

УДК 656.13.05

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-91-94

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ УСТРОЙСТВА ВЫДЕЛЕННЫХ ПОЛОС ДЛЯ МАРШРУТНЫХ ПАССАЖИРСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

ЛЮ ЮЙВЭЙ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Предложено развитие методики обоснования выделенных полос для маршрутных пассажирских транспортных средств (МПТС), учитывающее неоднородность транспортного потока – проникновение на приоритетную полосу немаршрутных автомобилей, прежде всего электромобилей. Введен коэффициент неоднородности $\eta(r)$, уточнена четырехступенчатая классификация полос, а базовая граница пассажиропотока обоснована независимой экономической моделью. При доле посторонних транспортных средств $p = 5\text{--}12\%$ минимально необходимый пассажиропоток возрастает на 10–28% относительно классического критерия; зависимость подтверждена натурными данными ($r = -0,89$; $RMSE = 4,79\%$).

Ключевые слова: маршрутные пассажирские транспортные средства, выделенные полосы, неоднородность транспортного потока, коэффициент неоднородности, провозная способность, пассажиропоток, электромобили, ступенчатая классификация, транспортное моделирование.

Введение. Привлекательность маршрутного транспорта – необходимое условие перехода города к устойчивой мобильности [1; 2]. На перегонах магистральных улиц приоритет МПТС чаще всего обеспечивается выделенной полосой, однако единого физически обоснованного критерия ее устройства нет: минимальный пассажиропоток, принятый за порог в разных странах, различается более чем на 9000 пасс./ч^{1,2,3,4} [3–6].

Р.М. Зубачик показал, что порогом целесообразности должна служить не интенсивность движения МПТС, а минимальный пассажиропоток, и предложил соответствующую эмпирическую формулу¹. Однако его методика построена и проверена для однородного потока безрельсового МПТС и не учитывает неоднородность реального движения – прежде всего выезд на выделенную полосу личных электромобилей и других немаршрутных средств, доля которых в городах Беларуси и Китая устойчиво растет.

Цель работы – научно обосновать и количественно формализовать влияние неоднородности потока на целесообразность и параметры выделенной полосы, развив методику, предложенную Р.М. Зубачиком¹.

Задача актуальна потому, что рост парка личных электромобилей (к 2030 г. – до 10–15% в отдельных городах) сопровождается их допуском на полосы со знаком 5.9.1 в экспериментальных зонах. Это противоречит идее приоритета: даже кратковременное присутствие постороннего автомобиля перед стоп-линией искажает данные адаптивного управления и снижает регулярность МПТС, подрывая доверие к нему как к альтернативе личному автомобилю.

Основная часть. Сопоставление зарубежных норм (таблица 1) обнаруживает значительный разброс критериев – прямое свидетельство того, что единой методики, пригодной сразу для Беларуси и Китая, не существует.

Таблица 1. – Минимальный пассажиропоток как критерий внедрения выделенных полос по данным разных стран

Источник	Мин. пассажиропоток, пасс./ч	Дополнительные условия
Южная Корея	1800–4500	60–150 ед./ч МПТС; 3–4 полосы
США, Великобритания	2000	интенсивность МПТС 50–200 ед./ч
Китай, GA/T 507-2004	2000 / 5000	насыщенность 0,5–0,8; ≥ 3 полосы
Беларусь, СН 3.03.06-2022	не используется	частота МПТС ≥ 30 ед./ч
Р.М. Зубачик, 2015	2050–2740	непрерывное/регулируемое движение

¹ Зубачик Р.М. Вдосконалення методів забезпечення пріоритетного руху для маршрутних автобусів на вулично-дорожній мережі міста: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Зубачик Роман Михайлович; Нац. трансп. ун-т. – Київ, 2015. – 20 с.

² Highway Capacity Manual: HCM 2010 / Transportation Research Board. – Washington, DC: National Research Council, 2010. – 1650 p.

³ Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) / Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. – Köln, 2015. – 320 S.

⁴ National Association of City Transportation Officials (NACTO). Transit Street Design Guide. – Washington, DC: Island Press, 2016. – 328 p.

За основу принят критерий⁵ $Q_{Пjk} \geq Q_{Нjk}$ (где $Q_{Пjk}$ – пассажиропоток на приоритетной полосе j -го перегона в k -м направлении, $Q_{Нjk}$ – на неприоритетных полосах, пасс./ч). Он обобщен на смешанный состав МПТС через эффективную провозную способность полосы:

$$Q_{эфф,jk} = \eta(p) \cdot \sum q_{i,jk} \cdot U_i, \quad (1)$$

где $q_{i,jk}$ – интенсивность движения МПТС типа i , ед./ч; U_i – вместимость подвижной единицы, пасс.; m – число типов МПТС на маршруте (автобус, троллейбус, трамвай, электробус); $\eta(p)$ – коэффициент неоднородности потока.

Посторонний автомобиль, стоящий в очереди у стоп-линии, физически и алгоритмически перекрывает МПТС доступ к зоне детектирования систем адаптивного управления. Пока эта зона занята немаршрутным средством, система не распознает приближение МПТС и не инициирует продление разрешающего сигнала, поэтому влияние такого автомобиля на провозную способность непропорционально велико по сравнению с его долей в потоке: теряется не одна условная «единица» пропускной способности, а целый цикл приоритетного пропуска. Приняв поток проникновений простейшим, из теории массового обслуживания получаем вероятность занятости зоны детектирования как функцию интенсивности проникновений и времени ее удержания одним автомобилем: уже при интенсивности 30 ед./ч она достигает 39%. Отсюда эмпирически калиброванная зависимость:

$$\eta(p) = 1 - m_{\text{бл}} \cdot p, \quad m_{\text{бл}} \approx 1,8, \quad (2)$$

где p – доля посторонних транспортных средств на выделенной полосе. По выборке натуральных наблюдений ($N = 18$) коэффициент корреляции Пирсона $r = -0,89$, среднеквадратическая ошибка $\text{RMSE} = 4,79\%$, что статистически подтверждает адекватность зависимости (2).

По величине пассажиропотока выделенные полосы разделены на четыре ступени (таблица 2), различающиеся не только порогом, но и способом обособления – от легкой разметки до полной физической изоляции полосы (BRT). Каждой ступени отвечает свой уровень капиталоемкости и необратимости решения, поэтому корректный выбор ступени важен экономически. Границы ступеней заданы как функция коэффициента неоднородности:

$$Q_{\text{ст}}^*(p) = Q_{\text{ст,баз}} / \eta(p). \quad (3)$$

Таблица 2. – Четырехступенчатая классификация выделенных полос

Ступень	Базовый ПП, пасс./ч	ПП при $p = 10\%$, пасс./ч	Тип обособления
1. Мягкий приоритет	до 1000	до 1220	разметка 1.23, знак 5.9.1
2. Жесткий базовый	1000–2500	1220–3049	сплошная линия 1.1
3. Пространственно-конструктивный	2500–4500	3049–5488	направляющие островки
4. Абсолютный системный (BRT)	свыше 4500	свыше 5488	физическая изоляция

Совместное влияние загрузки неприоритетных полос Z и доли посторонних средств p описывает зависимость

$$Q^*(Z, p) = Q_{\text{баз}} / [\eta(p) \cdot f(Z)], \quad f(Z) = 1 - \beta \cdot (Z/Z_{\text{max}}). \quad (4)$$

При высокой загрузке ($Z \approx 0,75$) даже умеренная неоднородность ($p \approx 10\%$) поднимает требуемый порог выше 3300 пасс./ч (рисунок 1), перевода участок в следующую ступень раньше, чем при учете одного лишь фактора p .

Базовую границу $Q_{\text{баз}} = 2500$ пасс./ч (граница ступеней 2 и 3) мы обосновали независимо – из баланса социальных потерь времени вытесненного и приоритетного потоков:

$$Q_{\text{баз}} = C_{\text{п}} \cdot Y \cdot \Delta t / \Delta s, \quad (5)$$

где $C_{\text{п}}$ – провозная способность изымаемой полосы для индивидуального транспорта, авт./ч; Y – средняя занятость легкового автомобиля, пасс./авт.; Δt – прирост задержки вытесненного автомобиля, с; Δs – время, сэкономленное пассажиром МПТС благодаря приоритету, с.

При $C_{\text{п}} = 1200$ авт./ч, $Y = 1,4$ пасс./авт., $\Delta t = 100$ с, $\Delta s = 67$ с получаем $Q_{\text{баз}} \approx 2507$ пасс./ч. Это практически совпадает с величиной из зарубежных норм (см. таблицу 1) и говорит о ее объективности, а не о простом заимствовании.

Расчет для условий Минска показал: при текущей оценке доли посторонних средств $p = 5\%$ требуемый пассажиропоток растет на 10%, а при прогнозной на 2030 г. доле $p = 12\%$ – на 28%. По логистической модели роста доли электромобилей (рисунок 2) порог перехода к жесткому приоритету (ступень 2) может подняться

⁵ Зубачик Р.М. Вдосконалення методів забезпечення пріоритетного руху для маршрутних автобусів на вулично-дорожній мережі міста: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Зубачик Роман Михайлович; Нац. транспорт. ун-т. – Київ, 2015. – 20 с.

с исходных 1000 до 1300–1400 пасс./ч к 2035 г. Практически это означает, что часть участков, сегодня формально проходящих по критерию, в среднесрочной перспективе перестанет ему соответствовать без организационных мер против проникновения немаршрутных средств; это следует учитывать при долгосрочном планировании маршрутной сети и пересмотре СН 3.03.06-2022⁶.

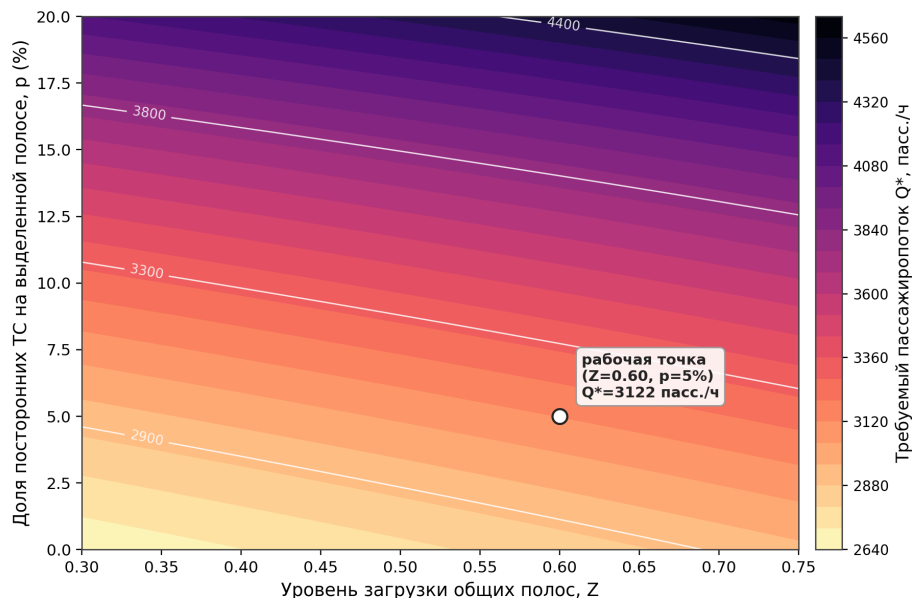


Рисунок 1. – Совместное влияние уровня загрузки Z и неоднородности потока p на требуемый пассажиропоток для границы Ступень 2 → Ступень 3

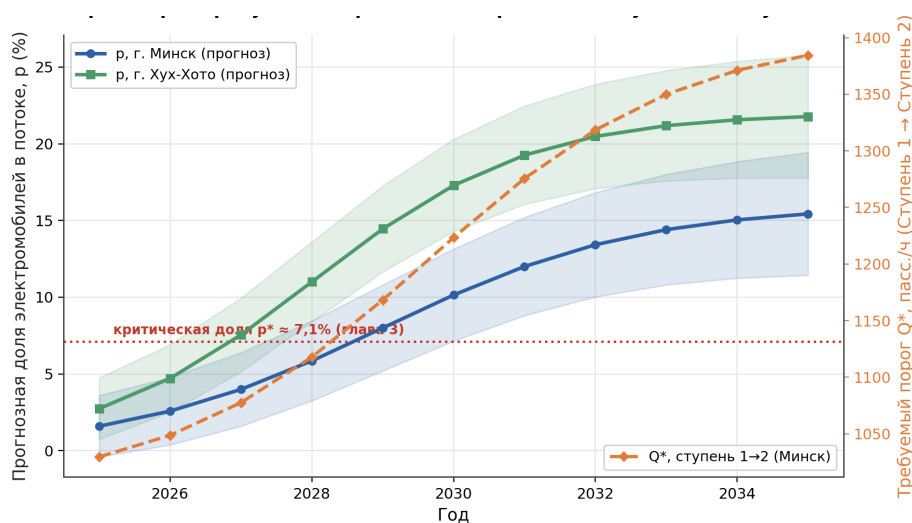


Рисунок 2. – Прогноз доли электромобилей в транспортном потоке (2025–2035) и траектория требуемого порога пассажиропотока для границы ступень 1 → ступень 2

Для применения методики без прямого обращения к формулам (1)–(5) удобна матрица выбора ступени приоритета по диапазонам Z и p , а объекты-кандидаты целесообразно ранжировать по трем показателям: фактической интенсивности движения МПТС, измеренной натурно задержке и текущей либо прогнозной доле электромобилей на участке. Такой подход делает проектные решения объективными и позволяет заранее закладывать конструктивный резерв там, где доля электромобилей в среднесрочной перспективе превысит критическую, избавляя от последующей реконструкции уже построенной инфраструктуры. Движение немаршрутных средств, включая электромобили, по выделенной полосе должно быть запрещено.

Полученные результаты согласуются с данными для смешанного состава маршрутного транспорта и с результатами имитационного моделирования регулируемых перекрестков [3; 4], что обеспечивает целост-

⁶ СН 3.03.06-2022. Улицы населенных пунктов. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2022. – 48 с.

ность подхода в рамках более широкой задачи устойчивого пространственно-временного приоритета МПТС в неоднородных потоках.

Заключение. Методика Р.М. Зубачика развита в четырех направлениях. Введен коэффициент неоднородности $\eta(p)$, обоснованный теорией массового обслуживания и проверенный натурными данными ($r = -0,89$; $RMSE = 4,79\%$). Границы четырехступенчатой классификации формализованы как функции доли посторонних средств. Установлена совместная зависимость требуемого пассажиропотока от загрузки и неоднородности потока. Базовая граница пассажиропотока получила независимое экономическое обоснование, подтвердившее ее объективность.

Практически это позволяет объективно оценивать и прогнозировать целесообразность выделенных полос при смешанном составе движения и растущей доле электромобилей – задача, особенно важная для городов Беларуси и Китая, где процесс только начинается. Методику могут применять проектные институты и подразделения ГАИ при разработке технико-экономических обоснований, а также при пересмотре СН 3.03.06-2022 – для перехода от жесткого критерия минимальной частоты МПТС к расчету эффективной провозной способности полосы с учетом фактической и прогнозной неоднородности потока.

Дальнейшая работа – уточнение коэффициентов зависимостей (2) и (4) по расширенной серии натурных наблюдений на объектах с разной долей электромобилей и распространение результатов на координированное управление потоками на смежных регулируемых перекрестках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лю Ю., Семченков С.С., Капский Д.В. Обеспечение приоритетного движения маршрутного пассажирского транспорта за счет устройства выделенных полос // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2025. – № 1(51). – С. 49–52.
2. Лю Ю. Социально-ориентированный подход к выбору приоритетных мер организации движения маршрутного пассажирского транспорта // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2026. – № 1(53). – С. 70–76.
3. Лю Ю., Скирковский С.В., Капский Д.В. Типизация проблем размещения выделенных полос для маршрутного пассажирского транспорта // Транспорт и транспортные системы: сб. науч. статей. – Минск: БНТУ, 2025. – С. 194–202.
4. Врубель Ю.А. Организация дорожного движения: учеб. пособие. – Минск: БНТУ, 2018. – 356 с.
5. Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.
6. Устойчивая городская мобильность: теория и практика развития: учеб. / А.О. Лобашов, Е.Н. Кот, Д.В. Капский и др. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 236 с.
7. Планирование устойчивой городской мобильности: учеб.-метод. пособие / А.О. Лобашов, С.С. Семченков, Е.Н. Кот и др. – Минск: БНТУ, 2022. – 180 с.

Поступила 20.07.2026

IMPROVING THE METHOD FOR ASSESSING THE FEASIBILITY OF DEDICATED LANES FOR PASSENGER VEHICLES, CONSIDERING TRAFFIC FLOW HETEROGENEITY

LIU YUWEI

(Belarusian National Technical University, Minsk)

This paper proposes a further development of the methodology for justifying dedicated lanes for public transport vehicles (PPVs), taking into account the heterogeneity of traffic flow – the intrusion of non-route vehicles, primarily electric vehicles, into the priority lane. The heterogeneity coefficient $\eta(p)$ is introduced, the four-stage lane classification is refined, and the basic passenger flow limit is substantiated using an independent economic model. With a share of non-route vehicles $p = 5\text{--}12\%$, the minimum required passenger flow increases by 10–28% relative to the classical criterion; The dependence is confirmed by field data ($r = -0,89$; $RMSE = 4,79\%$).

Keywords: public transport vehicles, dedicated lanes, traffic flow heterogeneity, heterogeneity coefficient, carrying capacity, passenger traffic, electric vehicles, tiered classification; transport modeling.