

РУТКОВСКИЙ В.Н., КАПСКИЙ Д.В.

## АНАЛИЗ, РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ( ГИБКОГО) СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Белорусский национальный технический университет  
г. Минск, Республика Беларусь

*В статье выполнен анализ различных алгоритмов адаптивного регулирования, применяемых в интеллектуальной системе крупнейшего города – Минска. Разработан алгоритм адаптивного регулирования в зависимости от динамично изменяющейся нагрузки локального перекрестка. На примере одного из перекрестков приведен пример реализации данного алгоритма. Даны рекомендации по дальнейшему применению данного алгоритма на сети улиц.*

**Ключевые слова:** интеллектуальная транспортная система, алгоритм управления, транспортные и пешеходные потоки, адаптивное управление

### Введение

АСУ ДД представляет собой комплекс технических средств, реализующий определенные технологические алгоритмы управления транспортными потоками [1,12,14,15].

Комплекс алгоритмов, реализуемых в современной АСУ ДД, можно разделить на следующие группы [2-11]:

1. **Основные технологические**, обеспечивающие обработку информации о транспортных и пешеходных потоках, принятие решений по управлению дорожным движением;

2. **Специальные технологические**, реализующие управление в особых случаях (в состав данной группы входят следующие алгоритмы: ручного управления светофорной сигнализацией; диспетчерского управления светофорной сигнализацией на отдельном перекрестке; включения «зеленых улиц»; изменения направления транспортных потоков при заторах с помощью управляемых дорожных знаков; информирования водителей о рекомендуемой скорости движения автомобилей);

3. **Служебные и вспомогательные**, необходимые для взаимодействия технических и программных средств АСУ ДД в процессе функционирования системы (к группе служебных алгоритмов, обеспечивающих взаимодействие технических средств АСУ ДД относятся алгоритмы: взаимодействия с исполнительными органами; получения первичной информации о параметрах транспортных и пешеходных потоков; обмена информацией между техническими средствами; взаимодействия с диспетчерским персоналом; обработки информации в процессе реализации технологических алгоритмов; внутренней проверки функционирования технических средств. К группе вспомогательных алгоритмов относятся алгоритмы, обеспечивающие накопление и регистрацию данных по условиям и параметрам движения транспортных и пешеходных потоков, а также функцио-

нированию технических средств АСУ ДД, в т.ч. периферийных).

В монографии особое внимание уделено **основным технологическим алгоритмам**, поскольку именно данный набор управленческих воздействий определяет качество и эффективность дорожного движения на объектах или участках сети, включенных в автоматизированную систему управления дорожным движением (см. ниже).

**По пространственному критерию** все алгоритмы светофорного регулирования делятся на локальные и сетевые [10,12,11].

Алгоритм светофорного регулирования является локальным, если для определения параметров регулирования на перекрестке используется только информация о транспортных потоках на подходах к этому перекрестку и в зоне перекрестка. При этом локальный алгоритм может использовать информацию, полученную как непосредственно на стоп-линиях, так и на отдаленных подходах к перекрестку (200–400 м от стоп-линии). Локальные алгоритмы определяют цикл регулирования, последовательность фаз регулирования, их длительности или моменты переключения фаз, параметры промежуточных тактов. Для определения перечисленных параметров используется информация о геометрических характеристиках перекрестка, интенсивности и составе транспортных потоков на подходах к нему и/или на геометрических направлениях проезда через перекресток, наличии и/или отсутствии транспорта и пешеходов в различных зонах перекрестка (на стоп-линиях, в конфликтных точках) [9,11].

Особенностью сетевых алгоритмов является использование для определения параметров регулирования информации о транспортной ситуации на нескольких перекрестках, обычно связанных в единую сеть, характеризующуюся значительной интенсивностью движения транспорта между соседними перекрестками и небольшими (до 600–700 м) расстояниями между ними. Как правило, на сетевом

уровне определяются циклы регулирования для группы перекрестков и сдвиги. Для определения этих параметров используется информация о топологии сети, геометрических характеристиках, входящих в нее перекрестков, интенсивности и составе транспортных потоков на подходах к ним и/или на геометрических направлениях проезда через перекрестки, временах проезда между соседними стоп-линиями.

**По временному критерию** все алгоритмы светофорного регулирования делятся на методы, реализующие управление дорожным движением по прогнозу и методы, действующие в реальном времени (адаптивные алгоритмы). При этом к адаптивным методам традиционно относятся и алгоритмы, использующие краткосрочный прогноз транспортной ситуации на ближайшие 3–15 мин. Управление по прогнозу (или жесткое управление) не исключает достаточно частого (до 3–5 раз в суточном цикле) изменения параметров регулирования, однако эти параметры определяются, не исходя из текущей транспортной ситуации, а методом ее прогноза, основанного на выполненных ранее (за сутки, неделю или более длительный период) наблюдениях. Промежуточное положение между адаптивными и неадаптивными алгоритмами занимают методы, основанные на ситуационном управлении. Методы этой группы предполагают предварительный расчет параметров регулирования для различных классов транспортных ситуаций и создание библиотеки типовых режимов регулирования. Выбор конкретного режима из библиотеки производится в реальном времени на основании текущей информации о транспортной ситуации и отнесении ее к одному из классов транспортных ситуаций [13–16].

*Локальное адаптивное управление длительностью цикла и длительностями фаз.*

Локальное адаптивное управление длительностью цикла и длительностями фаз – наиболее часто используемый класс методов адаптивного управления, нашедших применение как в зарубежной, так и в отечественной практике. Отсутствие широкого опыта применения у нас таких методов отражает традиционное отставание в использовании автоматизированных методов светофорного регулирования. Класс методов довольно широк и включает в себя [9,11,10]:

- методы поиска разрыва и его модификации;
- методы разъезда очереди;
- методы расчетного определения длительностей цикла и фаз;
- метод прогноза прибытий.

**Метод поиска разрыва** при фиксированных значениях управляющих параметров нашел наиболее широкое применение в отечественной практике. Именно его обычно имеют в виду, когда говорят о местном гибком регулировании (МГР). Метод

предполагает контроль присутствия транспортных средств в сечениях, отстоящих от стоп-линий на расстоянии 30–50 м. Управляющими параметрами метода являются:

$t_k^{\min}$  – минимальное значение длительности основного такта фазы  $k$ ;

$t_k^{\max}$  – максимальное значение длительности основного такта фазы  $k$ ;

$t_{\text{эк}}$  – экипажное время.

Минимальная длительность основного такта рассчитывается с учетом необходимости пропуска транспортных средств в количестве, определяемом расстоянием от стоп-линии до контролируемого сечения, пропуска трамвая, если в фазе осуществляется движение трамваев, и предоставления пешеходам достаточного времени для перехода, если в фазе осуществляется движение пешеходов. Максимальная длительность основного такта должна обеспечивать допустимое время ожидания разрешающего сигнала на направлениях, движение которых запрещено в фазе  $k$ . Правильное задание этого параметра чрезвычайно важно для безопасности движения, так как при его завышении возрастает вероятность того, что участники движения не будут соблюдать требования светофорной сигнализации, считая ее неисправной или вследствие недисциплинированности. Экипажное время определяется продолжительностью периода проезда транспорта от контролируемого сечения до стоп-линии [11,17].

Алгоритм поиска разрыва работает следующим образом: с началом основного такта фиксируется прохождение автомобилями контролируемого сечения, и каждый автомобиль, проходящий через сечение в период отработки основного такта, продлевает его минимальную длительность на величину экипажного времени, тем самым обеспечивая свой проход через стоп-линию во время текущего такта. Основной такт заканчивается, если достигнута его максимальная длительность или в контролируемом сечении в течение экипажного времени не появился ни один автомобиль после истечения минимальной длительности, то есть в транспортном потоке появился разрыв.

Модификации алгоритма поиска разрыва связаны с определением в реальном времени его параметров [10, 11, 17,18]. Минимальная длительность основного такта может определяться с учетом реальной длины и состава очереди, скопившейся на направлении к моменту включения такта, наличия трамвая, ожидающего зеленого сигнала, наличия пешеходов. Максимальная длительность основного такта может зависеть от фактического времени ожидания длин очередей участников движения на конкурирующих направлениях. Экипажное время может определяться с учетом вариаций скорости, зависящей от типа транспортного средства, плотности транспортного потока и состояния дорожного покрытия (сухое, мокрое, гололед и так далее). Все модификации

алгоритма, очевидно, требуют детектирования дополнительных параметров: числа транспортных средств на направлениях, их типа, скорости, длин очередей.

Алгоритмы поиска разрыва ориентированы на учет изменения пространственной структуры потока. В то же время они неэффективны в условиях, когда транспортный поток имеет пачкообразный и циклический характер. Например, возможен случай, когда в период от момента включения основного такта до истечения его минимальной длительности прохода транспорта через контролируемое сечение не происходит, но пачки подходят сразу после включения разрешающего сигнала. В этом случае возможно обеспечить беспрепятственный пропуск транспорта через перекресток путем сдвига момента включения фазы на величину основного такта, но данный алгоритм не обеспечивает такого сдвига.

Даже в случае потока постоянной интенсивности описанный метод не позволяет минимизировать задержку транспорта на перекрестке. Например, при интервале времени между автомобилями в потоке, движение которому разрешено в первой фазе, равном 2,5 с, а в потоке, движение которому разрешено во второй фазе, – 3,5 с и при экипажном времени 3 с управление будет обеспечивать приоритет первому потоку, продлевая длительность первой фазы до максимального значения и ограничивая длительность второй минимальным значением, что, очевидно, не обеспечивает оптимизации параметров регулирования.

В целом эффективное использование алгоритмов поиска разрыва возможно только с учетом особенностей перекрестка и, как правило, на перекрестках с невысокой интенсивностью движения.

**Метод разъезда очереди** требует детектирования длин очередей на направлениях проезда через перекресток. Определение длины очереди может осуществляться как непосредственно, так и расчетным методом, путем сравнения числа автомобилей, прошедших через два контролируемых сечения – у стоп-линии и на некотором расстоянии от нее. Как и в предыдущем алгоритме, требуется задание граничных значений длительности основных тактов каждой фазы регулирования. Текущая длительность основного такта определяется временем разгрузки скопившейся за время горения запрещающего сигнала очереди, которое рассчитывается в реальном времени и зависит от состава потока, траектории его движения (прямо, поворот), необходимости просачивания через конфликтующий поток транспорта или пешеходов, наличия в зоне перекрестка трамвайных путей и их состояния.

Недостаток алгоритма при таком варианте реализации – необходимость задержки практически всех автомобилей. Этого недостатка можно избежать, если увеличить длительность основного такта, обеспечив не только пропуск очереди, но и части

свободно движущихся автомобилей с учетом текущей интенсивности и загрузки направления 60–70 %.

При высоких уровнях загрузки перекрестка, когда резерв увеличения длительности такта отсутствует, управление по алгоритму разгрузки очередей может быть близким к оптимальному.

Методы расчетного определения длительностей цикла и фаз основаны на использовании алгоритмов в реальном времени с учетом текущих значений интенсивности транспортных потоков и интенсивности разгрузки очередей на направлениях проезда через перекресток. Расчет может выполняться раз в цикл с использованием сглаженных данных, накопленных за несколько циклов, предшествующих расчету, или раз в несколько циклов. Частота пересчета, как показывает мировой опыт, не должна превышать 15 мин. Для практического использования, как показали исследования, проведенные при разработке АСУ ДД «Сигнал», в условиях отсутствия заторов предпочтительнее метод минимизации задержки, а в условиях предзаторовой ситуации (загрузка перекрестка выше 80 %) или наличия заторов на нескольких конфликтных направлениях метод выравнивания загрузок.

При наличии затора на одном из направлений движения через перекресток  $j$  его ликвидации может способствовать применение параметров регулирования определенных в результате решения задачи линейного программирования:

$$\text{Max } t_{zi} \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^K t_k = C; \quad (2)$$

$$q_i C < q_{ni} t_{zi}, \quad i = 1, \dots, I; \quad (3)$$

$$C < 120; \quad (4)$$

$$C > 25; \quad (5)$$

$$t_k^{\min} < t_k < t_k^{\max}, \quad k = 1, \dots, K; \quad (6)$$

(и условия целочисленности переменных  $C$  и  $t_k$ )

при ограничениях вида и условиях (2)–(6), обеспечивающих не превышение предельных длин очередей:

$$q_i (C - t_{zi}) \leq L_i, \quad i = 1, \dots, I, \quad i \neq j, \quad (7)$$

где  $L_i$  – предельная длина очереди на направлении  $i$ .

Такой же подход может быть использован при отсутствии затора в том случае, когда в процессе управления выявляется превышение предельной длины очереди на одном из направлений движения через перекресток, приводящее, например, к «запиранию» предыдущего по направлению движения перекрестка.

Применение расчетных методов требует установки детекторов, позволяющих определять текущие интенсивности движения и состав транспортных потоков на всех направлениях движения транспорта

через перекресток, а в случае использования противозаторового управления – надежно идентифицировать наличие заторов исходя из плотности потоков, длин очередей или иным способом.

**Метод прогноза прибытий** предполагает наличие информации о моментах пересечения автомобилями сечений, расположенных на значительном (200–300 м) удалении от стоп-линий перекрестка. Эта информация позволяет прогнозировать моменты прибытия транспорта к стоп-линиям, используя, например, модель растяжения пачки, применяемую в методе TRANSYT [11,14]. В методе прогноза прибытий процедура определения оптимальных параметров регулирования имеет двухэтапную структуру: на первом этапе одним из расчетных методов определяются базовые длительности цикла и фаз, на втором на основании прогноза прибытий уточняется момент переключения фазы. Процедура уточнения выполняется за несколько секунд до наступления каждого из моментов переключения. Принятие решения о сдвиге планового момента переключения фаз принимается на основании прогноза суммарных величин задержек за период прогнозирования, определенных с учетом прогноза прибытия транспорта.

Метод прогноза прибытий требует тщательного определения контролируемых сечений: они должны быть расположены достаточно далеко от стоп-линий, чтобы обеспечить прогноз на ближайшие несколько секунд, и в то же время достаточно близко к стоп-линии, чтобы при наличии, например, двух регулируемых направлений на одном подходе к перекрестку достоверно определить распределение интенсивности транспортных потоков между различными направлениями. В заключение отметим, что метод MOVA, скорее всего, с учетом информации о его структуре и схеме расстановки датчиков, представляет собой сочетание расчетных методов и метода прогноза прибытий [10, 11, 6-9].

**Локальное адаптивное управление последовательностью фаз.** Алгоритмы этой группы направлены на формирование оптимальной последовательности фаз регулирования в цикле регулирования. Класс алгоритмов адаптивного управления последовательностью фаз включает в себя:

- методы управления вызывной фазой;
- метод вызова альтернативных фаз.

К группе алгоритмов управления вызывной фазой относится наиболее часто применяемый метод вызова пешеходной фазы на пешеходном переходе посредством нажатия кнопки вызывного пешеходного устройства. Вызов транспортной фазы может осуществляться посредством детектирования присутствия транспорта или наличия очереди определенной длины у стоп-линии, а также превышения автомобилем, стоящим у стоп-линии, определенного времени ожидания. Несмотря на простоту идеи: при наличии вызова включается фаза, при его отсутствии

фаза пропускается, – возможны различные варианты реализации алгоритма. Ниже приводятся варианты алгоритма вызывного пропуска, реализуемые в белорусских контроллерах.

♦ **Одна вызывная фаза в цикле.**

- *2-фазный цикл, вызывная фаза – вторая.*

• **Вариант 1.** После отработки минимальной длительности первой фазы выполняется анализ наличия запроса. Если запрос отсутствует, то текущая фаза продлевается до тех пор, пока не возникнет запрос, после чего вызывная фаза обрабатывает свое время, и вновь включается первая фаза.

• **Вариант 2.** Отличие от предыдущего варианта в том, что после отработки минимальной длительности вызывной фазы выполняется анализ наличия дополнительного запроса на ее продление. Наличие такого запроса продлевает длительность вызывной фазы по алгоритму поиска разрыва до максимального значения длительности фазы. Таким образом, и вызывная, и основная фазы имеют переменную длительность.

- *3-х и более фазный цикл, одна вызывная фаза, например, вторая.*

В этом случае возможны те же варианты отработки вызова фазы, что и в случае двухфазного цикла, но возникают различия, связанные с технологией пропуска фазы при наличии более чем двух фаз.

• **Вариант 1.** Запрос на вызывную фазу анализируется в период до достижения максимальной длительности первой фазы. При отсутствии запроса на вызывную фазу и достижении максимальной длительности первой фазы выполняется переключение на третью фазу.

• **Вариант 2.** При отсутствии запроса на вызывную фазу анализируется наличие запроса на третью фазу. При обнаружении такого запроса происходит немедленный переход к ней.

♦ **Две вызывных фазы в цикле.**

*Цикл состоит из трех фаз, основной является первая, вторая и третья – вызывные фазы.*

• **Вариант 1.** После отработки минимальной длительности первой фазы анализируется наличие запроса на вторую и третью фазы. При отсутствии запросов длительность первой фазы продлевается неограниченно. Если запрос поступает, то немедленно обрабатывается вызывная фаза (длительность которой может быть и постоянной, и переменной), а по окончании ее включается первая фаза.

• **Вариант 2.** Отличается от предыдущего тем, что по окончании отработки одной вызывной фазы и наличии запроса на другую вызывную фазу включается эта фаза.

• **Вариант 3.** Отличается от варианта 2 тем, что при наличии запроса на отработку второй вызывной фазы анализируется наличие запроса от основной фазы. Решение о включении вызывной фазы принимается с учетом приоритета запросов (зависящих от длин очередей или времени ожидания).

Возможны и другие варианты реализации алгоритма вызова фаз. Принятие решения о применении той или иной модификации алгоритма должно осуществляться технологом с учетом специфических особенностей перекрестка.

*Метод вызова альтернативных фаз* позволяет заменять в последовательности фаз одну фазу другой в зависимости от текущей ситуации на перекрестке. В простейшем варианте перед включением вызывной фазы анализируется наличие запроса на альтернативную ей фазу и в зависимости от приоритетности запросов включается вызывная или альтернативная фаза. Другой вариант предполагает, при наличии запросов от двух вызывных фаз, замену этих двух фаз на одну альтернативную. Последний метод особенно часто требует применения на вызывных пешеходных переходах через магистрали с широкой проезжей частью и разделительной полосой.

*Локальное адаптивное управление промежуточным тактом.* Цели локального адаптивного управления промежуточным тактом – повышение безопасности движения за счет более точного определения параметров разгрузки перекрестка и повышение его пропускной способности за счет обеспечения дополнительного времени горения разрешающих сигналов в промежуточном такте на наиболее загруженных направлениях.

К группе методов, направленных на более точное определение параметров разгрузки, относятся:

- непосредственное детектирование конфликтных точек,
- адаптивное определение времен разгрузки пар конфликтных направлений.

**Непосредственное детектирование конфликтных точек** на перекрестке может осуществляться, например, с помощью видеодатчиков или путем установки индуктивной петли, охватывающей всю зону перекрестка. Промежуточный такт обрабатывается таким образом, что включение разрешающего сигнала в промежуточном такте на данном направлении осуществляется после получения сигнала об освобождении всех точек конфликтов для этого направления. При этом обработка выключения разрешающих сигналов начинается в момент начала промежуточного такта.

В качестве исходных данных используются времена разгрузки пар конфликтных направлений, зависящие от типа и скорости движения транспортного средства, первым въезжающего на перекресток с включаемого направления, и транспортного средства, въезжающего на перекресток последним с выключаемого направления.

**Метод адаптивного определения времен разгрузки** основан на определении в реальном времени типов и скоростей транспортных средств, определяющих времена разгрузки конфликтных направлений, и последующем использовании одного из расчетных методов определения структуры промежуточного

такта. Упрощенный вариант этого метода ориентирован на учет состояния дорожного покрытия, определяемого погодными условиями: при наличии, например, слоя мокрого снега на дороге вместо типовых времен разгрузки используются их скорректированные значения.

Обеспечение дополнительного времени горения сигналов в промежуточном такте возможно путем

- определения структуры промежуточного такта с учетом переменной последовательности фаз;
- использования, в зависимости от транспортной ситуации, различных методов расчета промежуточного такта;
- вызывного удлинения разрешающего сигнала в промежуточном такте.

**Определение структуры промежуточного такта с учетом переменной последовательности фаз** применяется при наличии вызывных фаз или диспетчерском управлении, когда последовательность фаз не является постоянной. В этом случае сам набор пар конфликтных направлений, а следовательно, и времен их разгрузки, зависят от пары последовательных фаз. Метод основан на адаптивном формировании наборов времен разгрузки при каждом переключении фаз в последовательности, отличной от стандартной, и использовании этого набора при определении структуры промежуточного такта. Несмотря на очевидность идеи, ни в одном из отечественных контроллеров данный метод не реализован.

**Адаптивный выбор расчетного метода определения структуры промежуточного такта** учитывает конкретную ситуацию, возникающую на перекрестке в момент переключения фаз. Идею метода легче понять из следующих примеров. Пусть на перекрестке длительность фазы регулируется с помощью алгоритма поиска разрыва, и выключение фазы происходит по критерию достижения ее максимальной длительности при наличии транспорта на подходе к стоп-линиям выключаемых направлений. Тогда для обеспечения дополнительной возможности пропуска этого транспорта в промежуточном такте необходимо использовать алгоритм позднего переключения. Наоборот, при выключении фазы по критерию наличия разрыва, когда на подходе к стоп-линиям выключаемых направлений транспорта нет, а на стоп-линиях включаемых направлений есть очереди, разумно использовать алгоритм раннего переключения, обеспечивающий скорейшее включение разрешающего сигнала для разгрузки очередей.

**Метод вызывного удлинения разрешающего сигнала в промежуточном такте** нашел широкое применение в скандинавских странах (алгоритм LHOVRA, разработанный Шведским институтом транспорта). В этом методе реализована возможность незначительного (не более чем на 2 с) увеличения длительности разрешающего сигнала на выключаемом направлении, обеспечивающего пропуск

дополнительного автомобиля, приближающегося к стоп-линии в период отработки промежуточно-го такта. Метод реализован путем задания зеленого мигания различной длительности в промежуточном такте для каждого направления: минимальной длительности и дополнительной длительности. Для обеспечения безопасности движения в момент начала отработки дополнительного сигнала длительности текущих сигналов на всех направлениях должны быть увеличены.

Практически во всех АСУ ДД, в том числе и в «Город М», реализована возможность *локальной адаптивной коррекции жестких планов координации*. Такая коррекция помогает несколько повысить эффективность управления по жестким программам. Основное требование, предъявляемое к алгоритмам местного гибкого регулирования, используемым в системах координированного управления – отсутствие нарушений в координации вследствие их использования. Это означает, что местное гибкое регулирование не должно приводить к изменению длительности цикла на отдельных перекрестках, а изменение отдельных моментов переключения фаз в цикле может варьироваться в пределах жестко фиксированных интервалов, выбранных таким образом, чтобы не нарушалась общая координация. Определение границ этих интервалов с достаточной степе-

нью достоверности можно выполнить путем анализа циклических диаграмм потоков, сформированных по методу TRANSYT, или лент времени.

Представим перегон как связный список участков. Тогда моделирование процесса движения ТП на перегоне будет заключаться в последовательном моделировании движения ТП на каждом из участков перегона. При этом усреднение плотности ТП для каждого  $i$ -го участка будет производиться по трем участкам  $i-1$ ,  $i$ ,  $i+1$ -му, что позволяет имитировать распадение элемента пачки транспортных единиц ТЕ, находящегося на  $i$ -м участка, в зависимости от окружающей транспортной ситуации. Действительно, чем больше средняя плотность ТП на перегоне, тем хуже маневренность ТЕ, тем меньше число транспортных единиц перейдет на  $i+1$ -й участок, следовательно, пачка будет распадаться медленнее.

Моделирование процесса передвижения ТП на перегоне для одного шага моделирования представлено блок-схемой, изображенной на рис. 1. Здесь сначала происходит вычисление скоростей на всех участках прогона, а затем происходит моделирование процесса движения на каждом участке. Передвижение транспортной единицы вдоль ТП в течение одного интервала времени производится последовательно с конца, начиная с шага передвижения  $N \rightarrow N-1$  и оканчивая шагом  $2 \rightarrow 1$  ( $N$  – номер участка).

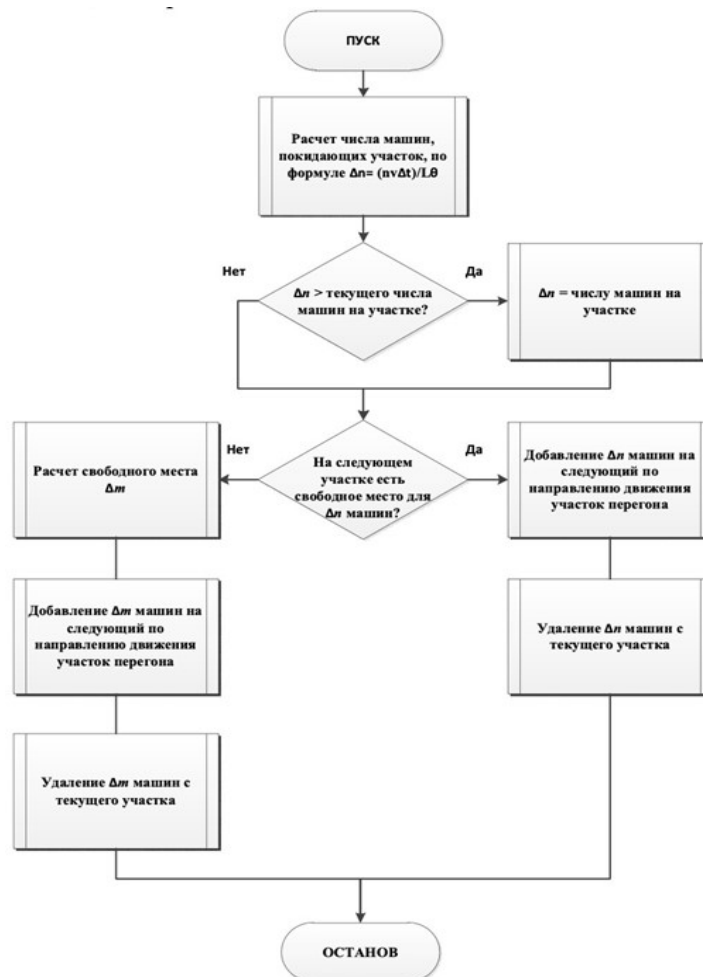


Рисунок 1. Блок-схема моделирования процесса передвижения ТП на участке перегона для одного шага моделирования

Объект въезд в зону моделирования. При имитации въезда в моделируемую дорожную сеть принимается условие, что входной перегон состоит из двух участков – границы  $\Gamma$  и  $N$ -го участка. ТП передвигается только с границы на  $N$ -й участок. На границе  $\Gamma$  в течение каждого интервала  $\Delta t$ .

Основной процедурой здесь является моделирование процесса прибытия автомобилей в зону моделирования. В этой процедуре используется функция, генерирующая случайные числа с пуассоновским распределением вероятности, блок-схема которой представлена на рис. 2 а,б.

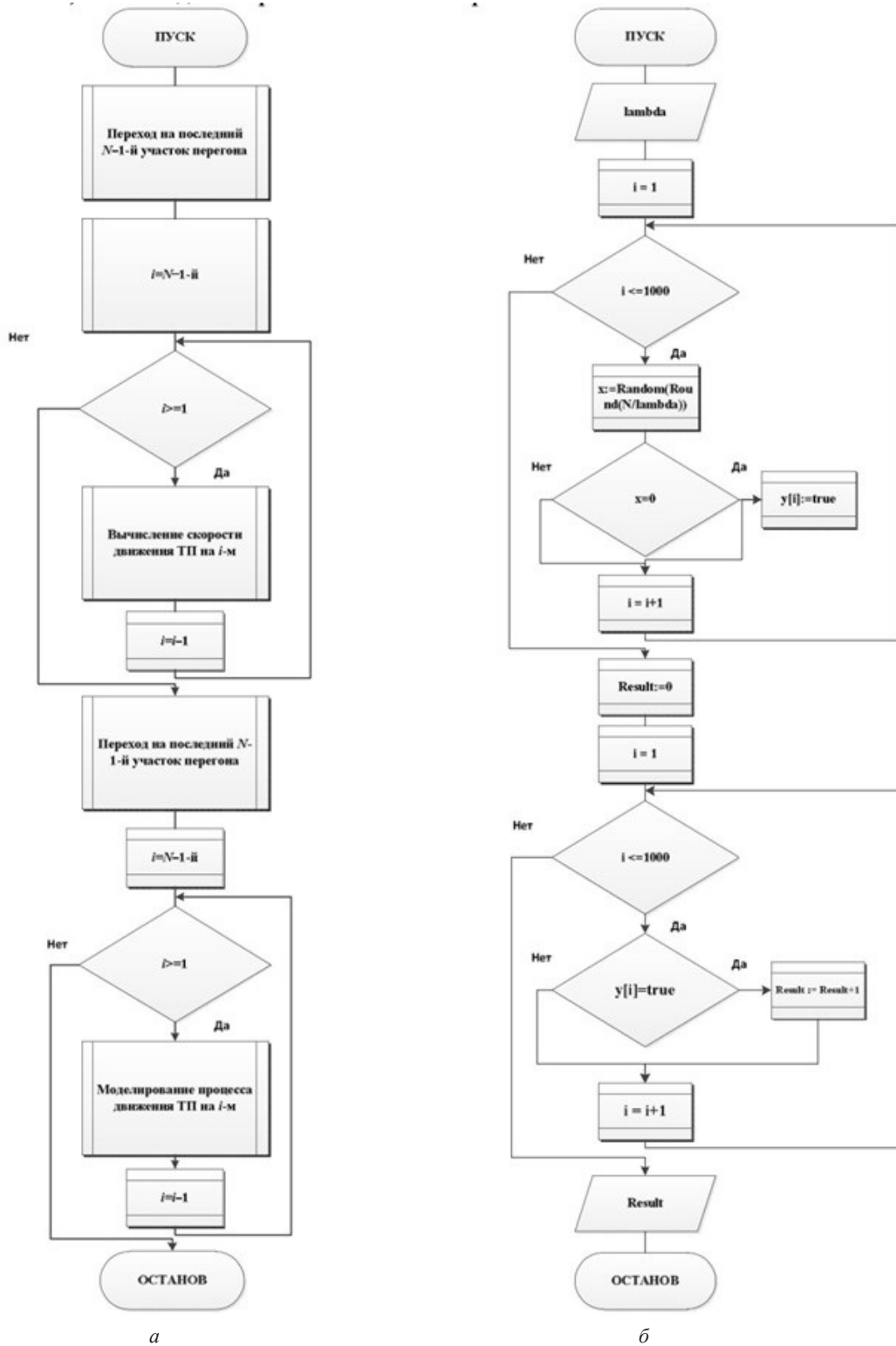


Рисунок 2. Блок-схема моделирования процесса передвижения ТП на перегоне для одного шага моделирования (а) и блок-схема функции, генерирующей числа с пуассоновским распределением вероятности (б) производится генерация числа  $n_{i,0}$ , соответствующего единичной выборке из пуассоновского распределения

При имитации *выезда из зоны моделирования* принимается, что выходной перегон состоит из двух участков – выходного и границы, основное отличие которых заключается в том, что участок, соответствующий границе, не имеет ограничений по вместимости.

За регулирование движения на перекрестке отвечает введенный при объектно-ориентированном программировании объект TGateWay, который имеет три других типа объектов TWay, отвечающие за направления выхода с перегона или въезда (налево, направо и прямо). Объект направление въезда TWay имеет свойства:

- часть потока (Portion типа real) – доля ТП, выезжающая в данном направлении;
- возможность въезда (Enabled типа boolean) – возможность передвижения ТП в данном направлении;
- следующий участок (NextSection типа PSection) – указатель на участок перегона или выхода, соответствующий данному направлению.

*Движение на регулируемом перекрестке* управляется объектом светофор (TTraffic), который может разрешать выезд автомобилей с перегона или въезда, устанавливая каждое из свойств Enabled объектов TWay, принадлежащих перегону или въезду, либо запрещать выезд. Объект светофор имеет свойства:

- текущая позиция сигналов: красный, желтый или зеленый (Pos типа integer);
- время, которое прошло от начала включения текущего сигнала, до текущего момента моделирования (Sec типа real);
- периоды включения каждого из сигналов светофора (tPos – массив из 4-х элементов типа real);
- указатели на перегон или въезд, к которому принадлежит светофор (Road типа PRoad; RoadIn типа PRoadIn).

### Предлагаемый алгоритм адаптивного регулирования перекрестка на локальном уровне

Рассмотрим реализацию нашего алгоритма на Транспортном узле №1 в Демократической Республики Конго, городе Киншаса перекресток Бульвара 30 июня и авеню Батетела. Исследуемый участок дороги имеет следующие характеристики (рис. 3).

По результатам экспериментальных исследований получены данные о характеристиках интенсивности и состава транспортных и пешеходных потоков, на основании которых построены картограммы интенсивностей движения, диаграммы состава транспортных потоков, графики изменения интенсивности по времени суток для каждого из направлений.

Результаты экспериментальных исследований фрагментарно приведены на рисунках 4–5.



Рисунок 3. Схема обозначения входов на перекрестке Boulevard du 30 Juin – Avenue des Batetela – Avenue Mwene Ditu (вход А – со стороны Avenue Colonel Mondjiba)

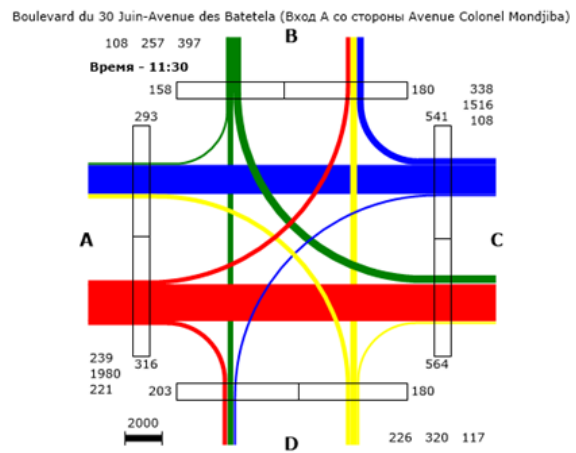
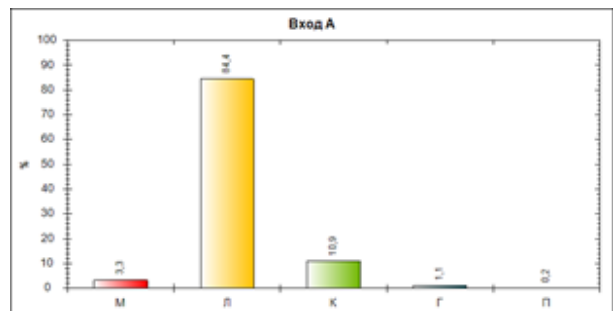


Рисунок 4. Усредненная картограмма интенсивности движения на перекрестке Boulevard du 30 Juin – Avenue des Batetela – Avenue Mwene Ditu (вход А со стороны Avenue Colonel Mondjiba)

Суммарная интенсивность движения транспортных средств на пересечении 5827 физ.ед./ч (5788 прив.ед./ч).

Доля легковых автомобилей в составе потока на разных входах составляет от 83 до 100 %.





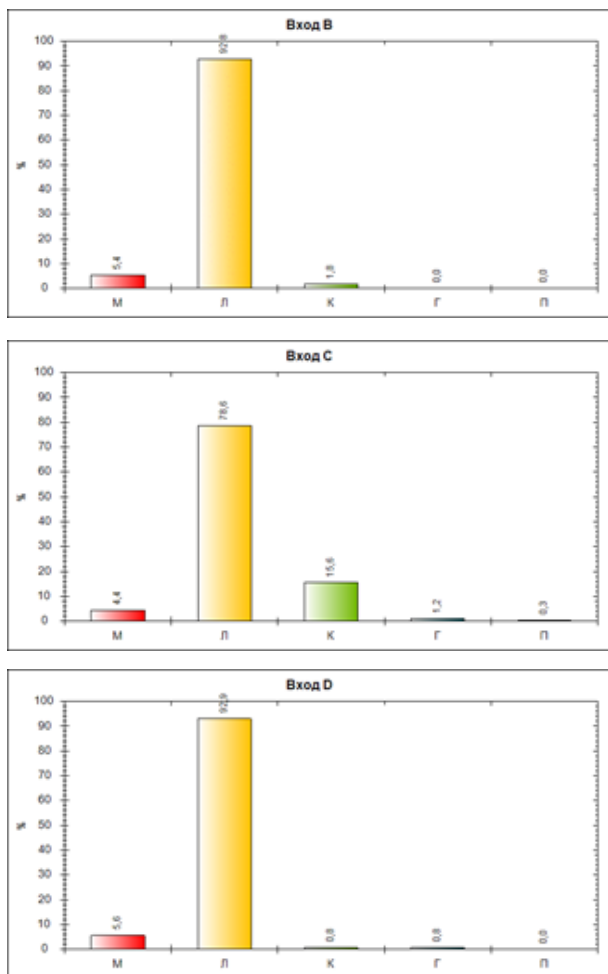


Рисунок 5. Диаграммы состава транспортных потоков на входах на перекрестке Boulevard du 30 Juin – Avenue des Batetela – Avenue Mwene Ditu (Вход А со стороны Avenue Colonel Mondjiba)

### Реализация стандартного алгоритма управления дорожным движением без использования детекторов транспорта

По результатам расчета прогнозируемых показателей эффективности дорожного движения на регулируемом перекрестке Boulevard du 30 Juin – Avenue des Batetela – Avenue Mwene Ditu (рис. 6) можно сделать следующий вывод: прогнозируемые коэффициенты загрузки полос в период времени 11.00–12.00 часов находятся в диапазоне 0,10–0,98 и подтверждают, что вариант предлагаемого планировочного решения и схемы пофазного движения (рис. 7 и 8) на перекрестке обеспечивает приемлемые коэффициенты загрузки для всех направлений.

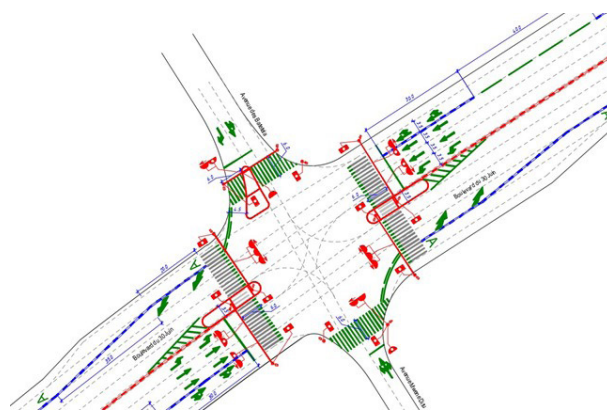


Рисунок 6. Концептуального решения исследуемого транспортного узла № 1

Расчет прогнозируемых показателей эффективности дорожного движения представлен в таблице.

Таблица

Прогнозируемые показатели эффективности дорожного движения для периода 11.00–12.00 (Вход А со стороны Avenue Colonel Mondjiba)

	Q авт/ч	Qн авт/ч	Тзэл с	Доля	Х	Lo м	d с/авт	D тыс.ч/	ко ост/ав	КО млн.ос	П тыс\$/г
AD	203	548	51	0.45	0.83	133	42.69	7.22	0.91	0.55	30.15
AC	1917	5173	51	0.45	0.83	118	41.08	65.62	0.79	4.56	265.89
AB	239	1907	15	0.13	0.95	58	84.93	16.92	1.19	0.85	62.74
AA											
BA	108	1907	62	0.54	0.10	9	13.40	1.21	0.44	0.14	5.91
BD	257	749	40	0.35	0.98	164	77.66	16.63	1.23	0.95	63.61
BC	397	1158	40	0.35	0.98	155	70.34	23.27	1.15	1.37	89.81
BB											
CB	320	1035	44	0.39	0.80	105	39.36	10.50	0.85	0.82	44.10
CA	1448	4685	44	0.39	0.80	99	41.46	50.03	0.80	3.49	202.93
CD	108	1907	8	0.07	0.81	23	69.68	6.27	1.05	0.34	23.71
CC											
DC	117	356	40	0.35	0.94	166	88.02	8.58	1.30	0.46	32.23
DB	298	906	40	0.35	0.94	142	63.17	15.69	1.10	0.98	61.58
DA	212	645	40	0.35	0.94	149	70.69	12.49	1.16	0.74	48.24
DD											
					0.84			234.42		15.25	930.91

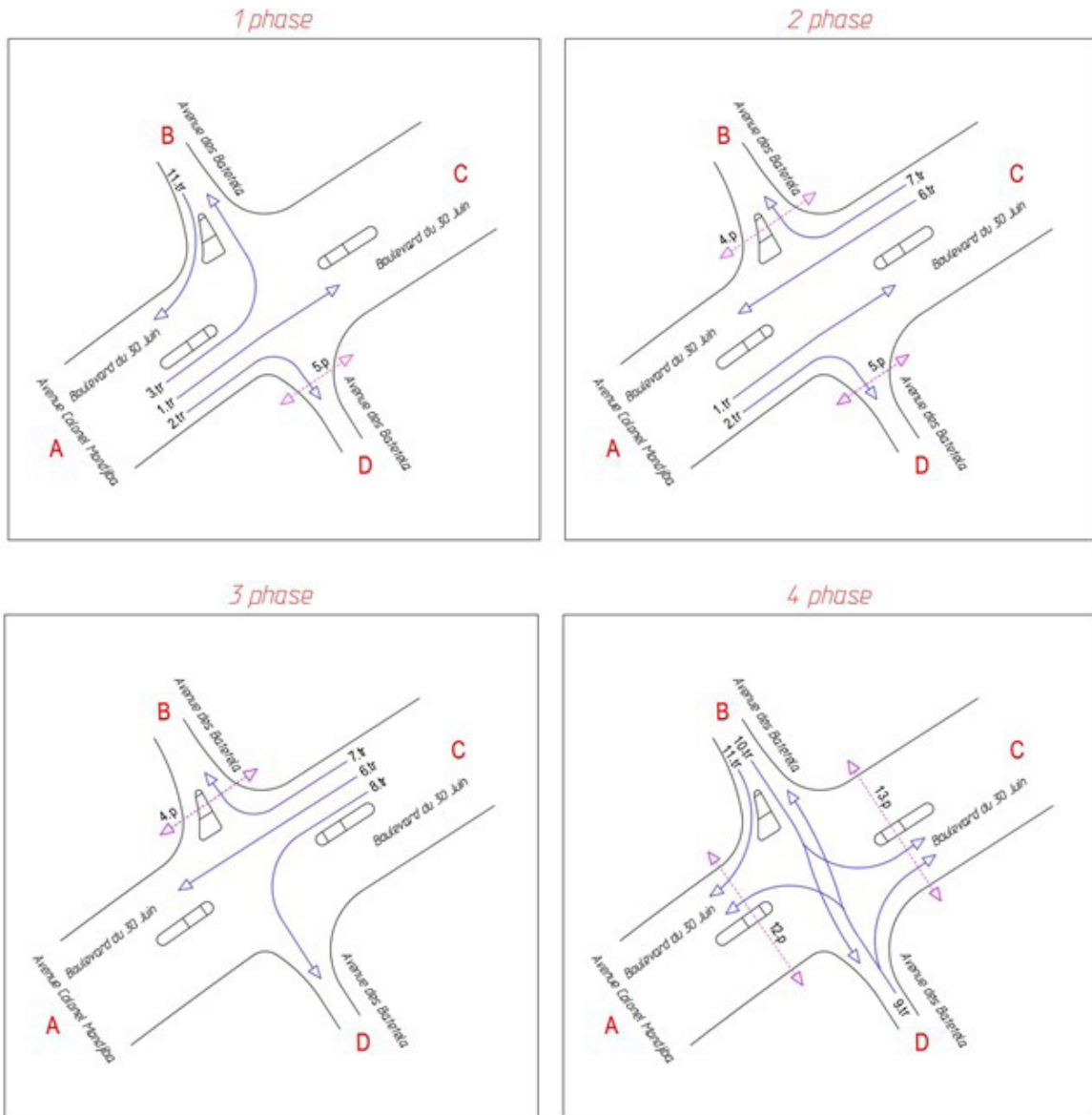


Рисунок 7. Предлагаемая схема пофазного движения на перекрестке Boulevard du 30 Juin – Avenue des Batetela – Avenue Mwene Ditu



Рисунок 8. Предлагаемая диаграмма светофорного регулирования на перекрестке Boulevard du 30 Juin – Avenue des Batetela – Avenue Mwene Ditu Беза адаптивного режима

### Заключение

По результатам проведенных исследований, опираясь на полученный опыт от работы существующих алгоритмов управления в г.Минске для исследуемого перекрестка Boulevard du 30 Juin – Avenue des Batetela – Avenue Mwene Ditu в Демократической Республики Киншаса, выбрали вариант работы нашего разработанного алгоритма управления со сбором информации от радиолокационных радаров, накоплением контроллером информации по интенсивности движения, и включением необходимой рабочей программы с прогнозированием, опираясь на накопленную информацию. Так же заложили возможность выбора включения фаз движения в зависимости от наличия транспортных средств при повороте налево при невысокой стоимости затрат на разработку и внедрение данного программно-технического комплекса. Такой вариант управления может занять достойное место в управлении дорожным движением в городах и населенных пунктах, где нет координационного управления. При доработке данного алгоритма управления дорожным движением возможно расширение на несколько

перекрестков и улиц. В свою очередь это повлечет прокладку современных линий связи и увеличении мощности сервера для обработки информации.

На данном объекте применены радиолокационные детекторы транспорта, как наиболее перспективные и наиболее функциональные. Дорожный контроллер необходим с языком программирования высокого уровня для реализации любых алгоритмов управления дорожным движением.

Особенность нашего алгоритма состоит в том, чтобы накапливать информацию о количестве и времени движения авто транспортный средств с детекторов транспорта на протяжении 1 года (возможно и более лет). Создать информационную базу и по накопленным данным прогнозировать распределение транспортных средств на предстоящий час. Возможно в процессе эксплуатации необходимо это время будет увеличить или уменьшить. Генерацию основных рабочих программ (РП) программа делает сама на результатах потоков транспортных средств в процессе наблюдения. То есть за основу мы берем  $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$  и в промежутке этого временного цикла создаем 10 или 20 РП с шагом интенсивности 30 %. Поэтому количество программ зависит от разницы времени между  $T_{\max}$  и  $T_{\min}$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Врубель Ю.А. Определение потерь в дорожном движении / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Е.Н. Кот – Мн: РИО БНТУ, 2006. – 252 с.;
2. Печерский М.П. Автоматизированные системы управления дорожным движением / М.П. Печерский, В.Г. Хорович – М.: Транспорт, 1979. – 175 с.
3. Власов А.А. Адаптивные системы управления дорожным движением в городах / А. А. Власов: Монография. – Пенза: Изд-во ПГУАС, 2012. – 162 с.
4. Брайловский Н.О. Управление движением транспортных средств / Н.О. Брайловский, Б.И. Грановский – М.: Транспорт. 1978. – 112 с.
5. Капитанов В.Т. Управление транспортными потоками в городах / В.Т. Капитанов, Е.Б. Хилажев. – М.: Транспорт, 1985. – 94 с.
6. Bielefeldt C. MOTION-a new on-line traffic signal network control system / Bielefeldt C., Busch F. // Road Traffic Monitoring and Control, Seventh International Conference on London. – 1994. – Pp. 55-59
7. Hunt P.B. SCOOT – A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals / P.B. Hunt, D.I. Robertson, R.D. Bretherton, R.I. Winton // Report TRRL 1014 – Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, U.K., 1981 – 44 pp.
8. Krajzewicz D. Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban MObility / Daniel Krajzewicz, Jakob Erdmann, Michael Behrisch, and Laura Bieker. // International Journal On Advances in Systems and Measurements, – 2012. – 5(3&4). – Pp. 128-138.
9. Прижбыл П., Свитек М. Телематика на транспорте: перевод с чешского О. Бузека и В. Бузковой / под ред. В.В. Сильянова. – М.: МАДИ, 2003. – 540 с.
10. Капский Д.В. Основы автоматизации интеллектуальных транспортных систем : учебник / [Капский Д. В. и др.]. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 408 с.
11. Врубель Ю.А. Координированное управление дорожным движением : монография / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Д.В. Рожанский, Д.В. Навой, Е.Н. Кот. – Минск : БНТУ, 2011. – 240 с.
12. Воробьев Э.М. АСУ дорожным движением / Э.М. Воробьев, Д.В. Капский. – Минск: УП НИИСА, 2005. – 88 с.
13. Скиркоцкий С.В. Теоретические и практические подходы к созданию и развитию интеллектуальной транспортной системы города: монография / С.В. Скиркоцкий, Д.В. Капский, Д.В. Навой. – Гомель: БелГУТ, 2022. – 171 с.
14. Robertson D.I. Transyt: a traffic network study tool / D.I. Robertson // RRL Report LR 253. – 1969.
15. Шуть В.Н., Капский Д.В. Графовая модель конфликтного взаимодействия транспортных средств на различных перекрестках / Автотракторостроение и автомобильный транспорт. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. В 2-х томах. Минск, 2021. – С. 190-197.

16. **Капский Д.В., Шуть В.Н., Пегин П.А.** Графовая модель конфликтного взаимодействия транспортных средств на различных перекрестках / Наука и техника. – 2018. – Т. 17. – № 3. – С. 246-254.
17. **Кухаренок Г.М., Капский Д.В., Навой Д.В., Рожанский Д.В., Шуть В.Н.** Исследование механизма распада координированной пачки автотранспортных средств при движении на перегоне магистральной улицы / Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2010. – № 15. – С. 63-68.
18. **Пегин П.А.** Современные тенденции развития бортовых интеллектуальных транспортных систем: монография / П.А. Пегин, Д.В. Капский, В.В. Касьяник, В.Н. Шуть; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2019. – 198 с.

## REFERENCES

1. **Vrubel Y.A., Kapski D.V., Kot E.N.** Determination of losses in road traffic. Mn: RIO BNTU, 2006, 252 p.
2. **Pechersky M.P., Khorovich V.G.** Automated traffic control systems. M.: Transport, 1979, 175 p.
3. **Vlasov A.A.** Adaptive traffic control systems in cities. Monograph. Penza: PGUAS Publishing House, 2012, 162 p.
4. **Brailovsky N.O., Granovsky B.I.** Vehicle traffic control. M.: Transport, 1978, 112 p.
5. **Kapitanov V.T., Khilazhev E.B.** Management of traffic flows in cities. M.: Transport, 1985, 94 p.
6. **Bielefeldt C., Busch F.** MOTION-a new on-line traffic signal network control system. Road Traffic Monitoring and Control, Seventh International Conference on London, 1994, pp. 55-59.
7. **Hunt P.B., Robertson D.I., Bretherton R.D., Winton R.I.** SCOOT – A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals. Report TRRL 1014 – Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, U.K., 1981, 44 pp.
8. **Daniel Krajzewicz, Jakob Erdmann, Michael Behrisch, Laura Bieker.** Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban MObility. International Journal On Advances in Systems and Measurements, 2012, 5(3&4), pp. 128-138.
9. **Prizbyl P., Svitek M.** Telematics in transport: translation from Czech by O. Buzek and V. Buzkova / ed. V.V. Silyanova. M.: MADI, 2003, 540 p.
10. **Kapski D.V.** Fundamentals of automation of intelligent transport systems: textbook. Moscow, Vologda: Infra-Engineering, 2022, 408 p.
11. **Vrubel Y.A., Kapski D.V., Rozhansky D.V., Navoi D.V., Kot E.N.** Coordinated traffic control: monograph. Minsk: BNTU, 2011, 240 p.
12. **Vorobyov E.M., Kapski D.V.** ACS for road traffic. Minsk: UP NIISA, 2005, 88 p.
13. **Skirkovsky S.V., Kapski D.V., Navoi D.V.** Theoretical and practical approaches to the creation and development of an intelligent city transport system: monograph. Gomel: BelGUT, 2022, 171 p.
14. **Robertson D.I.** Transyt: a traffic network study tool. RRL Report LR 253, 1969.
15. **Shut V.N., Kapski D.V.** Graphic model for developing a distribution plan. Automotive and tractor manufacturing and road transport. Collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference. In 2 volumes. Minsk, 2021. pp. 190-197.
16. **Kapski D.V., Shut V.N., Pegin P.A.** Graphic model of conflict interaction of vehicles at various intercrossings. Science and technology, 2018, vol. 17, no. 3, pp. 246-254.
17. **Kukharenok G.M., Kapski D.V., Navoi D.V., Rozhansky D.V., Shut V.N.** Study of the mechanism of discovery of a coordinated pack of vehicles when driving on the main street. Bulletin of Brest State Technical University. Water construction, thermal power engineering and geoecology, 2010, no. 15, pp. 63-68.
18. **Pegin P.A., Kapski D.V., Kasyanik V.V., Shut V.N.** Modern trends in the development of on-board intelligent transport systems: monograph. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. St. Petersburg: SPbGASU, 2019, 198 p.

RUTKOVSKY V.N., KAPSKI D.V.

## ANALYSIS, DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF ADAPTIVE ALGORITHMS FOR (FLEXIBLE) TRAFFIC LIGHT REGULATION

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Republic of Belarus*

*The article analyzes various adaptive control algorithms used in the intelligent system of the largest city – Minsk. An adaptive control algorithm has been developed depending on the dynamically changing load of a local intersection. On the example of one of the intersections, an example of the implementation of this algorithm is given. Recommendations are given for the further application of this algorithm on the street network.*

**Keywords:** *intelligent transport system, control algorithm, traffic and pedestrian flows, adaptive control*

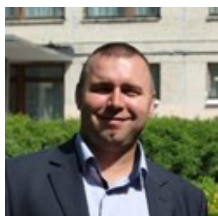


**Капский Денис Васильевич**, доктор технических наук, доцент. Заместитель Председателя ВАК, Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь. Проводит исследования в области организации движения, технических средств регулирования и информационно-алгоритмического обеспечения управления движением, транспортного планирования и математического моделирования процессов транспортных систем.

**Kapski D.V.**, doctor of Science, Associate Professor. Vice-chairman HAC, Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus. Conducts research in the field of traffic management, technical means of regulation and information and algorithmic support for traffic control, transport planning and mathematical modeling of transport systems processes.

**Тел:** +375 (29) 686-53-23

**Email:** d.kapsky@bntu.by



**Рутковский Вячеслав Николаевич**, магистр кафедры «Транспортные системы и технологии» АТФ БНТУ, директор ООО «ПрофиСлав-Строй». Область интересов: исследования характеристик дорожного движения, адаптивное управление дорожным движением; проектирование светофорных объектов и автоматизированные системы управления дорожным движением.

**Rutkovsky V.N.** Master of the Department of Transport Systems and Technologies ATF BNTU, Director of ProfiSlav-Stroy LLC. Area of interest: road traffic characteristics research, adaptive road traffic control; design of traffic light objects and automated road traffic control systems.

**Тел:** +375 29 602 49 48

**E-mail:** profislav@bntu.by