

УДК 519.872.7

*Илющенко Владимир Васильевич,**к.т.н., доцент кафедры «Электропривод и электрический транспорт»**ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»**Анпилогов Андрей Витальевич,**магистрант кафедры «Электропривод и электрический транспорт»**ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»**Пешков Даниил Евгеньевич,**магистрант кафедры «Электропривод и электрический транспорт»**ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»*

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НА ГОРОДСКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТРАНСПОРТЕ

Ilyushchenko V.V., Anpilogov A.V., Peshkov D.E.

SIMULATION GUEUING SYSTEMS IN URBAN ELECTRIC TRANSPORT

Аннотация. В данной работе проведен анализ моделей систем массового обслуживания применительно к транспортным системам, связанных с отысканием оптимальных пропорций между количественными значениями интенсивностей потоков обслуживания и тенденциями изменения различных факторов.

Ключевые слова: системы массового обслуживания, городской электрический транспорт, транспортные системы, имитационное моделирование.

Abstract. In this paper, the analysis of models of queuing systems in relation to transport systems, associated with finding the optimal proportions between the quantitative values of the intensities of service flows and trends in various factors.

Keywords: queuing systems, urban electric transport, transport systems, simulation modeling.

Введение

Повышение эффективности услуг городского электрического транспорта предполагает решение совокупности взаимосвязанных задач, многие из которых можно отнести к задачам более высокого уровня, так как они выходят за рамки узко транспортных проблем [1]. При этом процесс оптимизации заключается в нахождении соотношений, связанных с функционированием транспортных систем. Например, это могут быть соотношения балансового типа, в которых количественные значения учитываемых факторов связаны функциональными зависимостями; соотношения, описывающие динамику изменения факторов во времени или экономических показателей при изменении количественных значений факторов и т. д.

Существенная часть моделей на транспорте строится на основе теории систем массового обслуживания. Системы массового обслуживания (СМО) предназначены для выполнения потока заявок или требований, поступивших на их вход в случайные моменты времени. На общественном транспорте моделируется движение

пассажира, а не транспортных средств [2]. При проведении исследования использовалась студенческая версия системы GPSS World [3].

Развитие реформирования рынка транспортных услуг предполагает под собой либерализацию рынка, то есть облегчение выхода на рынок и разрешение конкуренции. Отсутствие регулирования изменило набор транспортных услуг, имеющихся в большинстве городов. Большинство транспортных маршрутов (ТМ) городского электрического транспорта (ГЭТ) дублировано другими видами транспорта.

Например, необходимо определить производительность ТМ троллейбуса, дублированного полностью или частично ТМ автобуса. Для решения этой задачи напрямую понадобится довольно сложная и дорогая модель, выполненная в одном из универсальных пакетов имитационного моделирования [4]. Однако возможно решить задачу более простым способом, если разложить ее на отдельные составляющие [5]:

1. Определить общее число потенциальных пассажиров, которых может перевезти ТМ троллейбуса.

2. Определить примерное количество транспортных средств (ТС), необходимых для перевозки потенциальных пассажиров.

3. Определить точное количество ТС, необходимых для перевозки потенциальных пассажиров.

Для этого понадобится выполнить три имитационных модели:

1. Модель параллельно работающих разомкнутых СМО с отказами и одним источником поступления заявок. Модель предназначена для определения общего числа потенциальных пассажиров, которых может перевести ТМ троллейбуса, например, в течение двух рабочих смен.

2. Модель многоканальной разомкнутой СМО с отказами. Модель предназначена для определения примерного количества ТС, необходимых для перевозки общего числа потенциальных пассажиров.

3. Модель одноканальной замкнутой СМО с ожиданием. Модель предназначена для определения точного количества ТС и количества совершенных рейсов, необходимых для перевозки потенциальных пассажиров, с учетом производительности ТМ.

Алгоритмы работы моделей представлены на рис. 1.

Моделирование СМО дублированного ТМ с отказами

Например, на остановочные пункты ТМ ГЭТ дублированного другими видами транспорта прибывает в 1 час 300 пассажиров, т. е. 5 пассажиров в мин. Таким образом, интенсивность потока $\lambda = 1/5 = 0,2$ пассажира в мин. Если пассажир не успел совершить посадку на технические средства ТМ ГЭТ, он уезжает другим видом транспорта. Необходимо определить производительность данного транспортного маршрута. Пассажиры на всех видах транспорта по данному транспортному маршруту обслуживаются от 5 до 70 минут. Интервалы времени между поступлением заявок имеют экспоненциальное распределение со средним значением $\lambda=1/5 = 0,2$, что соответствует реальным условиям. При использовании метода имитационного моделирования для городского пассажирского, и в частности, электрического транспорта интенсивность потока обслуживания μ можно принять с равномерным законом поступления требований на обслуживание, поскольку ТС двигаются по расписанию. Среднее значение потока обслуживания одного пассажира в каждом канале $\mu = 0,22$ мин. Аналитическим методом подобная задача решена в работах [6, 7, 8].

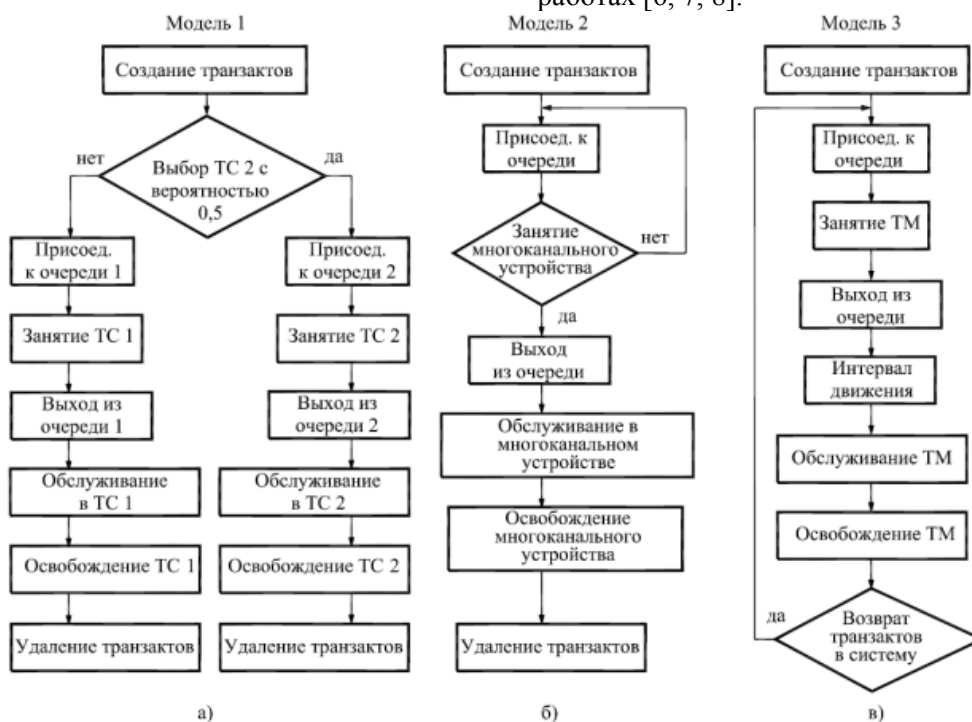


Рисунок - 1. Алгоритмы работы моделей СМО ТМ троллейбуса, дублированного другими видами транспорта: а) модель параллельно работающих разомкнутых СМО с отказами и одним источником поступления заявок, б) модель многоканальной разомкнутой СМО с отказами, в) модель одноканальной замкнутой СМО с ожиданием

Рассмотрим построение имитационной модели. В блоке TRANSFER зададим частоту перехода на блок с меткой Tr11_2 – 0.5. Таким образом, потенциальный пасса-

жир с равной вероятностью может выбрать для поездки либо троллейбус, либо автобус [2].

```

;GPSS File                               SMO s otkazami.GPS
*      Моделирование СМО дублированного ТМ с отказами
GENERATE (Exponential(1,0,0.2))          ; прибытие пассажиров
TRANSFER 0.5,Avt1_1,Tr11_2              ; выбор первого прибывшего ТС
*      Моделирование работы автобусного маршрута
Avt1_1  QUEUE  Och1                      ; присоединение к очереди 1
SEIZE   Avt1   ; вход в ТС 1
DEPART  Och1   ; выход из очереди 1
ADVANCE 0.22   ; обслуживание 1
RELEASE Avt1   ; освобождение ТС 1
TERMINATE ; пассажир покидает систему
*      Моделирование работы троллейбусного маршрута
Tr11_2  QUEUE  Och2                      ; присоединение к очереди 2
SEIZE   Tr12   ; вход в ТС 2
DEPART  Och2   ; выход из очереди 2
ADVANCE 0.22   ; обслуживание 2
RELEASE Tr12   ; освобождение ТС 2
TERMINATE ; пассажир покидает систему
*      Задание параметров моделирования
GENERATE 960 ; 2 рабочих смены, 16 часов
TERMINATE 1 ; останов моделирования
    
```

В результате моделирования получен следующий отчет:

Таблица 1

Результаты моделирования при $\mu = 0,22$

Метка	Аналитический метод	Имитационный метод	
	Коэффициент использования	UTIL.	ENTRIES
Avt_1	0,52	0,537	2345
Tr1_2	0,48	0,529	2309

Например, модель показала более высокий показатель использования канала с меткой Tr11_2 (троллейбус) – UTIL.(0.529), т. е. будет перевезено 53 % потенциальных пассажиров, а не 47 % как в аналитической модели, что связано с использованием экспоненциального закона распределения заявок. Кроме того, в показателе ENTRIES (число входов), стало известно примерное количество пассажиров, которые могут быть обслужены троллейбусным ТМ в те-

чение 2 рабочих смен – 2309 человек. Если изменить условия задачи в соответствии с аналитической моделью и увеличить вероятность выбора потенциальными пассажирами в качестве средства передвижения троллейбуса (TRANSFER 0.75, Avt1_1, Tr11_2). Например, увеличивая частоту перехода транзакта на блок с меткой Tr11_2 – 0,75 можно имитировать увеличение количества транспортных средств (троллейбусов), работающих на маршруте (см. табл. 2).

```

;GPSS File                               SMO s otkazami.GPS
*      Моделирование СМО дублированного ТМ с отказами
GENERATE (Exponential(1,0,0.2))          ; прибытие пассажиров
TRANSFER 0.75,Avt1_1,Tr11_2              ; выбор первого прибывшего ТС
    
```

Результаты моделирования при $\mu = 0.44$

Метка	Аналитический метод	Имитационный метод	
	Коэффициент использования	UTIL.	ENTRIES
Avt_1	0,32	0,273	1191
Trl_2	0,68	0,793	3463

В этом случае модель также показала более высокий показатель использования канала с меткой Trl1_2 (троллейбус) – UTIL.(0,793), т. е. будет перевезено 79 % потенциальных пассажиров, а не 68 % как в аналитической модели. В показателе ENTRIES (число входов) изменилось количество потенциальных пассажиров – 3463 человека.

Моделирование многоканальной СМО с отказами

Решение поставленной задачи аналитическим методом представляется затруднительным. Поэтому ограничимся использованием только имитационного метода. После моделирования из отчета (см. табл. 3) видно, что коэффициент использования каждого из трех троллейбусов 100 % (UTIL. 1.000, 1.000, 1.000). Однако значительное число потенциальных пассажиров отказались от обслуживания на остановочных пунктах (DELAY 2829). Общее число перевезенных пассажиров – 1884 человека, при

возможном числе потенциальных пассажиров – 2309 человек. Изменим в модели число троллейбусов, находящихся на маршруте до четырех. После моделирования получаем отчет (см. табл. 4). В данном случае модель имеет вполне удовлетворительные показатели по качеству обслуживания, коэффициент использования каналов при этом остается очень высоким (UTIL. 1.000, 1.000, 0.999, 0.999), хотя и несколько снизился. При этом все еще значительное число потенциальных пассажиров отказались от обслуживания на остановочных пунктах (DELAY 1372). Общее число пассажиров, которые могут быть обслужены в случае увеличения количества ТС на маршруте - 3340 человек, при возможном числе потенциальных пассажиров – 2309 человек. Чтобы полностью покрыть потребности пассажиропотока, попробуем изменить количество троллейбусов, находящихся на маршруте до пяти. После моделирования получим отчет (см. табл. 5).

Представление имитационной модели:

```

;GPSS File          SMO_3_1.GPS
* Моделирование трехканальной разомкнутой СМО
OST STORAGE 3
GENERATE (Exponential(1,0,0.2)) ; прибытие пассажиров
ENTER OST ; присоединение к очереди
TRANSFER ALL,TRL1,TRL3,3 ; выбор троллейбуса 1,2,3
TRL1 SEIZE CAN1 ; вход в троллейбус 1
ASSIGN 1,CAN1
TRANSFER ,GO
SEIZE CAN2 ; вход в троллейбус 2
ASSIGN 1,CAN2
TRANSFER ,GO
TRL3 SEIZE CAN3 ; вход в троллейбус 3
ASSIGN 1,CAN3
GO LEAVE OST ; выход из очереди
ADVANCE 1.53 ; обслуживание
RELEASE P1
TERMINATE
* Задание параметров моделирования
GENERATE 960 ; 2 рабочих смены, 16 часов
TERMINATE 1 ; останов моделирования
    
```

Таблица 3

Результаты моделирования при числе каналов – 3

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	DELAY
CAN1	628	1,000	0
CAN2	628	1,000	0
CAN3	628	1,000	0
STORAGE	1887	0,999	2829

Таблица 4

Результаты моделирования при числе каналов - 4

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	DELAY
CAN1	835	1,000	0
CAN2	835	1,000	0
CAN3	835	0,999	0
CAN4	835	0,999	0
STORAGE	3344	0,998	1372

Таблица 5

Результаты моделирования при числе каналов - 5

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	DELAY
CAN1	989	0.948	0
CAN2	977	0.935	0
CAN3	954	0.914	0
CAN4	917	0.879	0
CAN5	877	0.840	0
STORAGE	4716	0.433	0

Таким образом, пять троллейбусов обеспечивают 100 % перевозку потенциальных пассажиров при заданной интенсивности потока заявок, однако загрузка троллейбусов при этом снижается.

Моделирование одноканальной СМО с ожиданием

Примером СМО с ожиданием для городского электрического транспорта может служить транспортный маршрут без дублирования другими видами транспорта. В нашей задаче это ТМ с работающими на нем транспортными средствами. Будут обслуживаться 100 % ТС, поэтому понятия относительной и абсолютной пропускной способности теряют смысл [8].

Содержательное описание объекта моделирования остается прежним. Задача моделирования заключается в том, чтобы определить точное количество ТС, необходимых для перевозки потенциальных пассажиров. Для этого необходимо знать номинальную вместимость ТС, время обслуживания (движения по маршруту) одного троллейбуса,

интервал движения между троллейбусами.

Указываемая в технических характеристиках номинальная вместимость троллейбуса, в зависимости от типа составляет до 90 человек. Средняя загрузка, в зависимости от типа составит до 45 человек. Для того чтобы обслужить 2309 пассажиров потребуется выполнить около 50 рейсов ($2309/45=51,3$). С учетом того, что каждый троллейбус может выполнить в течение двух рабочих смен не более $960/70(+10)=12\pm 1$ рейсов, понадобится $51,3/12\pm 1=3,9...4,3$ от трех до пяти ТС. Время обслуживания одного троллейбуса $t_{об} = 70 \pm 5$ мин, интервалов движения 10 ± 2 мин.

Выполним имитационную модель. После моделирования получим отчет (см. табл. 6). Модель продемонстрировала работу трех троллейбусов за 960 минут модельного времени. За указанное время число выполненных рейсов равно 36, среднее время интервала движения троллейбусов – 9,966 мин., загрузка транспортного маршрута 37,4 %.

Представление имитационной модели:

;GPSS File		SMO s ogidaniem	
* Моделирование замкнутой СМО с ожиданием			
	GENERATE ...3		; количество транспортных средств
OST	QUEUE	OCH	; конечная остановка
	SEIZE	TRL	; вход в троллейбус
	DEPART	OCH	; выход на маршрут
	ADVANCE	10,2	; интервал движения
	RELEASE	TRL	; выход из троллейбуса
	ADVANCE	70,5	; обслуживание
	TRANSFER	.OST	; возврат на конечную остановку
	GENERATE	960	; 2 рабочих смены, 16 часов
	TERMINATE	1	; останов моделирования

Таблица 6

Результаты моделирования при числе ТС - 3

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME
TRL	36	0,374	9,966

На маршруте работают четыре троллейбуса. Получаем отчет:

Таблица 7

Результаты моделирования при числе ТС - 4

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME
TRL	48	0,499	9,982

Число выполненных рейсов равно 48, среднее время интервала движения троллейбусов – 9,982 мин., загрузка транспортного маршрута 49,9%.

На маршруте работают пять троллейбусов. Получаем отчет:

Таблица 8

Результаты моделирования при числе ТС - 5

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME
TRL	60	0,616	9,861

Число выполненных рейсов равно 60, среднее время интервала движения троллейбусов – 9,861 мин., загрузка транспортного маршрута 61,6 %.

Исходя из полученных расчетных данных можно сделать следующий вывод, что ТМ используется с номинальной загрузкой 61,6% при одновременной работе пяти троллейбусов, но в этом случае возрастет объем затрат на энергию, материалы и заработную плату работникам. Увеличить производительность ТС возможно только в случае увеличения интенсивности потока заявок на маршруте [9].

Заключение

Поскольку до сих пор сохраняется устойчивый спрос на услуги, предоставляемые предприятиями ГЭТ, необходимо оптимизировать работу данных организаций и всей смежной к этой отрасли инфраструктуры. Существенное влияние ГЭТ отражается как на эффективности экономики городов в целом, так и на реализацию социальных функций. Надежная система ГЭТ всегда была и

поныне остается основным фактором социально-политической стабильности.

Общественный городской транспорт является важнейшей частью городского хозяйства, так как от его четкой, бесперебойной работы зависят эффективность и качество работы почти всех отраслей народного хозяйства. Наличие и степень развития общественного транспорта определяют возможность нормальной жизнедеятельности города. Стабильное развитие пассажирского транспорта определяется необходимостью организации ритмичной и бесперебойной перевозки населения к центрам тяготения, уменьшая время ожидания, рост скоростей сообщения, комфортабельность, безопасность и техническую эстетику при одновременном снижении себестоимости перевозок.

Троллейбус имеет все преимущества электротранспорта: экологическая чистота, непрерывный плавный разгон и торможение, бесшумность, сравнительно невысокие эксплуатационные затраты. Эксплуатируются

при пассажиропотоках 2 - 2,5 тыс. пассажиров в час пик в одном направлении.

Разработанные модели предоставляют возможности для оценки отдельных экономических показателей предприятий ГЭТ без значительных финансовых затрат, кроме то-

го, имеются предпосылки для расширения этих возможностей. Дальнейшее развитие математических моделей таких транспортных систем позволит более точно определять эффективность работы предприятий общественного пассажирского транспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бакаев А.А.** Экономико-математические модели планирования и проектирования транспортных систем. – Киев: Техника, 1973. – 87 с.
2. **Горев А.Э.** Основы теории транспортных систем. – СПб.: СПбГАСУ, 2010. – 214 с.
3. **Кудрявцев Е.М.** GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 320 с.
4. **Триппель А.А., Ротарь В.Г.** Моделирование процесса перевозок пассажиров городским электротранспортом // Проблемы экономики и менеджмента. Научно-практический журнал. № 6 (10) – 2012. С.68-70.
5. **Pyushchenko V. V.** Simulation of the Profit from Urban Electrical Transport Services. - 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-5.
6. **Илющенко В.В., Арефьев В.Л.** Одноканальные системы массового обслуживания с отказами на городском электротранспорте // Техника – экономические проблемы развития регионов: материалы научно-практической конференции с международным участием (г. Иркутск 13-14 декабря 2017г.) Иркутск, 2017. Выпуск 19.С.101-104.
7. **Илющенко В.В., Белоусов И.В.** Моделирование многоканальной системы управления на городском электротранспорте // Техника – экономические проблемы развития регионов: материалы научно-практической конференции с международным участием (г. Иркутск 13-14 декабря 2017г.) Иркутск, 2017. Выпуск 19.С.98-101.
8. **Илющенко В.В., Манашов Р.С.** Применение систем массового обслуживания с ожиданием на городском электротранспорте // Техника – экономические проблемы развития регионов: материалы научно-практической конференции с международным участием (г. Иркутск 13-14 декабря 2017г.) Иркутск, 2017. Выпуск 19.С.95-98.
9. **Кийкова Е.В., Лаврушина Е.Г.** Моделирование систем. Практикум. – Владивосток: ВГУЭС, 2017. – 100 с.