

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И РЕКОНСТРУКЦИИ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ

Р. В. Андронов, Е. Э. Леверенц
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

THE USE OF STATISTICAL MODELING TO ASSESS THE EFFECTIVENESS OF THE APPLICATION OF ADAPTIVE CONTROL AND RECONSTRUCTION OF THE ROAD NETWORK INTERSECTIONS

Roman V. Andronov, Evgeny E. Leverents
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы и результаты применения статистического моделирования (так называемого метода Монте-Карло) – одной из разновидностей имитационного моделирования – для оценки эффективности организации дорожного движения на примере пересечения улиц Тимофея Чаркова и Верхнетарманской в городе Тюмени. Приводятся результаты моделирования по длине очереди и величине задержки для одного автомобиля для сценария уширения проезжей части пересечения и/или введения адаптивного регулирования транспортных потоков. Расчеты производились в разработанной авторами программе «SmartAdaptive+», предназначенной для технико-экономической оценки эффективности мероприятий по организации дорожного движения и применению адаптивного регулирования и мероприятий по изменению конфигурации узлов улично-дорожной сети (УДС).

Abstract. The article discusses the issues and results of the use of statistical modeling (one of the types of simulation modeling, the so-called "Monte Carlo" method), to assess the effectiveness of traffic management on the example of the Timofey Charkov st. and Verkhnetarmanskaya st. intersection, located in the city of Tyumen. The results are based on the length of the vehicle queue and traffic delay time for one car in the scenario of widening the intersection's carriageway and/or the implementation of the adaptive regulation for traffic flows. The calculations were carried out in the "SmartAdaptive+" program developed by the authors, and designed for a technical and economic assessment of the effectiveness of traffic management measures and the use of adaptive regulation and measures to change the road network nodes configuration.

Ключевые слова: регулируемые пересечения, адаптивное регулирование, статистическое моделирование, параметры и эффективность организации дорожного движения, транспортные потоки

Key words: traffic light intersections, adaptive control, statistical modeling, traffic management parameters and efficiency, traffic flows

Введение

В настоящее время продолжается рост численности населения Тюмени, происходящий за счет переезда жителей из автономных округов Тюменской области и малых населенных пунктов. В утвержденной Программе комплексного развития транспортной инфраструктуры города на период 2018–2040 годов предусматривается значительное – до 1 200 тыс. человек – увеличение численности населения.

В связи с этим в Тюмени высокими темпами ведется жилищное строительство, застройка территории осуществляется в том числе целыми микрорайонами. Особенно интенсивное комплексное строительство отмечается в за железнодорожной (отделенной Транссибирской железнодорожной магистралью) и заречной частях города. В частности, в заречной части возведены или продолжают строиться такие жилые комплексы, как «Европейский», «Новый Мыс», «Звездный», «Айвазовский» и другие.

Новые микрорайоны нуждаются в гармоничном транспортном обслуживании и оптимальной организации дорожного движения на улично-дорожной сети [1]. Потребительские свойства автомобильных дорог – безопасность, удобство, комфорт и бесперебойность – должны отвечать современным требованиям. Необходимый уровень безопасности дорожного движения обеспечивает в первую очередь устройство светофорного регулирования, которое не должно ухудшать и другие потребительские свойства дорог [2].

Данные задачи можно решить в комплексе посредством использования автоматизированных систем управления дорожным движением с помощью координации работы светофорных объектов либо их работы по принципу адаптивного регулирования.

Применяемая в Тюмени автоматизированная система управления дорожным движением СПЕКТР 2.0 [3] успешно справляется с поставленной задачей и применяется на основных магистральных улицах города, таких как ул. Республики, Мельникайте, Профсоюзная, Дружбы и других, но пока не применяется на местных и магистральных улицах местного значения.

Для оптимизации дорожного движения транспортные инженеры предлагают использовать программные комплексы имитационного транспортного моделирования: VISSIM, AnyLogic, Aimsun [4]. Их применение позволяет более гармонично осуществить транспортное обслуживание новых районов и сделать более удобную организацию дорожного движения.

Объект и методы исследования

На кафедре автомобильных дорог и аэродромов Тюменского индустриального университета разработан программный продукт «SmartAdaptive+», работающий по принципу статистического моделирования и позволяющий смоделировать применение адаптивного регулирования на изолированных узлах с выдачей необходимой итоговой информации по параметрам очередей и задержек. Принцип статистического моделирования (так называемый метод Монте-Карло) заключается в многократном моделировании проездов транспортных средств через пересечение по определенным законам распределения случайной величины. Программа предназначена для технико-экономической оценки эффективности мероприятий по организации дорожного движения и применению адаптивного регулирования и мероприятий по изменению конфигурации узлов улично-дорожной сети.

В данном исследовании в качестве объекта рассматривалось пересечение улиц Тимофея

**Характеристики дорожного движения на пересечении
улиц Тимофея Чаркова и Верхнетарманской**

Анализируемый участок (жесткое регулирование)	Количество полос движения	Интенсивность движения, авт./час	Задержки при движении через пересечение, с
Улица Тимофея Чаркова (направление от Велижанского тракта)	1	830	19,05
Улица Тимофея Чаркова (направление к Велижанскому тракту)	1	518	18,95
Улица Верхнетарманская	1	176	26,25

Чаркова и Верхнетарманской, на котором в 2021 году было введено светофорное регулирование. Улица Тимофея Чаркова имеет двухполосную проезжую часть и еще сравнительно недавно, до 2015–2016 года, обслуживала преимущественно северо-восточную промзону города, являясь связующей перемычкой между Велижанским и Тобольским трактами, являющимися выходами из города. Для данной улицы характерны были свободный и частично связанный режимы движения. В настоящее время в связи со строительством микрорайонов «Звездный» и «Новый Мыс», а также дополнительной сопутствующей инфраструктуры и торговых центров на ней наблюдается значительное увеличение интенсивности движения, и предполагаются дальнейший рост интенсивности движения и снижение удобства движения до уровня насыщенного потока.

В связи с этим планируется дополнительное устройство светофорных объектов на местах массового выезда транспорта из жилых районов. Благодаря установке одного из таких светофоров на пересечении с ул. Верхнетарманской повысилась безопасность движения и удобство при выезде с микрорайона «Новый Мыс», но, на взгляд авторов статьи, снизилось удобство дорожного движения для главного направления, в результате чего поворачивающие налево транспортные потоки стали задерживать пропуск прямого направления, т. к. движение осуществляется в один ряд.

Для составления модели работы пересечения использовались данные по интенсивности

движения в вечерний час пик (17:00–18:00), которые составили со стороны Велижанского тракта 830 автомобилей в час, с противоположного направления – 518 автомобилей в час, со стороны улицы Верхнетарманской – 176 автомобилей в час. На пересечении регулирование дорожного движения осуществляется системой жесткого светофорного регулирования. Данные, полученные в результате натурных наблюдений, представлены в табл. 1.

Постановка эксперимента

Были смоделированы три сценария возможного изменения конфигурации или светофорного регулирования на пересечении улиц Тимофея Чаркова и Верхнетарманской:

1. потенциальное введение адаптивного регулирования при сохранении параметров пересечения [5];
2. увеличение числа полос пересекающихся улиц до двух в каждом направлении;
3. введение адаптивного регулирования при увеличении полосности пересекающихся улиц.

Увеличение количества полос позволяет повысить пропускную способность улицы. На ул. Тимофея Чаркова поток насыщения изменится при увеличении количества полос до двух в одном направлении с 1 111 до 1 388 авт./час, на ул. Верхнетарманской с 1 482 до 2 313 авт./час. Это позволяет пропускать большее количество автомобилей, но при этом увеличивает площадь поперечного сечения самой улицы, образующей пересечение. Такое решение может быть не-

Таблица 2

**Проектные характеристики транспортного пересечения
улиц Тимофея Чаркова и Верхнетарманской при увеличении количества полос движения**

Анализируемый участок (жесткое регулирование)	Количество полос движения	Интенсивность движения, авт./час	Задержки при движении через пересечение, с
Улица Тимофея Чаркова (направление от Велижанского тракта)	2	830	10,9
Улица Тимофея Чаркова (направление к Велижанскому тракту)	2	518	11,0
Улица Верхнетарманская	2	176	31,2

Таблица 3

**Проектные характеристики транспортного пересечения
улиц Тимофея Чаркова и Верхнетарманской с применением адаптивного регулирования**

Анализируемый участок (адаптивное регулирование)	Количество полос движения	Интенсивность движения, авт./час	Задержки при движении через пересечение, с
Улица Тимофея Чаркова (направление от Велижанского тракта)	1	830	19,15
Улица Тимофея Чаркова (направление к Велижанскому тракту)	1	518	17,10
Улица Верхнетарманская	1	176	23,65

приемлемым в условиях плотной городской застройки, влечет за собой изменение цикла светофорного регулирования за счет увеличения пешеходной фазы [6]. Тем не менее, было проведено моделирование на основании существующих параметров пересечения и были получены результаты, представленные в табл. 2.

По полученным данным видно, что произошло уменьшение задержек транспорта на ул. Тимофея Чаркова, но на ул. Верхнетарманской потенциальное увеличение сечения улицы больших результатов не принесло [7].

Рассмотрим вариант, при котором не вносятся изменения в количество полос на улицах, но вводится режим адаптивного регулирования дорожного движения. Его результаты представлены в табл. 3.

При моделировании пересечения с адаптивным регулированием были получены следующие

результаты: на ул. Тимофея Чаркова произошло возрастание задержек, но за счет уменьшения задержек на ул. Верхнетарманской средневзвешенная задержка на пересечении уменьшилась с 19,84 до 18,97 с. Это еще раз подтверждает, что пропускная способность пересечения в скором времени будет исчерпана и даже более равномерное распределение транспортных потоков не позволит нам значительно снизить транспортные задержки [7].

Моделирование комбинации из решений позволяет оценить эффективность таких решений на перспективу. Так как пересечение улиц Тимофея Чаркова и Верхнетарманской находится в интенсивно застраиваемом районе, в будущем ожидается увеличение жителей и рост автомобилизации в нем, что может усугубить транспортную ситуацию. Комбинация из проектных решений представлена в табл. 4.

Таблица 4

**Проектные характеристики транспортного пересечения
улиц Тимофея Чаркова и Верхнетарманской с применением адаптивного
регулирования и при увеличении количества полос движения**

Анализируемый участок (адаптивное регулирование)	Количество полос движения	Интенсивность движения, авт./час	Задержки при движении через пересечение, с
Улица Тимофея Чаркова (направление от Велижанского тракта)	2	830	13,65
Улица Тимофея Чаркова (направление к Велижанскому тракту)	2	518	8,4
Улица Верхнетарманская	2	176	18,45

Таблица 5

**Проектные характеристики транспортного пересечения
улиц Тимофея Чаркова и Верхнетарманской с увеличенными интенсивностями движения**

Анализируемый участок (жесткое регулирование)	Количество полос движения	Интенсивность движения, авт./час	Задержки при движении через пересечение, с
Улица Тимофея Чаркова (направление от Велижанского тракта)	1	830	526,3
Улица Тимофея Чаркова (направление к Велижанскому тракту)	1	800	584,7
Улица Верхнетарманская	1	500	38,5

Таблица 6

**Проектные характеристики транспортного пересечения
улиц Тимофея Чаркова и Верхнетарманской с увеличением интенсивности
дорожного движения и введением адаптивного регулирования**

Анализируемый участок (адаптивное регулирование)	Количество полос движения	Интенсивность движения, авт./час	Задержки при движении через пересечение, с
Улица Тимофея Чаркова (направление от Велижанского тракта)	1	830	515,5
Улица Тимофея Чаркова (направление к Велижанскому тракту)	1	800	539,4
Улица Верхнетарманская	1	500	56,5

Результаты моделирования при условии применения адаптивного регулирования и одновременного увеличения полосности улиц позволили сократить величину средневзвешенной задержки транспорта с 13,27 до 12,42 с.

Такое изменение не выглядит достаточным для обоснования внедрения сразу двух проектных решений на пересечении. Но интенсивная

застройка в районе говорит о скором увеличении транспортной нагрузки на пересечении.

При моделировании возросших интенсивностей движения очереди по главному направлению будут накапливаться неограниченно, что не будет отражать ситуацию в реальности, но говорит о недопустимости работы пересечения в таком режиме (табл. 5). Интенсивность движения на улице

Таблица 7

**Проектные характеристики транспортного пересечения
улиц Тимофея Чаркова и Верхнетарманской с увеличенными интенсивностями движения,
количеством полос движения и введением адаптивного регулирования**

Анализируемый участок (адаптивное регулирование)	Количество полос движения	Интенсивность движения, авт./час	Задержки при движении через пересечение, с
Улица Тимофея Чаркова (направление от Велижанского тракта)	2	830	26,3
Улица Тимофея Чаркова (направление к Велижанскому тракту)	2	800	28,3
Улица Верхнетарманская	2	500	29,4

Тимофея Чаркова от Велижанского тракта не увеличивалась, так как данное направление работает на пределе своей пропускной способности.

При введении только адаптивного управления (табл. 6) пересечение все равно не справляется с транспортным потоком. Возможность переорганизовать циклы светофора путем адаптивного регулирования в данной ситуации большого эффекта не оказывает [8].

Попытки оптимизировать движение при увеличенном транспортном спросе и сохранении исходных характеристик пересечения являются нецелесообразными, когда входящий поток на-

чинает превосходить пропускную способность улицы [9].

Наилучшее соотношение по задержкам дает именно последний вариант (табл. 7). Средневзвешенная задержка при жестком регулировании составляет 36,5 с, а при адаптивном регулировании – 28,7 с. Средние накопленные длины очередей в этом случае составляют 6-7 и 5-6 автомобилей соответственно.

Результаты

Результаты моделирования можно сгруппировать в следующие диаграммы (рис. 1–4).

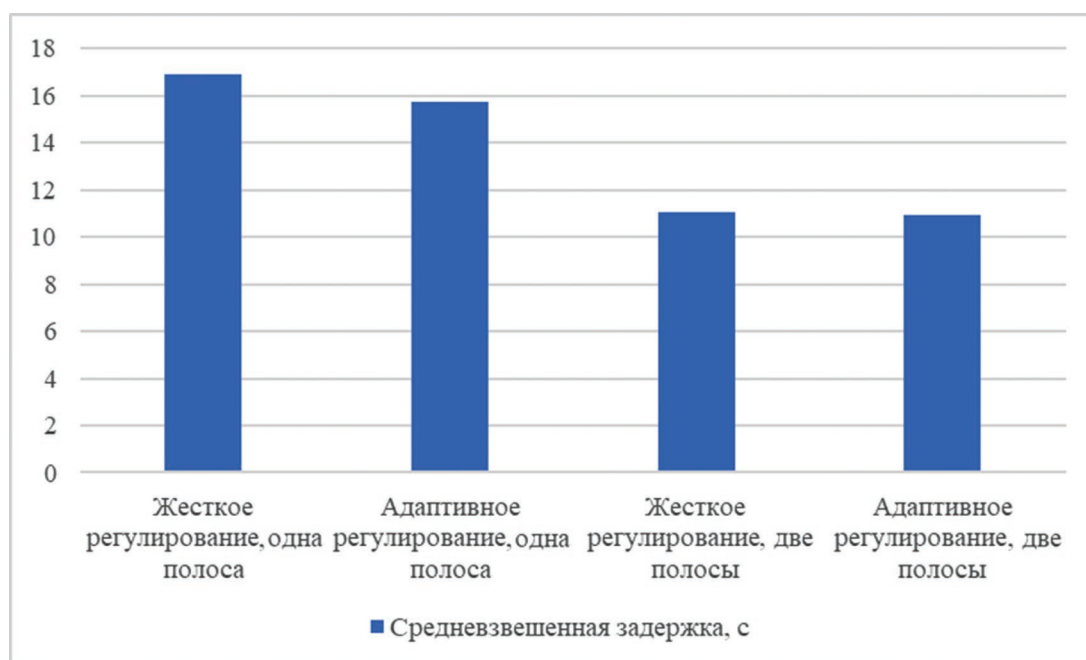


Рис. 1. Расчет средневзвешенной задержки при существующих условиях (без изменения интенсивности)

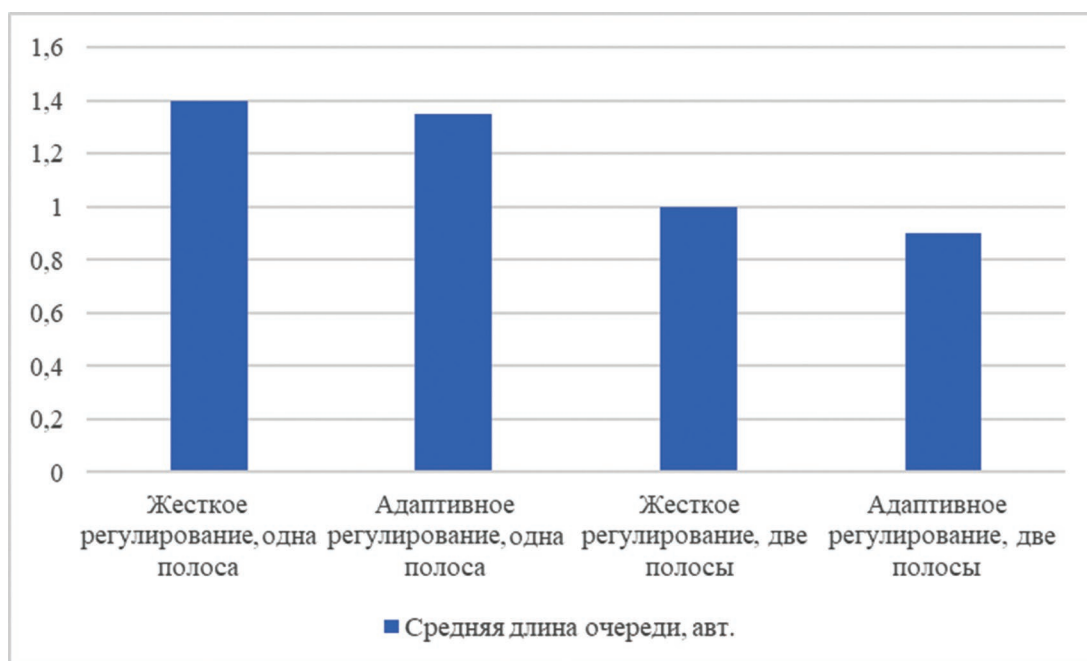


Рис. 2. Расчет средней длины очереди (без изменения интенсивности)

При расчете на рост интенсивности дорожного движения свою эффективность показывает именно комбинация проектных решений, реше-

ние без изменения количества полос на пересечении улиц Тимофея Чаркова и Верхнетарманской не учитывалось.

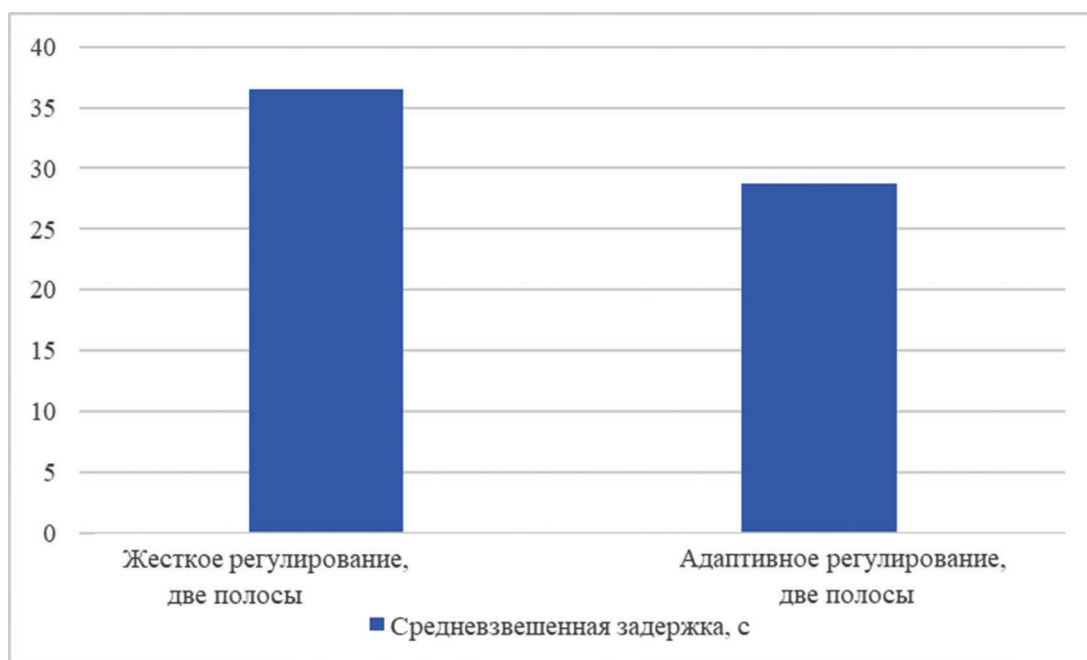


Рис. 3. Расчет средневзвешенной задержки по обоим пересекаемым направлениям движения при условии увеличения полос движения в одном направлении до двух (на перспективную интенсивность)

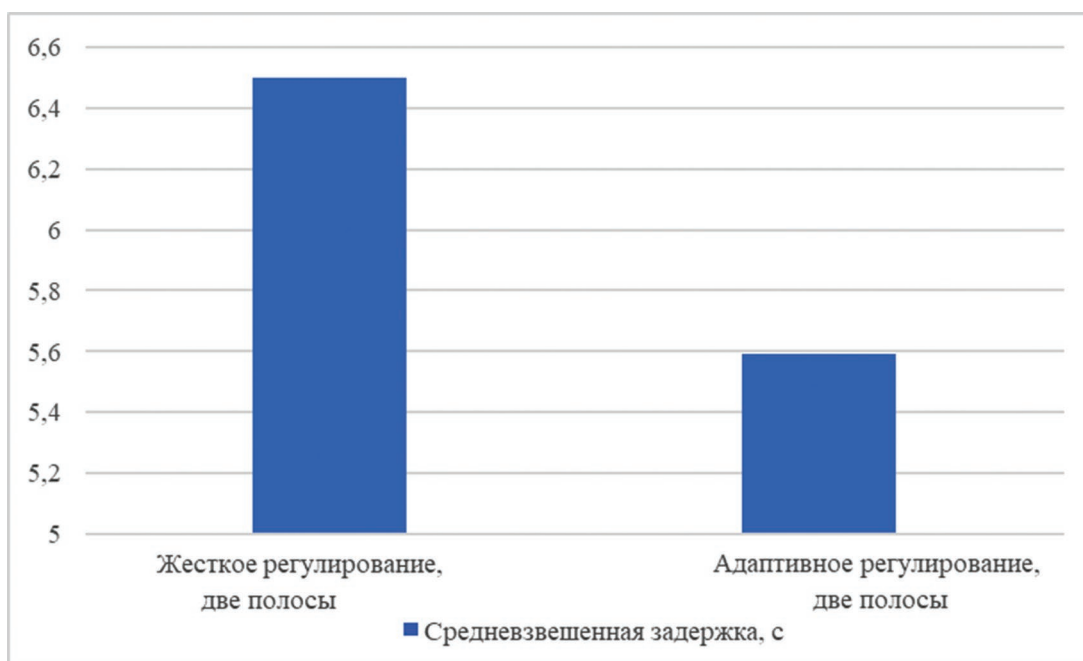


Рис. 4. Расчет средней длины очереди по обоим пересекаемым направлениям движения при условии увеличения полос движения в одном направлении до двух (на перспективную интенсивность)

Выводы

- Одним из решений, позволяющим повысить удобство дорожного движения путем уменьшения средних задержек, является адаптивное регулирование, подстраивающееся под изменяющиеся за короткие промежутки времени параметры транспортных потоков. Программный продукт «SmartAdaptive+», разработанный на кафедре автомобильных дорог и аэродромов Тюменского индустриального университета и работающий по принципу статистического моделирования дорожных ситуаций, позволяет смоделировать применение адаптивного регулирования на узле с выдачей необходимой итоговой информации по параметрам очередей и задержек транспортных средств [10].
- На примере рассматриваемого в данной статье частного пересечения улиц Тимофея Чаркова и Верхнетарманской в Тюмени, на котором установлено светофорное регулирование, обнаружено снижение удобства движения для главного направления, в результате которого поворачивающие налево транспортные потоки задерживают пропуск прямого направления, т. к. движение осуществляется в одну полосу и автомобили вынуждены объезжать поворачивающие транспортные средства с заездом на обочину. Средневзвешенная задержка одного автомобиля составляет по ул. Тимофея Чаркова 17,5 с, на ул. Верхнетарманской – 26,25 с.
- Применение вышеупомянутого программного продукта позволяет смоделировать результаты как потенциального применения адаптивного регулирования, так и реконструкции узла с увеличением количества полос движения. При условии только применения адаптивного регулирования средневзвешенная задержка одного автомобиля на пересечении составит 18,97 с. При увеличении количества полос движения – до 13,28 с. При увеличении полос движения и применении адаптивного регулирования – 12,42 с. При увеличении интенсивности движения пропускная способность пересечения будет исчерпана и добиться приемлемого удобства движения без увеличения полос движения только организационными меро-

- приятными не представляется возможным. В этом случае с увеличением количества полос движения задержка составит 36,8 с, при введении адаптивного регулирования и увеличении количества полос движения – 27,8 с.
4. В дальнейшем для решения задач организации дорожного движения на изолированных городских пересечениях рекомендуется для обоснования мер по организации и оптимизации дорожного движения на пересечениях улично-дорожной сети шире применять транспортное моделирование [7].

Библиографический список

1. Корягин, М. Е. Моделирование маршрутной сети прямоугольного города с Манхэттенской метрикой / М. Е. Корягин, А. С. Березина. – Текст : непосредственный // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2018. – № 2. – С. 21–25.
2. Вучик, В. Р. Транспорт в городах, удобных для жизни : монография / В. Р. Вучик. – Москва : Территория будущего, 2011. – 413 с. – Текст : непосредственный.
3. Андронов, Р. В. Применение адаптивного регулирования на пересечении городских улиц в сравнении с устройством развязки в разных уровнях / Р. В. Андронов, Е. Э. Леверенц, В. В. Морозов. – DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-4-194-200. – Текст : непосредственный // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 4 (63). – С. 194–200.
4. Якимов, М. Р. Транспортное планирование. Особенности моделирования транспортных потоков в крупных городах : монография / М. Р. Якимов, А. А. Арепьева. – Москва : Логос, 2016. – 280 с. – Текст : непосредственный.
5. Захаров, Д. А. Особенности развития дорожной инфраструктуры в городе Тюмени / Д. А. Захаров, Е. В. Дрогалева, В. С. Марилов – Текст : непосредственный // Строительный вестник. – № 2 (80). – 2017. – С. 56–61.
6. Расчет длительности пешеходной фазы основного такта работы светофорного объекта / И. Д. Алфёрова, З. В. Альметова, В. А. Городокин, В. Д. Шепелев. – DOI: 10.15593/24111678/2019.01.01. – Текст : непосредственный // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2019. – № 1. – С. 5–11.
7. Андронов, Р. В. Расчет методом Монте-Карло задержек транспортных средств на изолированном регулируемом пересечении при его работе на высоких уровнях загрузки / Р. В. Андронов, Е. Э. Леверенц. – Текст : непосредственный // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 1(60). – С. 221–226.
8. Дроздов, Г. Д. Развитие транспортной инфраструктуры в городской агломерации : монография / Г. Д. Дроздов, В. А. Попов, В. А. Иванов. – Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербургского гос. экономического ун-та, 2014. – 121 с. – Текст : непосредственный.
9. Якимов, М. Р. Транспортное планирование. Практические рекомендации по созданию транспортных моделей городов в программном комплексе PTV Vision® VISUM : монография / М. Р. Якимов, Ю. А. Попов. – Москва : Логос, 2014. – 200 с. – Текст : непосредственный.
10. Зырянов, В. В. Динамическая маршрутизация транспортных потоков как метод снижения транспортной нагрузки на элементы УДС / В. В. Зырянов, А. А. Феофилова, Н. Н. Чуклинов. – Текст : непосредственный // Мир транспорта и технологических машин. – 2018. – № 1(60). – С. 74–80.

References

1. Koryagin, M. E., & Berezina, A. S. (2018). Simulation of the route network of the rectangular city with Taxicab geometry. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, (2), pp. 21-25. (In Russian).
2. Vuchic, V. R. (1999). *Transportation for livable cities*. London, Publ. Routledge, 378 p. (In English).
3. Andronov, R. V., Leverents, E. Eh., & Morozov, V. V. (2017). Application of adaptive traffic regulation system at the city street intersections in comparison with the junction arrangement on different levels.

Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov (Bulletin of Civil Engineers), 4(63), pp. 194-200. (In Russian). DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-4-194-200

4. Yakimov, M. R., & Arep'eva, A. A. (2016). Transportnoe planirovanie. Osobennosti modelirovaniya transportnykh potokov v krupnykh gorodakh. Moscow, Logos Publ., 280 p. (In Russian).
5. Zakharov, D. A., Drogaleva, E. V., & Marilov, V. S. (2017). Osobennosti razvitiya dorozhnoy infrastruktury v gorode Tyumeni. Stroitel'nyy vestnik, 2(80), pp. 56-61. (In Russian).
6. Alferova, I. D., Almetova, Z. V., Gorodokin, V. A., & Shepelev, V. D. (2019). The pedestrian phase durational calculation in main tact of the traffic light object cycle. Transport. Transport facilities. Ecology, (1), pp. 5-11. (In Russian). DOI: 10.15593/24111678/2019.01.01
7. Andronov, R. V., & Leverents, E. E. (2017). Calculation of vehicles' delay at an isolated regulated intersection characterized with a high value of traffic load coefficient using the Monte Carlo technique. Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov (Bulletin of Civil Engineers), 1 (60), pp. 221-226. (In Russian).
8. Drozdov, G. D., Popov, V. A., & Ivanov, V. A. (2014). Razvitie transportnoy infrastruktury v gorodskoy aglomeratsii. St. Petersburg, Saint Petersburg State University of Economics Publ., 121 p. (In Russian).
9. Yakimov, M. R., & Popov, Yu. (2014). Transport planning. Practical recommendations for creating transport models of cities in the software package PTV Vision® VISUM. Moscow, Logos Publ., 200 p. (In Russian).
10. Zyryanov, V. V., Feofilova, A. A., & Chuklinov, N. N. (2017). Dynamic routing of transport flows as a method of reducing the transport load for macro elements. World of transport and technological machines, 1(60), pp. 74-80. (In Russian).

Сведения об авторах

Андронов Роман Валерьевич, к. т. н., доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Тюменский индустриальный университет, e-mail: aroma77777@mail.ru

Левренец Евгений Эдуардович, старший преподаватель кафедры строительной механики, Тюменский индустриальный университет, e-mail: leverenz72@gmail.com

Information about the authors

Roman V. Andronov, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Roads and Airfields, Industrial University of Tyumen, e-mail: aroma77777@mail.ru

Evgeny E. Leverents, Senior Lecturer at the Department of Structural Mechanics, Industrial University of Tyumen, e-mail: leverenz@gmail.com

Для цитирования: Андронов, Р. В. Применение статистического моделирования для оценки эффективности адаптивного регулирования и реконструкции пересечений улично-дорожной сети / Р. В. Андронов, Е. Э. Левренец. – DOI: 10.31660/2782-232X-2021-3-40-49. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2021. – № 3. – С. 40–49.

For citation: Andronov, R. V., & Leverents, E. E. (2021). The use of statistical modeling to assess the effectiveness of the application of adaptive control and reconstruction of the road network intersections. Arkhitektura, stroitel'stvo, transport [Architecture, construction, transport], (3), pp. 40-49. (In Russian). DOI: 10.31660/2782-232X-2021-3-40-49.