транспорта, собравшихся за время  $\tau$ ,  $Z = \rho\tau^2 / 2$ .

Время  $\tau$  сбора пассажиров принимается равным интервалу времени между прибытиями на остановку двух соседних ПЕ. Если пассажир не был обслужен подошедшей ПЕ, то время ожидания им прихода следующей равно уже не половине, а интервалу между ПЕ. Поэтому суммарные затраты времени на  $j$ -м ОП за интервал  $\tau_{i-1,i}^j$  между прибытиями  $i-1$ -й и  $i$ -й ПЕ

$$Z_i^j = P_i^j \frac{\tau_{i-1,i}^j}{2} + g_{i-1}^j \tau_{i-1,i}^j. \quad (2)$$

Средние затраты времени ожидания  $S_i^j$  вычисляются по формуле

$$S_i^j = Z_i^j / P_i^j. \quad (3)$$

На основании выражения (2) можно определить затраты для каждой ПЕ за рейс

$$Z_i = \sum_{j=1}^n Z_i^j, \quad (4)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^n S_i^j \quad (5)$$

и для каждого ОП за интервал времени между приходами  $n$  ПЕ:

$$\tau = t_{K+n}^j - t_K^j; \quad (6)$$

$$Z^j = \sum_{i=K}^{K+n} Z_i^j, \quad (7)$$

$$S^j = \sum_{i=K}^{K+n} S_i^j. \quad (8)$$

Величины  $Z_i^j$  могут вычисляться для всех  $i, j$  в процессе функционирования модели по формуле (2).

Рассмотрим влияние возмущающих воздействий на величину параметров  $Z$  и  $S$ .

*Отклонение ПЕ от расписания.* Допустим, что на достаточно коротком временном интервале плотность пассажиропотока постоянна,  $\rho^j(t) = \rho^j$ . Тогда

$$P_i^j = \int_{t_{i-1}^j}^{t_i^j} \rho^j dt = \rho^j (t_i^j - t_{i-1}^j) = \rho^j \tau_{i-1,i}^j; \quad (9)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n P_i^j = \sum_{j=1}^n \rho^j \tau_{i-1,i}^j.$$

Пусть на маршруте  $m$  ПЕ, а среднее время рейса  $T$ . Для ПЕ задано расписание с равными интервалами движения. При этом  $\Delta\tau = T / m$  – интервал между ПЕ. Будем считать, что расписание выполняется идеально,  $\tau_{i-1,i}^j = \Delta\tau$  для всех  $i = \overline{1, m}$ . Тогда

$$P_i = \sum_{j=1}^n \rho^j \Delta\tau = \Delta\tau \sum_{j=1}^n \rho^j = \rho \Delta\tau, \quad (10)$$

где  $\rho = \sum_{j=1}^n \rho^j$ .

Из выражения (10) видно, что все  $P_i$  равны между собой и при идеальном выполнении расписания пассажиропоток разделен между ПЕ. Будем считать, что ПЕ достаточно для обслуживания маршрута и при равномерном распределении пассажиропотока переполнений не возникало. Тогда

$$Z_i^j = P_i^j \frac{\tau_{i-1,i}^j}{2} = \rho^j \frac{(\Delta\tau)^2}{2}; \quad (11)$$

$$Z_i = \sum_{j=1}^n \rho^j \frac{(\Delta\tau)^2}{2} = \rho \frac{(\Delta\tau)^2}{2}; \quad (12)$$

$$Z^j = \sum_{i=1}^m \rho^j \frac{(\Delta\tau)^2}{2} = m\rho^j \frac{(\Delta\tau)^2}{2}; \quad (13)$$

$$Z = m\rho \frac{(\Delta\tau)^2}{2}, \quad (14)$$

где  $Z = \sum_{j=1}^n Z^j$ .

Пусть  $i$ -я ПЕ отклоняется от расписания на величину  $\delta_i$ . Тогда

$$\tau_{i-1,i} = \Delta\tau - \delta_{i-1} + \delta_i; P_i = \rho\Delta\tau + \rho(\delta_i - \delta_{i-1}); \quad (15)$$

$$Z_i = \rho \frac{(\Delta\tau + \delta_i - \delta_{i-1})^2}{2} = \rho \frac{(\Delta\tau)^2}{2} + \rho\Delta\tau(\delta_i - \delta_{i-1}) + \rho \frac{(\delta_i - \delta_{i-1})^2}{2}; \quad (16)$$

$$Z^j = \sum_{i=1}^m \rho^j \frac{(\Delta\tau + \delta_i - \delta_{i-1})^2}{2};$$

$$Z = \sum_{j=1}^n Z^j = m\rho \frac{(\Delta\tau)^2}{2} + \rho \sum_{i=1}^m \frac{(\delta_i - \delta_{i-1})^2}{2}. \quad (17)$$

Если мы обозначим  $P_i$  и  $Z$  в формулах (10) и (14) через  $P'_i$  и  $Z'$ , а в формулах (15) и (17) через  $P''_i$  и  $Z''$ , то получим

$$\Delta P_i = \rho\Delta\tau + \rho(\delta_i - \delta_{i-1}) - \rho\Delta\tau = P''_i - P'_i = \rho(\delta_i - \delta_{i-1}), \quad (18)$$

при нарушении регулярности движения появляется неравномерность в распределении пассажиропотока между ПЕ даже при постоянной плотности, что может привести к переполнениям

$$\Delta Z = Z'' - Z' = \rho \sum_{i=1}^m \frac{(\delta_i - \delta_{i-1})^2}{2} \geq 0. \quad (19)$$

Таким образом, время ожидания пассажиров при нарушении расписания возрастет.  $Z$  будет минимальным, если  $\delta_i = \delta_{i-1}$  для всех  $i$  из выражения (19) или  $\delta_i = 0$ .

Средние затраты времени ожидания ПЕ пассажирами

$$\begin{aligned} \Delta S &= \frac{\Delta Z}{P} = \frac{\rho \sum_{i=1}^m \frac{(\delta_i - \delta_{i-1})^2}{2}}{m\rho\Delta\tau} = \sum_{i=1}^m \frac{(\delta_i - \delta_{i-1})^2}{2m\Delta\tau} \\ &= \sum_{i=1}^m \frac{(\delta_i - \delta_{i-1})^2}{2T} \geq 0. \end{aligned} \quad (20)$$

На основании анализа выражений (19) и (20) можно сделать вывод, что для повышения качества обслуживания пассажиров на маршрутах движения необходим равномерный интервал между ПЕ.

Предположим, что ПЕ прибыла на  $k$ -й КП в момент времени  $t_k$  с опозданием на время  $\delta_k$ . Если величина времени опоздания удовлетворяет условию  $\delta_k = \gamma_{kj}\tau_{kj}$ , то можно формировать управляющее воздействие «на-

гон на участке  $k - j$  маршрута» ( $j = k + 1, k + 2, \dots, N_{КП} - 1$ ). При этом необходимо осуществлять корректировку плановых моментов проследования КП:

$$\tau_j^* = \begin{cases} \tau_j + \delta_k - \gamma_{kj}\tau_{kj}, & \text{если } (\delta_k - \gamma_{kj}\tau_{kj}) > 0; \\ \tau_j & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Если величина времени опоздания такова, что за счет увеличения скорости движения ПЕ обеспечить прибытие ее на конечный КП в плановый момент времени не представляется возможным, можно осуществить сокращение времени отстоя ПЕ на конечном КП. При этом необходимым условием формирования данного управляющего воздействия является  $\delta_k \leq \gamma_{kN}\Phi_{kN} + \gamma t_0$ .

Если величина опоздания такова, что за счет увеличения скорости движения и уменьшения времени отстоя ПЕ на конечном КП обеспечить отправление в очередной рейсов плановый момент времени не представляется возможным, допустимо формировать управляющие воздействия типа: «увеличение времени отстоя на КП» (так, чтобы ПЕ была отправлена в очередной рейс в плановый момент); «укороченный рейс» (такой, чтобы ПЕ закончила его к плановому моменту начала очередного рейса); «удлиненный рейс» (такой, чтобы ПЕ, пропустив один обычный рейс, вернулась из удлиненного к плановому моменту начала следующего рейса).

Предположим, что ПЕ прибыла на  $k$ -й КП в момент времени  $t_k$  с опережением планового момента прибытия  $\tau_k$  на величину  $\delta_k$ . Если величина  $\delta_k \leq \varepsilon_{kj}\tau_{kj}$ , то следует формировать управляющее воздействие «увеличение времени проезда». При этом необходимо осуществлять корректировку плановых моментов проследования контрольных пунктов:

$$\tau_j^* = \begin{cases} \tau_j - (\delta_k - \gamma_{kj}\tau_{kj}), & \text{если } (\delta_k - \gamma_{kj}\tau_{kj}) > 0; \\ \tau_j & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Если величина времени опережения такова, что за счет уменьшения скорости движения ПЕ обеспечить прибытие ее на конечный КП в плановый момент времени невозможно, то требуется увеличить время отстоя ПЕ на конечном КП. При этом необходимым условием формирования данного управляющего воздействия является

$$\delta_k \leq \varepsilon_{kN}\Phi_{kN} + \varepsilon t_0.$$

*Сход ПЕ с линии.* Пусть все предложения предыдущего пункта остаются в силе. Из формулы (10) следует, что для всех  $i$

$$P_i = \rho\Delta\tau = \frac{\rho\tau}{m}. \quad (21)$$

Предположим, что  $i$ -я ПЕ сошла с линии. Тогда

$$P'_{i+1} = P_i + P_{i+1} = 2P_i, \quad (22)$$

пассажиропоток, приходящейся на следующую за сошедшей ПЕ, увеличивается в два раза.

Потери времени на ожидание двух ПЕ

$$Z' = Z_i + Z_{i+1} = \rho \frac{(\Delta\tau)^2}{2} + \rho \frac{(\Delta\tau)^2}{2} = \rho\Delta\tau^2. \quad (23)$$

Потери времени после схода ПЕ

$$Z'' = \rho \frac{2(\Delta\tau)^2}{2} = 2\rho\Delta\tau^2; \quad (24)$$

$$\Delta Z = Z'' - Z' = \rho\Delta\tau^2 > 0. \quad (25)$$

Как видим, и в этом случае ВВ влияют на увеличение критерия  $Z$ . Учитывая условия, приведенные в выражении (22), можно сказать, что возникает возможность переполнения на маршруте. В данном случае ИТС формирует следующие управляющие воздействия: «уменьшение времени рейса», «раздвижка интервала», «переход на равномерный интервал», «переключение с маршрута на маршрут» и «ввод резервной ПЕ». Вначале оценим эффективность применения ИТС управляющих воздействий «ввод резервной ПЕ», «раздвижка интервала» и «переход на равномерный интервал». Предположим, что на маршруте выделено пять временных отрезков относительно постоянной интенсивности пассажиропотока (два «пиковых» и три «межпиковых»):  $t_0 - t_1, t_1 - t_2, \dots, t_4 - t_5$ . В момент времени  $t_c$  зафиксирован сход ПЕ с линии. Работоспособное состояние ПЕ будет восстановлено через время  $\tau_e$ , в момент времени  $t_e$ . Через время  $\tau_p$  в момент времени  $t_p$  может быть осуществлен ввод резервной ПЕ.

Суммарное время ожидания пассажиров на маршруте за время  $\tau_e$  при сходе ПЕ с линии составит

$$J_c = \sum_{j=1}^5 \lambda_j \tau_j ((t_c) t_{cj}).$$

Суммарное время ожидания пассажиров на маршруте за время  $\tau_e$  при вводе резерва составит

$$J_p = \sum_{j=1}^5 \lambda_j \tau_j (t_p) t_{pj} + \sum_{j=1}^5 \lambda_j \tau_j (t_p) t_{cj}. \text{ Тогда снижение}$$

$\Delta J_p$  суммарного времени ожидания пассажиров за счет ввода резерва при сходе ПЕ с линии определится в виде  $\Delta J_p = J_c - J_p$ .

Учитывая, что  $\tau_j(t_c) = \tau_j(\tau_p + \tau_j(t_p))$ , получим следующее выражение для  $\Delta J_p$ :

$$\Delta J_p = \sum_{j=1}^5 \lambda_j \tau_j (t_p) t_{cj} - \sum_{j=1}^5 \lambda_j \tau_j (t_p) t_{pj} = \sum_{j=1}^5 \lambda_j \tau_j (t_p) (t_{cj} - t_{pj}).$$

Проведя аналогичный анализ, можно показать, что снижение  $\Delta J_u$  суммарного времени ожидания пассажиров за счет раздвижки интервала при сходе ПЕ с линии определяется так  $\Delta J_u = \sum_{j=1}^5 \lambda_j \tau_j (\tau_u) (t_{cj} - t_{uj})$ . Аналогично

можно показать, что снижение  $\Delta J_o$  суммарного времени ожидания пассажиров за счет перехода на равномерный или оперативный интервал определяется в виде

$$\Delta J_o = \sum_{j=1}^5 \lambda_j \tau_j (\tau_o) (t_{cj} - t_{oj}).$$

Перейдем теперь к оценке эффективности применения управляющего воздействия «переключение ПЕ с маршрута на маршрут». Предположим, что анализируется возможность переключения ПЕ с одного маршрута, интенсивность пассажиропотока на котором  $\lambda_1$ , на другой, где интенсивность пассажиропотока  $\lambda_2$  в случае схода ПЕ с первого маршрута в момент времени  $t_c$  на время  $\tau_e$ . Начало переключения ПЕ со второго маршрута на первый осуществляется в момент времени  $t_n$ . При этом переключаемая ПЕ прибывает на первый маршрут в момент  $t_n$ .

Переключение ПЕ с одного маршрута на другой можно отождествлять с вводом резервной ПЕ на первый маршрут. Поэтому снижение  $\Delta J_n$  суммарного времени ожидания пассажиров на первом маршруте за счет переключения ПЕ с маршрута на маршрут определится

по аналогии с  $\Delta J_p$ :  $\Delta J_n = \sum_{j=1}^5 \lambda_j \tau_j (t_n) (t_{cj} - t_{nj})$ . Пере-

ключение ПЕ со второго маршрута равносильно сходу с него ПЕ, что вызывает увеличение времени  $\Delta J_1$  ожида-

ния пассажиров:  $\Delta J_1 = \sum_{j=1}^5 \lambda_{2j} \tau_j (t_n) t_{nj} - \sum_{j=1}^5 \lambda_{2j} \tau_j t_{2j}$ .

Перевод ПЕ с маршрута на маршрут будет оправдан только в том случае, если снижение времени ожидания пассажиров на новом маршруте будет больше увеличения времени ожидания пассажиров на прежнем маршруте (в рассматриваемом случае при  $\Delta J_n > \Delta J_1$ ). Общее снижение  $\Delta J$  времени ожидания пассажиров  $\Delta J = \Delta J_n - \Delta J_1$ .

При формировании управляющего воздействия «переключение ПЕ с маршрута на маршрут» в случае схода ПЕ с линии необходимо определить такую пару маршрутов, для которой обеспечивается максимум общего снижения времени ожидания пассажиров –  $\max \Delta J$ . Выбор наиболее эффективного управляющего воздействия при сходе ПЕ с линии может быть осуществлен при определении максимального снижения  $\Delta J_c$  суммарного времени ожидания пассажиров:  $\Delta J_c = \max(\Delta J_p, \Delta J_u, \Delta J_o, \max \Delta J)$ .

Таким образом, при каждом сходе ПЕ с линии целесообразно формировать такое управляющее воздействие, которое обеспечивает максимальное снижение времени ожидания пассажиров (по сравнению со случаем отсутствия управляющих воздействий).

Ухудшение условий движения. Рассмотрим соотношение между интервалом движения и другими параметрами движения:  $T_i = T_i^{de} + T_i^{ocm}$ , где

$$T_i^{de} = \sum_{j=1}^n \tau_i^{j,j+1} = \sum_{j=1}^n l^{j,j+1} / v_i^{j,j+1} = \frac{1}{v_{cp}} \sum_{j=1}^n l^{j,j+1} = L / v_{cp}, \quad (26)$$

$$T_i^{ocm} = \sum_{j=1}^n \tau_i^j = \sum_{j=1}^n \tau_{hi}^j + \sum_{j=1}^n \tau_{zi}^j; \quad (27)$$

$$\sum_{j=1}^n \tau_{hi}^j = \sum_{j=1}^n \eta_i (\tilde{P}_i^j + q_i^j) = \eta_i (\sum_{j=1}^n \tilde{P}_i^j + \sum_{j=1}^n q_i^j) = 2\eta_i \sum_{j=1}^n \tilde{P}_i^j = 2\eta_i \rho \Delta\tau.$$

Следовательно,  $T_i = \frac{L}{v_{cp}} + 2\eta_i\rho\Delta\tau + T_{zi} \approx T$ ;  $\Delta\tau = \frac{T}{m}$ ;

$$m\Delta\tau = L/v_{cp} + 2\eta_i\rho\Delta\tau + T_{zi}.$$

Отсюда

$$\Delta\tau = \frac{L/v_{cp} + T_{zi}}{m - 2\eta_i\rho}. \quad (28)$$

Из отношения

$$Z = m\rho \frac{(\Delta\tau)^2}{2} \quad (29)$$

видно, что с увеличением  $\Delta\tau$  растет и  $Z$ . При ухудшении условий движения  $v_{cp}$  понижается,  $v'_{cp} < v_{cp}$ .

Тогда

$$\delta = \Delta\tau' - \Delta\tau = \frac{L}{m - 2\rho\eta_i} \frac{\Delta v}{(v_{cp} - \Delta v)}; \quad \Delta v = v_{cp} - v'_{cp};$$

$$\Delta Z = m\rho \frac{(\Delta\tau + \delta)^2}{2} - m\rho \frac{(\Delta\tau)^2}{2} = m\rho\Delta\tau\delta + m\rho \frac{\delta^2}{2} > 0. \quad (30)$$

При ухудшении условий движения на отдельных маршрутах или маршрутной сети в целом, в качестве основного управляющего воздействия в ИТС рекомендуется управление «переход на равномерный интервал». С учетом возможной скорости движения ПЕ рассчитывается интервал, соблюдая который ПЕ отправляются с конечных КП.

Переполнения на маршруте фиксируется, если не все пассажиры могут быть обслужены прибывшей на ОП подвижной единицей, когда  $g_i^j > 0$ . Возникнув на одной остановке, переполнение может появиться и на других за счет уменьшения резерва мест в ПЕ. При переполнениях

$$Z_i^j = \rho^j \frac{(\Delta\tau)^2}{2} + g_i^j \Delta\tau; \quad (31)$$

$$\Delta Z_i^j = g_i^j \Delta\tau > 0; \quad (32)$$

$$\Delta Z = \sum_{g_i > 1} \Delta Z_i^j > 0. \quad (33)$$

Сумма берется по всем  $i, j$  для которых  $g_i^j > 0$ .

Внеплановое увеличение пассажиропотоков ведет к переполнению ПЕ, к снижению комфортабельности поездок и увеличению временных затрат пассажиров. Основными управляющими воздействиями при этом являются «переключение ПЕ с маршрута на маршрут» и «ввод резервной ПЕ». Целесообразно формировать такое управляющее воздействие, которое обеспечит максимальное снижение времени ожидания пассажиров (по сравнению со случаем отсутствия управляющих воздействий).

Предположим, на части  $j$ -го временного отрезка  $\tau_j(t_y)$  в момент  $t_y$  произошло внеплановое увеличение  $\lambda_j$  на величину  $\Delta\lambda_j$ . Тогда увеличение суммарного времени ожидания пассажиров на данном маршруте

$$\Delta J_y = \sum_{j=1}^5 \Delta\lambda_j \tau_j(t_n) t_{yj}.$$

Если на данный маршрут переключить ПЕ, то  $\Delta J_y$  уменьшится на  $\Delta J_n$ , на величину снижения суммарного времени ожидания пассажиров за счет переключения ПЕ с маршрута на маршрут. Если ввести резервную ПЕ, то величина  $\Delta J_y$  уменьшится на  $\Delta J_p$ , на величину снижения суммарного времени ожидания пассажиров за счет ввода резервной подвижной единицы.

Выбор типа управляющего воздействия при внеплановом увеличении пассажиропотока на маршруте может быть осуществлен при определении максимального уменьшения величины  $\Delta J_y$ :  $J_y = \max\{(\Delta J_y - \Delta J_n), (\Delta J_y - \Delta J_p)\}$ .

Таким образом, установлено, что все возмущающие воздействия ухудшают показатели качества обслуживания пассажиров. На описанной модели – это влияние можно подвергнуть количественной оценке. Моделируя ВВ и вычисляя величины  $Z$  и  $S$  до нарушения движения и после принятия диспетчерского воздействия, можно определить скорость реакции системы на ВВ и ДВ; эффективность ДВ, а в конечном результате – непосредственный экономический эффект от внедрения ИТС. Все указанные вычисления, а также статистический анализ моделирования производит блок анализа.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Предложенная модель реализована в MatLab. В ходе имитационного моделирования исследовались следующие параметры:  $\eta_i$ ;  $\tilde{P}_i^j + q_i^j$ ;  $\tilde{\tau}_i^{j+1}$ ;  $\Delta\tau'$ . Для проведения имитационного эксперимента была составлена рабочая таблица планирования в соответствии рекомендациями [8, 10].

#### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты имитационного моделирования пассажиропотока показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты имитационных экспериментов

Номер опыта	$\eta_i$	$\tilde{P}_i^j + q_i^j$	$\tilde{\tau}_i^{j+1}$	$\Delta\tau'$
1	0,2	1	1	0,34
2	0,8	14	1	0,17
3	0,2	1	11	2
4	0,8	14	11	1
5	0,5	7,5	6	-0,68

Экспериментальное значение критерия Фишера  $K_{fe} = 8,0 < K_{fm} = 16$  при  $P = 0,95$ , позволило сделать вывод об адекватности разработанной модели. Этот факт дает возможность обоснованно утверждать, что стохастическая имитационная модель является базой для внедрения управленческих действий для создаваемых ИТС управления пассажирским автотранспортном.

#### 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Имитационное моделирование с использованием пакета MatLab позволило сделать следующие выводы:

- предложенная математическая модель является работоспособной и позволяет адекватно описывать процесс движения подвижной единицы по маршруту;
- использование пакета MatLab в реальной практике эксплуатации ИТС не представляется возможным, поскольку его применение предполагает определенную квалификацию пользователя.

## ВЫВОДЫ

Научная новизна результатов, полученных в статье, состоит в том, что впервые разработана модель для ИТС управления маршрутами городских пассажирских автобусов с учетом влияния наиболее значимых стохастических факторов. Получена система уравнений, которая моделирует функционирование маршрута.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что разработано программное обеспечение для имитационного моделирования в среде MatLab, реализующее предложенную модель, на основе которой решена практическая задача выбора управляющих воздействий для ИТС городских автобусных маршрутов.

Перспективы дальнейших исследований состоят в том, чтобы программно реализовать предложенную модель на языках высокого уровня для проектируемых ИТС крупных городов Украины, что позволит оперативно оценивать влияние возмущающих воздействий (отклонение подвижной единицы от расписания, сход с линии, ухудшение условий движения, переполнение на маршруте) на показатели качества обслуживания пассажиров и составить оптимальное расписание движения транспорта.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетных научно-исследовательских тем «Информационно-аналитические технологии управления в интеллектуальных транспортных системах многокритериальными и многопродуктовыми потоками в условиях неоднородной неопределенности параметров процессов» (номер г/р 0113U000695) Днепропетровского национального университета железнодородного транспорта им. академика В. Лазаряна и «Разработка программного обеспечения для модулей АСУ предприятий с использованием объектно-ориентированных языков программирования и технологии клиент-сервер» (номер г/р 0107U006840) Луганского национального аграрного университета.

Лакно В. А.

Д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри організації комплексного захисту інформації, Європейський університет, Київ, Україна  
**МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МІСЬКИМИ АВТОБУСНИМИ ПЕРЕВЕЗЕННЯМИ**

Вирішене завдання розробки математичного забезпечення для інтелектуальної системи управління міськими автобусними перевезеннями. Об'єктом дослідження є автоматизація процесу прийняття рішень інтелектуальними системами управління міськими транспортними потоками. Предмет дослідження становлять моделі диспетчерського управління транспортними потоками автобусних маршрутів. Метою роботи є вдосконалення моделей для інтелектуальних транспортних систем керуючих міськими потоками автобусів і маршрутних таксі. Розроблено модель для інтелектуальної транспортної системи управління з урахуванням впливу найбільш значущих чинників на графік руху автобусів за маршрутом. Модель дозволяє оперативно оцінювати вплив збурюючих дій на рух рухомої одиниці, зокрема таких, як переповнення автобусів на маршруті пасажирами, їх схід з лінії, відхилення від розкладу та ін., на показники якості обслуговування, а також, оптимізувати розклад руху. В якості критерію оптимізації запропоновано використовувати показник мінімуму часу очікування пасажирами автобусів і маршрутних таксі на зупинках. Під час експериментів перевірена адекватність розробленої моделі, яка оцінювалася методом однофакторного дисперсійного аналізу і повнофакторного експерименту в реальних міських умовах. Результати експериментів дозволяють рекомендувати запропоновану модель для практичного використання в інтелектуальних транспортних системах управління міськими автобусними маршрутами.

**Ключові слова:** інтелектуальна транспортна система, управління автобусними перевезеннями, модель, алгоритм управління.

Lakhno V. A.

Dr. Sc., associate professor, Head of Complex Information Security Organization Department, European University, Kyiv, Ukraine  
**MODEL OF INTELLIGENT MANAGEMENT SYSTEM OF CITY BUS TRANSPORTATIONS**

This paper is devoted to improving the mathematical support for the intelligent traffic management system of city buses. It provides an overview of what is the real state of the-art with respect to traffic flow theory. A new mathematical model of the buses motion has been generating in consideration of stochastic factors. The model allows the calculating immediate changes in the city buses schedules connected with speed parameters. The model and program realization make allowance for increasing the efficiency of passenger service when projecting

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Transportation & Logistics 2030. [Electronic resource]. – London: PWC, 2014. – Access mode: <http://www.pwc.com/tl2030>
2. Mikulski J. Modern Transport Telematics / J. Mikulski // 11th International Conference on Transport Systems Telematics, TST 2011. Katowice-Ustron, 19–22 October 2011.: Abstracts. Katowice-Ustron, Poland. – 2011. – P. 8–11.
3. Continuing Evolution of Travel Time Data Information Collection and Processing / [Tarnoff, Philip John, Bullock, Darcy M, Young, Stanley E, et al.] // Transportation Research Board Annual Meeting. TRB. – 2009. – P. 23–45.
4. Tyagi V. Vehicular Traffic Density State Estimation Based on Cumulative Road Acoustics / V. Tyagi, S. Kalyanaraman, R. Krishnapuram // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2012. – Vol. 6. – P. 456–468.
5. Horowitz R. Control design of an automated highway system / R. Horowitz, P. Varaiya // In Proceedings of the IEEE. – 2000. – Vol. 88. – P. 913–925.
6. Dynamic Traffic Light Sequence, Science Publications / [Khalid A. S. Al-Khateeb, Jaiz A. Y. Johari, Wajdi F. Al-Khateeb] // Journal of Computer Science. – 2008. – No. 4 (7). – P. 517–524.
7. Автоматизированные системы обработки информации и управления на автомобильном транспорте : учебник / [А. Б. Николаев, С. В. Алексахин, И. А. Кузнецов, В. Ю. Строганов]; под ред. А. Б. Николаева. – М. : ACADEMIA, 2003. – 223 с.
8. Методика имитационного моделирования работы городского транспорта / [В. Н. Галушко, В. Д. Левчук, И. В. Максимей и др.] // Электрон. моделирование. – 2006. – № 2. – С. 79–95.
9. Дубова С. В. Особенности развития пассажирского транспорта в Киеве / С. В. Дубова // Містобудування та терит. планування. – 2003. – Вип. 15. – С. 68–72.
10. Лакно В. А. Повышение эффективности систем управления автомобильным пассажирским транспортом методами стохастического моделирования : монография / В. А. Лакно, А. И. Пилипенко. – Луганск : Элтон-2, 2007. – 177 с.
11. Transport Logistics. Shared solution to common challenges [Electronic resource]. – Paris: Organisation for economic co-operation and development, 2002. – Access mode: <http://www.internationaltransportforum.org/pub/pdf/02LogisticsE.pdf>

Статья поступила в редакцию 28.01.2016.

После доработки 10.02.2016.

city passenger transports. With regard to the traffic organization, the automated control system as the element of the intelligent transport systems plays the increasingly important role as a key component of the transport system, which is able to form the right choice for customers across a network, to support safe travel. The software implementing proposed method is developed. The experiments to study the properties of the proposed model are conducted. The experimental results allow to recommend the proposed model for use in practice.

**Keywords:** modeling, intelligent transport systems, information systems, dispatching control, transport flow, passenger flow.

## REFERENCES

1. Transportation & Logistics 2030. [Electronic resource]. London, PWC, 2014. Access mode: <http://www.pwc.com/tl2030>
2. Mikulski J. Modern Transport Telematics, *11 th International Conference on Transport Systems Telematics, TST 2011. Katowice-Ustron, 19–22 October 2011*. Abstracts. Katowice-Ustron, Poland. 2011. – P. 8–11.
3. Tarnoff, Philip John, Bullock, Darcy M, Young, Stanley E, et al. Continuing Evolution of Travel Time Data Information Collection and Processing, *Transportation Research Board Annual Meeting*. TRB, 2009, pp. 23–45.
4. Tyagi V., Kalyanaraman S., Krishnapuram R. Vehicular Traffic Density State Estimation Based on Cumulative Road Acoustics, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, Vol. 6, pp. 456–468.
5. Horowitz R., Varaiya P. Control design of an automated highway system, *In Proceedings of the IEEE*, 2000, Vol. 88, pp. 913–925.
6. Khalid A. S., Al-Khateeb, Jaiz A.Y. Johari, Wajdi F. Al-Khateeb Dynamic Traffic Light Sequence, Science Publications, *Journal of Computer Science*, 2008, No. 4 (7), pp. 517–524.
7. Nikolaev A. B., Aleksahin S. V., Kuznetsov I. A., Stroganov V. Yu. Ed. A. B. Nikolaev Automated systems for information processing and management of road transport : textbook. Moscow, Academy, 2003, 223 p.
8. Galushko V. N., Levchuk V. D., Maksimey I. V., Mogila V. S., Chechet P. L. Methods of simulation of urban transport, *Elektron. Modelirovanie*, 2006, No. 2, pp. 79–95.
9. Dubova S. V. Features of development of passenger transport in Kiev, *Mistobuduvannya ta terit. planuvannya*, 2003, Vyp. 15, pp. 68–72.
10. Lahno V. A., Pilipenko A. I. Improving the efficiency of control systems of road passenger transport methods of stochastic modeling, monografija. Lugansk, Elton-2, 2007, 177 p.
11. Transport Logistics. Shared solution to common challenges [Electronic resource]. Paris, Organisation for economic co-operation and development, 2002. Access mode: <http://www.internationaltransportforum.org/pub/pdf/02LogisticsE.pdf>