

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЕШЕХОДНЫМ ПЕРЕХОДОМ

В. Н. Шуть¹, Е. Е. Пролиско², Т. А. Глущенко³¹ К. т. н., доцент кафедры «Интеллектуальные информационные технологии» УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь² К. т. н., доцент кафедры «Интеллектуальные информационные технологии» УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь³ Старший преподаватель кафедры «Интеллектуальные информационные технологии» УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь**Реферат**

В статье рассматривается алгоритм адаптивного управления регулируемым пешеходным переходом. Это повышает эффективность регулирования транспортных потоков и безопасность передвижения пешеходов, так как пересечение пешеходами проезжей части будет выполняться в моменты времени с наименьшей интенсивностью движения транспорта. Одновременно с этим не будут прерываться транспортные потоки с высокой интенсивностью.

Ключевые слова: автоматизированное управление, транспортные потоки, светофорная сигнализация, светофорное регулирование, улично-дорожная сеть, городские системы управления транспортными потоками.

PEDESTRIAN CROSSING CONTROL ALGORITHMS

V. N. Shut, E. E. Prolisko, T. A. Glushchenko

Abstract

The algorithm of adaptive control of an adjustable pedestrian crossing is considered in the article. This improves the efficiency of traffic regulation and the safety of pedestrian traffic, since pedestrians crossing the carriageway will be performed at times with the least traffic. At the same time traffic flows with high intensity will not be interrupted.

Keywords: automated management, traffic flows, traffic light alarm, traffic light control, street road network, urban traffic management systems.

Введение

Несоответствие сложившейся улично-дорожной сети крупных городов условиям насыщенных и перенасыщенных транспортных потоков усложняет движение на регулируемых узлах и пешеходных переходах. Такая ситуация требует переосмысления теории и практики управления уличным движением и применения современных средств и методов управляющего, правового, организационного и градостроительного воздействий.

Отказ функционирования транспортной системы наступает в результате заторов на транспортной сети. Появление заторов, когда имеется запас пропускной способности сети, объясняется неоптимальностью работы светофорной сигнализации и общим ростом числа дорожно-транспортных происшествий, увеличивающих длины очередей ожидающих обслуживания на перекрестке транспортных средств. Заторовая ситуация может быстро распространиться на несколько ближайших узлов сети и перейти на значительную её часть (с последующим отказом в возможности управления движением на данном участке улично-дорожной сети) [1].

Реальные изменения интенсивности движения требуют соответствующей трансформации длительности фаз и циклов регулирования. При этом параметры управления должны учитывать не только суточные изменения транспортного потока, но и случайные колебания за короткий промежуток времени, совместимые с циклом светофорного регулирования (СФР). Это становится возможным только при использовании принципа

гибкого (адаптивного) регулирования, в основе которого положена обратная связь с транспортным потоком [2–4].

Применение регулируемых пешеходных переходов (РПП) значительно повышает эффективность пересечения магистральными транспортными потоками пешеходных переходов [5]. Снижает уровень опасности для пешеходов. Однако используемые в РПП алгоритмы работы не всегда отвечает требованиям транспортной сети. Основа алгоритма работы РПП заключается в изменении частоты переключения фаз в зависимости от интенсивности потока пешеходов.

На практике это работает так: пешеход подходит к РПП, нажимает тумблер вызова перехода (ТВП), и в случае, если время с прошлой смены фаз превышает минимальное время для движения автомобилей ($t_{\text{авт. мин.}}$), то светофор переключится сразу с минимальным ожиданием, а если это время меньше $t_{\text{авт. мин.}}$, то светофор переключится после истечения этого времени. Соответственно данный алгоритм адаптирует частоту переключения фаз светофора под интенсивность движения пешеходов.

Но рассмотрим ситуацию, когда участник движения (в личном или общественном транспорте) стоит на светофоре перекрестка, предшествующем РПП, и ему «загорается» зеленый сигнал светофора. Тогда он вместе со всем потоком разгоняется и подъезжает к РПП, и в этот момент ему «загорается» красный сигнал светофора. Весь поток автомобилей останавливается, едва успев разогнаться. Получается, что в некоторых случаях важна не частота смены фаз, а непосредственно момент их смены, так как не вовремя нажатая пеше-

ходом кнопка останавливает плотный транспортный поток. Применяемые алгоритмы работы РПП не учитывают данный фактор. Решением этой проблемы может стать усовершенствованный алгоритм с выделенными запрещающими и разрешающими смену фаз интервалами.

Описание и работа алгоритма преимущественного, безостановочного движения через РПП

Данный алгоритм основан на анализе транспортного потока, движущегося через РПП. Как правило, РПП расположены так, что на определенном удалении от них в обоих направлениях находятся перекрестки со светофорным регулированием.

Для реализации алгоритма необходимо провести анализ транспортных потоков, поступающих с перекрестков 1 и 2. Чтобы провести данный анализ, необходимо изучить параметры работы светофоров данных перекрестков, в частности, количество фаз X_1, X_2 и продолжительности циклов C_1, C_2 , а также плотность транспортных потоков, проходящих через перекрестки во время каждой фазы $Q_{1.1.1} \dots Q_{1.X_1.Y_1}; Q_{2.1.1} \dots Q_{2.X_2.Y_2}$. В нашем анализе необходимо учесть лишь те транспортные потоки, которые движутся от перекрестка со светофорным регулированием к РПП.

Так как перекрестки 1 и 2 находятся на некотором удалении L_1 и L_2 от РПП, необходимо рассчитать время движения транспортных потоков $t_{1\partial\epsilon}$ и $t_{2\partial\epsilon}$ от перекрестков 1 и 2 до РПП. Это можно вычислить по формуле:

$$t_{i\partial\epsilon} = \frac{V}{L_i}, \quad (1)$$

где V – разрешенная скорость движения транспорта на участке L_i , км/ч;

L_i – расстояние между РПП и перекрестком i , км.

Далее необходимо найти продолжительность цикла РПП $C_{РПП}$. Данная величина находится как наименьшее общее, кратное C_1 и C_2 .

Получив все необходимые данные, приступаем к основному алгоритму нахождения разрешающих/запрещающих интервалов. Для этого необходимо построить временную диаграмму, на которую нужно нанести продолжительности цикла $C_{РПП}$, а также транспортные потоки, проходящие через РПП от перекрестков 1 и 2 с их интенсивностью, продолжительность циклов светофоров перекрестков C_1, C_2 . Построение диаграммы следует начинать с нанесения временных интервалов $t_{1\partial\epsilon}$ и $t_{2\partial\epsilon}$ для транспортных потоков перекрестков 1 и 2, они необходимы для взаимного позиционирования транспортных потоков. Далее с момента окончания наименьшего из интервалов $t_{1\partial\epsilon}$ и $t_{2\partial\epsilon}$ отображаем продолжительность цикла $C_{РПП}$. Затем на диаграмму $C_{РПП}$ переносим транспортные потоки с диаграмм перекрестков 1 и 2 с их плотностями $Q_{1.1.1} \dots Q_{1.X_1.Y_1}; Q_{2.1.1} \dots Q_{2.X_2.Y_2}$, закрасив соответствующую область на $C_{РПП}$. По итогу диаграмма примет следующий вид (рис. 2).

Поиск свободных интервалов в цикле $C_{РПП}$

Поиск нужных интервалов заключается в нахождении на $C_{РПП}$ не закрашенных интервалов времени цикла, эти интервалы и являются оптимальными для движения пешеходов через РПП. Для правильной настройки РПП необходимо, чтобы выполнялись следующие условия:

1. На $C_{РПП}$ должен быть один и более незакрашенный интервал времени цикла, длительностью равной или большей

минимального времени, необходимого для движения пешеходов $t_{\min.\partial\epsilon.п.}$.

2. Интервалы времени цикла между незакрашенными участками должны быть меньше, чем допустимое время ожидания для пешеходов $t_{\max.ожид.п.} - t_{\min.\partial\epsilon.п.}$.

Проанализировав диаграмму (рис. 2), находим, что всё время цикла $C_{РПП}$ закрашено и не имеет свободных областей. Это означает, что нет оптимального времени для переключения фаз РПП. Такой результат получается, если при расчете учитывать все транспортные потоки от перекрестков 1 и 2.

Для дальнейшего поиска разрешающих/запрещающих интервалов необходимо из расчетов убрать транспортные потоки с минимальной интенсивностью и проверить получившуюся диаграмму на соблюдения условий, описанных выше.

После проведения всех вычитаний диаграмма примет вид, отображенный на рис. 3.

Из данной диаграммы видно, что продолжительность цикла $C_{РПП}$ можно разделить на 6 интервалов t_1-t_6 . Эти интервалы удовлетворяют условиям, описанным выше, а именно:

- разрешающие интервалы – $t_2, t_4, t_6 > t_{\min.\partial\epsilon.п.}$;
- запрещающие интервалы – $t_1, t_3, t_5 < t_{\max.ожид.п.} - t_{\min.\partial\epsilon.п.}$.

Также для оптимизации расположения разрешающих/запрещающих интервалов внутри цикла $C_{РПП}$, при наличии возможности изменения, можно сдвигать время начала цикла перекрестков 1 и 2. К примеру, для приведенной диаграммы на рис. 3 при положительном смещении начала цикла светофора перекрестка 2 относительно начала цикла перекрестка 1 можно увеличить интервалы t_2, t_5 и уменьшить интервалы t_3, t_4 и t_6 . Такие изменения более равномерно распределяют разрешающие и запрещающие участки по циклу $C_{РПП}$.

В таком случае, если настроить РПП для пропуска пешеходов только в интервалах t_2, t_4, t_6 цикла $C_{РПП}$, то удастся избежать остановки транспортных потоков с большей интенсивностью.

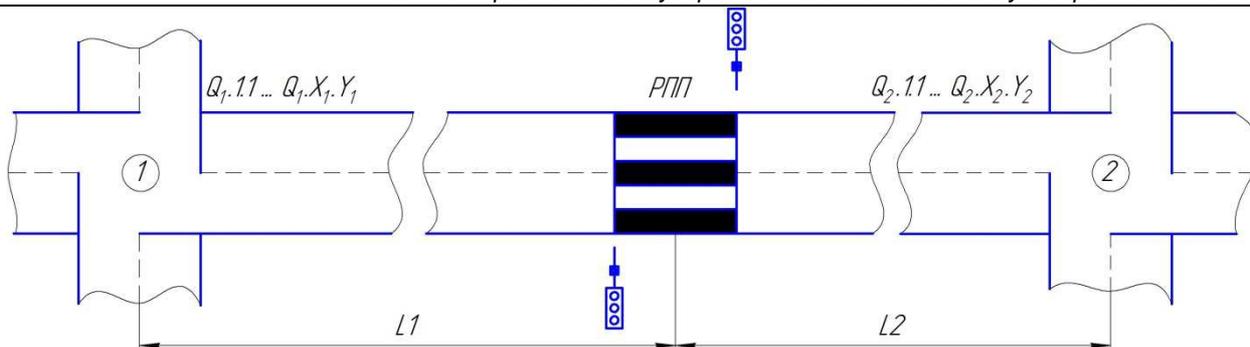
Для настройки РПП на работу по вычисленному циклу $C_{РПП}$ с запрещающими и разрешающими интервалами необходимо учесть, что если пешеходом будет нажат ТВП в момент, когда до конца разрешающего интервала осталось меньше времени, чем $t_{\min.\partial\epsilon.п.}$, то зеленый сигнал светофора РПП для пешехода должен загореться в следующем разрешающем интервале цикла $C_{РПП}$.

Для нахождения моментов времени цикла $C_{РПП}$, в которых будет осуществляться смена фаз РПП, необходимо разделить $C_{РПП}$ на интервалы реагирования на нажатие ТВП. Реализуется это следующим образом. От концов разрешающих интервалов отнимаем интервал времени $t_{\min.\partial\epsilon.п.}$. Начала этих интервалов будут одними из разделителей, вторыми будут начала разрешающих интервалов. Наглядно это представлено на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что цикл $C_{РПП}$ делится на 5 интервалов реагирования на нажатие ТВП ($t_{ТВП 1} - t_{ТВП 5}$). Суть этих интервалов заключается в том, что если ТВП будет нажата в этом интервале, то смена фаз произойдет в конце этого интервала. Таким образом, если ТВП будет нажата в интервале времени $t_{ТВП 3}$, то смена фаз произойдет в момент времени цикла $t_{с.ф.3}$.

Пример расчета разрешающих и запрещающих интервалов условного РПП

Рассмотрим следующую ситуацию. РПП расположен между двумя перекрестками 1 и 2 со светофорным регулированием и равноудален от них $L_1=L_2$ (см. рис. 1). Соответственно,



1 – первый перекресток со светофорным регулированием, находящийся на удалении L_1 , с количеством фаз X_1 и числом транспортных потоков Y_1 интенсивностью Q_1 ;
 2 – второй перекресток со светофорным регулированием, находящийся на удалении L_2 с количеством фаз X_2 и числом транспортных потоков Y_2 интенсивностью Q_2

Рисунок 1 – Типовое расположение РПП

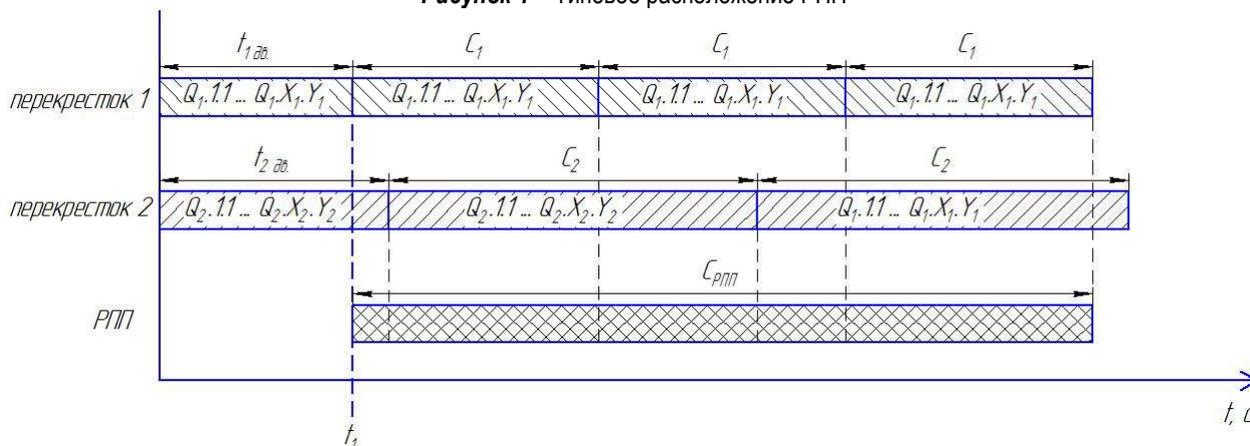


Рисунок 2 – Диаграмма поиска разрешающих/запрещающих интервалов

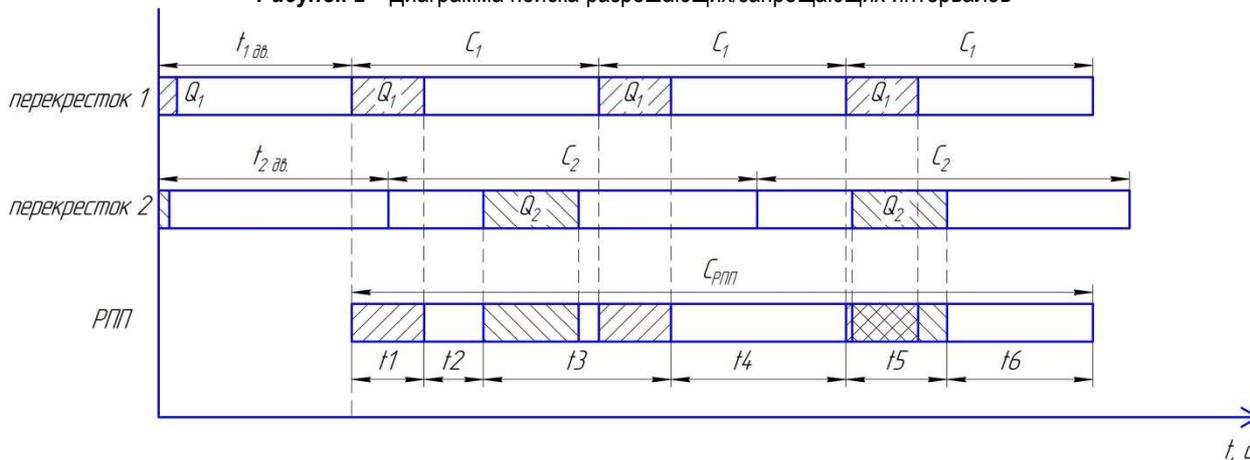


Рисунок 3 – Диаграмма поиска разрешающих/запрещающих интервалов после очистки

при равном удалении светофоров от РПП время движения транспорта от светофоров до РПП будет одинаковым $t_{1\text{дв}} = t_{2\text{дв}}$, а так как алгоритм расчета учитывает лишь разницу во времени движения, то в данном расчете значения $t_{1\text{дв}}$ и $t_{2\text{дв}}$ учитываться не будут.

Примем следующие входные данные: $t_{\text{макс.ожид.п}} = 60$ с., $t_{\text{мин.дв.п.}} = 25$ с. Светофор 1 имеет 2 фазы, равные по времени и с длительностью цикла $C_1 = 60$ с. Светофор 2 имеет 3 фазы, равные по времени и с длительностью цикла $C_2 = 90$ с.

Проведем анализ транспортных потоков, проходящих через РПП. Из [6] известно, что 2-фазный светофор формирует транспортные потоки как показано на рис. 5, а 3-фазный светофор как на рис. 6.

Из рисунка 5 видно, что из всех транспортных потоков во время первой фазы от светофора в сторону РПП движутся транспортные потоки $Q_{1.1.3}$ и $Q_{1.1.4}$, а во время второй фазы $Q_{1.2.3}$ и $Q_{1.2.4}$. Для расчета примем, что интенсивности транспортных потоков имеют следующую зависимость: $Q_{1.2.3} < (Q_{1.1.3} = Q_{1.1.4}) < Q_{1.2.4}$.

Из рисунка 6 видно, что во время фазы 1 со стороны светофора в сторону РПП движутся транспортные потоки $Q_{2.1.3}$, $Q_{2.1.4}$, во время фазы 2 – $Q_{2.2.2}$, во время фазы 3 – $Q_{2.3.2}$. Для расчета примем, что интенсивности транспортных потоков имеют следующую зависимость: $Q_{2.3.2} < (Q_{2.1.3} = Q_{2.1.4}) < Q_{2.2.2}$.

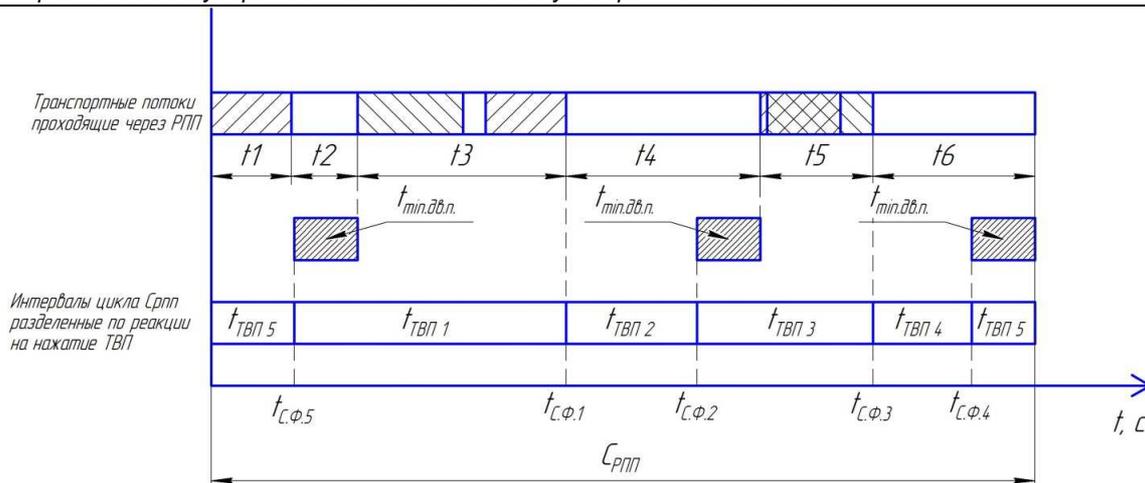


Рисунок 4 – Интервалы и моменты времени смены фаз

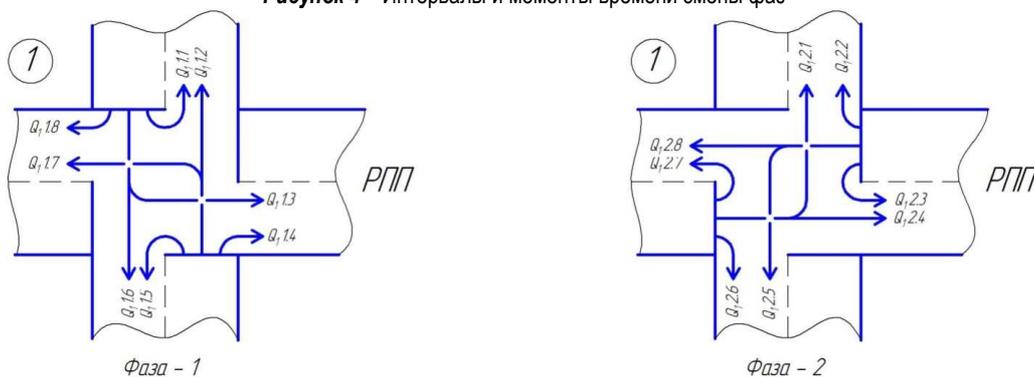


Рисунок 5 – Транспортные потоки 2-фазного светофора

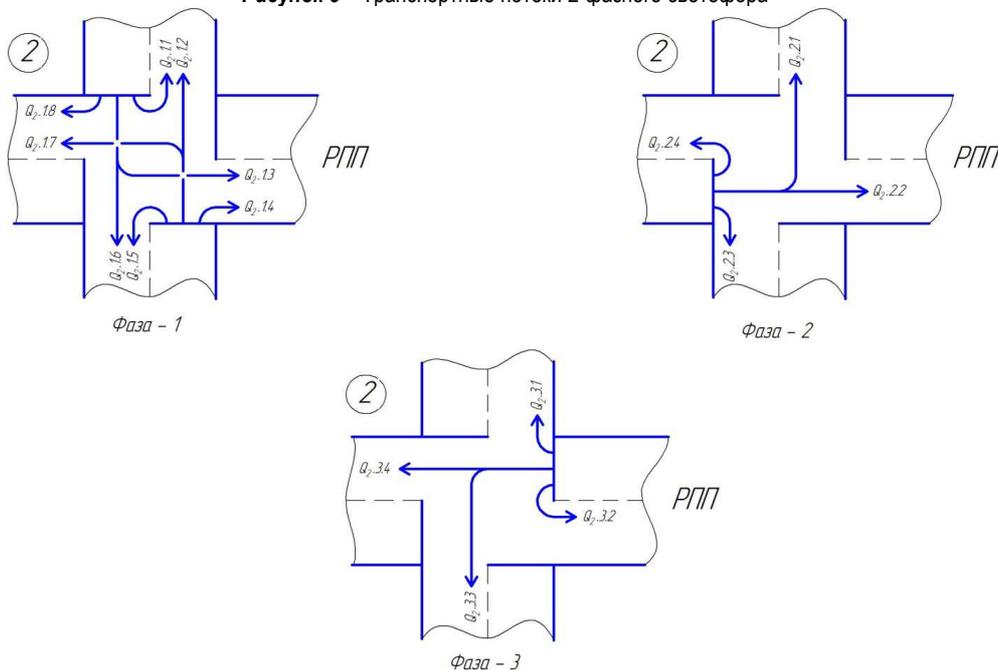


Рисунок 6 – Транспортные потоки 3-фазного светофора

Определим наименьшее общее кратное для C_1 и C_2 . Кратные для $C_1(60)=60/120/180/240$. Кратные для $C_2(80)=80/160/240$. Отсюда длительность цикла РПП – $C_{РПП} = 240$ с.

Строим диаграмму поиска разрешающих/запрещающих интервалов. На диаграмме транспортные потоки с разной интенсивностью обозначим штриховкой с разным шагом, чем более плотно заштрихована область, тем выше интенсив-

ность транспортного потока. Фазы будем разделять разным направлением штриховки.

Из рисунка 7 видно, что цикл $C_{РПП}$ заштрихован полностью. Это означает, что при данных условиях расчета не выполняются условия 1 и 2, описанные выше. Для дальнейшего расчета нам необходимо исключить транспортные потоки с наименьшей интенсивностью и снова проверить диаграмму разрешающих/запрещающих интервалов на выполнение условий.

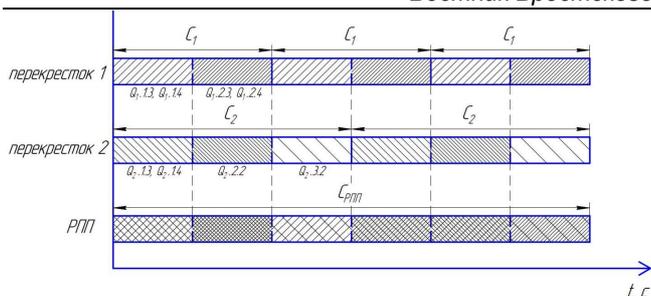


Рисунок 7 – Диаграмма разрешающих/запрещающих интервалов

После исключения из расчетов транспортных потоков с интенсивностью $Q_{1.1.3}$, $Q_{1.1.4}$ и $Q_{2.3.2}$, условие 1 – выполняется, условие 2 – нет.

Исключив следующий транспортный поток с меньшей интенсивностью $Q_{2.1.3}$, $Q_{2.1.4}$, условие 1 – выполняется, условие 2 – нет. По алгоритму необходимо исключить еще один транспортный поток, но т. к. в данном случае в расчетах осталось по одному транспортному потоку от каждого светофора, необходимо провести более детальный анализ диаграммы разрешающих/запрещающих интервалов и возможностей ее оптимизации.

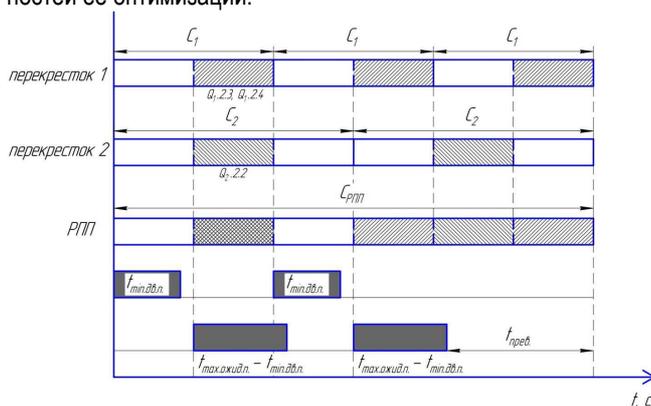


Рисунок 8 – Диаграмма разрешающих/запрещающих интервалов после первой очистки

Из рис. 8 видно, что незакрашенные области цикла $C_{РПП}$ больше $t_{\min.дв.п.}$, соответственно, условие 1 выполняется, но одна из закрашенных областей больше $t_{\max.ожид.п} - t_{\min.дв.п.}$. На $t_{прев.}$, а это означает, что условие 2 не выполняется.

Дальнейшее решение заключается в выборе одного из вариантов оптимизации:

- 1 вариант – увеличение $t_{\max.ожид.п}$ на величину $t_{прев.}$;
- 2 вариант – частичное исключение транспортного потока с наименьшей интенсивностью;
- 3 вариант – смещение времени начала циклов C_1 и C_2 друг относительно друга.

Проводя анализ вариантов оптимизации, можно сделать вывод, что:

- применение варианта 1 возможно при высокой интенсивности транспортных потоков, например, в «час пик»;
- применение варианта 2 – наиболее оптимальный вариант при средней интенсивности движения транспорта;
- применение варианта 3 в данном случае не эффективно, т. к. время движения $t_{\min.дв.п.} \approx$ длительности фазы светофоров 1 и 2, и т. к. светофор 2 имеет 2 фазы, то смещением времени начала циклов не удастся добиться выполнения условий. Данный вариант будет эффективен

при условии, что светофоры по обеим сторонам РПП имеют одинаковое количество фаз или более 2-х.

Для дальнейшего расчета примем вариант 2, частично исключив из расчета транспортный поток с наименьшей интенсивностью. В данном случае зададим, что $Q_{2.2.2} > (Q_{1.2.3}, Q_{1.2.4})$, соответственно диаграмма примет следующий вид (рис. 9).

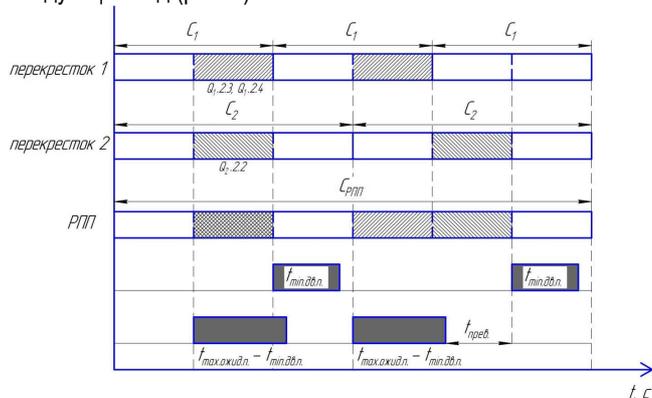


Рисунок 9 – Диаграмма разрешающих/запрещающих интервалов после второй очистки

Из рисунка 9 видно, что все незакрашенные области $C_{РПП}$ больше $t_{\min.дв.п.}$, а один из закрашенных интервалов все еще больше $t_{\max.ожид.п} - t_{\min.дв.п.}$, соответственно, необходимо увеличить $t_{\max.ожид.п}$ на величину $t_{прев.}$.

Найдем цикл $C_{РПП}$, разделённый на интервалы реагирования на нажатие ТВП, согласно описанному выше алгоритму. Также отобразим $C_{РПП}$ в виде круговой диаграммы, т. к. в таком виде более удобно анализировать циклические процессы.

На рис. 10 продолжительность цикла $C_{РПП}$ представлена в виде круга. На рис. 10А на продолжительность цикла $C_{РПП}$ нанесены продолжительности циклов C_1 и C_2 и транспортные потоки с их интенсивностями, а также точка начала и направление цикла. На рис. 10Б на получившуюся диаграмму рис. 10А нанесены $t_{\min.дв.п.}$, от них построены интервалы $t_{ТВП1} - t_{ТВП4}$ и указаны моменты смены фазы $t_{с.ф.1} - t_{с.ф.4}$.

На рис. 10В представлена итоговая диаграмма для настройки РПП для работы по алгоритму разрешающих/запрещающих интервалов, на ней отображена продолжительность цикла $C_{РПП}$ с нанесенными интервалами реагирования и моментами смены фаз, также указан интервал сдвига $t_{сдв.}$. Для наглядности интервалы реагирования заштрихованы разной штриховкой. Для рис. 10В : $t_{ТВП1} = 50$ с; $t_{ТВП2} = 5$ с; $t_{ТВП3} = 85$ с; $t_{ТВП4} = 35$ с; $t_{сдв.} = 5$ с.

Настроенный по данной диаграмме РПП работает следующим образом:

- если ТВП будет нажат во время интервала $t_{ТВП1}$, $t_{ТВП3}$, то переключение фаз произойдет в момент цикла $t_{с.ф.1}$, $t_{с.ф.3}$ соответственно;
- если ТВП будет нажата во время интервала $t_{ТВП2}$, $t_{ТВП4}$, то переключение фаз произойдет в тот же момент цикла.

Заключение

Настроенный по данному алгоритму РПП позволяет синхронизировать момент смены фаз РПП с транспортными потоками, проходящими через РПП, таким образом, что движение пешеходов через РПП осуществляется преимущественно в то время, когда через РПП возможно движение транспортных потоков с наименьшей интенсивностью. В моменты времени,

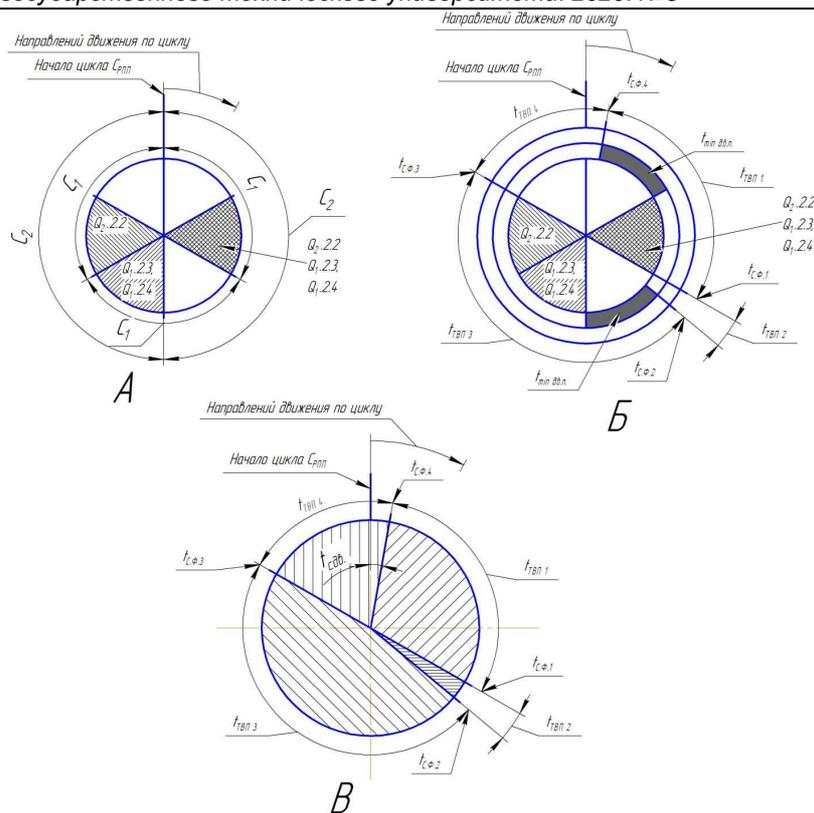


Рисунок 10 – Диаграмма реагирования РПП на нажатие ТВП

когда через РПП будут двигаться транспортные потоки с наибольшей интенсивностью, смена фаз РПП осуществляться не будет. Работа РПП по такому алгоритму позволяет пропускать через РПП транспортные потоки с большой интенсивностью, не останавливая их. Это в свою очередь повышает эффективность регулирования транспортных потоков и безопасность передвижения для пешеходов, т. к. пересечение пешеходами проезжей части будет происходить в моменты времени с наименьшей интенсивностью движения транспорта.

Дальнейшим развитием данного алгоритма может быть применение различных диаграмм для разного времени суток и дней недели.

Список цитированных источников

1. Врубель, Ю. А. Определение потерь в дорожном движении / Ю. А. Врубель, Д. В. Капский, Е. Н. Кот. – Минск, 2003.
2. Анфилец, С. В. Адаптивный алгоритм управления на основе поэтапной настройки светофорных объектов по магистрали / С. В. Анфилец, В. Н. Шуть // Доклады БГУИР. – Минск : БГУИР, 2010. – С. 79–86.
3. Anfilets, S. The Effectiveness Of The Adaptive Control System In Brest Region / S. Anfilets, V. Shuts // Evaluating International Congress Of Heavy Vehicles, Road Trains And Urban Transport. – Минск, 2010. – С. 222–226.
4. Anfilets, Sergey The Use of Natural Optimisation Algorithms for the Implementation of Adaptive Control at the Crossroad / Sergey Anfilets, Vasili Shuts // Reliability and Statistics in Transportation and Communication : доклады 12-ой Международной конференции. – Рига, 17–20 октября 2012 – С. 68–69.
5. Шуть, В. Н. Графовая модель регулируемого перекрестка при заторе // Проблемы и перспективы развития евроазиат-

ских транспортных систем : материалы четвертой Международной научно-практической конференции. – Челябинск, 2012. – С. 327–334.

6. Кременец, Ю. А. Технические средства организации дорожного движения / Ю. А. Кременец, М. П. Печерский, М. Б. Афанасьев. – М. : Академкнига, 2005. – 76 с.

References

1. Vrubel', YU. A. Opredelenie poter' v dorozhnom dvizhenii / YU. A. Vrubel', D. V. Kapskij, E. N. Kot. – Minsk, 2003.
2. Anfilec, S. V. Adaptivnyj algoritm upravleniya na osnove поэтапной настройки светофорных об"ектов по магистрали / S. V. Anfilec, V. N. SHut' // Doklady BGUIR. – Minsk : BGUIR, 2010. – S. 79–86.
3. Anfilets, S. The Effectiveness Of The Adaptive Control System In Brest Region / S. Anfilets, V. Shuts // Evaluating International Congress Of Heavy Vehicles, Road Trains And Urban Transport. – Minsk, 2010. – S. 222–226.
4. Anfilets, Sergey The Use of Natural Optimisation Algorithms for the Implementation of Adaptive Control at the Crossroad / Sergey Anfilets, Vasili Shuts // Reliability and Statistics in Transportation and Communication : doklady 12-оj Mezhdunarodnoj konferencii. – Riga, 17–20 oktyabrya 2012 – S. 68–69.
5. SHut', V. N. Grafovaya model' reguliruemogo perekrestka pri zatore. // Problemy i perspektivy razvitiya evroaziatskih transportnyh sistem : materialy chetvertoj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – CHelyabinsk, 2012. – S. 327–334.
6. Kremenec, YU. A. Tekhnicheskie sredstva organizacii dorozhnogo dvizheniya / YU. A. Kremenec, M. P. Pecherskij, M. B. Afanas'ev. – M. : Akademkniga, 2005. – 76 s.

Материал поступил в редакцию 10.01.2021