

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРАМВАЙНОГО ДВИЖЕНИЯ

д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ

(Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск;

Белорусский национальный технический университет, Минск;

Академия управления при Президенте Республики Беларусь, Минск)

А.А. КУСТЕНКО

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

д-р техн. наук, проф. О.Н. ЛАРИН

(Российский университет транспорта, Москва)

Представлены результаты исследования факторов, влияющих на эффективность трамвайного движения в городской агломерации г. Минска. Основное внимание уделено анализу задержек на регулируемых перекрестках и временным затратам, связанным с остановками трамваев на остановочных пунктах. На основе статистического анализа и математического моделирования разработана прогнозная модель времени прибытия трамваев к светофорным объектам (СФО), учитывающая такие параметры, как длительность светофорного цикла, расстояние между остановками, интенсивность пассажирообмена и технические характеристики трамваев. Выявлена прямая зависимость времени простоя трамваев на остановочных пунктах от интенсивности пассажирообмена. Результаты исследования имеют практическую значимость для повышения эффективности функционирования трамвайной сети, включая корректировку светофорных циклов, улучшение расписания и планирование новых маршрутов.

Ключевые слова: *трамвайное движение, задержки, регулируемые объекты, нерегулируемые объекты, светофорные объекты, пассажирообмен, остановочные пункты, математическая модель, скорость сообщения, городской транспорт.*

Введение. Трамвайное движение представляет собой важный компонент городской транспортной инфраструктуры, обеспечивающий экологически устойчивую и эффективную перевозку пассажиров. Однако его функционирование зависит от множества факторов, которые могут значительно снижать его эффективность. К числу таких факторов относятся задержки на регулируемых и нерегулируемых объектах, дорожно-транспортные происшествия (ДТП), а также временные потери, связанные с остановками на пассажирских пунктах. В условиях урбанизации и роста транспортной нагрузки на городские магистрали актуальность исследований, направленных на минимизацию данных факторов, становится особенно высокой [1].

В рамках настоящего исследования проанализировано влияние различных факторов на эффективность функционирования трамвайного движения в городской агломерации Минска. Основное внимание уделено изучению задержек, возникающих на регулируемых и нерегулируемых объектах, а также временным затратам, связанным с остановками трамваев на пассажирских пунктах. В качестве объекта исследования выбрана маршрутная сеть г. Минска. Для обработки данных использованы методы статистического анализа и математического моделирования, что позволило выявить ключевые закономерности и разработать прогнозные модели.

Целью исследования является разработка научно обоснованных рекомендаций по оптимизации трамвайного движения, направленных на снижение временных потерь и повышение скорости сообщения. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Проведен анализ влияния регулируемых и нерегулируемых объектов на временные задержки трамваев.
2. Исследована зависимость времени прибытия трамваев к светофорным объектам от параметров светофорного цикла.
3. Разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать время прибытия трамваев к СФО с учетом различных факторов.
4. Изучена зависимость времени простоя трамваев на остановочных пунктах от интенсивности пассажирообмена.
5. Проанализировано влияние протяженности участка безостановочного движения на скорость движения трамваев.

Результаты исследования имеют практическую значимость для оптимизации работы трамвайной сети, включая корректировку светофорных циклов, улучшение расписания движения и планирование новых маршрутов. Это позволит снизить временные потери, повысить скорость сообщения и, как следствие, улучшить качество транспортного обслуживания населения.

Основная часть. Прием скорость сообщения трамвая и, как следствие, задержки в трамвайном движении за критерий эффективности дорожного движения с участием трамвая (ДДУТ). Определим степень влияния

регулируемых, нерегулируемых объектов и ДТП с участием трамвая или на трамвайном полотне на эффективность ДДУТ [1; 2]. Для этого исследовалась работа трамвая на трамвайной сети г. Минска.

Сопоставим полученные результаты времени задержки на регулируемых и нерегулируемых объектах и задержки в результате ДТП как с участием трамвая, так и ДТП на трамвайном полотне без участия трамвая, но приведшие к задержкам в трамвайном движении. Для этого приведем полученное значение к годовым значениям:

- задержки на регулируемых объектах: 20 396 ч;
- задержки на нерегулируемых объектах: 1 485 ч;
- задержки при ДТП в год: 80,1 ч.

Для наиболее наглядного представления построим диаграмму, отражающую структуру суммарных задержек (рисунок 1).

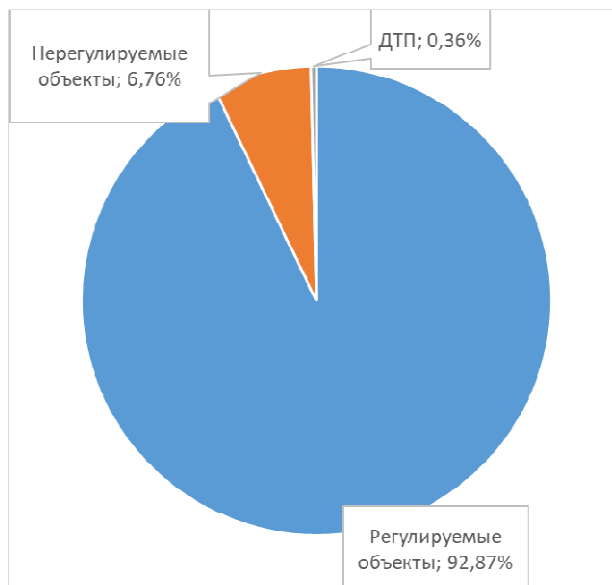


Рисунок 1. – Структура факторов дорожного движения, влияющих на дорожное движение с участием трамвая

Итак, наибольшее влияние на эффективность трамвайного движения оказывают задержки трамвая у регулируемых объектов.

Дальнейшие исследования были направлены на изучение различных аспектов влияния регулируемых объектов на трамвайное движение.

Замечено, что на задержки у регулируемых объектов влияют следующие факторы:

- продолжительность разрешающего сигнала светофора для трамваев;
- время прибытия трамвая к СФО;
- расположение СФО относительно остановочного пункта (ОП) трамвая.

Рассмотрим их подробнее.

Исследование времени прибытия трамвая к СФО относительно времени цикла. Трамвай движется не в потоке, поэтому его прибытие к СФО не растягивается на длительное время, как при движении автомобильного транспортного потока. Значит, можно предположить, что трамваю не требуется длительная фаза светофора для проезда СФО. Также можно предположить, что большинство трамваев пребывают к СФО в определенное время светового цикла и разброс во времени прибытия трамвая зависит от количества ОП перед СФО [3; 4].

Для проверки гипотезы были проведены исследования на трех различных СФО с различным количеством ОП перед ним (от 0 до 2). Все измерения на каждом СФО производились в одном плане координации, тем самым время сдвига включения трамвайной фазы ($t_{сдл}$) и время цикла (C_i) одинаковы для всех замеров на каждом СФО. Замеры проводились в солнечную погоду в межпиковое время движения трамваев.

В качестве примера полученных результатов на рисунке 2 приведены данные по количеству прибытий трамвая к регулируемому объекту на перекрестке Старовиленский тракт – ул. Нововиленская в направлении от ДС «Озеро».

Из проведенного анализа по составленным гистограммам на перекрестке ул. Я. Колоса – ул. Дорошевича (перед СФО нет ОП) 62% трамваев прибывают в интервале 10 с; на перекрестке ул. Куйбышева – пр-т Машерова (перед СФО один ОП) – 70% трамваев в интервале 15 с; на перекрестке Старовиленский тракт – ул. Нововиленская (перед СФО два ОП) – 62% трамваев в интервале 25 с.

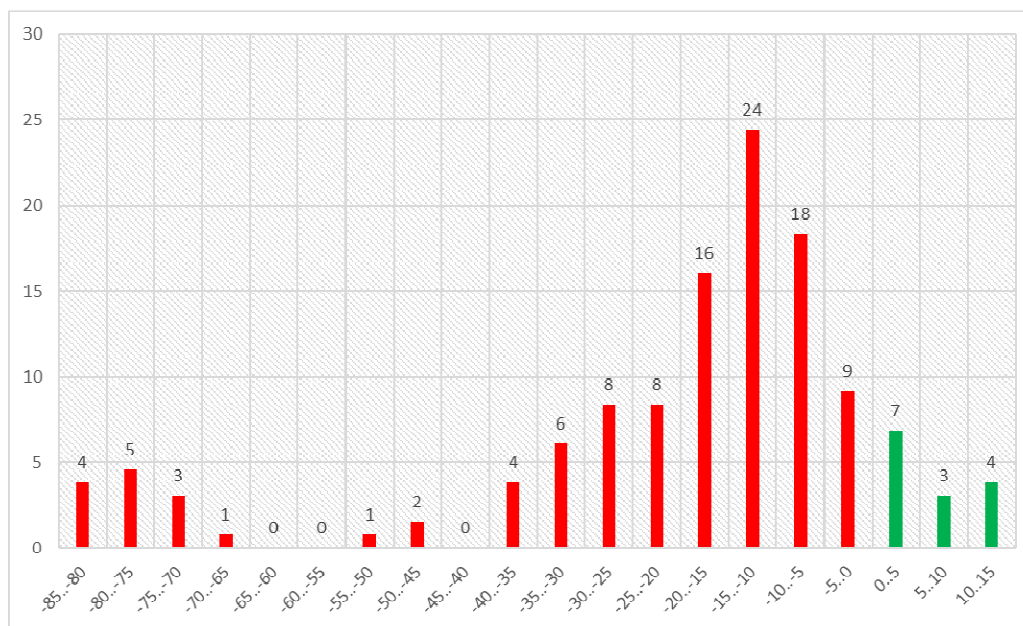


Рисунок 2. – Распределение прибытий трамвая к регулируемому объекту на перекрестке Старовиленский тракт – ул. Нововиленская

Таким образом, прибытие трамвая к СФО не носит случайный характер и предопределено следующими факторами:

- время проезда, предшествующего СФО;
- наличие и количество остановочных пунктов между двумя СФО;
- наличие иных конфликтных потоков участников дорожного движения (пешеходных, автомобильных или велосипедных).

Составление математической модели прибытия трамвая к СФО относительно времени цикла. В процессе наблюдения за движением трамвая между ОП была отмечена предопределенность прибытия трамвая к регулируемым объектам, т.е. трамваи с большей долей вероятности прибывают к регулируемому объекту в определенный интервал светофорного цикла. Данную закономерность можно использовать при организации трамвайного движения для повышения эффективности за счет регулирования отправления трамвая с конечных и промежуточных ОП.

Для подтверждения данной гипотезы и исследования наблюдаемой закономерности проведены исследования на регулируемых объектах, расположенных после перегонов с различными условиями движения трамвая (наличие нерегулируемых пешеходных переходов, остановочных пунктов, с проездом по середине проезжей части и на обособленном полотне).

На время прибытия к СФО влияют следующие факторы дорожного движения (ДД) [1; 5–7]:

- время отправления от предыдущего СФО1;
- время сдвига включения «зеленого» сигнала светофора на двух соседних СФО;
- время движения по перегону между соседними СФО;
- наличие или отсутствие на перегоне ОП и время простоя трамвая на нем;
- прочие возможные факторы, задерживающие трамвай на перегоне.

Кроме факторов ДД на время прибытия трамваев имеют значение [5; 9–12]:

- время суток (в зависимости от времени суток загруженность дорог может существенно отличаться, что сказывается на скорости движения трамваев и, как следствие, на времени их прибытия);
- расписание движения трамваев (если расписание не отлажено или не соответствует текущей ситуации на дорогах, то прибытие трамваев к регулируемому объекту может приводить к задержкам трамвая);
- погодные условия (непогода, такая как дождь, снег или сильный ветер, может существенно усложнить движение транспорта и повлиять на время прибытия трамваев к регулируемому объекту);
- техническое состояние трамвая;
- опыт водителя трамвая.

Обозначив время прибытия трамвая относительно начала включения зеленого сигнала СФО2, можно определить, будет ли задержка трамвая на данном СФО2 и ее продолжительность. Появляется возможность за счет управления продолжительностью и временем включения светофорных фаз влиять на время задержки трамвая перед СФО2 и, значит, на эффективность ДДУТ.

Все ранее определенные факторы ДД, влияющие на время прибытия трамвая к СФО2, можно записать в виде модели, которая рассчитывает время прибытия трамвая к СФО2 относительно начала включения «зеленого» сигнала светофора.

На основании исследований предложена аналитическая модель расчета времени прибытия трамвая к стоп-линии СФО2 в светофорном цикле в зависимости от времени простоя на ОП и длины перегона между СФО (рисунок 3).



Рисунок 3. – Визуализация перегона между двумя СФО

Время прибытия к СФО2 относительно времени начала светофорного цикла:

$$t_{\text{прт}}^{\text{сфо}} = \left(t_{\text{дв}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{оп}}} t_{\text{оп}i} + t_o - t_{\text{сд}} \right) \bmod C, \text{ с},$$

где $t_{\text{дв}}$ – время движения по участку маршрута, между СФО, с;

C – время цикла СФО2, с;

t_o – время отправления от СФО1, относительно времени включения «зеленого» сигнала СФО2, с;

$t_{\text{сд}}$ – временной сдвиг между включением «зеленого» сигнала цикла на двух соседних СФО, с;

$t_{\text{оп}i}$ – время простоя на i -ом ОП, с;

$n_{\text{оп}}$ – количество ОП на участке маршрута, между регулируемыми объектами.

Время на движение трамвая между СФО состоит из времени равноускоренного движения и времени остановок. Остановки могут быть технологическими (на ОП трамвая) и вызванными конфликтом с другими участниками дорожного движения.

После раскрытия в формуле значения параметра времени движения модель расчета времени прибытия трамвая к СФО примет следующий вид:

$$t_{\text{прт}}^{\text{сфо}} = \left(\sum_{i=1}^{n_{\text{оп}}} \left(\frac{l_{\text{уп}i} \cdot a_{\text{т}} + V_{\text{тпр}i}^2}{a_{\text{т}} \cdot V_{\text{тпр}i}} \right) + \sum_{i=1}^{n_{\text{оп}}} t_{\text{оп}i} + t_o - t_{\text{сд}} \right) \bmod C.$$

Для упрощения работы с полученной целевой функцией введем безразмерную величину – коэффициент синхронизации светофорных фаз (η_c):

$$\eta_c = \left\{ \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_{\text{оп}}} \left(\frac{l_{\text{уп}i} \cdot a_{\text{т}} + V_{\text{тпр}i}^2}{a_{\text{т}} \cdot V_{\text{тпр}i}} \right) + \sum_{i=1}^{n_{\text{оп}}} t_{\text{оп}i} + t_o - t_{\text{сд}} \right)}{C} \right\}.$$

(Примечание: фигурные скобки обозначают дробную часть от деления).

Таким образом, функция расчета времени прибытия трамвая к СФО2 примет следующий вид:

$$t_{\text{прт}}^{\text{сфо}} = \eta_c \cdot C,$$

где η_c – коэффициент синхронизации светофорных фаз.

Коэффициент η_c изменяется от 0 до 1.

Значение коэффициента η_c , равное 0 и близкое к 1, указывает на прибытие трамвая в начале разрешающего сигнала СФО2.

Значение η_c позволяет путем сравнения с долей «зеленого сигнала» в светофорном цикле СФО2 (λ) определить, проедет трамвай без остановки СФО2 или остановится на запрещающий сигнал светофора СФО2:

- $\lambda \leq \eta_c$ – трамвай прибывает на запрещающий сигнал светофора СФО2;
- $\lambda > \eta_c$ – трамвай прибывает на разрешающий сигнал светофора СФО2,

где λ – доля разрешающего сигнала для трамвая в светофорном цикле,

$$\lambda = \frac{t_2}{c}.$$

В полученной модели остаются неизвестными параметры времени простоя трамвая на ОП ($t_{опi}$) и максимальная скорость трамвая на i -ом участке транспортной сети (V_{Ti}).

Технологические особенности работы трамвая как маршрутного пассажирского транспортного средства обязывает трамвай осуществлять остановки для посадки и высадки пассажиров. Продолжительность простоя на остановочных пунктах напрямую влияет на эффективность ДДУТ. Для трамвайного движения колебания времени простоя на ОП приводит к сбою в регулярности движения трамвая. Кроме того, трамвай может выпасть из «зеленой волны», дополнительно теряя время на простой на светофорных объектах.

Основное влияние на время простоя на ОП оказывает время посадки-высадки пассажиров, остальные факторы косвенны и могут быть минимизированы за счет применения технических решений, таких как кнопка открытия дверей по требованию пассажира и автомат по продаже талонов в салоне трамвая.

Время посадки-высадки напрямую зависит от пассажирообмена на ОП.

Пассажирообмен остановочного пункта ($Q_{пас.об}$) – это суммарное число пассажиров, подходящих на остановочный пункт и садящихся в транспортное средство, и пассажиров, выходящих из салона пассажирского транспортного средства на данном остановочном пункте в единицу времени.

Построим точечный график с последующим подбором подходящей аппроксимирующей функции (линии тренда) (рисунок 4).

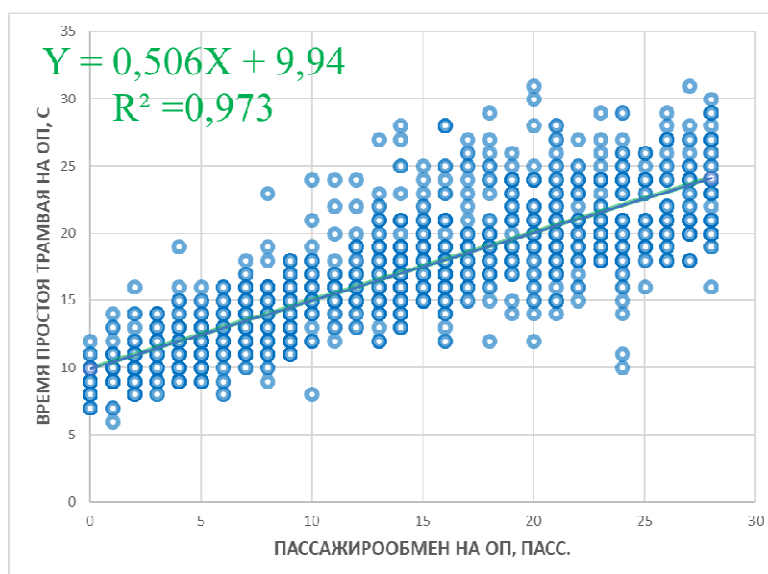


Рисунок 4. – Зависимость времени простоя трамвая на остановочном пункте от пассажирообмена на нем

Используя данные, подробно рассмотрим параметры полученного уравнения регрессии и значимость полученного уравнения (таблица 1).

Таблица 1. – Регрессионная статистика и дисперсионный анализ

Регрессионная статистика					
Множественный R					0,986
R-квадрат					0,973
Нормированный R-квадрат					0,972
Стандартная ошибка					0,727
Дисперсионный анализ					
	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	1	520,2	520,20	983,9	8,86E-23
Остаток	27	14,27	0,528		
Итого	28	534,5			

Модель регрессии показывает, что пассажирообмен является статистически значимым предиктором времени простоя трамвая. Высокий R-квадрат и низкая стандартная ошибка свидетельствуют, что модель хорошо описывает данные. F-статистика и ее p-значение подтверждают, что модель в целом значима.

Модель демонстрирует высокую точность, т.к. большинство остатков малы и близки к нулю. Отсутствие систематических ошибок (среднее значение остатков близко к нулю) указывает на то, что модель хорошо калибрована.

Таким образом, если водитель трамвая не продает талоны пассажиру, время простоя на ОП трамвая можно определить по формуле

$$t_{on} = \frac{t_n}{n_d} \cdot Q_{пас.об} + t_{о-з,д}, \text{ с,}$$

где t_n – время посадки-высадки пассажиров с учетом распределения по всем дверям ($t_n = 1,25$ с);

n_d – количество дверей в трамвае, $n_d = 2,5$ (передняя дверь трамвая обеспечивает движение пассажиров только в одном направлении);

$Q_{пас.об}$ – пассажирооборот на ОП, пасс.;

$t_{о-з,д}$ – время открытия и закрытия дверей трамвая, с ($t_{о-з,д} = 9,9$ с).

Скорость трамвая зависит от многих факторов: характеристик трамвайного вагона, состояния и расположения трамвайного полотна, интенсивности транспортного потока (если трамвай движется совместно с транспортным потоком), организации дорожного движения, расстояния между остановками трамвая [4; 5].

Для транспортной сети г. Минска и трамваев АКСМ601 скорости варьируются от 20 до 50 км/ч в зависимости от участка транспортной сети и расстояния между остановками трамвая.

С целью определения влияния протяженности участка безостановочного движения на скорость трамвая для трамвайной сети г. Минска и трамвая АКСМ601 проведены исследования на трамвайной сети г. Минска. Выбраны прямолинейные участки от 50 до 1000 м с минимальным влиянием факторов дорожного движения. Замеры производились в межпиковое время в сухую погоду. Скорость замерялась прибором Drag-ON 2 с точностью измерения до 0,01 км/ч.

Построим точечный график с последующим подбором подходящей аппроксимирующей функции (линии тренда) (рисунок 5).

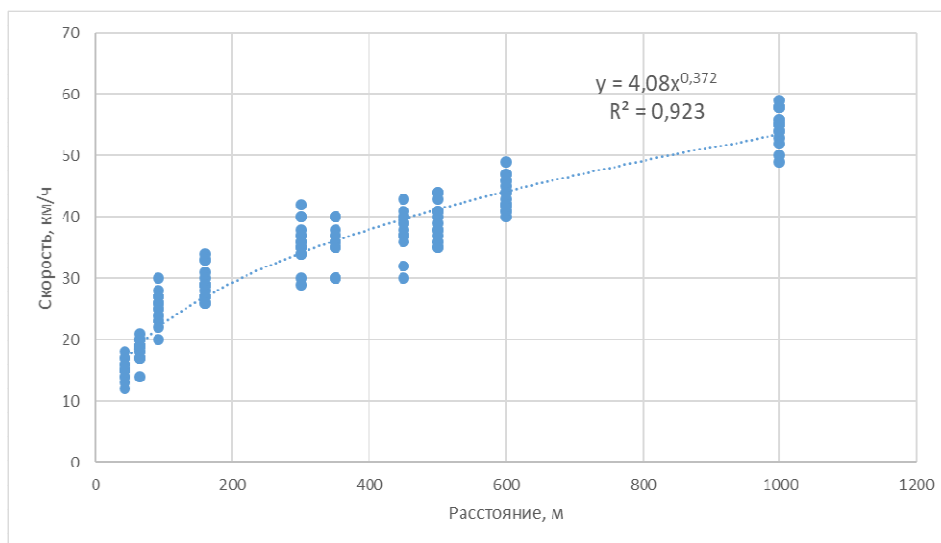


Рисунок 5. – Зависимость скорости движения трамваев от протяженности участка безостановочного движения

После анализа данных подробно рассмотрим параметры полученного уравнения регрессии и значимость полученного уравнения (таблица 2).

Таблица 2. – Регрессионная статистика и дисперсионный анализ

Регрессионная статистика					
Множественный R					0,9571
R-квадрат					0,916
Нормированный R-квадрат					0,9055
Стандартная ошибка					3,648
Дисперсионный анализ					
	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	1	1162,14	1162,14	87,3	1,41E-05
Остаток	8	106,48	13,31		
Итого	9	1268,6			

Модель регрессии статистически значима и хорошо объясняет вариацию зависимой переменной. Высокий R^2 и низкая стандартная ошибка указывают на высокую точность модели. Остатки случайно распределены вокруг нуля, что подтверждает адекватность модели. Гетероскедастичность отсутствует. Выбросы не обнаружены. Распределение остатков близко к нормальному. Это позволяет сделать вывод, что модель хорошо описывает данные и ее можно использовать для прогнозирования.

На основе результатов исследования запишем зависимость между скоростью трамвая и протяженностью участка безостановочного движения:

$$V_m = a \cdot l_{ум}^b, \text{ км/ч}, \quad (1)$$

где a и b – коэффициенты, учитывающие разрешенную скорость, особенности технического состояния трамвая и трамвайного полотна и особенности психоэмоционального состояния водителей трамвая, опережение или отставания от расписания.

Таким образом a и b в формуле (1) для транспортной сети г. Минска составят $a = 4,08$ и $b = 0,37$.

Закключение. В рамках проведенного исследования определены ключевые факторы, оказывающие влияние на ДДУТ, а также дана оценка степени их воздействия на эффективность функционирования трамвайной системы. В частности, проанализированы временные параметры простоя трамваев на ОП, что позволило выявить закономерности, связанные с процессами посадки-высадки пассажиров и операциями открытия-закрытия дверей.

На основе собранных эмпирических данных была разработана регрессионная модель, которая позволила определить среднее время, затрачиваемое на посадку-высадку одного пассажира, а также временные интервалы, связанные с функционированием дверных механизмов для трамваев, эксплуатируемых в г. Минске. По результатам анализа полученных данных выведена аналитическая формула для расчета времени простоя трамваев на ОП в зависимости от интенсивности пассажирообмена. Данная формула учитывает такие параметры, как количество пассажиров, время, необходимое для выполнения операций с дверьми, и другие факторы, влияющие на продолжительность останова. Кроме того, в ходе исследования была изучена зависимость максимальной скорости движения трамвая от протяженности участка пути.

На основе экспериментальных данных построена степенная регрессионная модель, которая описывает взаимосвязь между длиной участка, разрешенной скоростью движения, техническим состоянием трамвая и состоянием трамвайного полотна. Данная модель позволяет прогнозировать максимальную скорость трамвая на различных участках маршрута с учетом указанных факторов. Важным результатом исследования стала разработка целевой функции, которая определяет время прибытия трамвая к СФО относительно длительности светового цикла. Эта функция учитывает как скорость движения трамвая, так и время его простоя на ОП, что позволяет более точно прогнозировать время прибытия транспортного средства к СФО. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации планов координации движения трамваев и определения времени задержки на световых объектах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Координированное управление дорожным движением / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Д.В. Рожанский и др. – Минск: БНТУ, 2011. – 230 с.
2. Кустенко, А.А. Оценка влияния скорости движения на величину потерь // Дальний восток. Автомобильный дороги и безопасность движения: межвуз. сб. науч. тр. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2009. – № 9. – 44 с.
3. Некоторые вопросы исследования пассажиропотока в трамвайном движении / А.А. Кустенко, Д.В. Капский, Н.А. Филиппова и др. // Реализация транспортной стратегии РФ до 2030 года в части развития автотранспортного комплекса: сб. науч. тр. 11-й Междунар. науч.-практ. конф. / Махачкала (20 марта 2025 г.). – М: Перо, 2025. – С. 46–50.
4. Мирончук А.А., Добрынина Ю.Ю. Исследование влияния расстояния между остановочными пунктами на скорость движения трамвая // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 4(64). – С. 39.
5. Врубель Ю.А., Капский Д.В., Кот Е.Н. Определение потерь в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2006. – 239 с.
6. Основы автоматизации интеллектуальных транспортных систем: учеб. / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, С.В. Богданович и др. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 412 с.
7. Капский Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.
8. Влияние системы организации перевозок на экологические параметры работы автомобильного транспорта / Д.В. Капский, В.Н. Седюкевич, В.К. Ярошевич и др. // Вестн. Белорус. гос. ун-та транспорта: Наука и транспорт. – 2005. – № 1(10). – С. 49–51.
9. Леонович И.И., Врубель Ю.А., Капский Д.В. Теоретические основы определения экологических потерь в дорожном движении // Эколог. вестн. – 2007. – № 1. – С. 103–111.
10. Оценка транспортных передвижений в симбиотическом городе / Д.В. Капский, В.Н. Кузьменко, Д.В. Мозалевский и др. // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. / Гомель (25–26 нояб. 2021 г.) / под общ. ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель: Белорус. гос. ун-т транспорта, 2021. – Ч. 2. – С. 80–82.
11. Капский Д.В. Разработка мероприятий по повышению безопасности движения на регулируемых перекрестках // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2005. – № 1. – С. 55–58.

12. Внедрение плана устойчивой мобильности для создания симбиотического города / Д.В. Капский, В.Н. Кузьменко, Д.В. Мозалевский и др. // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. / Гомель (25–26 нояб. 2021 г.) / под общ. ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель: Белорус. гос. ун-т транспорта, 2021. – Ч. 2. – С. 72–74.

REFERENCES

1. Vrubel', Y.A., Kapskii, D.V., Rozhanskii, D.V., Navoi, D.V. & Kot, E.Ni. (2011). *Koordinirovannoe upravlenie dorozhnym dvizheniem*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
2. Kustenka, A.A. (2009). Otsenka vliyaniya skorosti dvizheniya na velichinu poter'. *Dal'nii vostok. Avtomobil'nyi dorogi i bezopasnost' dvizheniya*, (9). Khabarovsk: Izd-vo Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta. (In Russ.).
3. Kustenka, A.A., Kapskii, D.V., Filippova, N.A. & Sovetbekov, B.S. (2025). Nekotorye voprosy issledovaniya passazhiropotoka v tramvainom dvizhenii. *Realizatsiya transportnoi strategii RF do 2030 goda v chasti razvitiya avtotransportnogo kompleksa: sbornik nauchnykh trudov 11-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Makhachkala, 20 marta 2025 goda* (46–50). Moscow: Pero. (In Russ.).
4. Mironchuk, A.A. & Dobrynina, Yu.Yu. (2020). Issledovanie vliyaniya rasstoyaniya mezhdu ostanovochnymi punktami na skorost' dvizheniya tramvaya. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 4(64), 39. (In Russ.).
5. Vrubel', Y.A., Kapskii, D.V. & Kot, E.Ni. (2006). *Opreделение poter' v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
6. Kapskii, D.V., Kot, E.N., Bogdanovich, S.V., Larin, O.N. & Semchenkov, S.S. (2022). *Osnovy avtomatizatsii intellektual'nykh transportnykh sistem*. Vologda: Infra-Inzheneriya. (In Russ.).
7. Kapskii, D.V. (2008). *Prognozirovanie avariinosti v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
8. Kapskii, D.V., Sedyukovich, V.N., Yaroshevich, V.K. & Karasevich, S.N. (2005). Vliyanie sistemy organizatsii perevozok na ekologicheskie parametry raboty avtomobil'nogo transporta. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: Nauka i transport*, 1(10), 49–51. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Leonovich, I.I., Vrubel', Yu.A. & Kapskii, D.V. (2007). Teoreticheskie osnovy opredeleniya ekologicheskikh poter' v dorozhnom dvizhenii [Theoretical Bases of Definition of Ecological Losses in Traffic]. *Ekologicheskii vestnik*, (1), 103–111. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Kapskii, D.V., Kuz'menko, V.N., Mozalevskii, D.V., Korzhova, A.V., Krasil'nikova, A.S., Karaseva, M.G. & Kustenka, A.A. (2021). Otsenka transportnykh peredvizhenii v simbioticheskom gorode. *Problemy bezopasnosti na transporte: materialy XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Gomel', 25–26 noyabrya 2021 goda*. Chast' 2, (80–82). Gomel': Belorusskii gosudarstvennyi universitet transporta. (In Russ.).
11. Kapskii, D.V. (2005). Razrabotka meropriyatiy po povysheniyu bezopasnosti dvizheniya na reguliruemyykh perekrestkakh. *Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta* (1), 55–58. (In Russ.).
12. Kapskii, D.V., Kuz'menko, V.N., Mozalevskii, D.V., Korzhova, A.V., Krasil'nikova, A.S., Karaseva, M.G. & Kustenka, A.A. (2021). Vnedrenie plana ustoichivoi mobil'nosti dlya sozdaniya simbioticheskogo goroda. *Problemy bezopasnosti na transporte: materialy XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Gomel', 25–26 noyabrya 2021 goda*. Chast' 2, (72–74). Gomel': Belorusskii gosudarstvennyi universitet transporta. (In Russ.).

Поступила 11.06.2025

STUDY OF THE IMPACT OF TRAFFIC LIGHT REGULATION ON THE EFFICIENCY OF TRAM TRAFFIC

D. KAPSKI

*(Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, Minsk;
Belarusian National Technical University, Minsk;*

Academy of Public Administration under the President of the Republic of Belarus, Minsk)

A. KUSTENKA

(Belarusian National Technical University, Minsk)

O. LARIN

(Russian University of Transport, Moscow)

The article presents the results of a study on factors affecting the efficiency of tram traffic in the urban agglomeration of Minsk. The main focus is on the analysis of delays at regulated intersections, as well as time costs associated with tram stops at stations. A predictive model of tram arrival times at traffic light objects (TLOs) has been developed based on statistical analysis and mathematical modeling. A direct correlation between tram dwell time at stations and passenger exchange intensity has also been identified. The results of the study have practical significance for improving the efficiency of tram network operations, including adjustments to traffic light cycles, schedule optimization, and planning of new routes.

Keywords: tram traffic, delays, regulated intersections, unregulated intersections, traffic light objects, passenger exchange, stations, mathematical model, travel speed, urban transport.