

Вопросы моделирования систем городского транспорта

¹ Аслан Фаудович Закураев

² Александр Иванович Ткачев

¹ ЦАДИ, Россия

127041, г. Москва, ул. Бакунинская, 4/6, стр. 1. кв. 2

Доктор технических наук, профессор

E-mail: aslanz@mail.ru

² Сочинский государственный университет, Россия

354003, Сочи, ул. Советская, 26 а

Кандидат технических наук, профессор

E-mail: tkachev.sochi@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены методы моделирования транспортных систем с использованием метода группового учета аргументов, идентификации процессов трансформации групп автомобилей в транспортном потоке в процессе его саморегуляции и самоорганизации.

Ключевые слова: принципы самоорганизации транспортных потоков, критерии селекции, синтез моделей оптимальной сложности, модели транспортных узлов.

УДК
629.113

С точки зрения теории систем, городской пассажирский транспорт представляет собой большую систему с присущими ей всеми признаками, что оправдывает применение математического моделирования.

Система пассажирского транспорта содержит три основные характеристики:

- пассажиропотоки (заявки на обслуживание, их распределение во времени и пространстве);
- сеть маршрутов и парк транспортных единиц (системы обслуживания пассажиров);
- планы движения транспортных единиц (их распределение по оси маршрутов, расписание движения и графики работы).

Состояние этих характеристик зависит от поведения перечисленных подсистем, поведение которых является функцией состояния составляющих их элементов и связей между ними. Задача описания целевой функции заключается в уточнении проблемы исследования, а для решения данной задачи воспользуемся методом математического описания объектов эффективного функционирования и управления пассажирским транспортом.

Объект функционирования и управления городской пассажирской транспортной системой крупного города в часы пик состоит из n транспортных маршрутов, обслуживаемых m видами транспорта и k остановочных пунктов. Естественно, каждый маршрут характеризуется матрицей корреспонденции $R_i = ||R_{ij}||$, где R_{ij} - пассажиропотоки между пунктами i и j , ($i, j=1, k$), ($R_{ii}=0$); количеством подвижных единиц W_z , протяженностью S_z , интервалом движения E_z :

$$E_z = S_z / W_z V_z \quad (1) \quad \text{где } V_z -$$

средняя скорость движения подвижного состава z -го маршрута.

Цель управления системой транспортного обслуживания – удовлетворение спроса на качественные перевозки в часы пик в крупном городе и определение границы устойчивого состояния этой системы.

Качество её функционирования определяется в результате оценки уровня удовлетворения требованиям. Основные из них следующие:

- маршруты ГПТ должны соответствовать корреспонденциям пассажиропотоков;
- пешеходные подходы к остановочным пунктам должны быть минимальными;
- обеспечение регулярности движения по маршрутам;
- минимальное время ожидания транспортных единиц;
- обеспечение минимального времени на пересадки с одного маршрута на другой;
- обеспечение минимальных затрат времени на поездку;

• обеспечение комфорта поездки, определяемого уровнем наполнения подвижного состава, безопасностью движения и удобством поездки.

Если данные показатели выразить через затраты времени пассажирами на передвижение, то интересы пассажиров сводятся к минимизации значений этих показателей

$$\min H(\delta), \quad (2) \quad \text{где } H -$$

функционал затрат времени населения на передвижение.

Таким образом, задача эффективного функционирования и управления городским пассажирским транспортом сводится к поиску решения, удовлетворяющему взаимодействию R_{ij} , M и W , обеспечивающему выполнение условия (2), при заданных значениях R_{ij} .

Однако интересы выделенных подсистем в какой-то степени имеют противоречивый характер. Пассажиры заинтересованы в наименьших затратах времени на передвижение в любое время суток и года, что вызывает увеличение подвижного состава на маршрутах, следовательно, повышение эксплуатационных затрат и увеличение себестоимости перевозок пассажиров.

Кроме того, система обслуживания городского населения транспортом подвержена колебаниям (возмущениям), вносимым как со стороны поступления заявок на перевозки (непредвиденные колебания пассажиропотоков), так и со стороны обслуживания (непредвиденный сход единиц подвижного состава (ПЕ) с маршрутов по различным причинам).

Для поддержания всей системы в устойчивом состоянии, т.е. для удовлетворения любого спроса на обслуживание потока пассажиров с любым колебанием, необходимы критерии, по которым можно было бы сделать оценку состояния системы и определить целесообразность применения того или иного управляющего внешнего воздействия $\bar{U}$ для ввода системы в устойчивое состояние.

Кибернетическая модель самоорганизации транспортного процесса, представленная в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{dy_i}{dt} = f_i(t, y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (3)$$

соответствующих начальным условиям $\min H(\delta) = f(R_{ij}, M, \bar{U}, T)$ называется

устойчивой, если малое изменение начальных условий не может вызвать больших изменений по управляемости системы.

Системе пассажирского транспорта присуще существование множества альтернативных решений, и в качестве градостроительных предложений проектирования предлагается прокладка эстакад с целью создания дополнительных транспортных связей для эффективной координации работы различных видов транспорта в часы пик в крупном городе и освоения пассажирооборота. Это даёт возможность компромиссного решения, при котором каждый показатель качества обслуживания будет удовлетворён наиболее полно.

При решении задач проектирования новых транспортных систем весьма большую роль играют модели и точность моделирования исследуемых систем, так как они позволяют изучать влияние различных системных решений, не прибегая к реальному конструированию и испытаниям рассматриваемых процессов.

Построение моделей – всегда процедура неформальная, разработка универсальной модели сложна. Исследователи чаще прибегают к процессу упрощения математической модели, тем самым резко уменьшая информационное обеспечение аналитического характера, что приводит в конечном счете к большим ошибкам и неустойчивому характеру процесса. Конечно, система таких простых математических моделей предпочтительнее по сравнению с разработкой универсальной модели для интерпретации результатов исследования и подтверждения первоначальных гипотез.

В конечном результате простые математические модели для решения стохастических ситуационных задач функционирования ГПТ не работают [4]. Особенно это становится очевидным при моделировании организации транспортных потоков, когда есть ограничения пропускных способностей существующих улиц, при степенном увеличении интенсивности движения в часы пик в реальном режиме времени, с учётом нестационарного

характера транспортного потока (наличие светофоров, одностороннее движение, аварийное закрытие, ремонт дорог, закрытие маршрутов и т.д.). Относительная ценность этих требований по ограничению зависит от состояния и развития улично-дорожной сети, уровня автомобилизации населения, а также от свободного выбора времени перемещений.

Решение задачи при наличии большого количества контролируемых и неуправляемых показателей качества перевозки пассажиров, удовлетворения спроса на перевозку, отсутствие детерминированной теории пассажирских перевозочных процессов в мегаполисе, большая размерность технологических задач определили наиболее приемлемый в данных условиях подход к решению, основанный на принципах самоорганизации.

Принцип эвристической самоорганизации и основанный на нём метод группового учёта аргументов (МГУА) представляют собой попытку резкого повышения точности математической модели оптимальной сложности при коротком периоде наблюдения за процессом с максимально возможным сокращением субъективной априорной информации со стороны человека [5].

До настоящего времени задачи моделирования сложных транспортных систем решались при помощи регрессионного анализа с использованием метода наименьших квадратов. Однако при этом указывался вид уравнения регрессии (его степень и число членов), причём результат моделирования носил субъективный характер. При помощи регрессионного анализа принципиально нельзя установить структуру уравнения (модели) оптимальной сложности, т.к. действует правило: “чем сложнее модель – тем она точнее” (вплоть до нуля ошибки). В реальных задачах переусложнение модели (overfitting) так же плохо, как её недостаточная сложность.

Принцип самоорганизации модели на ЭВМ позволяет найти единственную модель оптимальной сложности, для этого достаточно указать (в соответствии с теоремой неполноты Гёделя) некоторый внешний критерий. Принцип самоорганизации формулируется так: при постепенном усложнении модели ряд критериев (называемых критериями селекции), имеющих свойства внешнего дополнения (по Стаффорду Бирю), проходят через минимум, определяющий единственную для каждого критерия модель оптимальной сложности [2]. Всегда можно выбрать такой порядок усложнения модели (например, повышение числа членов и степени полинома), при котором минимум будет единственным. В качестве критерия селекции в теории самоорганизации используется, главным образом, критерий регулярности – величина среднеквадратической ошибки, измеряемой на отдельной последовательности экспериментальных точек.

Для синтеза модели оптимальной сложности применяется метод поочерёдного опробования (перебор) моделей с постепенным их усложнением. Для каждой модели рассчитывается значение критерия селекции и выбирается та модель, для которой он меньше, чем для других моделей.

Перебор моделей является непараметрическим методом и не требует никаких сведений о статистических или других свойствах объекта (стационарность, нелинейность, не марковость и пр.). Важно отметить объективный характер такого синтеза моделей оптимальной сложности. По принципу самоорганизации человек только задаёт машине экспериментальные данные и указывает критерий селекции. Далее машина сама, без помощи человека, синтезирует модель и указывает её достоверность, мерой которой является глубина минимума критерия селекции. Только в случае получения достаточно глубокого минимума можно быть уверенным в том, что задача синтеза модели решена. Если минимум не глубокий (более 0.05), то следует расширить область перебора машины: изменить состав аргументов, опорных функций, запаздывающих аргументов и т.д. Все параметры вычислительных алгоритмов МГУА оптимизируются так, чтобы получить наиболее глубокий минимум основного критерия селекции. В частности, по этому правилу выбирается глубина учёта предыстории (размер таблицы исходных данных).

Объем таблиц постепенного усложнения модели определяется следующим образом: число колонок таблицы равно числу членов полного степенного полинома Колмогорова –

Габова C_{n+N}^n при $n = N$, где n – степень полинома, N – число переменных. Для одного, двух, трёх и четырёх аргументов получим два, пять, двадцать один, семьдесят колонок соответствия. Число строк последней колонки равно $2^{C_{2n}^n}$, т.е. $2^2, 2^5, 2^{21}, 2^{70}$ соответственно. Отсюда можно заключить, что полный перебор моделей (например, из

указанных полиномов) возможен только при числе переменных не более трёх-четырёх. Число переменных в реальных задачах достигает сотен. Для таких задач большой размерности вместо полного перебора моделей (с целью нахождения моделей оптимальной сложности) применяются разнообразные алгоритмы рационализированного перебора, среди которых наиболее эффективным представляется МГУА.

Построение алгоритмов МГУА построено на следующих принципах:

$$\text{“Полное” описание объекта } \varphi = f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (4)$$

заменяется m “частными” описаниями. Для первого ряда селекции “частные” описания имеют вид

$$y_1 = f_1(x_1, x_2), \quad y_2 = f_1(x_1, x_3), \dots, y_m = f_1(x_{n-1}, x_n) \quad (5)$$

$$\text{где } m = C_n^2.$$

Вид функции f_1 не изменяется во всех уравнениях (5). В качестве функции f_1 используются полиномы не выше второй степени относительно двух аргументов

$$f_1 = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_j + a_3 x_i x_j + a_4 x_i^2 + a_5 x_j^2 \quad (6)$$

Коэффициенты в уравнении (6) определяются по методу наименьших квадратов на обучающей последовательности (часть точек исходной информации).

Из полученных m “частных” описаний, используя величину критерия селекции на проверочной последовательности (часть точек, не попавшая в обучающую последовательность), выбирается F наилучших описаний (гипотез), согласно принципу неокончательных решений. Величина $F > 1$ является “свободой выбора”. На следующий ряд селекции пропускаются только те F лучших “частных” описаний, которые удовлетворяют условию селекции

$$\delta_i \rightarrow \min, \quad \text{где } i = \overline{1, F}; \quad j = \overline{1, m}. \quad (7)$$

“Частные” описания, допущенные на второй ряд селекции, называются “промежуточными” переменными. Они являются аргументами для “частных” описаний следующего ряда селекции

$$z_1 = f_1(y_1, y_2), \quad z_2 = f_1(y_1, y_3), \dots, z_p = f_1(y_{m-1}, y_m), \quad (8)$$

$$\text{где } p = C_m^2.$$

Исключая промежуточные переменные, можно получить “аналог”, который должен по виду соответствовать “полному” описанию. При переходе от ряда к ряду сложность “промежуточных” переменных возрастает.

Число рядов наращивается до тех пор, пока ошибка на проверочной последовательности уменьшается. На последнем ряду селекции вместо F выбирается одно или F наилучшее описание и при помощи обратных подстановок определяется “полное” описание объекта (4).

При решении всех проблем, связанных с “частными” описаниями, используется внешнее дополнение, т.е. значение некоторого критерия, подсчитанное на проверочной последовательности. А при решении вопроса об оптимальном разбиении ряда исходных данных на проверочную и обучающую последовательности применяют второе внешнее дополнение. Им служит значение некоторого критерия, определенное на точках так называемой “экзаменационной” последовательности. К этой последовательности принадлежат точки, не попавшие ни в обучающую, ни в проверочную последовательности.

В качестве первого внешнего дополнения используется ряд критериев, смысл которых заключается в оценке степени регулярности, баланса переменных и несмещенности.

Критерий регулярности представляет собой величину среднеквадратичной ошибки, измеряемой на отдельной проверочной последовательности экспериментальных точек N_{II}

$$\Delta(1) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{N_{II}} (y_k - y_k^*)^2}{\sum_{k=1}^{N_{II}} y_k^2}}, \quad (9)$$

где k – номер точки;

N_{II} – число точек проверочной последовательности;

y_k – действительное значение функции в точках;

$(y_k - y^*)$ – ошибка интерполяции.

Критерий несмещенности коэффициентов представляет собой величину

$$\eta_{см.к.} = \sqrt{\frac{(A_1 - A_2)^2}{A_1^2}}, \quad (10)$$

где A_1 и A_2 – параметры модели, полученные, соответственно, на первой и второй обучающих последовательностях.

Критерий несмещенности решений тоже предполагает разбиение исходного ряда на две последовательности и представляет собой величину

$$\eta_{см.р.} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (y_{1k} - y_{2k})^2}{\sum_{k=1}^N y_{1k}^2}}, \quad (11)$$

где y_{1k} и y_{2k} – значения функции, полученные после определения параметров моделей на первой и второй обучающей последовательностях и пересчета их по всем N точкам исходного ряда.

Комбинированный критерий k представляет собой выражение

$$k = \sqrt{\alpha \eta_{см.}^2 + (1 - \alpha) \Delta(1)^2}, \quad (12)$$

где $\eta_{см.}$ – критерий несмещенности;

$\Delta(1)$ – критерий регулярности;

α – весовой коэффициент.

В настоящей работе при идентификации процессов трансформации групп индивидуальных автомобилей в часы пик в транспортном потоке в различных транспортных узлах и улиц были рассмотрены модели шести типов:

- а) устойчивый узел развязки надэстакадного типа;
- б) неустойчивый узел развязки подэстакадного типа;
- в) устойчивый въезд на эстакаду;
- г) неустойчивый выезд с эстакады;
- д) седловидный узел въезда и выезда с эстакады;
- е) центральные узлы транспортных колец в крупных городах и мегаполисах.

Такая классификация является минимально необходимой, чтобы решить задачу определения устойчивого состояния функционирования наземного транспортного потока в крупном городе в часы пик. Для этого необходимо моделировать отдельно все шесть случаев перехода к устойчивым циклам движения при изменении уровней движения [1].

На этой основе можно записать уравнение ограничения, отражающее наши гипотезы относительно новой ситуации. Во-первых, необходимо сделать предположение о назначении поездок. Обычно классифицируют поездки, направленные в сторону проживания по типу пассажиров, а поездки, направленные в другие стороны, по другой характеристике зоны, такой, как использование земли и т.д. Для решения этой задачи была составлена программа.

В результате расчетов при $\Delta v = 1 \text{ км/сутки}$, $\Pi = 2$ на 120 точках (интервал дискретизации равен 3 суток) были получены следующие уравнения динамики для шести контрольных транспортных узлов:

Тр.узел №6

$$\begin{aligned} x_{7_{k+1}} = & -2.09 \cdot 10^{-2} - 0.22 \mu_{1_{k+1}} - 6.03 \cdot 10^{-2} \mu_{2_{1_k}} + 3.49 \cdot 10^{-3} x_{3_{k-1}} - \\ & - 0.10 \mu_{2_{2_{k+1}}} + 5.81 \cdot 10^{-4} \mu_{3_{2_k}} - 7.30 \cdot 10^{-2} x_{4_k} + 0.31 \mu_{1_{3_k}} + \\ & + 0.53 \cdot 10^{-1} \mu_{1_{3_{k+1}}} - 4.40 \cdot 10^{-4} \mu_{2_{3_k}} - 0.21 \mu_{3_{3_{k+1}}} + 0.95 x_{7_{k-1}} \end{aligned}$$

Тр.узел №5

$$\begin{aligned} x_{6_{k+1}} = & -3.21 \cdot 10^{-2} - 0.14 \mu_{1_{1_k}} - 0.19 \mu_{1_{1_{k+1}}} - 6.03 \cdot 10^{-2} \mu_{2_{1_k}} + \\ & + 3.91 \cdot 10^{-3} x_{3_{k-1}} - 0.14 \mu_{2_{2_k}} + 0.63 \cdot 10^{-3} \mu_{3_{2_{k+1}}} - 7.10 \cdot 10^{-2} x_{4_{k-1}} + \\ & + 6.31 \cdot 10^{-2} \mu_{1_{3_k}} - 0.21 \mu_{3_{3_{k+1}}} + 0.83 x_{5_k} + 0.91 x_{6_{k-1}} \end{aligned}$$

Тр.узел №4

$$\begin{aligned} x_{5_{k+1}} = & -1.80 \cdot 10^{-2} + 0.79 \cdot 10^{-1} \mu_{1_{2_k}} - 0.82 \mu_{3_{1_{k+1}}} + 0.91 x_{3_{k-1}} - \\ & - 1.38 \cdot 10^{-2} \mu_{1_{2_k}} - 3.91 \cdot 10^{-2} \mu_{3_{2_{k+1}}} + 0.42 x_{2_{k-1}} + 2.63 \cdot 10^{-1} x_{2_k} - \\ & - 0.65 \mu_{4_k} + 0.90 x_{5_{k-1}} + 0.91 x_{5_k} \end{aligned}$$

Тр.узел №3

$$\begin{aligned} x_{4_{k+1}} = & -3.20 \cdot 10^{-2} + 0.86 \mu_{1_{2_{k+1}}} - 0.66 \mu_{3_{1_k}} + 0.64 x_{3_k} - \\ & - 3.06 \cdot 10^{-2} \mu_{3_{2_{k+1}}} + 0.21 x_{2_k} - 2.17 \cdot 10^{-2} \mu_{4_k} + 0.11 x_{3_k} + 0.27 x_{4_{k-1}} \end{aligned}$$

Тр.узел №2

$$\begin{aligned} x_{3_{k+1}} = & -1.47 \cdot 10^{-2} + 0.52 \mu_{1_{1_k}} + 0.58 \mu_{1_{1_{k+1}}} - 0.51 \mu_{2_{1_k}} + \\ & + 1.25 \mu_{3_{1_k}} - 0.34 \mu_{2_{1_{k+1}}} + 2.36 \mu_{3_{1_{k+1}}} + 0.27 x_{1_{k-1}} - \\ & - 0.71 \mu_{4_k} + 0.30 x_{1_k} + 0.34 x_{2_{k-1}} \end{aligned}$$

Тр.узел №1

$$\begin{aligned} x_{2_{k+1}} = & 2.08 \cdot 10^{-5} - 3.61 \mu_{2_{1_k}} - 0.47 \mu_{2_{1_{k+1}}} + 4.25 \mu_{3_{1_k}} + 3.55 \mu_{3_{1_{k+1}}} - \\ & - 1.63 \mu_{4_k} + 0.79 x_{2_k} + 0.56 x_{1_{k-1}} \end{aligned}$$

Выводы:

Задача исследования процессов в перевозочных системах требует, чтобы соблюдалось соответствие свойств системы и ее модели не на конечном, а на бесконечном множестве значений целевой функции. В таких случаях математическая модель должна приближаться к так называемой “физической” модели, отражающей действительные функциональные связи и взаимодействия в реальной системе. Необходимым условием этого приближения является ультраустойчивость (нечувствительность) математического описания по отношению к различным вариантам разбиения исходных данных на обучающую и проверочную последовательности.

Результаты представленной работы можно сформулировать следующим образом:

- показано, что МГУА является методом высокой точности решения задачи восстановления функции, описывающей транспортную систему в часы пик;
- поставлена и решена задача восстановления функции, заданной приближенно рядом экспериментальных точек;

- предложен новый критерий селекции;
- разработаны три метода идентификации процессов саморегуляции, основанные на принципах самоорганизации;
- предложен метод перспективной идентификации процессов трансформации групп автомобилей в транспортном потоке (без учета процессов смешивания, транспортных запаздываний).

Примечания:

1. Закураев А.Ф. Скоростная надземная трубопроводная система для перевозки пассажиров в мегаполисе. М.: Транспортное строительство, 2008.
2. Закураев А.Ф., Тахтамышев Х.М., Кидакоев М.М., Дауров Д.С. Проектирование нового вида транспортной артерии для больших городов и санаторно-курортных центров / Под. ред. А.Ф. Закураева. Невинномысск: изд-во НГГТИ, 2008. 181 с.
3. Зырянов В.В. Критерии оценки условий движения и модели транспортных потоков. Кемерово: Кузбасс. политех. ин-т, 1993. 164 с.
4. Ивахненко А.Г. Метод группового учёта аргументов – конкурент метода стохастической аппроксимации // Автоматика. 1968. № 3; Ивахненко А.Г. Открытие физических законов методом МГУА по критерию несмещённости // Автоматика. 1973. № 6.
5. Ивахненко А.Г., Дылбокова Д., Сиргиладзе Д., Чеберкус А. Глубина минимума критерия селекции как показатель достоверности // Автоматика. 1976. № 2.

City Transport System Modeling

¹Aslan F. Zakuraev

²Alexander I. Tkachev

¹ TCADI, Russia

4/6 Bakuninskaya Str., build.1, apart. 2 Moscow 127041, Russia

Dr. (Engineering), Professor

E-mail: aslanz@mail.ru

² Sochi State University, Russia

26a Sovetskaya Str., Sochi 354000

PhD (Engineering), Professor

E-mail: tkachev.sochi@yandex.ru

Abstract. The contribution is concerned with methods of transport system modeling, using the method of group consideration of arguments, identification of processes of automobiles groups transformation in traffic flow during its self-regulation and self-organization.

Keywords: principles of traffic flows self-organization, selection criteria, synthesis of models of optimal complexity, transport nodes models.

UDC
629.113