



5. И.М. Якимов, А.П. Кирпичников, М.В. Трусфус, В.В. Мокшин, Вестник Технологического университета, **20**, 15, 118-122 (2017).
6. И.М. Якимов, А.П. Кирпичников, В.В. Мокшин, Вестник Казанского технологического университета, **17**, 13, 352-357 (2014).
7. В.В. Мокшин, И.М. Якимов, Р.М. Юльметьев, А.В. Мокшин, Нелинейный мир, **7**, 1, 66-76 (2009).

В.В. Мокшин, Н.А. Стадник, Д.Н. Маряшина, А.В. Золотухин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ANYLOGIC В ОРГАНИЗАЦИИ МАССОВЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

(Казанский национальный технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань)

Эффективность работы любого транспортного предприятия, в том числе транспортной системы массового обслуживания, можно повысить, применив автоматизированные информационные системы (АИС), которые регистрируют статистические данные о работе предприятия и обрабатывают их. АИС позволяют построить математическую модель функционирования транспортной системы массового обслуживания и провести по ней оптимизацию его работы.

Исследование функционирования системы массового обслуживания проведено по методике, состоящей из следующих этапов [1]:

1. Предварительный анализ объекта исследования и постановка задач.
2. Разработка структурной и имитационной модели.
3. Разработка стратегического плана и проведение имитационных экспериментов.
4. Построение математической модели.
5. Вычисление коэффициентов влияния факторов на изменение результативных показателей эффективности работы модели.
6. Оптимизация.

Для моделирования функционирования транспортной системы массового обслуживания (СМС) отобраны 9 результативных показателей эффективности и 7 влияющих на них факторов, перечень которых приведён в таблице 1. Первые 3 фактора – изменяемые (оптимизируемые), остальные факторы являются объективными [2].

Разработка математической модели процесса функционирования транспортной СМС представлена в виде совокупности уравнений регрессии:

$$y_j = f_j(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7), \quad (1)$$

где y_j - j -й результативный показатель эффективности; x_i - i -й фактор, влияющий на производственный процесс; k - количество результативных показателей эффективности.

Задача оптимизации - задача минимизации/максимизации выражается формулой:



$$\begin{aligned} y_j &= f_j(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \rightarrow \min(\max) & (2) \\ a_j &\leq f_j(x_i) \leq b_j \\ c_i &\leq x_i \leq d_i; i \in \{1, 2, 3\} \\ x_i &\rightarrow \text{const}; i \in \{4, 5, 6, 7\} \end{aligned}$$

где a_j, b_j – левая и правая граница допустимых значений j -го результативного показателя эффективности; c_i, d_i – левая и правая граница допустимых значений i -го фактора.

По результатам оптимизации получаем формулы вычисления оптимального значений оптимизируемых факторов:

$$x_{i\text{опт}} = F_i(x_4, x_5, x_6, x_7); i \in \{1, 2, 3\} \quad (3)$$

Для построения имитационной модели была выбрана среда имитационного моделирования AnyLogic [3]. Структурная модель системы массового обслуживания представлена на рисунке 1.

В качестве стратегического плана принят дробно факторный эксперимент (ДФЭ). Три первых фактора приняты в качестве основных, остальные четыре в качестве дополнительных.

Таблица 1. Показатели эффективности и факторы

№	Код	Наименование переменной
1	y_1	Общее количество транзактов в системе
2	y_2	Среднее количество транзактов в системе
3	y_3	Среднее время пребывания транзактов в системе
4	y_4	Среднее количество транзактов в очереди
5	y_5	Среднее время пребывания в очереди
6	y_6	Среднее время прибытия грузовиков на точки обслуживания
7	y_7	Среднее количество грузовиков, едущих на точки обслуживания
8	y_8	Среднее время прибытия грузовиков в центр обслуживания
9	y_9	Среднее количество грузовиков, едущих в центр обслуживания
10	x_1	Количество грузовиков
11	x_2	Количество пунктов обслуживания
12	x_3	Точность алгоритма построения маршрутов
13	x_4	Общая протяженность маршрутов
14	x_5	Среднее время ожидания заказа от пунктов обслуживания
15	x_6	Среднее время погрузки
16	x_7	Среднее время отгрузки

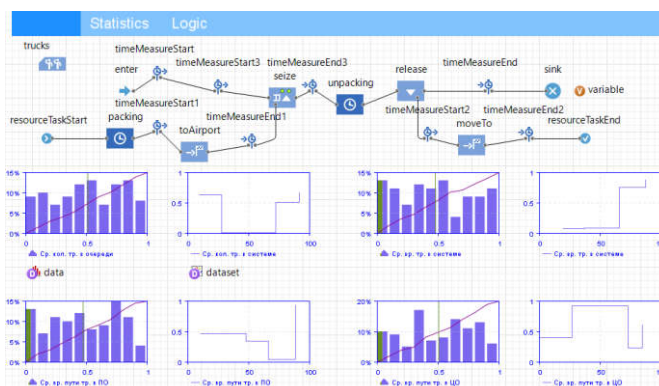


Рис. 1. Структура имитационной модели

К вершинам трехмерного куба добавляется центральная точка и 12 звездных точек по две на каждый фактор, четыре остальных дополнительных фактора меняются по законам изменения произведений основных факторов, т.е. реализуется план дробного факторного эксперимента:

$$X_4 = X_1 \cdot X_2; X_5 = X_1 \cdot X_3; X_6 = X_2 \cdot X_3$$

$$X_7 = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3;$$

Общее количество вариантов стратегического плана:

$$N = 1 + 32 + 2 \cdot 6 = 22$$

Стратегический план использован для управления процессом имитационного моделирования.

При построении уравнений регрессии по результатам имитационного моделирования были учтены следующие факторы: $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7$, отношения стандартных ошибок к средним значениям не должно превышать 0.10; уровни значимости по коэффициентам множественной детерминации и критериям Фишера не должны превышать 0.05.

Приведём уравнение регрессии, полученное для наиболее существенного результативного показателя: общее количество транзактов в системе – y_1 :

$$y_1 = -181.43 + 39.95 \cdot x_1 + 39.95 \cdot x_2 + 449.48 \cdot x_3 + 0,31 \cdot x_4 + 23,2 \cdot x_5 - 579,36 \cdot x_6 - 828,57 \cdot x_7 + 0,04 \cdot x_1 \cdot x_4 + 2,93 \cdot x_1 \cdot x_5 - 72,57 \cdot x_1 \cdot x_6 - 103,57 \cdot x_1 \cdot x_7 + 0,01 \cdot x_2 \cdot x_4 + 1,16 \cdot x_2 \cdot x_5 - 29,32 \cdot x_2 \cdot x_6 - 41,42 \cdot x_2 \cdot x_7 + 0,32 \cdot x_3 \cdot x_4 + 23,79 \cdot x_3 \cdot x_5 - 594,87 \cdot x_3 \cdot x_6 - 849,81 \cdot x_3 \cdot x_7 + 0,91 \cdot x_1^2 + 0,14 \cdot x_2^2 + 61,01 \cdot x_3^2 + 0,01 \cdot x_4^2 + 9,28 \cdot x_5^2 - 812,04 \cdot x_6^2 - 836,73 \cdot x_7^2 \quad (4)$$

Оптимизация данной системы массового обслуживания заключается в определении лучших значений факторов x_1, x_2, x_3 при выбранной целевой функции y_1 (общее количество транзактов в системе). Для решения этой задачи математическим методом использован метод касательных (Ньютона) [4], обеспечивающий нахождение минимального (максимального) значения, если нелинейность целевой функции и ограничений не превышает второй степени. Результат оптимизации представлен на рисунке 2.

В результате оптимизации и последующего за ней регрессионного анализа были получены формулы для вычисления оптимального количества грузовиков, пунктов обслуживания и точности алгоритма построения маршрутов.

$$x_{1opt} = 24,38 - 1,24 \cdot x_4 + 87,39 \cdot x_5 \quad (5)$$



$$x_{2\text{опт}} = 8,72 + 0,03 \cdot x_4 + 57,9 \cdot x_6 \quad (6)$$

$$x_{3\text{опт}} = -0,35 + 0,01 \cdot x_4 - 6,91 \cdot x_7 \quad (7)$$



Рис. 2. Результат оптимизации ИМ

Были рассмотрены худший, лучший и наиболее вероятный сценарии работы системы массового обслуживания и для каждого сценария при средних значениях объективных факторов x_4, x_5, x_6, x_7 и при средних принятых при моделировании значениях оптимизируемых факторов x_1, x_2, x_3 вычислено значение целевой функции y , результаты вычислений приведены в таблице 2.

Таблица 2. Факторные характеристики сценариев имитационного моделирования

№	Объективные факторы				Оптимизируемые факторы						Целевая f	
	x_4	x_5	x_6	x_7	x_1	x_2	x_3	$x_{1\text{опт}}$	$x_{2\text{опт}}$	$x_{3\text{опт}}$	y	$y_{\text{опт}}$
1	253,1	3,5	0,3	0,21	4	6	0,945	14	16	0,99	833	1506
2	217,9	3	0,2	0,14	6	8	0,96	15	18	0,99	1112	1929
3	182,9	2,5	0,1	0,07	8	10	0,975	16	20	0,99	1474	2413

В ходе исследования функционирования транспортной системы массового обслуживания (СМС) были определены 9 результативных показателей эффективности, а также 7 влияющих на них факторов. Для оптимизации функционирования транспортной СМС была предложена оптимизация первых 4-х факторов. Также были разработаны структурная и имитационная модели в программной среде имитационного моделирования AnyLogic.

Разработан стратегический план проведения имитационного эксперимента с применением дробно факторного эксперимента, а после проведено имитационное моделирование работы транспортной СМС по стратегическому плану.

Построена математическая модель работы и оптимизации транспортной СМС, с помощью которой были вычислены коэффициенты влияния факторов на результативные показатели эффективности.

Проведен оптимизационный эксперимент и рассчитаны формулы вычисления значений оптимизируемых факторов по значениям объективных факторов, а также построены модели сценариев работы модели при различных значениях факторов и вычислены соответствующие значения целевой функции.



В ходе исследования была выявлена высокая эффективность применения имитационного моделирования для оптимизации работы транспортной системы массового обслуживания в программной среде имитационного моделирования AnyLogic.

Литература

1. Старцева Ю.Г., Якимов И.М., Кирпичников А.П. Моделирование движения автотранспорта на управляемом У – образном перекрестке // Вестник Казанского технологического университета. - 2015. - Т. 18. - № 7. - С. 263-267.
2. Мокшин В.В. Параллельный генетический алгоритм отбора значимых факторов, влияющих на эволюцию сложной системы // Вестник Казанского госуд. технич. ун-та им. А.Н. Туполева. - 2009.- Т. 7. - № 1. - С.66-76.
3. Якимов И.М., Кирпичников А.П., Маряшина Д.Н. Сравнение систем структурного и имитационного моделирования ANYLOGIC, STRATUM 2000, ACTOR PILGRIM // Вестник Казанского технологического университета. - 2018. - Т. 21. - № 10. - С. 140-143.
4. Якимов И.М., Кирпичников А.П., Зайнуллина Г.Р., Яхина З.Т. Оценка достоверности результатов имитационного моделирования по результатам имитационного моделирования // Вестник Казанского технологического университета. - 2015. - Т. 18.- № 6. - С. 173-178.

А.А. Мухаммадиев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

(Казанский национальный исследовательский технический университет
им А.Н. Туполева-КАИ)

Анализ частотных характеристик осуществляется частотным методом, при котором электрическая цепь задается своими частотными характеристиками (АЧХ и ФЧХ), которые в большинстве практических случаев, для простых электрических схем, могут быть рассчитаны. Частотный метод анализа включает в себя задачу частотного или спектрального представления воздействия в виде суммы гармонических составляющих с определенными амплитудами, начальными фазами и частотами, а также задачу определения реакций цепи на каждую гармоническую составляющую воздействия и их суммирование [1].

Цель работы – моделирование частотных (входных и передаточных) и переходных характеристик произвольной электрической цепи.

Для моделирования предлагается использовать программу Electronics Workbench [2, 3]. Пример схемы измерения частотных характеристик цепи приведен на рис. 1. На рис. 2 и 3 представлены результат моделирования АЧХ и ФЧХ. Схема измерения частотных характеристик входного сопротивления цепи приведена на рис. 4.