

УДК 656.08:65.11

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-72-85>

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПИСАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА НА ДУБЛИРУЮЩИХ УЧАСТКАХ

**С.А. Аземша, И.Н. Кравченя***Белорусский государственный университет транспорта,  
г. Гомель, Республика Беларусь*

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Одним из показателей качественной работы городского пассажирского транспорта является регулярность движения маршрутных транспортных средств, которая напрямую зависит от грамотно составленного расписания. Актуальной является задача оптимизации расписания движения городского пассажирского транспорта с учетом повышения качества обслуживания пассажиров. Цель данной работы – разработка методики выравнивания интервалов времени между следующими друг за другом транспортными средствами разных маршрутов на дублирующих участках и оценка эффективности ее применения.

**Материалы и методы.** Предложена методика оптимизации расписания, включающая в себя следующие этапы: анализ сети общественного транспорта, выделение дублирующих участков и определение их характеристик, расчет оптимальных временных интервалов между прибытиями маршрутных транспортных средств и выравнивание этих интервалов на дублирующих участках, анализ качества скорректированного расписания движения маршрутных транспортных средств и расчет эффекта. Реализована имитационная модель городского пассажирского транспорта в системе имитационного моделирования GPSS World, которая позволяет провести тестирование методики оптимизации расписания движения маршрутных транспортных средств.

**Выводы.** Методика корректировки расписания общественного транспорта позволяет увеличить равномерность движения следующих друг за другом транспортных средств разных маршрутов на дублирующих участках, скорректировать интервалы движения для каждого маршрута, сократить нагрузку на остановочные пункты, уменьшив время простоя и длину очередей из маршрутных транспортных средств к остановочным пунктам, а также сократить время ожидания маршрутного транспортного средства теми пассажирами, перевозка которых возможна транспортными средствами нескольких маршрутов.

**Применение.** Приведенная методика апробирована на существующей транспортной сети г. Гомеля.

**Ценность.** Полученные результаты оптимизации могут быть использованы перевозчиками и операторами перевозок для повышения качества предоставляемых услуг.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** городской пассажирский транспорт, методика оптимизации расписания, маршрутное транспортное средство, дублирующий участок, интервал движения.

**Благодарности.** Выражаем благодарность руководителям транспортных предприятий, осуществляющих перевозки пассажиров в г. Гомеле, а также рецензентам данной статьи.

**Поступила 10.12.20, принята к публикации 26.02.21.**

**Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

**Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.**

*Для цитирования:* Аземша С.А., Кравченя И.Н. Оценка эффективности оптимизации расписания движения городского пассажирского транспорта на дублирующих участках / С.А. Аземша, И.Н. Кравченя. – DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-72-85> // Вестник СибАДИ. – 2021. – Т. 18, № 1(77). – С. 72–85.

© Аземша С.А., Кравченя И.Н., 2021



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-72-85>

## EFFICIENCY ASSESSMENT OF OPTIMIZING THE SCHEDULE OF URBAN PASSENGER TRANSPORT ON DUPLICATE SECTIONS

**Sergei A. Azemsha, Irina N. Kravchenia**  
Belarusian State University of Transport  
Gomel, the Republic of Belarus

### ANNOTATION

**Introduction.** One of the quality indicators of urban passenger transport services is regularity of route vehicles, which directly depends on a well-designed schedule. An urgent task is to optimize urban passenger transport schedule in response to the improvement in passenger service quality. The purpose of this work is to develop alignment technique of time intervals between consecutive vehicles of different routes on duplicate sections and efficiency assessment of its application.

**Materials and methods.** Optimization technique includes some steps: analysis of public transport network, determining a lot of duplicate sections and their characteristics, calculation the optimal time intervals among arrivals of route vehicles and alignment this intervals among consecutive route vehicles on duplicate sections, analysis of the quality of adjusted schedule of route vehicles and calculating the effect. The simulation model of urban passenger transport within simulation modelling system GPSS World is realized. It allows testing optimization technique of route vehicle scheduling.

**Conclusions.** Adjusting technique of urban passenger transport schedule allows to increase movement steadiness of consecutive vehicles of different routes on duplicate sections, adjust traffic intervals for each route, shorten the traffic load on stations, reducing idle time and queue lengths of route vehicles in front of transport stops and also minimize waiting time for route vehicle by those passengers, who can be transported along several routes.

**Application.** The described technique was tested in the existing transport network of Gomel.

**Value.** The obtained optimization results can be used by carriers and transport operators to improve the quality of services provided.

**KEYWORDS:** urban passenger transport, scheduling technique, route vehicles, duplicate sections, traffic interval.

**Submitted 10.12.20, revised 26.02.21.**

**The authors have read and approved the final manuscript.**

**Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.**

*For citation:* Azemsha S.A., Kravchenia I.N. Efficiency assessment of optimizing the schedule of urban passenger transport on duplicate sections. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2021; 18 (1):72-84. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2021-18-1-72-85>

©Azemsha S.A., Kravchenia I.N., 2021



Content is available under the license  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

## ВВЕДЕНИЕ

Современный городской пассажирский транспорт, от качественной и стабильной работы которого зависят многие аспекты городской жизнедеятельности, является важнейшей системой, обеспечивающей экономическое развитие городов, формирование комфортных условий проживания населения. Доступность и качество работы городского пассажирского транспорта во многом определяют реальный уровень жизни населения, социальный климат, а снижение его привлекательности приводит к использованию пассажирами личных автомобилей, что оказывает негативное влияние на экологическую обстановку городов [1].

При составлении расписания городского пассажирского транспорта необходимо учитывать, чтобы расписание было максимально рациональным и обеспечивало качественное обслуживание населения (т. е. создавало пассажирам лучшие условия пользования маршрутными транспортными средствами и проезд с минимальной затратой времени), движение маршрутных транспортных средств в соответствии с пассажиропотоками на маршрутах, регулярность движения, координацию движения маршрутных транспортных средств с движением других видов пассажирского транспорта.

Вопросы оптимизации расписания городского пассажирского транспорта отражены во многих научных трудах [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22]. В соответствии с различными особенностями разработанные подходы можно разделить на следующие группы: интерактивная графическая визуализация и оптимизация, методы математического программирования, эвристический и метаэвристический подходы. Методы интерактивной графической оптимизации были предложены несколькими исследователями. В работах [2, 3] дана методология корректировки расписания общественного транспорта в режиме реального времени, основанная на пространственно-временных графических методах с использованием многокритериального анализа для сокращения времени в пути и уменьшения активного потребления энергии. Новый инструмент визуализации BusVis для планирования поездок на общественном

транспорте, объединяющий методы компоновки графиков и позволяющий визуально сравнивать время в пути и направления движения, описан в работе [4].

Второй подход, широко встречающийся в литературе, использует методы математического программирования. В работе [5] авторы разработали двухцелевую модель целочисленного программирования, учитывающую интересы операторов общественного транспорта при оптимизации и синхронизации расписания, а также распределение спроса пользователей. В работе [6] предложена математическая модель для реализации перевозочного процесса различных видов пассажирского транспорта в точке их притяжения. В качестве основного условия функционирования рассматривается соблюдение условия ритмичности подвижного состава на остановочно-пересадочных пунктах. В работе [7] сформулирована двухуровневая модель математического программирования, в которой проектирование расписания и выбор маршрутов одновременно определяются с помощью двух стратегий: адаптивных и неадаптивных маршрутов. В работе [8] для планирования общественного транспорта предложены подходы смешанного целочисленного линейного программирования.

В третьей группе используются эвристические и метаэвристические подходы: генетический алгоритм, имитационный отжиг, оптимизация муравьиной колонии. В работе [9] для интегрированного планирования расписания разработана многопродуктовая потоковая модель, а также предложен метаэвристический подход к решению этой задачи. В работе [10] представлен генетически обоснованный алгоритм синхронизации линий общественного транспорта в пересадочном узле. Описанный подход основан на моделировании спроса на изменение линий общественного транспорта с помощью генетического алгоритма. Для формирования расписания городского пассажирского транспорта, обеспечивающего максимальную удовлетворенность пассажиров и пассажироперевозчиков одновременно, в работах<sup>1</sup> [11, 12] авторы предложили использование муравьиного алгоритма.

<sup>1</sup> Горохова Е. С., Кочегурова Е. А. Формирование расписания пассажирского транспорта с помощью муравьиного алгоритма // Молодежь и современные информационные технологии : сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 9–13 ноября 2015, Томск : ТПУ, 2016. Т. 1. С. 122-123.

Для повышения качества обслуживания пассажиров ряд авторов<sup>2, 3</sup> [19, 20, 21, 22] при разработке расписания городского пассажирского транспорта предлагают учитывать совместные участки движения транспортных средств разных маршрутов. Если на отдельном участке транспортной сети работает несколько маршрутов, то для исключения образования очередей на остановочных пунктах необходимо согласовывать графики движения транспортных средств различных маршрутов по совместным (дублирующим) участкам их движения путем корректировки времени начала движения по каждому из них. Таким образом, дублирующий участок – совместимый участок движения транспортных средств различных маршрутов. Наличие дублирующих участков маршрутов может сопровождаться образованием очередей транспорта на остановочных пунктах, а также неравномерностью интервалов движения и наполняемости транспортных средств, что приводит к увеличению времени ожидания пассажирами транспорта и негативно отражается на комфортности поездки. Законодательство Республики Беларусь в сфере транспортной деятельности<sup>4</sup> (ст. 21) указывает на то, что расписание движения транспортных средств по маршруту должно быть соотнесено с расписанием движения транспортных средств на дублирующих маршрутах, а также с расписанием движения пассажирских транспортных средств других видов транспорта. В тоже время никаких методических рекомендаций, проясняющих механизмы такого соотнесения, нет. Таким образом, задача повышения качества обслуживания пассажиров и эффективности работы городского пассажирского транспорта за счет выравнивания расписания разных маршрутов на дублирующих участках является актуальной.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предлагаемая методика оптимизации расписания городского общественного транспорта путем выравнивания интервалов вре-

мени между следующими друг за другом маршрутными транспортными средствами разных маршрутов на дублирующих участках включает следующие этапы.

На первом этапе проводится анализ городской сети и определяются: множество маршрутов общественного транспорта  $M=\{M_1, M_2, \dots, M_{Nm}\}$ ; множество остановочных пунктов  $S=\{S_1, S_2, \dots, S_{Ns}\}$ ; частота движения маршрутных транспортных средств разных маршрутов  $N_M=\{N_{M1}, N_{M2}, \dots, N_{Mm}\}$ ; множество временных интервалов прибытия/отправления маршрутных транспортных средств различных маршрутов на каждый остановочный пункт (в соответствии с существующим расписанием)  $ST=\{ST_1, ST_2, \dots, ST_{Nsd}\}$ .

Для множества маршрутов определяются: множество дублирующих участков  $D=\{D_1, D_2, \dots, D_{Nd}\}$ , протяженность дублирующих участков  $LD=\{LD_1, LD_2, \dots, LD_{Nd}\}$ , частота движения маршрутных транспортных средств разных маршрутов на дублирующих участках  $N_D=\{N_{D1}, N_{D2}, \dots, N_{Dd}\}$ , множество временных интервалов прибытия / отправления маршрутных транспортных средств различных маршрутов на каждый остановочный пункт дублирующего участка  $SDT=\{SDT_1, SDT_2, \dots, SDT_{Nsd}\}$ ; коэффициенты социальной значимости дублирующих участков  $KD=\{KD_1, KD_2, \dots, KD_{Nd}\}$  в зависимости от протяженности участка, на котором дублируются маршруты, количества маршрутов на дублирующих участках, социальной значимости обслуживаемого района: железнодорожные и автовокзалы, объекты притяжения, крупные предприятия, учебные учреждения и пр.

Определяется множество плановых периодов  $T$  оптимизации расписания, например каждый час; час пик; межпиковые периоды. Таким образом, каждый остановочный пункт  $S_j$  в плановый период  $T$  будет характеризоваться вектором  $(S_j, M_j, N_{Mij}, ST_{ijk})$ . Каждый дублирующий участок  $D_j$  в плановый период  $T$  будет характеризоваться вектором  $(D_j, KD_j, LD_j, N_{Dij}, SDT_{ij})$ .

<sup>2</sup> Усов С. П. Повышение эффективности работы городского транспорта путем корректирования расписаний дублирующих маршрутов / Обрезкова В.Е., Липенкова О.А., Липенков А.В. // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф. 15 марта 2016, Пенза: ПГУАС. 2016. С. 382-390.

<sup>3</sup> Лебідь І. Методика оптимізації розкладу руху міського громадського транспорту на різних маршрутах за ділянками, що дублюються // Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019: матеріали I Міжнар. наук.-техн. конф. 13 – 15 травня 2019 р. Вінниця: ВНТУ. 2019. С. 176-177.

<sup>4</sup> Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 22 ноября 2014 г. № 1088 «Об утверждении правил перевозок пассажиров городским электрическим транспортом и правил перевозок пассажиров метрополитеном».

Второй этап заключается в выборе дублирующего участка для оптимизации расписания и определении его характеристик. Дублирующие участки  $D=\{D_1, D_2, \dots, D_{Nd}\}$  ранжируются в порядке убывания (невозрастания) количества остановочных пунктов и маршрутов на дублирующем участке. Для оптимизации выбирается наиболее значимый дублирующий участок  $D_r$  с множеством маршрутов  $MD=\{MD_1, MD_2, \dots, MD_{Nmd}\}$ . Маршруты выбранного дублирующего участка  $D_r$  ранжируются в порядке возрастания (неубывания) количества маршрутных транспортных средств.

Для выбранных маршрутов назначается базовый остановочный пункт  $SB_r$ . При выборе базового остановочного пункта следует принимать во внимание протяженность участка, на котором дублируются маршруты, частоту движения маршрутных транспортных средств разных маршрутов на таких участках, социальную значимость обслуживаемого района.

Оптимальный интервал времени между прибытиями на базовый остановочный пункт маршрутных транспортных средств всех маршрутов  $I_{MDk}^*$  и маршрутов  $r$ -го дублирующего участка  $I_{Dr}$  определяется по формулам:

$$I_{MDk}^* = \frac{T}{N_{Mk}}, \quad (1)$$

$$I_{Dr}^* = \frac{T}{\sum_{i=1}^n N_{Dri}}, \quad (2)$$

где  $T$  – период времени планирования,  $N_{Mk}$  – количество рейсов, выполняемых на  $k$ -м маршруте в период планирования  $T$ ,  $N_{Dri}$  – количество рейсов, выполняемых на маршрутах  $r$ -го дублирующего участка;  $n$  – число маршрутов  $r$ -го дублирующего участка.

На третьем этапе для базового остановочного пункта  $SB_r$  по дублирующему участку  $D_r$  для исходного расписания в период планирования  $T$  формируется двумерная булева матрица назначений, в которой отражается назначение  $j$ -го маршрута на  $i$ -й временной интервал (таблица 1):  $x_{ij} = 1$ , если на  $i$ -й временной интервал назначен  $j$ -й маршрут,  $x_{ij} = 0$  в противном случае,  $x_{ij} = 1^*$  – обязательное назначение, которое определяет фиксированное время прибытия маршрутного транспортного средства на базовый остановочный пункт.

Для исходного расписания в период планирования  $T$  определяются характеристики матрицы назначений дублирующего участка  $D_r$  (см. таблицу 1):

– коэффициент загрузки остановочного пункта маршрутными транспортными средствами дублирующего участка, равный количеству транспортных средств, прибывающих на остановочный пункт:

$$K_{Di} = \sum_{j=1}^k x_{ij}, \quad (3)$$

–  $|I_D^* - I_i|$  – величина отклонения интервалов между следующими друг за другом маршрутными транспортными средствами от оптимальной величины дублирующего участка,

Таблица 1 – Матрица назначений дублирующего участка  $D_r$

Table 1 – Assignment matrix for the duplicate section  $D_r$

Время	$MD_1$	$MD_2$	...	$MD_k$	$K_D$	$ I_D^* - I_i $	$T_w$	$ I_{MD1}^* - I_i $	...	$ I_{MDk}^* - I_i $
$t_1$	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1k}$	$K_{D1}$	$ I_D^* - I_1 $	$T_{w1}$	$ I_{MD1}^* - I_1 $	...	$ I_{MDk}^* - I_1 $
$t_2$	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2k}$	$K_{D2}$	$ I_D^* - I_2 $	$T_{w2}$	$ I_{MD2}^* - I_2 $	...	$ I_{MDk}^* - I_2 $
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$t_i$	$x_{i1}$	$x_{i2}$	...	$x_{ik}$	$K_{Di}$	$ I_D^* - I_i $	$T_{wi}$	$ I_{MD1}^* - I_i $	...	$ I_{MDk}^* - I_i $
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$t_n$	$x_{n1}$	$x_{n2}$	...	$x_{nk}$	$K_{Dn}$	$ I_D^* - I_n $	$T_{wn}$	$ I_{MD1}^* - I_n $	...	$ I_{MDk}^* - I_n $
Сумма	$\sum_{i=1}^n x_{i1}$	$\sum_{i=1}^n x_{i2}$	...	$\sum_{i=1}^n x_{ik}$	$\sum_{i=1}^n K_{Di}$	$\sum_{i=1}^n  I_D^* - I_i $	$\sum_{i=1}^n T_{wi}$	$\sum_{i=1}^n  I_{MD1}^* - I_i $	...	$\sum_{i=1}^n  I_{MDk}^* - I_i $



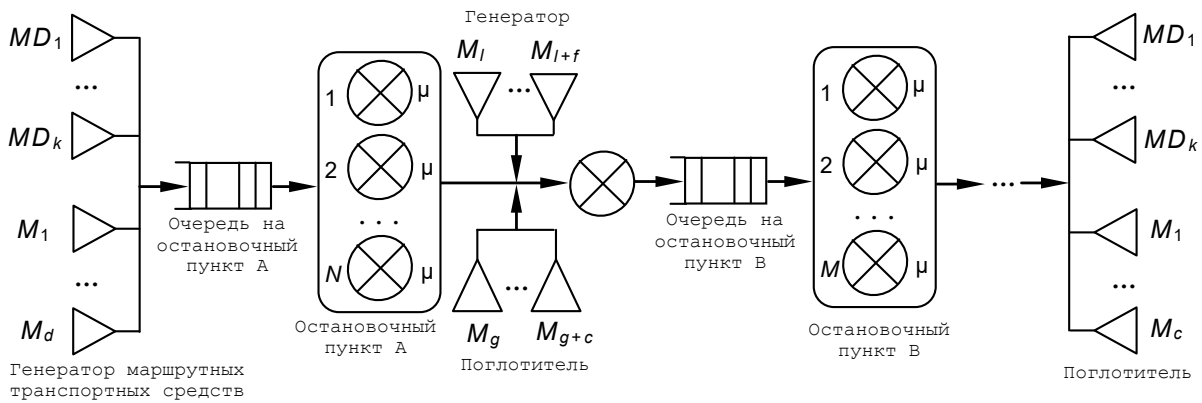


Рисунок – Концептуальная модель дублирующего участка

Figure – Conceptual model of a duplicate section

–  $|I_{MDk}^* - I_i^0|$  – величина отклонения интервалов между следующими друг за другом маршрутными транспортными средствами от оптимальной величины  $k$ -го маршрута,

–  $T_{Wi} = I_i \lambda_i$  – время ожидания пассажирами транспортных средств, где  $\lambda_i$  – интенсивность прихода пассажиров, использующих транспортные средства дублирующего участка.

На четвертом этапе для исходного расписания в плановый период  $T$  определяется значение целевой функции  $D_r^0(I)$  для дублирующего участка  $D_r$ :

$$D_r^0(I) = \sum_{i=1}^{N_D} |I_{Dr}^* - I_i^0| + \sum_{i=1}^{N_{MD1}} |I_{MD1}^* - I_i^0| + \dots + \sum_{i=1}^{N_{Mk}} |I_{MDk}^* - I_i^0| \rightarrow \min. \quad (4)$$

Значение целевой функции  $D_r^0(I)$  определяется как минимизация средней величины отклонения интервалов между следующими друг за другом маршрутными транспортными средствами от оптимальной величины для планового периода  $T$ .

Пятый этап заключается в выравнивании интервалов времени между следующими друг за другом маршрутными транспортными средствами на дублирующем участке. Для рассматриваемого дублирующего участка  $D_r$  выбирается маршрут  $MD_i$  с минимальным количеством транспортных средств. Для выбранного маршрута  $MD_i$  в базовом остановочном пункте  $SB_r$  производится выравнивание расписания движения маршрутных транспортных средств путем корректировки времени прибытия  $t_i$ . При

этом должны учитываться следующие ограничения: расписание выравненных маршрутов  $MD_{i-1}$  на дублирующем участке; оптимальный интервал времени  $I_{MDi}^*$  между прибытиями на остановочный пункт транспортных средств маршрута  $MD_i$ ; обязательные назначения для маршрута  $MD_i$ ; коэффициент загрузки остановочного пункта  $K_{Dr}$ , величина которого для дублирующего участка должна быть равна 1; возможность отправки транспортного средства с конечного пункта для выравненных маршрутов (сравнение времени прибытия и отправления транспортного средства с конечного остановочного пункта; проверка соблюдения режима труда и отдыха водителей).

Шестой этап состоит в определении характеристик матрицы назначений (см. таблицу 1) и значения целевой функции  $D_r^*(I)$  дублирующего участка  $D_r$  для планового периода  $T$  после оптимизации:

$$D_r^*(I) = \sum_{i=1}^{N_D} |I_{Dr}^* - I_i| + \sum_{i=1}^{N_{MD1}} |I_{MD1}^* - I_i| + \dots + \sum_{i=1}^{N_{Mk}} |I_{MDk}^* - I_i| \rightarrow \min. \quad (5)$$

Исходя из минимальной величины  $D_r^*(I)$  и ограничений, производится перебор матриц назначений и выбирается оптимальное расписание прибытия маршрутных транспортных средств рассматриваемого дублирующего участка  $D_r$  на базовый остановочный пункт  $SB_r$ . Далее производится расчет времени движения через остальные остановочные пункты маршрута относительно базового пункта и переход к следующему дублирующему участку.

Таблица 2 – Параметры дублирующих участков

Table 2 – Parameters of duplicate sections

Дублирующие участки	Маршруты	Количество остановочных пунктов	Сумма кол-ва маршрутов и остановочных пунктов	Длина дублирующего участка (км)
$D_1$ – «Институт «Гомельпроект» – Улица Огоренко»	№ 17, 18, 34	13	3 + 13 = 16	7,5
$D_2$ – «Вокзал – Первая школа»	№ 35, 55, 58	12	3 + 12 = 15	8,47
$D_3$ – «Вокзал – Горэлектротранспорт»	№ 10, 19, 43	10	3 + 10 = 13	4,94
$D_4$ – «Вокзал – кинотеатр «Октябрь»	№ 20, 21, 40, 52	8	4 + 8 = 12	4,47
$D_5$ – «Медгородок – Технический университет им П.О. Сухого»	№ 16, 17, 26, 33	8	4 + 8 = 12	3,39
$D_6$ – «Вокзал – Дворец культуры «Гомсельмаш»	№ 6, 8, 8А, 9	7	4 + 7 = 11	3,93

Для апробации методики оптимизации расписания движения маршрутных транспортных средств по дублирующим участкам на следующем этапе разработана имитационная модель дублирующих участков. Математическая модель движения маршрутных транспортных средств всех видов по дублирующим участкам представлена в виде системы массового обслуживания и реализована в системе имитационного моделирования GPSS World<sup>5</sup>. Концептуальная модель дублирующего участка приведена на рисунке.

В результате проведения имитационного эксперимента на разработанной имитационной модели будут получены коэффициенты загрузки остановочных пунктов при движении маршрутных транспортных средств всех видов по дублирующим участкам и длины очередей на остановочных пунктах.

На последнем этапе производится оценка эффективности оптимизации расписания по времени ожидания пассажирами прибытия маршрутных транспортных средств и равномерности их движения на дублирующих участках, занятости остановочного пункта транспортными средствами, а также эффективность оптимизации расписания движения общественного транспорта на дублирующих участках в целом.

Из матриц назначений для каждого планового периода  $T$  по дублирующим участкам определяются:

– количество периодов времени, для которых на остановочный пункт прибывают два и

более транспортных средств дублирующего участка ( $K_D \geq 2$ );

– время ожидания пассажирами транспортных средств маршрутов дублирующего участка  $T_w$ ;

– величины отклонения интервалов между следующими друг за другом маршрутными транспортными средствами от оптимальной величины для дублирующих участков до оптимизации  $D_r^0(I)$  и после оптимизации  $D_r^*(I)$ .

Эффективность оптимизации расписания движения общественного транспорта на дублирующих участках

$$F_r^* = D_r^0(I) - D_r^*(I). \quad (6)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Приведенная методика оптимизации расписания общественного транспорта на дублирующих участках апробирована на существующей транспортной сети г. Гомеля. Город Гомель, с населением около 530 000 чел., является административным центром и вторым по численности населения городом Беларуси. В настоящее время в г. Гомеле перевозка пассажиров осуществляется по 83 регулярным автобусным маршрутам. Было выявлено 6 протяженных дублирующих участков, на которых предусмотрено движение автобусов трех и более маршрутов (таблица 2).

<sup>5</sup> GPSS World Reference Manual. Minuteman Software, 4 ed. Holly Springs. NC. U.S.A. 2001.

Дублирующие участки были ранжированы в порядке убывания суммы остановочных пунктов и количества маршрутов.

Первый дублирующий участок  $D_1$  «Институт «Гомельпроект» – Улица Огоренко» является общим для маршрутов № 17, 18 и 34 на протяжении 13 остановочных пунктов, его длина 7,5 км. Данный совместный отрезок пути – один из важнейших в г. Гомеле, так как проходит через наиболее загруженные транспортным потоком улицы в Центральном районе города (Советская и Интернациональная), в их пределах на остановочных пунктах формируется большое количество ожидающих пассажиров, также часто возникают задержки общественного транспорта по причине вынужденной остановки для ожидания возможности подъезда к остановочному пункту из-за одновременного прихода нескольких маршрутных транспортных средств различных маршрутов. В качестве примера рассмотрим оптимизацию расписания движения на дублирующем участке  $D_1$  «Институт «Гомельпроект» – Улица Огоренко» в час пик для промежутка времени с 7 до 8 ч. Рассчитаем основные характеристики для промежутка времени с 7 до 8 ч по остановочному пункту «Институт «Гомельпроект»»:

– оптимальный интервал времени между прибытиями на остановочный пункт маршрутных транспортных средств дублирующего участка

$$I_{D_1}^* = \frac{60}{8 + 4 + 6} = 3,33 \text{ мин};$$

– оптимальный интервал времени между прибытиями на остановочный пункт транспортных средств маршрутов № 17, 18 и 34:

$$I_{17}^* = 7,5 \text{ мин}; \quad I_{18}^* = 15 \text{ мин}; \quad I_{34}^* = 10 \text{ мин}.$$

По рассчитанному оптимальному интервалу времени между прибытиями на остановочный пункт маршрутных транспортных средств первого дублирующего участка, который равен 3,33 мин, сдвигаем время прибытия автобусов № 17, 18 и 34 таким образом, чтобы разница между их оптимальным и реальным значением была минимальной.

Матрицы назначений для первого дублирующего участка «Институт «Гомельпроект» – Улица Огоренко» в пиковый период времени с 7 до 8 ч представлены в таблицах 3, 4.

Таблица 3 – Матрица назначений для дублирующего участка  $D_1$  при существующем расписании

Table 3 – Assignment matrix for  $D_1$  duplicate section under the existing schedule

Время прибытия	Дублирующий участок $D_1$ «Институт «Гомельпроект» – Улица Огоренко»								
	№17	№18	№34	$K_{D_1}$	$ I_{D_1}^* - I_i $	$T_w$	$ I_{17}^* - I_i $	$ I_{18}^* - I_i $	$ I_{34}^* - I_i $
7:00	0	0	1	1	–	–			1
7:04	1	0	0	1	0,67	50	0		
7:09	0	1	0	1	1,67	75		2	
7:11	1	0	0	1	1,33	15	0		
7:12	0	0	1	1	2,33	5			2
7:18	1	0	0	1	2,67	105	0		
7:22	0	1	0	1	0,67	50		2	
7:24	0	0	1	1	1,33	15			2
7:25	1	0	0	1	2,33	5	0		
7:35	1	0	0	1	6,67	275	3		
7:36	0	1	1	2	2,33	5		1	2
7:42	1	0	0	1	2,67	105	0		
7:47	0	0	1	1	1,67	75			1
7:49	1	1	0	2	1,33	15	0	2	
7:56	1	0	0	1	3,67	140	0		
7:59	0	0	1	1	0,33	30			2
Сумма	8	4	6	18	31,67	965	3	7	10



Таблица 4 – Матрица назначений для дублирующего участка  $D_1$  при оптимизированном расписании

Table 4 – Assignment matrix for  $D_1$  duplicate section under the optimized schedule

Время прибытия	Дублирующий участок $D_1$ «Институт «Гомельпроект» – Улица Огоренко»								
	№17	№18	№34	$K_{D_1}$	$ I_{D_1}^* - I_i $	$T_w$	$ I_{17}^* - I_i $	$ I_{18}^* - I_i $	$ I_{34}^* - I_i $
7:00	0	0	1	1	–	–			1
7:03	1	0	0	1	0,33	30	0		
7:07	0	1	0	1	0,67	50		2	
7:10	1	0	0	1	0,33	30	0		
7:13	0	0	1	1	0,33	30			3
7:17	1	0	0	1	0,67	50	0		
7:20	0	1	0	1	0,33	30		2	
7:23	0	0	1	1	0,33	30			0
7:25	1	0	0	1	1,33	15	1		
7:31	1	0	0	1	2,67	105	1		
7:33	0	0	1	1	1,33	15			0
7:36	0	1	0	1	0,33	30		1	
7:39	1	0	0	1	0,33	30	1		
7:43	0	0	1	1	0,67	50			0
7:46	1	0	0	1	0,33	30	0		
7:49	0	1	0	1	0,33	30		2	
7:53	1	0	0	1	0,67	50	0		
7:56	0	0	1	1	0,33	30			3
Сумма	8	4	6	18	11,31	635	3	7	7

В результате оптимизации расписания для пикового периода времени с 7 до 8 ч на первом дублирующем участке суммарная величина отклонения интервалов между следующими друг за другом автобусами от оптимальной величины снизилась с 32 до 11 мин. Суммарное время ожидания пассажирами транспортных средств сократилось на 30%.

Для оценки занятости остановочного пункта «Институт «Гомельпроект»» маршрутными транспортными средствами используются два критерия:

– коэффициент загрузки остановочного пункта транспортными средствами дублирующих участков  $K_{D_i}$ , рассчитанный по формуле (3),

– общий коэффициент загрузки остановочного пункта  $K_o$ , равный сумме коэффициентов загрузки остановочного пункта всеми видами транспортных средств :

$$K_o = K_A + K_T = (K_{D_1} + K_{D_2} + K_{D_4} + K_{ND}) + K_T,$$

где  $K_A$  – коэффициент загрузки остановочного

пункта автобусами дублирующих участков  $K_{D_i}$  и автобусами, не включенными в дублирующие участки  $K_{ND}$ ,

$K_T$  – коэффициент загрузки остановочного пункта троллейбусами.

В таблице 5 приведены результаты загрузки остановочного пункта «Институт «Гомельпроект»» маршрутными транспортными средствами до и после оптимизации для пикового периода времени с 7 до 8 ч.

Помимо коэффициентов загрузки рассчитывается длина очереди  $L_Q$  из транспортных средств на остановочном пункте. Для расчета данного показателя длина автобуса принята равной 18 м, троллейбуса – 12,3 м. В таблицу 5 внесены только те периоды времени, когда на остановочном пункте «Институт «Гомельпроект»», длина которого составляет 40 м, наблюдается очередь, то есть одновременно находится более двух автобусов, трёх троллейбусов или одного автобуса и одного троллейбуса. В таблице 5 длина очереди приведена в двух единицах измерения – в метрах и в количестве транспортных средств.

Таблица 5 – Загрузка остановочного пункта «Институт «Гомельпроект»»

Table 5 – Gomelproyekt Institute transport stop load factor

Время	До оптимизации									После оптимизации								
	$K_{D1}$	$K_{D2}$	$K_{D4}$	$K_{ND}$	$K_A$	$K_T$	$K_O$	$L_O$		$K_{D1}$	$K_{D2}$	$K_{D4}$	$K_{ND}$	$K_A$	$K_T$	$K_O$	$L_O$	
								М	ТС								М	ТС
7:00	1	1	0	0	2	1	3	48	1	1	0	0	0	1	1	2	0	0
7:09	1	0	0	1	2	0	2	36	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0
7:12	1	0	0	0	1	2	3	43	1	0	0	0	0	0	2	2	0	0
7:18	1	0	0	2	3	2	5	79	3	0	0	0	0	0	2	2	0	0
7:23	0	1	1	0	2	0	2	36	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
7:31	0	0	0	2	2	0	2	36	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
7:35	1	0	0	0	1	2	3	42	1	0	0	0	0	0	2	2	0	0
7:36	2	0	1	1	4	0	4	72	3	1	0	0	0	1	0	1	0	0
7:42	1	0	0	1	2	0	2	36	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0
7:43	0	0	1	1	2	1	3	48	1	1	0	0	0	1	1	2	0	0
7:46	0	0	0	0	0	2	2	0	0	1	0	0	0	1	2	3	43	1
7:49	2	0	0	0	2	0	2	36	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
7:56	1	0	1	0	2	0	2	36	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
Сумма	11	2	4	8	25	10	33	548	16	8	0	0	2	10	10	20	43	1

После оптимизации, при условии прибытия автобусов и троллейбусов по расписанию, очередь из одного транспортного средства будет наблюдаться только в 7:46, когда одновременно прибывает автобус №17 и два троллейбуса.

Проведена оптимизация расписания движения автобусов на шести дублирующих

участках в час пик для промежутка времени с 7 до 8 ч и для межпикового периода времени с 11 до 12 ч. Оценка эффективности скорректированного расписания по шести дублирующим участкам представлена в таблицах 6, 7.

Таблица 6 – Результаты оптимизации расписания для пикового периода времени

Table 6 – Optimization result of the schedule for the rush hours

ДУ	До оптимизации				После оптимизации				$F_r^*(I)$
	$K_d \geq 2$	$ I_D^* - I_i $	$ I_{MD}^* - I_i $	$D_r^0(I)$	$K_d \geq 2$	$ I_D^* - I_i $	$ I_{MD}^* - I_i $	$D_r^*(I)$	
$D_1$	2	32	20	52	0	11	17	28	24
$D_2$	1	24	34	58	0	9	28	37	21
$D_3$	0	34	38	72	0	9	33	42	30
$D_4$	1	39	32	71	0	4	29	33	38
$D_5$	2	31	44	75	0	13	45	58	17
$D_6$	1	15	27	42	0	2	23	25	17
Сумма	7	175	195	370	0	48	175	223	147

Таблица 7 – Результаты оптимизации расписания для межпикового периода времени

Table 7 – Optimization result of the schedule for the period between rush hours

ДУ	До оптимизации				После оптимизации				$F_r^*(I)$
	$K_D \geq 2$	$ I_D^* - I_i $	$ I_{MD}^* - I_i $	$D_r^0(I)$	$K_D \geq 2$	$ I_D^* - I_i $	$ I_{MD}^* - I_i $	$D_r^*(I)$	
$D_1$	1	33	35	68	0	15	32	47	21
$D_2$	0	24	34	58	0	6	18	24	34
$D_3$	1	35	23	58	0	3	20	23	35
$D_4$	1	26	32	58	0	9	17	26	32
$D_5$	1	28	34	62	0	9	25	34	28
$D_6$	1	20	31	51	0	5	28	33	18
Сумма	5	166	189	355	0	47	140	187	168

Величина эффективности оптимизации расписания движения автобусов по шести дублирующим участкам равна 168 мин – для межпикового периода времени, 147 мин – для пикового периода времени.

Количество периодов времени, для которых на остановочный пункт прибывают два и более автобусов ( $K_D \geq 2$ ) дублирующих участков, до оптимизации составляло 7 (для пикового периода) и 5 (для межпикового периода). В результате оптимизации коэффициент загрузки остановочного пункта автобусами дублирующих участков сокращен до  $K_D = 1$ .

Таким образом, по результатам проведенной оптимизации:

- Скорректированы интервалы движения для каждого маршрута в отдельности по дублирующим участкам. Величина отклонения интервалов между следующими друг за другом автобусами от оптимальной величины уменьшилась в среднем на 26% для межпикового периода времени и на 10% – для пикового.

- Сокращены коэффициенты загрузки остановочных пунктов автобусами дублирующих участков.

- Увеличена равномерность движения следующих друг за другом автобусов разных маршрутов на дублирующих участках. Величина отклонения интервалов между следующими друг за другом маршрутными транспортными средствами от оптимальной величины уменьшилась в среднем на 40% для межпикового периода времени и на 36% – для пикового.

- В итоге суммарная величина отклонения интервалов между следующими друг за другом автобусами от оптимальной величины по шести дублирующим участкам уменьшилась в среднем на 47% для межпикового периода времени и на 40% – для пикового.

- Сократилось время ожидания маршрутных транспортных средств теми пассажирами, перевозка которых возможна несколькими вариантами маршрутов. При этом время ожидания пассажирами транспортных средств сократилось на 27% для межпикового периода времени, и на 28% – для пикового.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При оптимизации существующего расписания пассажирского транспорта особое внимание уделялось улучшению таких показателей, как время ожидания пассажирами прибытия транспортных средств на остановочный пункт и коэффициент загрузки транспортом остановочного пункта.

Первый параметр влияет на уровень удовлетворенности от поездки пассажиров. Выравнивание интервалов времени между прибытиями следующих друг за другом транспортных средств разных маршрутов на дублирующих участках способствует равномерному наполнению транспортных средств, в результате чего увеличивается уровень комфорта для пассажиров.

Уменьшение же коэффициента загрузки транспортом остановочного пункта позволяет исключить образование очередей из маршрутных транспортных средств при посадке/высад-

ке пассажиров. В результате этого снижаются задержки транспорта, также по причине отсутствия вынужденных простоев маршрутных транспортных средств перед остановочным пунктом (для ожидания возможности подъезда к нему) и последующих разгонов, уменьшаются экономические (дополнительные расходы топлива) и экологические (от выбросов загрязняющих веществ в атмосферу) потери.

Предложенная методика оптимизации расписания общественного транспорта позволяет:

- скорректировать интервалы движения для каждого маршрута;
- увеличить равномерность движения следующих друг за другом транспортных средств разных маршрутов на дублирующих участках;
- уменьшить нагрузку на остановочные пункты;
- сократить время ожидания маршрутного транспортного средства теми пассажирами, перевозка которых возможна несколькими вариантами маршрутов;
- увеличить равномерность наполняемости маршрутных транспортных средств;
- скоординировать движение маршрутных транспортных средств с движением других видов пассажирского транспорта;
- сократить время простоя и длины очередей из маршрутных транспортных средств на подъездах к остановочным пунктам для посадки и высадки пассажиров, что позволит уменьшить расход топлива и выбросы загрязняющих веществ в атмосферу.

Проведенные экспериментальные исследования показали возможность применения разработанной методики на практике.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Azemsha S.A. Parameters of automobilization in the Republic of Belarus and their impact on greenhouse gas emissions // *Ecologica*. Beograd. 2019. Vol. 94: 217-223.
2. Cao Zh., Ceder A., Zhang S. Real-time schedule adjustments for autonomous public transport vehicles // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019. Vol. 109: 60-78. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.10.004>.
3. Cao Zh., Ceder A. Autonomous shuttle bus service timetabling and vehicle scheduling using skip-stop tactic // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019. Vol. 102: 370-395. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.03.018>.
4. Krause J., Spicker M., Wörteler L., Schäfer M., Zhang L. Interactive Visualization for Real-time Public Transport Journey Planning // *Sigrad*. 2012: 95-98.
5. Liu T., Ceder A. Integrated public transport timetable synchronization and vehicle scheduling with demand assignment: A bi-objective bi-level model using deficit function approach // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2018. Vol. 117: 935-955. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.08.024>
6. Арсланов М.А., Минатуллаев Ш.М., Филиппов А.А. Математическая модель организации перевозок пассажиров в остановочно-пересадочных пунктах при многократном изменении пассажиропотоков // *Вестник СибАДИ*. 2018. № 15 (3). С. 362–371. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-3-362-371>
7. Wu W., Liu R., Jin W., Ma Ch. Stochastic bus schedule coordination considering demand assignment and rerouting of passengers // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019. Vol. 121: 275-303. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.01.010>
8. Yin J., Yang L., Tang T., Gao Z., Ran B. Dynamic passenger demand oriented metro train scheduling with energy-efficiency and waiting time minimization: Mixed-integer linear programming approaches // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017. Vol. 97: 182-213. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.01.001>.
9. Carosi S., Frangioni A., Galli L., Girardi L., Vallese G. A heuristic for integrated timetabling and vehicle scheduling // *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019. Vol. 127: 99-124. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.07.004>
10. Naumov V. Genetic-based algorithm of the public transport lines synchronization in a transfer node // *Transportation Research Procedia*. 2020. Vol. 47: 315-322. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.104>
11. Kochegurova E.A., Fadeev A.S., Piletskya A.Y. Calculation of performance indicators for passenger transport based on telemetry information // *Engineering Technology, Engineering Education and Engineering Management*. 2015: 847-851.
12. Yurchenko M., Kochegurova E., Fadeev A., Piletskya A. Calculation of performance indicators for passenger transport based on telemetry information // *Engineering Technology, Engineering Education and Engineering Management*. 2015: 847-851.
13. Subiono, Fahim K., Adzkiya D. Generalized public transportation scheduling using max-plus algebra // *Kybernetika*. 2018. Vol. 54. Issue 2: 243-267.
14. Yakimov M., Trofimenko Yu. Developing an urban public passenger transport route network with account for natural resource limitations // *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36: 801-809. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.078>.
15. Muller S.A., Leich G., Nagel K. The effect of unexpected disruptions and information times on public transport passengers: a simulation study // *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 170: 745-750. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.161>.
16. Leng N., Corman F. The role of information availability to passengers in public transport disruptions: An agent-based simulation approach // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020. Vol. 133: 214-236. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.01.007>.

17. Leng N., Corman F. How the issue time of information affects passengers in public transport disruptions: an agent-based simulation approach // *Procedia Computer Science*. 2020. Vol. 170: 382-389.

18. Banerjee N., Morton A., Akartunali K. Passenger demand forecasting in scheduled transportation // *European Journal of Operational Research*. 2019. Vol. 286: 797-810. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.10.032>

19. Дудніков О.М., Виноградов М.С., Золотухіна І.М. Методика розробки розкладу руху автобусів різних маршрутів з урахуванням сумісної ділянки їх руху // *Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. Донецьк: ДонНТУ*. 2010. № 2(11). С. 21–31.

20. Волошин С.О., Виноградов М.С. Необхідність координації інтервалів руху автобусів на сумісних ділянках двох незалежних міських маршрутів // *Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. Донецьк: ДонНТУ*, 2008. № 1(6). С. 126–131.

21. Кажаяев А.А. Имитационная модель загрузки остановочных пунктов городского маршрутного транспорта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-zagruzki-ostanovochnyh-punktov-gorodskogo-marshrutnogo-transporta>

22. Кравченя И.Н., Подколзин А.М. Оптимизация расписания городского общественного транспорта разных маршрутов на дублирующих участках // *Организация и безопасность дорожного движения. Тюмень: ТИУ*. 2019. Т.2. С. 54–61.

## REFERENCES

1. Azemsha S.A. Parametry avtomobilizatsii v Respublike Belarus' i ih vlianie na vybrosy parnikovykh gazov [Parameters of automobilization in the Republic of Belarus and their impact on greenhouse gas emissions]. *Ecologica. Beograd*. 2019; 94: 217-223. (In Russian)

2. Cao Zh., Ceder A., Zhang S. Real-time schedule adjustments for autonomous public transport vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019; 109: 60-78. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.10.004>.

3. Cao Zh., Ceder A. Autonomous shuttle bus service timetabling and vehicle scheduling using skip-stop tactic. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019; 102: 370-395. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.03.018>.

4. Krause J., Spicker M., Wörteler L., Schäfer M., Zhang L. Interactive Visualization for Real-time Public Transport Journey Planning. *Sigrad*. 2012: 95-98.

5. Liu T., Ceder A. Integrated public transport timetable synchronization and vehicle scheduling with demand assignment: A bi-objective bi-level model using deficit function approach. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2018; 117: 935-955. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.08.024>

6. Arslanov M.A., Minatullaev S.M., Filippov A.A. Matematicheskaya model' organizatsii peresadki passazhirov v ustanovochno-ostanovochnykh punktakh pri mnogokratnom izmenenii passazhiropotokov [Mathematical model of the organization of passengers' trans-

portation in stopping-trans-relocation points with a multiple change of passenger traffic] *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018; 15(3): 362-371. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-3-362-371>. (In Russian)

7. Wu W., Liu R., Jin W., Ma Ch. Stochastic bus schedule coordination considering demand assignment and rerouting of passengers. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019; 121: 275-303. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.01.010>

8. Yin J., Yang L., Tang T., Gao Z., Ran B. Dynamic passenger demand oriented metro train scheduling with energy-efficiency and waiting time minimization: Mixed-integer linear programming approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017; 97: 182-213. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.01.001>.

9. Carosi S., Frangioni A., Galli L., Girardi L., Vallese G. A matheuristic for integrated timetabling and vehicle scheduling. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2019; 127: 99-124. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.07.004>.

10. Naumov V. Genetic-based algorithm of the public transport lines synchronization in a transfer node. *Transportation Research Procedia*. 2020; 47: 315-322. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.104>.

11. Kochegurova E.A., Fadeev A.S., Piletskya A.Y. Calculation of performance indicators for passenger transport based on telemetry information. *Engineering Technology, Engineering Education and Engineering Management*. 2015: 847-851.

12. Yurchenko M., Kochegurova E., Fadeev A., Piletskya A. Calculation of performance indicators for passenger transport based on telemetry informatio. *Engineering Technology, Engineering Education and Engineering Management*. 2015: 847-851.

13. Subiono, Fahim K., Adzkiya D. Generalized public transportation scheduling using max-plus algebra. *Kybernetika*. 2018; 54(2): 243-267.

14. Yakimov M., Trofimenko Yu. Razvitie marshrutnoy seti gorodskogo obshhestvennogo passazhirskogo transporta s uchetom ogranichenij prirodnykh resursov [Developing an urban public passenger transport route network with account for natural resource limitations]. *Transportation Research Procedia*. 2018; 36: 801-809. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.078>.

15. Muller S.A., Leich G., Nagel K. The effect of unexpected disruptions and information times on public transport passengers: a simulation study. *Procedia Computer Science*. 2020; 170: 745-750. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.161>.

16. Leng N., Corman F. The role of information availability to passengers in public transport disruptions: An agent-based simulation approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2020; 133: 214-236. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.01.007>.

17. Leng N., Corman F. How the issue time of information affects passengers in public transport disruptions: an agent-based simulation approach. *Procedia Computer Science*. 2020; 170: 382-389.

18. Banerjee N., Morton A., Akartunali K. Passenger demand forecasting in scheduled transportation. *European Journal of Operational Research*. 2019; 286: 797-810. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.10.032>.



19. Dudnikov A.N., Vinogradov N.S., Zolotukhina I.M. Metodyka rozrobky rozkladu rukhu avtobusiv riznykh marshrutiv z urakhuvannyam sumisnoyi dilyanky yikh rukhu [The Scheduling Methods for Miscellaneous Bus Routes subject to Joint Areas of their Motion]. *Visti Avtomobil'no-dorozhn'oho instytutu*. 2010; 2(11): 21-31. (In Ukrainian)

20. Voloshin S.O., Vinogradov M.S. Neobkhidnist' koordynatsiyi intervaliv rukhu avtobusiv na sumisnykh dilyankakh dvokh nezaleznykh mis'kykh marshrutiv [The need to coordinate bus travel intervals on compatible sections of two independent urban routes] *Avtomobil'no-dorozhn'oho instytutu*. 2008; 1(6): 126-131. (In Ukrainian)

21. Kazhaev A.A. Imitatsionnaya model' zagruzki ostanovochnykh punktov gorodskogo marshrutnogo transporta [Simulation model of loading public transport stops]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnaya-model-zagruzki-ostanovochnykh-punktov-gorodskogo-marshrutnogo-transporta>. (Accessed 10 June 2019). (In Russian)

22. Kravchenya I.N., Podkolzin A.M. Optimizatsiya raspisaniya gorodskogo obshchestvennogo transporta raznykh marshrutov na dubliruyushchikh uchastkakh [Optimization of public transport schedule of different routes on duplicating stretches]. *Organizatsiya i bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya*. 2019; 2: 54–61. (In Russian)

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Аземша Сергей Александрович – канд. техн. наук, доц., <https://orcid.org/0000-0002-9368-8910>, Белорусский государственный университет транспорта, заведующий кафедрой «Управление автомобильными перевозками и дорожным движением» (246022, Республика Беларусь, г. Гомель, ул. Кирова, д. 34, +375297316677, s-azemsha@yandex.ru).

Кравченя Ирина Николаевна – канд. техн. наук, доц., [orcid.org/0000-0002-2670-639X](https://orcid.org/0000-0002-2670-639X), Белорусский государственный университет транспорта, доц. кафедры «Управление автомобильными перевозками и дорожным движением» (246022, Республика Беларусь, г. Гомель, ул. Кирова, д. 34, +375296207145, ira.kravchenya@gmail.com).

## AUTHORS' AFFILIATION

Sergei A. Azemsha, Cand. of Sci, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-9368-8910>, Belarusian State University of Transport, Head of the Road Transport and Traffic Management Department,

246022, Republic of Belarus, Gomel, Kirov str., h. 34, +375297316677, s-azemsha@yandex.ru

Irina N. Kravchenia, Cand. of Sci., Associate Professor, [orcid.org/0000-0002-2670-639X](https://orcid.org/0000-0002-2670-639X), Belarusian State University of Transport, Associate Professor of the Road Transport and Traffic Management Department, 246022, Republic of Belarus, Gomel, Kirov str., h. 34, +375296207145, ira.kravchenya@gmail.com

## ВКЛАД СОАВТОРОВ

Аземша С.А. Выполнение аналитических исследований, постановка цели и задачи исследований, анализ и ознакомление с зарубежным и отечественным опытом. Выбор и обоснование научно-методических подходов к оптимизации расписания городского пассажирского транспорта на дублирующих участках маршрутов, а также способа оценки эффективности такой оптимизации. Анализ результатов полученных данных, обоснование выводов. Выявление актуальных вопросов и рекомендаций для дальнейшей проработки темы.

Кравченя И.Н. Разработка научно-методических подходов для оптимизации расписания городского пассажирского транспорта на дублирующих участках маршрутов и оценки эффективности такой оптимизации, а также получение конкретного алгоритма их реализации. Апробация полученного алгоритма на примере.

## AUTHORS' CONTRIBUTION

Sergei A. Azemsha, carrying out analytical studies, setting the goals and objectives of research, analysis and familiarization with foreign and domestic experience, selection and justification of scientific and methodological approaches to optimizing the timetable of urban passenger transport on duplicate sections of routes, as well as the method of evaluating the effectiveness of such optimization, analysis of the results of the data obtained, substantiation of the conclusions, identification of relevant issues and recommendations for further elaboration of the topic.

Irina N. Kravchenia, development of scientific and methodological approaches for optimizing the timetable of urban passenger transport on duplicate sections of routes and for evaluating the effectiveness of such optimization, as well as obtaining a concrete algorithm for their implementation, test the resulting algorithm with an example.