УДК 004.942

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Григорьева Д.Н., Фасхутдинова А.Р. (Казань)

Введение

Мы живем в технологическую эпоху, которая предусматривает быстрые изменения в технологиях, отраслях, социальных моделях и процессах как следствие улучшенной взаимосвязи и интеллектуальной автоматизации. Эта революция затрагивает почти все отрасли в каждой стране и вызывает огромные изменения с беспрецедентной скоростью, с последствиями для всех дисциплин, отраслей промышленности и экономики. Использование современных интеллектуальных технологий позволяет принимать более разумные и быстрые решения относительно бизнес-процесса, в конечном счете повышая производительность и прибыльность всей операции.

Моделирование на основе искусственного интеллекта является ключом к созданию автоматизированных интеллектуальных систем в соответствии с сегодняшними потребностями. Существуют отделы, занимающиеся исключительно управлением и организацией интеллектуальной дорожной системы, которая позволила бы оптимизировать время прохождения траекторий, используемых их пользователями. Важно разработать модель, которая позволила бы реализовать решение, использующее усовершенствованные технологии.

Основная часть

Рассмотрим участок в городе Москве. Необходимо регулировать движение, изменяя параметры интенсивности движения автомобилей с помощью установления различных фаз работ светофоров. В AnyLogic встроена библиотека дорожного движения, которая позволяет размещать дороги, перекрёстки, стоп-линии, парковки и автобусные остановки. Используя элементы управления библиотеки дорожного движения, поместим дороги, перекрёстки, остановки и парковки на изображение (рис. 1).

Рис. 1. Моделирование участка дороги в AnyLogic

Добавим светофоры и установим режимы работы для семи перекрёстков. Далее описывается логика движения и остановки автобусов. Время нахождения автобуса на остановке устанавливается с помощью блока Delay. Так же необходимо смоделировать логику аварийной ситуации на дороге.

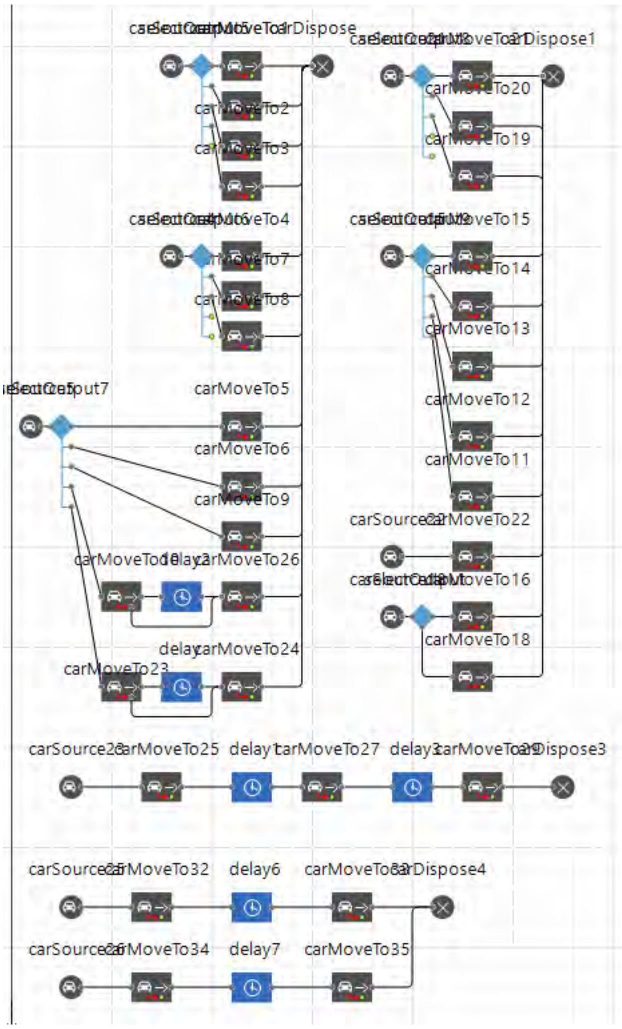

Рис. 2. Модель движения транспорта

Для оптимизации движения используем настройку параметров фаз работы светофора. Параметры p1, p2, p3, p4, p5, p6, p7 будут отвечать за длительность зеленой или красной фазы светофора (в секундах). Далее необходимо рассчитывать время нахождения каждого транспортного средства в модели. Результаты времени нахождения автомобиля в модели удобно представить с помощью диаграммы (рис. 3).

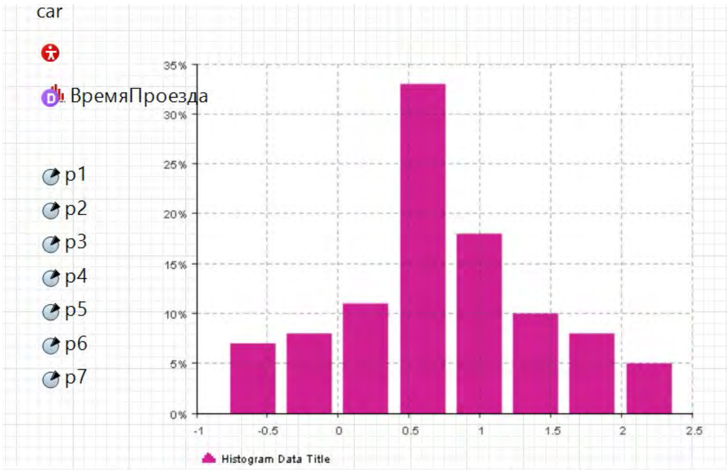

Рис. 3. Диаграмма времени нахождения авто в модели

В случае поломки машины и образования затора отображается аварийная ситуация, начинает образовываться пробка.

Для создания оптимизационного эксперимента используем стандартный интерфейс. Свойства оптимизационной модели представим на рисунке 4.

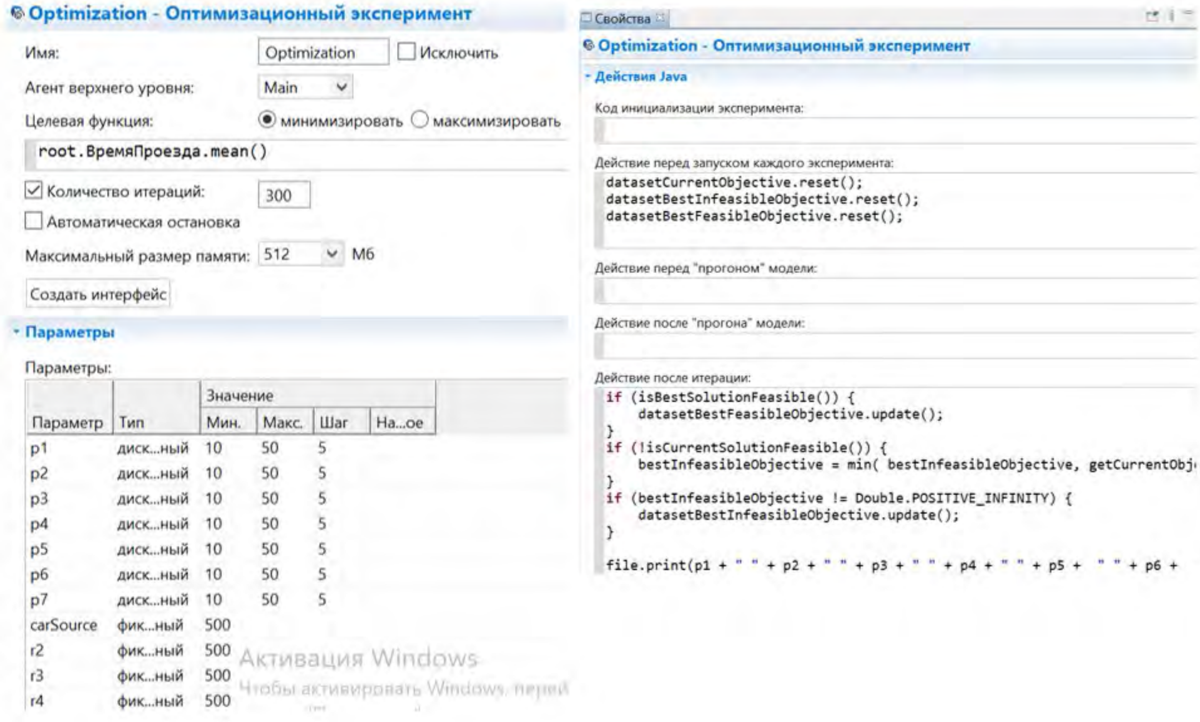

Рис. 4. Свойства оптимизационной модели

Анализ собранной статистики

Основные статистические характеристики исходных данных.

Вычисление основных статистических характеристик ИСД

Важно знать, насколько точно экспериментальное распределение случайных чисел приближается к нормальному распределению. Наиболее общее первоначальное представление о распределении случайных величин можно получить из анализа их основных статистических свойств.

Среднее арифметическое значение (оценка математического ожидания):

$$\overline{v}_j = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} v_{ij}\ ;\ j = \overline{1, N+M+V+L}\,,$$

где n – количество учитываемых временных интервалов; N – количество производственно-экономических факторов; K – количество результативных показателей эффективности; V – общее количество факторов внешней среды; L – общее количество тарифных факторов; v_{ij} – значение j–й переменной на i–ом временном интервале; $\overline{v}_j$ – среднее арифметическое значение j–той переменной по n экспериментальным значениям; i – номер строки в таблице ИСД; j – номер столбца в таблице ИСД.

Стандартное отклонение – это мера того, насколько широко распределены экспериментальные данные относительно их среднего значения:

$$\sigma_j^* = \sqrt{\frac{n\sum_{i=1}^{n} v_{ij}^2 - (\sum_{i=1}^{n} v_{ij})^2}{n^2}}\ ;\ j = \overline{1, N+M+V+L}\,.$$

Оценка асимметрии:

$$a_j = \frac{n}{(n-1)\cdot(n-2)}\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{v_{ij}-\overline{v}_j}{\sigma_i}\right]^3;\ j = \overline{1, N+M+V+L}\,.$$

Эксцесс характеризует относительную четкость или сглаженность распределения по сравнению с нормальным распределением. Отрицательный эксцесс соответствует относительно равномерному распределению:

$$э_j = \left\{\frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)}\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{v_{ij}-\overline{v}_j}{\sigma_j}\right]^4\right\} - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)};$$

$$j = \overline{1, N+M+V+L}$$

где n – количество учитываемых временных интервалов.

Таблица 1. Основные статистические характеристики ИСД

Variable	Descriptive Statistics (Лист1 in file) Valid N	Mean	Median	Minimum	Maximum	Std.Dev.	Skewness	Std.Err. Skewness	Kurtosis	Std.Err. Kurtosis
x1	306	28,6928	30,0000	10,0000	50,0000	11,21725	0,031992	0,139348	-0,94735	0,277810
x2	306	26,8301	20,0000	10,0000	50,0000	12,37729	0,522311	0,139348	-0,99666	0,277810
x3	306	34,2647	35,0000	10,0000	50,0000	12,38184	-0,675186	0,139348	-0,43065	0,277810
x4	306	30,9641	35,0000	10,0000	50,0000	10,94556	-0,353801	0,139348	-0,59788	0,277810
x5	306	21,9444	15,0000	10,0000	50,0000	12,38297	0,697518	0,139348	-0,78182	0,277810
x6	306	25,1634	25,0000	10,0000	50,0000	10,97566	0,585298	0,139348	-0,40591	0,277810
x7	306	33,0229	35,0000	10,0000	50,0000	12,00121	-0,374607	0,139348	-1,05248	0,277810
y	306	124,7726	123,9458	109,4849	147,5697	7,65052	0,504759	0,139348	-0,17529	0,277810

Временное прогнозирование

При наличии квартальных данных за 7-летнюю деятельность компании рекомендуется использовать наиболее широко используемый на практике метод прогнозирования – метод Бокса-Дженкинса, названный в честь ученого, который его предложил. Прогнозы ВДР (временных динамических рядов) очень хорошо применимы и называются АРПСС – авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего.

Общая модель, предложенная Боксом и Дженкинсом, включает параметры авторегрессии и параметры скользящего среднего. Вводится три типа параметров модели: параметры авторегрессии (*p*), порядок разности (*d*), параметры скользящего среднего (*q*). В обозначениях Бокса и Дженкинса модель записывается как АРПСС (*p, d, q*).

Мультипликативная сезонная АРПСС представляет собой естественное эволюцию и обобщение традиционной модели АРПСС на ВДР, где существует периодическая сезонная компонента. Несезонные параметры – в дополнение к общей тенденции изменений ВДР в модель вводятся сезонные параметры и определяются интервалы (указанные на этапе идентификации модели). Подобно параметрам простой модели АРПСС, эти параметры называются: сезонная авторегрессия (*ps*), сезонная разность (*ds*), сезонное скользящее среднее (*qs*). Таким образом, полная сезонная АРПСС может быть записана как АРПСС (*p, d, q*) (*ps, ds, qs*). Для учета имеющейся авторегрессии требуется выделить элементы, которые последовательно зависят друг от друга.

В таблице 2 представлен фрагмент результата прогноза переменных. В таблицах приведены средние прогнозируемые значения во втором столбце; левые границы 90% доверительных интервалов в третьем столбце и правые – в четвертом столбце; стандартные ошибки прогноза в пятом столбце.

Таблица 2. Фрагмент результата прогноза переменных

Paramet.	Input: X1 (Лист1 in file) Transformations: none Model:(0,0,1)(1,0,0) Seasonal lag: 12 MS Residual= 172,47					
	Param.	Asympt. Std.Err.	Asympt. t(304)	p	Lower 95% Conf	Upper 95% Conf
q(1)	-0,619273	0,037603	-16,4687	0,00	-0,693268	-0,545278
Ps(1)	0,761082	0,039451	19,2920	0,00	0,683451	0,838713

Paramet.	Input: Y (Лист1 in file) Transformations: none Model:(0,0,1)(1,0,0) Seasonal lag: 12 MS Residual= 474,58					
	Param.	Asympt. Std.Err.	Asympt. t(304)	p	Lower 95% Conf	Upper 95% Conf
q(1)	-0,559706	0,037538	-14,9105	0,00	-0,633573	-0,485840
Ps(1)	0,981804	0,015873	61,8526	0,00	0,950568	1,013039

Корреляционный анализ

Корреляция – это взаимозависимость случайных величин между собой. Тесноту связи между переменными принято характеризовать парными коэффициентами линейной корреляции, вычисляемыми по формуле:

$$r_{ij} = \frac{\frac{1}{n}\sum_{g=1}^{n} v_{gi}v_{gj} - \frac{1}{n}\sum_{g=1}^{n} v_{gi} \cdot \frac{1}{n}\sum_{g=1}^{n} v_{gj}}{\sqrt{\left(\frac{1}{n}\sum_{g=1}^{n} v_{gi}^2 - \left(\frac{1}{n}\sum_{g=1}^{n} v_{gi}\right)^2\right) \cdot \left(\frac{1}{n}\sum_{g=1}^{n} v_{gj}^2 - \left(\frac{1}{n}\sum_{g=1}^{n} v_{gj}\right)^2\right)}};$$

$$i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, N + M + V + L},$$

где n – количество учитываемых временных интервалов; N – количество производственно-экономических факторов; K – количество результативных показателей эффективности; V – общее количество факторов внешней среды; L – общее количество тарифных факторов; $v_{ig}\ \left(v_{jg}\right)$- значение i-той (j-той) переменной на g-ом временном интервале [1].

Критическое значение коэффициента линейной корреляции:

$$r_{ij\ крит} = \pm\sqrt{\frac{t^2_{ij\ крит}}{t^2_{ij\ крит} + n - 2}}\ ;\ i = \overline{1,n};\ \ j = \overline{1, N + M + V + L}\ ,$$

где $r_{ij\ крит}$ – критическое значение критерия Стьюдента для рекомендуемого уровня значимости $\alpha = 0{,}05$, определяемого по статистическим таблицам при n–2 =25–2 = 23 степенях свободы.

n = 25– количество значений в ИСД.

Находим $r_{ij} = \pm\sqrt{\frac{2.0687^2}{2.0687^2+25-2}}$ = ± 0,396077.

Таблица 3. Парные коэффициенты линейной корреляции

	Correlations (Лист1 in file) Marked correlations are significant at p < ,05000 N=306 (Casewise deletion of missing data)						
Variable	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
x1	1,000000	0,116470	0,072138	-0,079161	-0,085500	0,049676	0,064764
x2	0,116470	1,000000	0,097594	0,103705	0,243571	-0,125296	-0,247052
x3	0,072138	0,097594	1,000000	-0,228208	-0,330116	0,273510	0,167802
x4	-0,079161	0,103705	-0,228208	1,000000	0,155455	-0,244212	-0,106496
x5	-0,085500	0,243571	-0,330116	0,155455	1,000000	0,155665	-0,135101
x6	0,049676	-0,125296	0,273510	-0,244212	0,155665	1,000000	-0,008118
x7	0,064764	-0,247052	0,167802	-0,106496	-0,135101	-0,008118	1,000000

Построение регрессионной модели

Повторим постановку задачи построения математической модели в виде совокупности уравнений регрессии [2].

$$y_j = f_j(x_1, x_2, \ldots, x_i, \ldots x_M);$$
$$j = \overline{1, K},$$

где y_j – j-й результативный показатель эффективности (отклик); К – общее количество результативных показателей эффективности; x_i – i-й фактор, влияющий на отклики; М – общее количество факторов.

Величина стандартной ошибки:

$$S_{cm} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n-1}(y_i - f(x_{i1}, x_{i2} \ldots x_{iM}))^2}{n - q - 1}}$$

В дополнение к этому показателю рекомендуется использовать дополнительные показатели, которые вводятся на основе дисперсионного анализа. Если показатель не предъявляет требований к переменной, для которой производится подгонка, дисперсионный анализ требует, чтобы переменная, для которой производится подгонка, подчинялась нормальному закону [3].

Оценка влияния факторов на результативные показатели функционирования моделируемой информационной системы (отклики) производится по удельным весам и коэффициентам эластичности [4].

На рисунке 5 представлены графики для y (наблюдаемое) и f (прогнозированное), указаны значения коэффициентов множественной детерминации для наблюдаемых и прогнозируемых значений, вычисленные при помощи встроенного в Excel функционала.

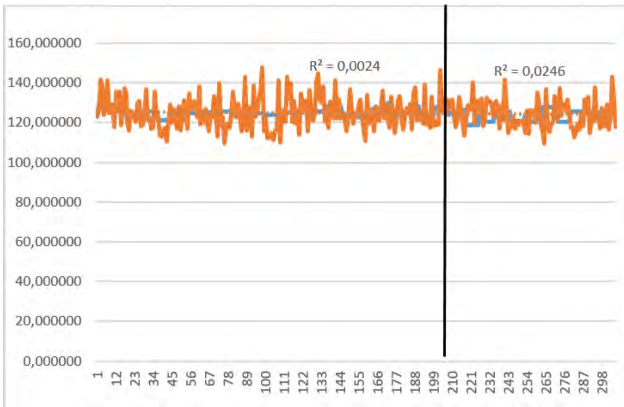

Рис.5. Графики для y и f

Таким образом, получили уравнение множественной регрессии для переменной y:

y = 126,801235 + 0,0578914851 *x1 + 0,10740065*x2 - 0,21824644*x3 - 0,0528141774*x4 - 0,0941167978*x5 + 0,0444530619*x6 + 0,0973568085*x7

Оптимизация по модели

По полученным уравнениям регрессии проводится оптимизация с минимизацией основного показателя y за счет выбора оптимальных значений факторов $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_M$.

$f(x_1, x_2, x_3, \ldots\ldots, x_M) \to \min$

В дополнение к основному условию оптимизации можно налагать условия и на другие показатели эффективности (если их несколько), т.к. в их вычислении участвуют те же оптимизируемые факторы [5]. Например, эти условия могут выглядеть так:

$c_1 \le f_1(x_1, x_2, \ldots\ldots, x_M) \le d_1$

$c_2 \le f_2(x_1, x_2, \ldots\ldots, x_M) \le d_2$

…..

и при ограничениях на влияющие факторы:

$x_{1\min} \le x_1 \le x_{1\max}$

$x_{2\min} \le x_2 \le x_{2\max}$

…..

$x_{M\min} \le x_M \le x_{M\max}$

По полученным регрессионным уравнениям выполняем оптимизацию. Оптимизируемым уравнением будет регрессионное уравнение по параметру y:

y = 126,801235 + 0,0578914851 *x1 + 0,10740065*x2 - 0,21824644*x3 - 0,0528141774*x4 - 0,0941167978*x5 + 0,0444530619*x6 + 0,0973568085*x7→ min

Выберем следующие ограничения:

$10 \le x1 \le 50$, $10 \le x2 \le 50$, $10 \le x3 \le 50$, $10 \le x4 \le 50$, $10 \le x5 \le 50$, $10 \le x6 \le 50$, $10 \le x7 \le 50$

При этом получаем y = 111,613384.

Аналогично проводится анализ для второй оптимизации.

	1 x1	2 x2	3 x3	4 x4	5 x5	6 x6	7 x7	8 y
1	10,000000	10,000000	10,000000	10,000000	10,000000	10,000000	10,000000	35,831683
2	40,000000	15,000000	30,000000	10,000000	30,000000	50,000000	50,000000	41,445545
3	40,000000	15,000000	30,000000	10,000000	30,000000	50,000000	50,000000	38,574257
4	40,000000	15,000000	30,000000	10,000000	30,000000	50,000000	50,000000	40,633663
5	40,000000	15,000000	30,000000	10,000000	30,000000	50,000000	50,000000	34,306931
6	40,000000	15,000000	30,000000	10,000000	30,000000	50,000000	50,000000	41,178218
7	40,000000	15,000000	30,000000	10,000000	30,000000	50,000000	50,000000	41,435644
8	40,000000	15,000000	30,000000	10,000000	30,000000	50,000000	50,000000	39,178218
9	40,000000	15,000000	30,000000	10,000000	30,000000	50,000000	50,000000	38,158416
10	10,000000	35,000000	50,000000	40,000000	45,000000	35,000000	15,000000	33,712871
11	10,000000	35,000000	50,000000	40,000000	45,000000	35,000000	15,000000	34,752475
12	10,000000	35,000000	50,000000	40,000000	45,000000	35,000000	15,000000	31,445545
13	10,000000	35,000000	50,000000	40,000000	45,000000	35,000000	15,000000	34,465347
14	10,000000	35,000000	50,000000	40,000000	45,000000	35,000000	15,000000	37,326733
15	10,000000	50,000000	50,000000	50,000000	10,000000	50,000000	10,000000	34,623762
16	10,000000	50,000000	50,000000	50,000000	10,000000	50,000000	10,000000	34,851485
17	10,000000	50,000000	50,000000	50,000000	10,000000	50,000000	10,000000	34,306931
18	10,000000	50,000000	50,000000	50,000000	10,000000	50,000000	10,000000	34,495050

Рис. 6. Статистика для проведения анализа

Таблица 4. Основные статистические характеристики ИСД

Variable	Descriptive Statistics (Лист1 in file1)								
	Valid N	Mean	Median	Minimum	Maximum	Std.Dev.	Skewness	Std.Err. Skewness	Kurtosis	Std.Err. Kurtosis
x1	306	19,83660	10,00000	10,00000	50,00000	13,56126	0,934886	0,139348	-0,79609	0,277810
x2	306	27,94118	25,00000	10,00000	50,00000	12,31458	0,301487	0,139348	-1,14290	0,277810
x3	306	35,96405	45,00000	10,00000	50,00000	14,22773	-0,440550	0,139348	-1,39536	0,277810
x4	306	34,01961	35,00000	10,00000	50,00000	13,00137	-0,535468	0,139348	-0,99986	0,277810
x5	306	34,18301	40,00000	10,00000	50,00000	12,61612	-0,542929	0,139348	-1,02057	0,277810
x6	306	24,41176	20,00000	10,00000	50,00000	13,80712	0,645936	0,139348	-0,98320	0,277810
x7	306	27,71242	25,00000	10,00000	50,00000	14,47991	0,195427	0,139348	-1,39588	0,277810
y	306	36,75309	36,73762	31,44554	43,84158	3,04688	0,063327	0,139348	-0,93243	0,277810

Заключение

Была смоделирована имитационная модель, с помощью результатов которой были собраны статистические данные. Оптимизационные данные получены из выгрузки данных в программе AnyLogic. Предложены алгоритмы оптимизации светофорного регулирования.

Научный руководитель: В.В. Мокшин, к.т.н., доцент, Казань.

Литература

1. Корреляционный анализ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://lektsii.com/2-102725.html

2. Лекция 5 Регрессионный анализ 5 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://samzan.net/232398

3. Использование метода имитационного моделирования для определения оптимальных режимов работы светофоров на исследуемых перекрестках / К.Т. Шаршеева, Г.У. Тультемирова, М.С. Алымкулова, Ю.Х. Исманов, С.А. Алымкулов, К.М. Жумалиев // Бюллетень науки и практики. – 2023. – С. 229-236.

4. **Mokshin A.V.** Adaptive genetic algorithms used to analyze behavior of complex system / A.V. Mokshin, V.V. Mokshin, L.M. Sharnin // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2019. – № 71. – P. 174–186.

5. Факторный анализ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studfile.net/preview/2014718/page:5/