

# Сравнение результатов аналитического расчёта и имитационного моделирования транспортных систем

Тун Мин У, Лупин С.А.

**Аннотация**— Проведены исследования, позволяющие сравнить результаты аналитического расчёта и имитационного моделирования транспортных систем. Получены данные, показывающие, что моделирование дает результаты, более точно описывающие реальную транспортную систему, а, следовательно, позволяющие принять более обоснованное решение о вариантах модернизации системы общественного транспорта. На примере организации автобусных маршрутов в центральном районе Янгона, показана перспективность замены беспересадочной радиальной схемы движения на вариант с пересадками на кольцевой линии. Такое решение приведет не только к снижению времени ожидания пассажиров, но и улучшит транспортную ситуацию в историческом центре города, где использование других вариантов крайне ограничено. При проведении исследований использована гибридная модель, созданная в среде Anylogic и сочетающая агентный и дискретно-событийный подходы, а также инструментарий работы с ГИС-картами.

**Ключевые слова**— аналитический расчёт; имитационное моделирование; общественный транспорт; Anylogic.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Рассматривая тенденции развития современного общества можно увидеть их противоречивый характер. Если в одних странах рождаемость, а вместе с ней и численность населения неуклонно снижаются, то в других наблюдается противоположная тенденция – рост числа жителей. В целом, население нашей планеты неуклонно увеличивается. При этом продолжается процесс концентрации людей в крупных агломерациях. Население мегаполисов растет даже более быстрыми темпами, чем население Земли. Проблемы снабжения ресурсами жителей крупных городов и обеспечение их связности между собой достаточно успешно решаются путём строительства сверхскоростных автомобильных и железнодорожных магистралей. Но транспортная ситуация внутри мегаполисов становится все более сложной.

До определенного момента государства не пытались ограничивать количество частных машин, однако это привело к тому, что транспортные пробки стали неотъемлемой частью городского ландшафта. И сегодня проблема совершенствования городской транспортной инфраструктуры является едва ли не самой острой.

Конечно, в разных странах подходы к её решению отличаются, но основные надежды связывают с

процессом вытеснения личного транспорта из наиболее проблемных городских районов.

Пассажиры при этом смогут пользоваться услугами общественного транспорта (ОТ) [1]. Столь кардинальные изменения не должны сказываться на качестве обслуживания пассажиров. Это значит, что время перемещения между отдельными пунктами в городе на общественном и личном транспорте не должно сильно отличаться. С учетом постоянных пробок и отсутствием свободных парковочных мест, уже сегодня в центре Москвы большинство людей предпочитает пользоваться общественным транспортом, но это относится в первую очередь к метрополитену, который обеспечивает предсказуемость времени поездок.

К сожалению, наземный транспорт такой возможностью не обладает и многочисленные попытки найти некоторое универсальное решение, обеспечивающее ритмичность движения автобусов успеха не имели. Но острота проблемы делают ее чрезвычайно актуальной, поэтому и интерес к её решению у исследователей не снижается.

В мегаполисах со сложившейся дорожной инфраструктурой, особенно в зонах исторической застройки, количество вариантов ее совершенствования весьма ограничено. В качестве одного из основных сегодня рассматривают использование специальных полос, выделенных только под движение общественного транспорта [2], но и он доступен только на относительно широких улицах. При таких ограничениях возрастает роль систем управления потоками транспорта, особенно это касается планирования движения автобусов. В работе проводится сравнение двух подходов к совершенствованию алгоритмов работы систем управления. Первый опирается на аналитический расчет, а второй на моделирование. При этом общественный транспорт рассматривается как система массового обслуживания (СМО), где запросы формируются потоками пассажиров, а транспортные единицы являются исполнительными элементами.

## II. СВЯЗАННЫЕ РАБОТЫ

Кратко рассмотрим некоторые исследования, направленные на совершенствование систем управления общественным транспортом.

Интересный подход описан в работе [3], он предлагает систему обеспечения безопасности городского дорожного движения на основе технологий распознавания и визуализации результатов дорожной

аналитики с помощью программно-аппаратного комплекса WAYMARK и геоинформационной системы. Дорожные объекты переносятся на электронные карты, которые возможно редактировать и настраивать, и таким образом обеспечивается решение управленческих задач. Сегодня подобные функции есть даже в простейших видеорегистраторах.

Авторы работы [4] представили анализ транспортных потоков в Московской агломерации, используя интегрированную среду разработчика TRANSNET. Концепция «обобщенной цены» передвижения в качестве критерия оценки, позволяет сравнивать альтернативные пути движения между собой, а так же учитывать влияние различных факторов на оптимальный маршрут. Подобная модель применима для крупных городов или городских агломераций и современные навигаторы в полной мере реализуют такой функционал.

В работе [5] предложены методы исследования эффективности управляющих систем для планирования работы ОТ в условиях конкуренции. Представлена модель, созданная в среде Anylogic для анализа эффективности различных стратегий и выбора из них оптимальной. Дополнение модели инструментарием работы с ГИС-картами позволяет получить максимальное приближение к реальным условиям работы системы ОТ.

Для проведения сравнительного анализа результатов аналитических расчетов с результатами моделирования в среде AnyLogic построена модель, сочетающая агентную и дискретно-событийную парадигмы. Комбинация в рамках одной модели разных методов позволяет сделать ее адекватной отображаемой действительности [6, 7].

### III. ГРАФОВАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

В качестве объекта исследования будем использовать реальный фрагмент транспортной инфраструктуры города Янгон, Мьянма.

В центре Янгона, как и во всех крупных городах, движение транспорта крайне затруднено, поэтому поиск новых вариантов организации общественного транспорта является важнейшей задачей [8, 9].

Дорожная сеть на рисунке 1 полностью соответствует центральному району города, в котором расположены многочисленные исторические объекты.

На карте отмечены восемь автобусных остановок (BS1-BS8), расположение которых соответствует реальности. Конечно, таких остановок в Янгоне намного больше, но для проведения сравнительного анализа методов моделирования этого количества вполне достаточно.

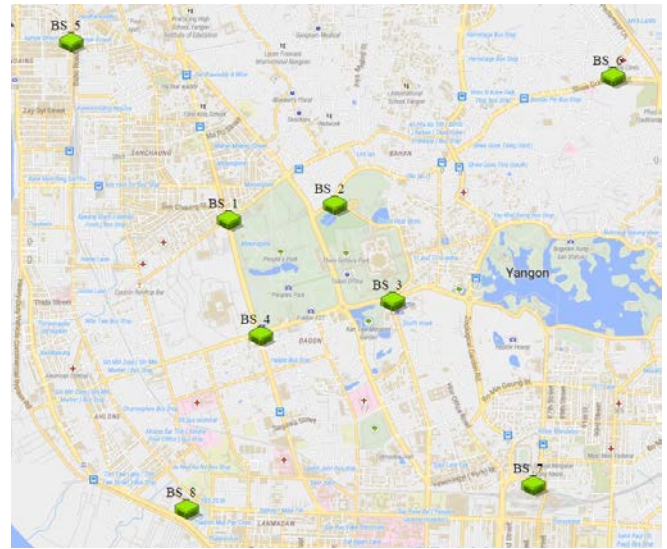


Рис. 1 Фрагмент ГИС-карты центра Янгона

Для проведения аналитического расчета представим транспортную сеть в виде направленного графа (Рис.2). Такой подход является традиционным и опирается на развитый аппарат теории графов.

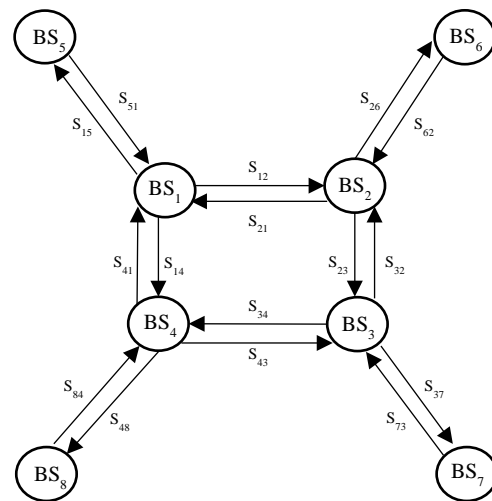


Рис. 2 Графовая модель транспортной сети

Отметим, что использование направленного графа необходимо только в том случае, когда маршруты движения автобусов в прямом и обратном направлениях не совпадают.

На следующем этапе необходимо определить расстояния между всеми остановками в сети или задать матрицу расстояний. Простейший способ заключается в вычислении кратчайшего расстояния между ними, для чего мы использовали инструментарий ГИС-карт [10]. Полученные результаты отражены в Таблице 1. Матрица симметрична и не позволяет отобразить разницу между прямым и обратным маршрутами автобусов.

ТАБЛИЦА 1. КРАТЧАЙШИЕ РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ОСТАНОВКАМИ, (КМ)

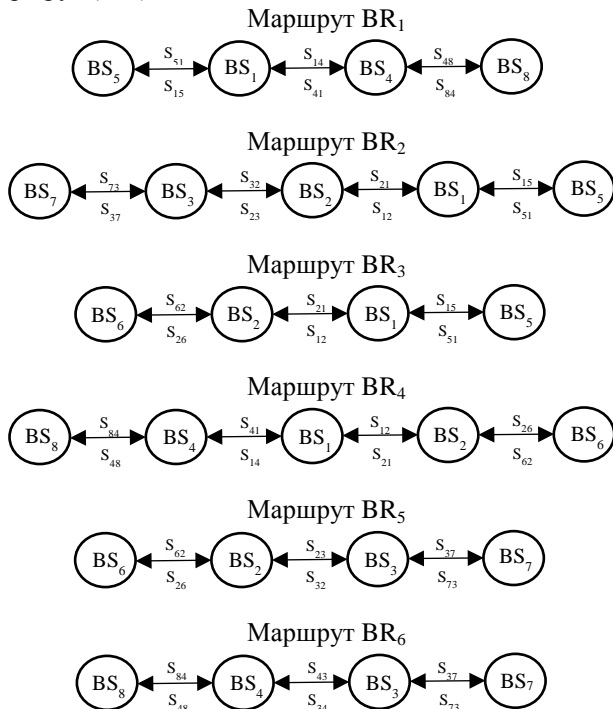
	$BS_1$	$BS_2$	$BS_3$	$BS_4$	$BS_5$	$BS_6$	$BS_7$	$BS_8$
$BS_1$	-	0.87	1.79	0.98	1.94	3.36	3.68	2.52
$BS_2$		-	0.92	1.85	2.81	2.49	2.81	3.39
$BS_3$			-	1.11	3.73	3.41	1.89	2.65
$BS_4$				-	2.92	4.34	3	1.54
$BS_5$					-	5.3	5.62	4.46
$BS_6$						-	5.3	5.88
$BS_7$							-	4.54
$BS_8$								-

ТАБЛИЦА 2. РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ОСТАНОВКАМИ С УЧЕТОМ ДОРОГ, (КМ)

	$BS_1$	$BS_2$	$BS_3$	$BS_4$	$BS_5$	$BS_6$	$BS_7$	$BS_8$
$BS_1$	-	1.52	2.21	1.35	3.12	3.67	4.83	3.79
$BS_2$	1.56	-	1.28	2.43	3.29	2.73	3.89	4.86
$BS_3$	3.54	2.62	-	2.65	6.32	3.63	2.61	5.09
$BS_4$	1.92	1.77	1.14	-	4.72	4.08	3.75	3.48
$BS_5$	2.72	3.59	4.28	3.70	-	5.73	6.90	4.17
$BS_6$	4.00	2.74	3.12	4.27	5.72	-	5.07	6.70
$BS_7$	4.65	3.72	2.61	3.75	7.42	4.73	-	3.81
$BS_8$	3.49	4.26	3.63	2.53	4.17	6.58	3.26	-

Наши предыдущие исследования [10] показали, что такие модели не могут обеспечить точность оценок, поэтому мы используем более сложную матрицу расстояний (Табл. 2). Её элементы учитывают реальные маршруты движения транспорта.

На следующем этапе следует определить маршруты движения автобусов. В рассматриваемом примере существующая радиальная беспересадочная схема движения включает шесть маршрутов, представленных ниже. Отметим, что беспересадочная схема, предполагает, что между любыми двумя остановками существует как минимум один беспересадочный маршрут (WT).

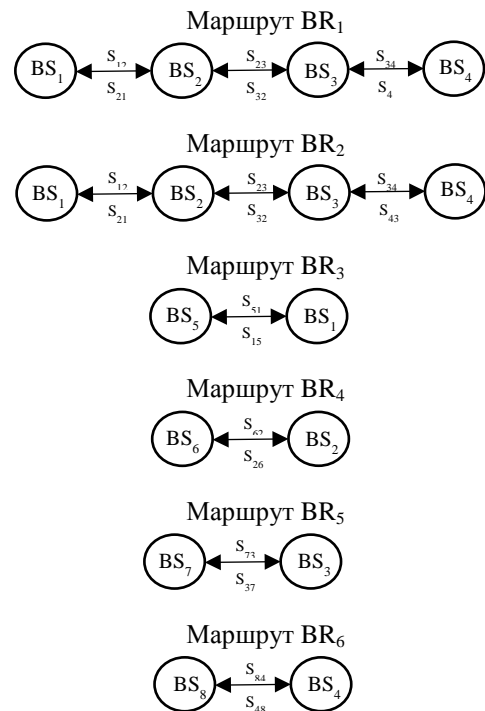


Параметры автобусных маршрутов для схемы WT – интервалы ( $T_{инт}$ ) и интенсивность движения ( $\lambda$ ) приведены в Таблице 3. В графе  $T_{ост}$  показано суммарное время задержки на всех остановках маршрута.

ТАБЛИЦА 3. ПАРАМЕТРЫ МАРШРУТОВ (WT)

	$L$ (км)	$T_{ост}$ (мин)	$T_{инт}$ (мин)	$\lambda$ (1/час)
$BR_1$	15.14	12	32,2	1,875
$BR_2$	18.03	16	40,1	1,496
$BR_3$	14.39	12	31,2	1,923
$BR_4$	17.85	16	39,8	1,507
$BR_5$	14.58	12	31,5	1,905
$BR_6$	15.01	12	32	1,875

В качестве альтернативы радиальной схеме движения рассмотрим радиально-кольцевую. Этот вариант (TR) предполагает необходимость пересадок для некоторых остановок.



Параметры автобусных маршрутов для схемы TR – приведены в Таблице 4.

ТАБЛИЦА 4. ПАРАМЕТРЫ МАРШРУТОВ (TR)

	$L$ (км)	$T_{ост}$ (мин)	$T_{инт}$ (мин)	$\lambda$ (1/час)
$BR_1$	7.38	8	17,9	3,35
$BR_2$	7.38	8	17,9	3,35
$BR_3$	5.84	4	11,8	5,08
$BR_4$	5.47	4	11,3	5,31
$BR_5$	5.22	4	11	5,45
$BR_6$	6.01	4	12	5,0

При расчете параметров маршрутов использовались следующие соотношения:

$$T_{инт} = 2 \cdot L / V \tag{1}$$

$$\lambda = 60 / T_{инт} \tag{2}$$

Здесь  $L$  – длина маршрута (км),  $V$  – скорость движения автобусов (км/час),  $\lambda$  – интенсивность движения (1/час).

IV. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ

Проведем аналитический расчёт параметров транспортной системы (ТС), опираясь на базовые понятия теории вероятностей. Если скорость движения транспорта ( $V$ ) является постоянной величиной, то основным критерием эффективности ТС, как системы массово обслуживания, будет время задержки обслуживания. В нашем случае это время ожидания пассажиров -  $T_W$ .

Расчёты проводились для следующих условий:

1. Скорость движения автобусов на всех маршрутах одинакова и составляет 45 км/час.
2. На всех маршрутах автобусы не делают длительных остановок на конечных станциях.
3. Время посадки и высадки пассажиров ( $T_{ост}$ ) не зависит от их количества и составляет 2 минуты.
4. При наличии нескольких альтернативных маршрутов, пассажир выбирает тот, автобус которого раньше появится на остановке.
5. Транспортные пробки и возможные поломки автобусов не учитываются.
6. Количество автобусов в схемах **WT** и **TR** совпадает и равно шести.
7. Ситуации возможного переполнения автобусов (отказа в обслуживании) не учитываются.

Расчетные соотношения:

$$T_{инт} = 2 \cdot \lambda \quad (3)$$

$$T_W = T_{инт}/2. \quad (4)$$

При наличии альтернативных маршрутов:

$$\lambda = \lambda_{\Sigma} = \sum \lambda_i. \quad (5)$$

Результаты расчётов для схем **WT** и **TR** и всех вариантов перемещения пассажиров представлены в таблицах 5 и 6 соответственно. Отметим, что при аналитическом расчёте, время задержки пассажиров при движении в прямом и обратном направлениях совпадают. В таблицах заполнены все ячейки для удобства последующего сравнения с результатами моделирования.

Таблица 5. Расчёт  $T_w$  для схемы **WT** (мин)

От	До							
	$BS_1$	$BS_2$	$BS_3$	$BS_4$	$BS_5$	$BS_6$	$BS_7$	$BS_8$
$BS_1$	-	6.1	20.1	8.9	5.7	8.7	20.1	8.9
$BS_2$	6.1	-	8.8	19.9	8.8	5.6	8.8	19.9
$BS_3$	20.1	8.8	-	16	20.1	15.8	5.7	16
$BS_4$	8.9	19.9	16	-	16.1	19.9	16	5.7
$BS_5$	5.7	8.8	20.1	16.1	-	15.6	20.1	16.1
$BS_6$	8.7	5.6	15.8	19.9	15.6	-	15.8	19.9
$BS_7$	20.1	8.8	5.7	16	20.1	15.8	-	16
$BS_8$	8.9	19.9	16	5.7	16.1	19.9	16	-

Таблица 6. Расчёт  $T_w$  для схемы **TR** (мин)

От	До							
	$BS_1$	$BS_2$	$BS_3$	$BS_4$	$BS_5$	$BS_6$	$BS_7$	$BS_8$
$BS_1$	-	4.5	4.5	4.5	5.9	10.1	10	10.5
$BS_2$	4.5	-	4.5	4.5	10.4	5.7	10	10.5
$BS_3$	4.5	4.5	-	4.5	10.4	10.1	5.5	10.5
$BS_4$	4.5	4.5	4.5	-	10.4	10.1	10	6

$BS_5$	5.9	10.4	10.4	10.4	-	16.1	15.9	16.4
$BS_6$	10.1	5.7	10.1	10.1	16.1	-	15.7	16.2
$BS_7$	10	10	5.5	10	15.9	15.7	-	16
$BS_8$	10.5	10.5	10.5	6	16.4	16.2	16	-

Таблица 7. Сравнение **WT** и **TR** схем движения ( $T_w$ , расчёт)

От	BR	До							
		$BS_1$	$BS_2$	$BS_3$	$BS_4$	$BS_5$	$BS_6$	$BS_7$	$BS_8$
$BS_1$	WT		6.1	20.1	8.9	5.7	5.7	20.1	8.9
	TR		4.5	4.5	4.5	5.9	5.9	10	10.5
$BS_2$	WT	6.1		8.8	19.9	8.8	5.6	8.8	19.9
	TR	4.5		4.5	4.5	10.4	5.7	10	10.5
$BS_3$	WT	20.1	8.8		16	20.1	15.8	5.7	16
	TR	4.5	4.5		4.5	10.4	10.1	5.5	10.5
$BS_4$	WT	8.9	19.9	16		16.1	19.9	16	5.7
	TR	4.5	4.5	4.5		10.4	10.1	10	6
$BS_5$	WT	5.7	8.8	20.1	16.1		15.6	20.1	16.1
	TR	5.9	10.4	10.4	10.4		16.1	15.9	16.4
$BS_6$	WT	5.7	5.6	15.8	19.9	15.6		15.8	19.9
	TR	5.9	5.7	10.1	10.1	16.1		15.7	16.2
$BS_7$	WT	20.1	8.8	5.7	16	20.1	15.8		16
	TR	10	10	5.5	10	15.9	15.7		16
$BS_8$	WT	8.9	19.9	16	5.7	16.1	19.9	16	
	TR	10.5	10.5	10.5	6	16.4	16.2	16	

Полученные параметры позволяют сравнить эффективность двух схем движения транспорта. Для наглядности данные собраны в таблицу 7.

Минимальные значения для каждой пары остановок выделены зеленым цветом. Для близких значений преимущество не определялось.

В качестве основного критерия, характеризующего качество систем ОТ, при сравнении мы используем время задержки обслуживания или время ожидания пассажиров ( $T_w$ ).

Схема **TR** демонстрирует значительное преимущество по сравнению с действующим вариантом **WT**. Снижение времени ожидания наблюдается на подавляющем большинстве остановок (максимально в 4 раза), при этом ухудшение составляет не более 10%.

V. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

А теперь посмотрим, какие результаты даст моделирование. Отметим, что были исследованы те же варианты маршрутов и их параметры, что и в случае аналитического расчёта. Результаты моделирования для варианта **WT** показаны в таблице 8, а для варианта **TR** в таблице 9. Полученные данные собраны в таблицу 10.

Таблица 8. Результаты моделирования,  $T_w$  для схемы **WT** (мин)

От	До							
	$BS_1$	$BS_2$	$BS_3$	$BS_4$	$BS_5$	$BS_6$	$BS_7$	$BS_8$
$BS_1$	-	7.4	20.1	14.5	7	11.8	20.1	14.5
$BS_2$	7.4	-	14.1	19.9	10.2	12	14.1	19.9
$BS_3$	20.1	11.8	-	16	20.1	15.7	13.7	16
$BS_4$	11.6	19.9	16	-	16.1	19.9	16	7
$BS_5$	6.9	9.9	20	15.9	-	15.5	20	15.9
$BS_6$	12.7	12.4	15.6	19.7	15.5	-	15.6	19.7
$BS_7$	19.9	12.9	12.8	16	19.9	15.8	-	16
$BS_8$	13	19.8	16	7.2	16.1	19.8	16	-

Таблица 9. Результаты моделирования,  $T_w$  для схемы **TR** (мин)

От	До							
	$BS_1$	$BS_2$	$BS_3$	$BS_4$	$BS_5$	$BS_6$	$BS_7$	$BS_8$

$BS_1$	-	4.5	4.5	4.5	5.8	10.2	10.1	12.6
$BS_2$	4.9	-	4.9	4.9	11.5	5.6	10	12.1
$BS_3$	4.7	4.7	-	4.7	11.4	10.3	5.6	12
$BS_4$	5	5	5	-	11.4	10.4	9.5	6.2
$BS_5$	6	9.5	9.5	9.5	-	14.9	14.2	17.1
$BS_6$	10.4	5.6	10.4	10.4	18.6	-	15.2	17.9
$BS_7$	10.3	10.3	5.3	10.3	16.9	16.4	-	17.9
$BS_8$	9.3	9.3	9.3	6	15.5	15.9	13.3	-

ТАБЛИЦА 10. СРАВНЕНИЕ **WT** И **TR** СХЕМ ДВИЖЕНИЯ ( $T_w$ , МОДЕЛЬ)

От	BR	До							
		$BS_1$	$BS_2$	$BS_3$	$BS_4$	$BS_5$	$BS_6$	$BS_7$	$BS_8$
$BS_1$	WT		7.4	20.1	14.5	7	11.8	20.1	14.5
	TR		4.5	4.5	4.5	5.8	10.2	10.1	12.6
$BS_2$	WT	7.4		14.1	19.9	10.2	12	14.1	19.9
	TR	4.9		4.9	4.9	11.5	5.6	10	12.1
$BS_3$	WT	20.1	11.8		16	20.1	15.7	13.7	16
	TR	4.7	4.7		4.7	11.4	10.3	5.6	12
$BS_4$	WT	11.6	19.9	16		16.1	19.9	16	7
	TR	5	5	5		11.4	10.4	9.5	6.2
$BS_5$	WT	6.9	9.9	20	15.9		15.5	20	15.9
	TR	6	9.5	9.5	9.5		14.9	14.2	17.1
$BS_6$	WT	12.7	12.4	15.6	19.7	15.5		15.6	19.7
	TR	10.4	5.6	10.4	10.4	18.6		15.2	17.9
$BS_7$	WT	19.9	12.9	12.8	16	19.9	15.8		16
	TR	10.3	10.3	5.3	10.3	16.9	16.4		17.9
$BS_8$	WT	13	19.8	16	7.2	16.1	19.8	16	
	TR	9.3	9.3	9.3	6	15.5	15.9	13.3	

В целом результаты моделирования и аналитического расчёта совпадают, однако, в некоторых случаях они не просто отличаются, но и приводят к противоположным заключениям. Это наблюдается, например, для маршрутов  $BS_1$ - $BS_6$  и  $BS_1$ - $BS_8$ . Отличие объясняется тем, что аналитический расчёт не может учитывать несогласованность движения автобусов на разных маршрутах [11-13].

Таким образом, результаты моделирования более достоверны, и они показывают убедительное преимущество схемы TR по сравнению со схемой WT.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили сравнить результаты аналитического расчёта с результатами имитационного моделирования. Полученные данные показывают, что моделирование дает результаты более точно описывающие реальную транспортную систему, а, следовательно, позволит принять более обоснованное решение о вариантах модернизации системы общественного транспорта. На примере организации автобусных маршрутов в центральном районе Янгона, показана перспективность замены беспересадочной радиальной схемы движения на вариант с пересадками на кольцевой линии, позволяющий не только снизить время ожидания пассажиров, но и улучшить транспортную ситуацию в историческом центре города.

Конечно, построение модели требует больших затрат по сравнению с аналитическим расчётом, но точность получаемых оценок позволит их окупить. Кроме того,

при моделировании гораздо проще формировать потоки пассажиров, соответствующие как реальной, так и прогнозной плотности заселения отдельных районов города, что, в свою очередь, позволит прогнозировать и требования к общественному транспорту.

Дальнейшие исследования будут направлены на включение в модель возможности нахождения оптимального расписания для каждого маршрута, обеспечивающего минимизацию дисперсии времени ожидания пассажиров.

## БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Lu, Y. Zhuang. Study on the methods of urban passenger traffic demand corridors // Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 22(1), 2005
- [2] William L.Garrison., David M.Levinson. The Transportation Experience – Policy, Planning and Deployment. – Oxford University Press, 2006, p. 470
- [3] Головин О. К., Сидоров А. В., Михайлов Д. А.. Поддержка принятия решений автоматической дислокации геообъектов транспортной инфраструктуры // Известия Самарского научного центра РАН, 2014, №4-2, С. 413–418
- [4] Алиев А. С., Стрельников А. И., Швецов В. И., Шершевский Ю. З. Моделирование транспортных потоков в крупном городе с применением к московской агломерации // Автоматика и телемеханика, 2005, выпуск 11, С. 113–125
- [5] Sergey Lupin, Than Shein, Kyaw Kyaw Lin, Anastasia Davydova. Modelling of the Transport Systems in a Competitive Environment. // Proceedings of the Fifth International Conference on Internet Technologies and Applications (ITA 13), Glyndwr University, Wrexham, North Wales, UK, 10-13 September 2013, pp.41-48
- [6] Borshchev A. The Big Book of Simulation Modeling. Multimethod Modeling with AnyLogic 6 // AnyLogic North America, 2013, p. 614
- [7] Liao S., Dai J. Study on complex adaptive system and Agent-Based modeling & simulation // Journal of System Simulation, 2004, vol.16(1), pp. 113-117
- [8] Woodhouse S., Lovett A., Dolman P., Fuller R. Using a GIS to select priority areas for conservation // Computers, Environment and Urban Systems, Mar-2000, vol.24, pp. 79-93
- [9] Alexandris G., Giannikos I. A new model for maximal coverage exploiting GIS capabilities // European Journal of Operational Research, 2010, vol.202, pp. 328–338
- [10] T. M. Oo., Sergey Lupin., M. T. Khaing., A. Thu. Using Hybrid Modeling for Estimation of the Efficiency of Service Systems // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg, Moscow, Russia, 2021, pp. 2277-2280, doi: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396596
- [11] Ceder A., Golany B., Tal O. Creating bus timetables with maximal synchronization // Transport Research, Part A, 35, 2001, pp. 913-928
- [12] Zidi S., Maouche S., Hammadi S. Real-time route planning of the public transportation system // Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Toronto, Canada, 2006, pp. 55-60
- [13] Bartholdi John J., Eisensteing Donald D. A self-coordinating bus route to resist bus bunching // Transport Research, Part B, 2012, pp. 1-26

Статья получена 14 февраля 2024 г.

Тун Мин У, аспирант Национального исследовательского университета «МИЭТ»; (email: htunmin5045@gmail.com);

С.А. Лупин, профессор, Национальный исследовательский университет «МИЭТ», (e-mail: lupin@mice.ru).

# Analytical calculations in comparison with simulation modeling of transport systems

Tun Min Oo, S.A. Lupin

**Abstract**— Research has been carried out to compare the results of analytical calculations and simulation modeling of transport systems. Data were obtained showing that the modeling produces results that more accurately describe the real transport system, and, therefore, allow a more informed decision to be made about options for modernizing the public transport system. Using the example of the organization of bus routes in the central region of Yangon, the prospects of replacing the direct radial traffic scheme with an option with transfers on the circle line are shown. Such a solution will not only reduce the waiting time for passengers, but will also improve the transport situation in the historical center of the city, where the use of other options is extremely limited. When conducting research, a hybrid model was used, created in the Anylogic environment and combining agent-based and discrete-event approaches, as well as tools for working with GIS maps.

**Keywords**— analytical calculation; simulation modeling; public transport; Anylogic.

## REFERENCES

- [1] Lu. Y. Zhuang. Study on the methods of urban passenger traffic demand corridors // Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 22(1), 2005
- [2] William L. Garrison., David M. Levinson. The Transportation Experience – Policy, Planning and Deployment. – Oxford University Press, 2006, p. 470
- [3] Golovnin O. K., Sidorov A. V., Mihajlov D. A. Podderzhka prinjatija reshenij avtomaticheskoy dislokacii geoob'ektov transportnoj infrastruktury // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN, 2014, #4-2, S. 413–418
- [4] Aliev A. S., Strel'nikov A. I., Shvecov V. I., Shershevskij Ju. Z. Modelirovanie transportnyh potokov v krupnom gorode s primeneniem k moskovskoj aglomeracii // Avtomatika i telemekhanika, 2005, vypusk 11, S. 113–125
- [5] Sergey Lupin, Than Shein, Kyaw Kyaw Lin, Anastasia Davydova. Modelling of the Transport Systems in a Competitive Environment. // Proceedings of the Fifth International Conference on Internet Technologies and Applications (ITA 13), Glyndwr University, Wrexham, North Wales, UK, 10-13 September 2013, pp.41-48
- [6] Borshchev A. The Big Book of Simulation Modeling. Multimethod Modeling with AnyLogic 6 // AnyLogic North America, 2013, p. 614
- [7] Liao S., Dai J. Study on complex adaptive system and Agent-Based modeling & simulation // Journal of System Simulation, 2004, vol.16(1), pp. 113-117
- [8] Woodhouse S., Lovett A., Dolman P., Fuller R. Using a GIS to select priority areas for conservation // Computers, Environment and Urban Systems, Mar-2000, vol.24, pp. 79-93
- [9] Alexandris G., Giannikos I. A new model for maximal coverage exploiting GIS capabilities // European Journal of Operational Research, 2010, vol.202, pp. 328–338
- [10] T. M. Oo., Sergey Lupin., M. T. Khaing., A. Thu. Using Hybrid Modeling for Estimation of the Efficiency of Service Systems // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), St. Petersburg, Moscow, Russia, 2021, pp. 2277-2280, doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396596
- [11] Ceder A., Golany B., Tal O. Creating bus timetables with maximal synchronization // Transport Research, Part A, 35, 2001, pp. 913-928
- [12] Zidi S., Maouche S., Hammadi S. Real-time route planning of the public transportation system // Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Toronto, Canada, 2006, pp. 55-60
- [13] Bartholdi John J., Eisensteing Donald D. A self-coordinating bus route to resist bus bunching // Transport Research, Part B, 2012, pp. 1-26