

ТРАНСПОРТ

УДК 656.13

А. Н. Дудников, канд. техн. наук, С. А. Легкий, канд. экон. наук,
А. В. Фильчаков

Автомобильно-дорожный институт
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

РАСЧЕТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЦИКЛА ТРЕХФАЗНОГО СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ПЕРЕКРЕСТКАХ ДВУХПОЛОСНЫХ ГОРОДСКИХ УЛИЦ

Проведен анализ существующих методов организации движения транспортных средств при левых поворотах на перекрестках со светофорным регулированием. Получена новая формула расчета длительности цикла трехфазного светофорного регулирования на перекрестках двухполосных городских улиц, учитывающая обеспечение необходимой их пропускной способности.

Ключевые слова: расчет длительности цикла, перекресток, улица городская, регулирование светофорное трехфазное, способность пропускная перекрестка

Постановка проблемы

В Донецкой Народной Республике состояние безопасности движения является сложным. Около 70 % дорожно-транспортных происшествий возникает на территории улично-дорожной сети города, из них 75 % происходит на перекрестках. Применение светофорного регулирования обеспечивает повышение безопасности движения на перекрестке улиц путем распределения транспортных и пешеходных потоков во времени. Поэтому проблема расчета оптимальной длительности цикла трехфазного светофорного регулирования на перекрестках двухполосных городских улиц с учетом их пропускной способности является актуальной.

Анализ последних исследований и публикаций

Схемы организации движения на регулируемых пересечениях исследованы достаточно хорошо [1]. Однако в условиях плотных транспортных потоков возникают ситуации, связанные с осложнением выполнения левых поворотов и снижением пропускной способности перекрестков улиц. Для указанных условий применяют методы организации движения на левом повороте [2–8]: метод просачивания; метод отсечки; метод уплотнения; организация отдельной фазы регулирования; организация удаленных за пересечения левых поворотов; организация объезда левого поворота по другому маршруту; запрет левых поворотов.

Наиболее эффективным и распространенным методом организации движения на левых поворотах перекрестка со светофорным регулированием является метод выделения фазы светофорного регулирования для обеспечения беспрепятственного движения транспортных средств. Другие методы из указанных предусматривают значительные расходы или несоответствующим образом обеспечивают безопасность движения на левых поворотах.

Организация трех фаз светофорного регулирования на перекрестках дорог в классическом случае предусматривает выделение третьей фазы в условиях значительных интенсивностей левоповоротных и пешеходных потоков, на что указывает Ю. А. Кременец [2]. Автор утверждает, что согласно средней продолжительности существующих циклов с двумя фазами регулирования, левоповоротную фазу возможно не вводить при интенсивности движения левоповоротного потока до 120 ед/ч. Кроме этого, Ю. А. Кременец отмечает, что в условиях незначительных интенсивностей встречного потока прямого направления максимальная ин-

тенсивность левоповоротного потока 120 ед/ч может быть увеличена пропорционально отношению интенсивностей встречного и попутного потоков в прямом направлении.

В указанном случае продолжительность фазы будет определяться интенсивностью потока попутного направления [2]. При этом во встречном направлении появляется избыток продолжительности зеленого сигнала, что улучшает завершение левоповоротной фазы.

Характеристика направлений движения при светофорном регулировании приведена на рисунках 1–3.

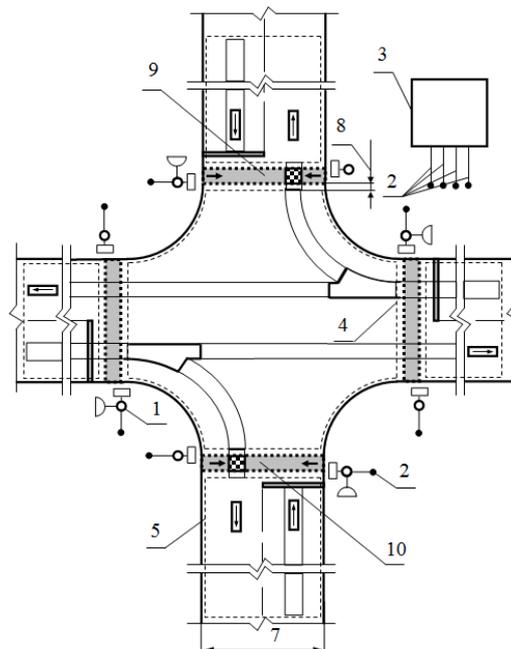


Рисунок 1 – Схема первой транспортной фазы разъезда соответствующих потоков главного направления на перекрестке с трехфазным светофорным регулированием с формированием пропуска пешеходного движения

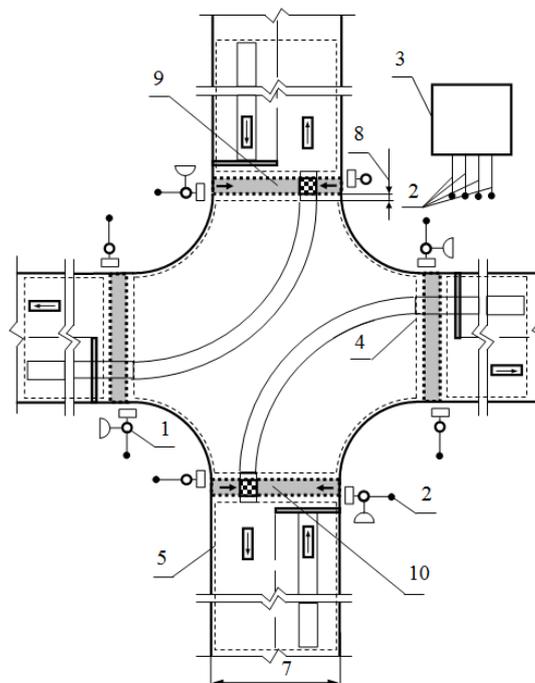


Рисунок 2 – Схема второй транспортной фазы разъезда соответствующих левоповоротных потоков главного направления на перекрестке с трехфазным светофорным регулированием с формированием пропуска пешеходного движения

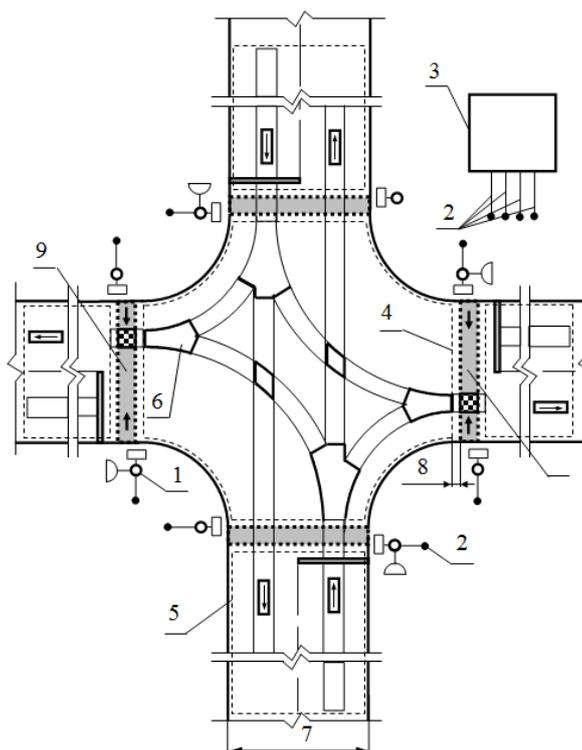


Рисунок 3 – Схема третьей транспортной фазы разъезда левоповоротных потоков соответствующих потоков второстепенного направления на перекрестке с трехфазным светофорным регулированием с формированием пропуска пешеходного движения

На рисунках 1–3 имеются следующие условные обозначения:

- 1 – светофорная опора, где установлены дорожные знаки, транспортные и пешеходные светофоры;
- 2 – электрическое соединение соответствующей светофорной колонки с дорожным контроллером;
- 3 – дорожный светофорный контроллер;
- 4 – границы площади перекрестка;
- 5 – границы площади подходов к перекрестку;
- 6 – область слияния двух транспортных потоков, осуществляющих в соответствующей транспортной фазе повороты направо и налево;
- 7 – ширина проезжей части улицы;
- 8 – интервал безопасности, ограничивающий транспортные средства при пропуске пешеходов на соответствующем переходе, в условиях выполнения ими поворота налево;
- 9, 10 – пешеходные переходы, которые задействованы в соответствующей транспортной фазе двухфазного светофорного регулирования на соответствующем городском перекрестке на одном уровне.

С учетом встречного движения прямого направления относительно левоповоротного потока организацию движения транспортных средств указанного левоповоротного потока можно разделить на два подхода:

- организация левоповоротного потока в условиях наличия разрывов во встречном потоке прямого направления в пределах соответствующей фазы светофорного регулирования;
- организация левоповоротного потока в условиях отсутствия разрывов во встречном потоке прямого направления в пределах соответствующей фазы светофорного регулирования.

Первый подход должен реализовываться на практике за счет времени продолжительности основного такта и промежуточного такта соответствующей фазы светофорного регулирования.

Второй подход должен реализовываться на практике за счет времени продолжительности промежуточного такта соответствующей фазы регулирования.

В условиях, когда времени фазы регулирования недостаточно для разъезда очереди транспортных средств, необходимо организовывать третью фазу светофорного регулирования для обеспечения соответствующего движения транспортных средств налево и повышения пропускной способности перекрестков.

Целью исследования является вывод формулы расчета длительности цикла трехфазного светофорного регулирования на перекрестках двухполосных городских улиц с учетом необходимой их пропускной способности.

Изложение основного материала исследования

Рассмотрим процесс движения транспортных средств на одном из подходов к перекрестку. В результате переключения сигналов светофора происходит задержка транспортных средств при трогании с места. При этом длительность горения зеленого сигнала на направлении для пропуски определенного количества транспортных средств составит:

$$t_3 = (d + k)(n_a - 1), \quad (1)$$

где t_3 – длительность основного такта определенной фазы двухфазного светофорного регулирования, с;

d – временной интервал между последовательно движущимися автомобилями, с;

k – задержка транспортных средств при трогании с места в результате переключения сигналов светофора, с;

n_a – число автомобилей, проезжающих в период основного такта, ед.;

$(n_a - 1)$ – число интервалов между автомобилями, проезжающими в период основного такта, ед.

Необходимая длительность основного такта с учетом выезда последнего транспортного средства с площади перекрестка отдельной фазы светофорного регулирования для бесконфликтного проезда площади перекрестка рассчитывается по формуле:

$$t'_3 = (d + k)(n_a - 1) + \frac{L_a}{V_a}, \quad (2)$$

где t'_3 – длительность основного такта с учетом времени проезда стоп-линии последним автомобилем, с.

L_a – средняя габаритная длина автомобилей в фазе светофорного регулирования;

V_a – средняя скорость движения автомобилей в фазе светофорного регулирования.

Общая длительность фазы светофорного регулирования:

$$t'_3 + t_n = (d + k)(n_a - 1) + \frac{L_a}{V_a} + \frac{L_{cm.n}}{V_a} \quad (3)$$

где $L_{cm.n}$ – расстояние между стоп-линиями на площади перекрестка, м;

t_n – длительность промежуточного такта, с:

$$t_n = \frac{L_a}{V_a} + \frac{L_{cm.n}}{V_a}. \quad (4)$$

Длительность цикла трехфазного светофорного регулирования составит:

$$(t'_3 + t_n)_1 + (t'_3 + t_n)_2 + (t'_3 + t_n)_3 = T_y, \quad (5)$$

где $(t'_3 + t_n)_1$ – длительность первой фазы регулирования, с;

$(t'_3 + t_n)_2$ – длительность второй фазы регулирования, с;

$(t'_3 + t_n)_3$ – длительность третьей фазы регулирования, с.

Используя результаты (3), получим формулу для длительности цикла трехфазного светофорного регулирования:

$$T_y = (d_1 + k_1)(n_{a1} - 1) + (d_2 + k_2)(n_{a2} - 1) + (d_3 + k_3)(n_{a3} - 1) + \frac{L_a}{V_{a1}} + \frac{L_{cm.l}}{V_{a1}} + \frac{L_a}{V_{a2}} + \frac{L_{cm.l}}{V_{a2}} + \frac{L_a}{V_{a3}} + \frac{L_{cm.l}}{V_{a3}} \quad (6)$$

где d_1, d_2, d_3 – временной интервал между последовательно движущимися автомобилями в 1-й, 2-й, 3-й фазе светофорного регулирования, с;

k_1, k_2, k_3 – задержка транспортных средств при трогании с места в 1-й, 2-й, 3-й фазе светофорного регулирования, с;

n_{a1}, n_{a2}, n_{a3} – число автомобилей, проезжающих в 1-й, 2-й, 3-й фазе светофорного регулирования, ед.;

$(n_{a1} - 1), (n_{a2} - 1), (n_{a3} - 1)$ – число интервалов между автомобилями, проезжающими в 1-й, 2-й, 3-й фазе светофорного регулирования, ед.;

V_{a1}, V_{a2}, V_{a3} – средние скорости движения транспортных средств в 1-й, 2-й, 3-й фазе светофорного регулирования, м/с.

Покажем в формуле T_y значения количества автомобилей n_a :

$$T_y = n_{a1}(d_1 + k_1) - (d_1 + k_1) + n_{a2}(d_2 + k_2) - (d_2 + k_2) + n_{a3}(d_3 + k_3) - (d_3 + k_3) + \frac{L_a}{V_{a1}} + \frac{L_{cm.l}}{V_{a1}} + \frac{L_a}{V_{a2}} + \frac{L_{cm.l}}{V_{a2}} + \frac{L_a}{V_{a3}} + \frac{L_{cm.l}}{V_{a3}} \quad (7)$$

Предполагаем следующее упрощение для транспортных потоков на пересекающихся улицах:

$$d_1 = d_2 = d_3; k_1 = k_2 = k_3 \quad (8)$$

Получим выражение длительности цикла T_y :

$$T_y = (d + k)(n_{a1} + n_{a2} + n_{a3}) - 3(d + k) + \frac{L_a}{V_{a1}} + \frac{L_{cm.l}}{V_{a1}} + \frac{L_a}{V_{a2}} + \frac{L_{cm.l}}{V_{a2}} + \frac{L_a}{V_{a3}} + \frac{L_{cm.l}}{V_{a3}} \quad (9)$$

Выразим из формулы (8) значения количества пропущенных автомобилей через перекресток улиц во время отработки цикла светофорного регулирования:

$$n_{a1} + n_{a2} + n_{a3} = \frac{T_y + 3(d + k) - \left(\frac{L_a}{V_{a1}} + \frac{L_{cm.l}}{V_{a1}} + \frac{L_a}{V_{a2}} + \frac{L_{cm.l}}{V_{a2}} + \frac{L_a}{V_{a3}} + \frac{L_{cm.l}}{V_{a3}} \right)}{d + k}, \quad (\text{ед.}) \quad (10)$$

Пропускная способность перекрестка с трехфазным светофорным регулированием составит:

$$P = 2(n_{a1} + n_{a2} + n_{a3}) \frac{3600}{T_y} \text{ авт/ч}, \quad (11)$$

где $2(n_{a1} + n_{a2} + n_{a3})$ – суммарное количество автомобилей, пропускаемых через перекресток за трехфазный цикл регулирования, ед. (2 – учитывает двухстороннее движение);

$\frac{3600}{T_u}$ – количество оборотов цикла в час, ед.

Исходя из соотношения (10), запишем уравнение баланса числа автомобилей, пропускаемых в трех фазах цикла светофорного регулирования:

$$\frac{P \cdot T_u}{2 \cdot 3600} = (n_{a1} + n_{a2} + n_{a3}) \text{ (ед.)}. \quad (11)$$

Преобразуем уравнение (9) с учетом (11):

$$\frac{T_u + 3(d+k) - \left(\frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a1}} + \frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a2}} + \frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a3}} \right)}{d+k} = \frac{P \cdot T_u}{2 \cdot 3600} \text{ (ед.)}. \quad (12)$$

Распишем уравнение (12), относительно длительности цикла:

$$\frac{T_u + 3(d+k) - \left(\frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a1}} + \frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a2}} + \frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a3}} \right)}{d+k} \cdot 2 \cdot 3600 = P \cdot T_u; \quad (13)$$

$$\left[\frac{T_u}{d+k} + 3 - \frac{\frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a1}} + \frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a2}} + \frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a3}}}{d+k} \right] \cdot 2 \cdot 3600 = P \cdot T_u; \quad (14)$$

$$3 \cdot 2 \cdot 3600 - 2 \cdot 3600 \cdot \frac{\frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a1}} + \frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a2}} + \frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a3}}}{d+k} = P \cdot T_u - 2 \cdot 3600 \cdot \frac{T_u}{d+k}; \quad (15)$$

$$3 \cdot 2 \cdot 3600 - 2 \cdot 3600 \cdot \frac{\frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a1}} + \frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a2}} + \frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a3}}}{d+k} = T_u \left[P - 2 \cdot 3600 \cdot \frac{1}{d+k} \right] \text{ (ед.)}. \quad (16)$$

Выразим из уравнения (16) длительность цикла:

$$T_u = \frac{3 \cdot 2 \cdot 3600 - 2 \cdot 3600 \cdot \frac{\frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a1}} + \frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a2}} + \frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a3}}}{d+k}}{P - 2 \cdot 3600 \cdot \frac{1}{d+k}}, \text{ с}; \quad (17)$$

Итоговая формула расчета длительности цикла трехфазного светофорного регулирования с обеспечением необходимой пропускной способности перекрестка имеет следующий вид:

$$T_u = \frac{21600 - \frac{7200}{d+k} \left(\frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a1}} + \frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a2}} + \frac{L_a + L_{cm.l}}{V_{a3}} \right)}{P - \frac{7200}{d+k}}, \text{ с}. \quad (18)$$

Заключение

Получена новая формула расчета длительности цикла трехфазного светофорного регулирования на перекрестках двухполосных городских улиц, учитывающая реализацию их необходимой пропускной способности.

Применение новой формулы расчета длительности цикла трехфазного светофорного регулирования на перекрестках двухполосных городских улиц позволяет повысить безопасность дорожного движения, снизить количество и тяжесть дорожно-транспортных происшествий за счет лучшей организации движения транспортных средств.

Список литературы

1. Столяров, А. Л. Нові підходи щодо покращення безпеки дорожнього руху (за матеріалами іноземних джерел) / А. Л. Столяров, Ю. П. Лапшин // Автошляховик України. – 2007. – № 6. – С. 16–18.
2. Кременец, Ю. А. Технические средства организации дорожного движения / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский, М. Б. Афанасьев. – Москва : Академкнига, 2005. – 255 с. – ISBN 5-94628-111-9 : 3000.
3. Метсон, Т. М. Организация движения / Т. М. Метсон, У. С. Смит, Ф. В. Хард. – Москва : Автотранзитиздат, 1960. – 464 с.
4. Drew, Donald R. Traffic Flow Theory and Control / D. Drew. – New York : McGraw-HILL BOOK COMPANY, 1968. – 467 p.
5. Живоглядов, В. Г. Теория движения транспортных и пешеходных потоков / В. Г. Живоглядов. – Ростов-на-Дону : Северо-Кавказский регион, 2005. – 1082 с.
6. Webster, F. V. Traffic Signals Road Research Technical Paper N56, HMSQ / F. V. Webster, B. M. Cobbe // London, 1966. – 111 p.
7. Дудников, А. Н. Формализация потока насыщения для полос с разрешенными маневрами в трех направлениях перекрестков городских улиц со светофорным регулированием / А. Н. Дудников, Н. С. Виноградов, В. И. Абрамов // Современные тенденции развития и перспективы внедрения инновационных технологий в машиностроении, образовании и экономике. – 2018. – Т. 4, № 1(4). – С. 141–152.
8. Дудников, А. Н. Экспериментальная проверка методики расчета потоков насыщения для полос с разрешенными маневрами в трех направлениях перекрестков городских улиц со светофорным регулированием / А. Н. Дудников, Н. С. Виноградов, В. И. Абрамов // Современные тенденции развития и перспективы внедрения инновационных технологий в машиностроении, образовании и экономике. – 2018. – Т. 5, № 1–2(3). – С. 39–47.

А. Н. Дудников, С. А. Легкий, А. В. Фильчаков
Автомобильно-дорожный институт

ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

Расчет длительности цикла трехфазного светофорного регулирования на перекрестках двухполосных городских улиц

В Донецкой Народной Республике состояние безопасности движения является сложным. Около 70 % дорожно-транспортных происшествий возникает на территории улично-дорожной сети города, из них 75 % происходит на перекрестках. Применение светофорного регулирования обеспечивает повышение безопасности движения на перекрестке улиц путем распределения транспортных и пешеходных потоков во времени. Поэтому проблема расчета оптимальной длительности цикла трехфазного светофорного регулирования на перекрестках двухполосных городских улиц с учетом их пропускной способности является актуальной.

Проведенный анализ схем организации движения левоповоротных потоков показал, что учетом встречного движения прямого направления относительно левоповоротного потока можно выделить два подхода к организации движения:

- организация левоповоротного потока в условиях наличия разрывов во встречном потоке прямого направления в пределах соответствующей фазы светофорного регулирования;
- организация левоповоротного потока в условиях отсутствия разрывов во встречном потоке прямого направления в пределах соответствующей фазы светофорного регулирования.

Первый подход должен реализовываться на практике за счет времени продолжительности основного такта и промежуточного такта соответствующей фазы светофорного регулирования.

Второй подход должен реализовываться на практике за счет времени продолжительности промежуточного такта соответствующей фазы регулирования.

В условиях, когда времени фазы регулирования недостаточно для разъезда очереди транспортных средств, необходимо организовывать третью фазу светофорного регулирования для обеспечения соответствующего движения транспортных средств налево.

На основании результатов анализа существующих схем организации движения левоповоротных потоков, с использованием метода системного анализа, предложена формула расчета длительности цикла трехфазного светофорного регулирования на перекрестках двухполосных городских улиц. Новизна данной формулы заключается в учете необходимой пропускной способности перекрестков.

Применение новой формулы расчета длительности цикла трехфазного светофорного регулирования на перекрестках двухполосных городских улиц позволяет повысить безопасность дорожного движения, снизить количество и тяжесть дорожно-транспортных происшествий за счет лучшей организации движения транспортных средств.

РАСЧЕТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЦИКЛА, ПЕРЕКРЕСТОК, УЛИЦА ГОРОДСКАЯ, РЕГУЛИРОВАНИЕ СВЕТОФОРНОЕ ТРЕХФАЗНОЕ, СПОСОБНОСТЬ ПРОПУСКНАЯ ПЕРЕКРЕСТКА

A. N. Dudnikov, S. A. Legkii, A. V. Filchakov
Automobile and Road Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka
Cycle Duration Calculation of the Three-phase Signal Control at the Intersections of Two-lane Urban Streets

In the Donetsk of People's Republic the traffic safety state is complicated. About 70 % of road accidents occur on the territory of the city's road network, of which 75 % occur at intersections. Application of the signal control provides the traffic safety increase at intersections of streets by distributing traffic and pedestrian flows in time. Therefore, the calculation problem of the optimal cycle duration of the three-phase signal control at intersections of two-lane urban streets taking into account their carrying capacity is actual.

The conducted scheme analysis of the traffic organization of the left-hand turning flows showed that taking into account the oncoming traffic of the direct direction relative to the left-hand turning flow, two approaches to the traffic organization can be distinguished:

- organization of a left-turn flow in the presence of gaps in the oncoming flow of the forward direction within the corresponding phase of the signal control;
- organization of a left-turn flow in the absence of gaps in the oncoming flow of a forward direction within the corresponding phase of the signal control.

The first approach should be implemented in practice due to the duration of the main cycle and the intermediate cycle of the corresponding phase of the signal control.

The second approach should be implemented in practice due to the duration of the intermediate cycle of the corresponding control phase.

In conditions when the time of the control phase is not enough to pass the queue of vehicles, it is necessary to organize the third phase of the signal control to ensure the appropriate movement of vehicles to the left.

Based on the results of the existing schemes analysis for traffic organization of left-turn traffic flows, using the method of the system analysis, a formula for calculating the cycle duration of three-phase signal control at the intersections of two-lane urban streets is proposed. The novelty of this formula lies in the consideration of the required traffic capacity of the intersections.

The new formula application for calculating the cycle duration of the three-phase signal control at the intersections of two-lane urban streets makes it possible to increase the traffic safety, reduce the number and severity of road accidents due to better organization of the vehicle traffic.

CYCLE DURATION CALCULATION, INTERSECTION, URBAN STREET, THREE-PHASE SIGNAL CONTROL, INTERSECTION CAPACITY

Сведения об авторах:

А. Н. Дудников

SPIN-код: 8393-4943
SCOPUS ORCID ID: 0000-0001-5082-3038
Телефон: +38 (071) 301-98-50
Эл. почта: andudnikov@rambler.ru

С. А. Легкий

SPIN-код: 6047-7196
SCOPUS ORCID ID: 0000-0003-0049-578X
Телефон: +38 (071) 316-84-49
Эл. почта: LegkiySA@mail.ru

А. В. Фильчаков

Телефон: +38 (071) 311-15-64
Эл. почта: dron.filchakov@gmail.com

Статья поступила 09.11.2020

© А. Н. Дудников, С. А. Легкий, А. В. Фильчаков, 2020

Рецензент: В. В. Быков, канд. техн. наук, доц., АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»