УДК 004.942

DOI: 10.15827/0236-235X.125.150-158

Дата подачи статьи: 10.07.18

2019. Т. 32. № 1. С. 150–158

Сравнение эффективности адаптивных алгоритмов светофорного регулирования в среде AnyLogic

С.А. Андронов¹, к.т.н., доцент, andronv_00@mail.ru

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, 190000, Россия

В статье рассматриваются моделирование и управление транспортным потоком в зависимости от интенсивности дорожного движения. Разработаны и реализованы имитационные модели в среде пакета программ AnyLogic ряда адаптивных алгоритмов управления транспортным потоком, таких как мягкое программирование светофорных объектов с использованием нечеткой логики, разъезда очередей, поиска разрывов в транспортном потоке, поисковой оптимизации с использованием формулы Вебстера, прямой минимизации транспортных задержек в процессе имитации и мягкое программирование светофорных объектов с использованием нечеткой логики.

В процессе имитационного моделирования, в том числе в условиях движения на реально существующих перекрестках мегаполиса, выполнено сравнение возможного эффекта от применения перечисленных адаптивных алгоритмов с работой светофора с фиксированной длительностью фаз при различной загруженности транспортной сети. Приведены диаграммы границ эффективности рассмотренных алгоритмов в широком диапазоне изменения параметров. Сравнимые алгоритмы упорядочены по эффекту пропускной способности перекрестка в диапазонах принятых исходных данных.

Результаты моделирования показывают, что установка систем адаптивного регулирования позволяет уменьшить время простоя автомобилей (нагрузку на двигатели, расход бензина, вредные выбросы) по сравнению с обычным светофором в среднем от 5 до 50 %. Оптимизационный принцип построения адаптивного регулирования показывает значительно больший эффект повышения пропускной способности перекрестка по сравнению с работой алгоритмов типа «пропуск очередей» и «поиск разрывов» в широком диапазоне изменения интенсивностей транспортного потока. Промежуточное положение занимает алгоритм работы светофора с нечеткой логикой. Эксперимент «анализ чувствительности» в программе AnyLogic демонстрирует достаточно полную зависимость критерия оптимизации транспортного потока от оптимального значения интенсивности проезжающих транспортных средств.

Ключевые слова: светофорное регулирование, адаптивный алгоритм, имитационное моделирование, AnyLogic.

Ядром построения интеллектуальной транспортной системы (ИТС) города являются АСУ дорожным движением (АСУДД). Одной из перспективных областей в сфере управления дорожным движением стали адаптивные системы, которые подстраиваются под текущую дорожную ситуацию в зависимости от многих параметров. Адаптивное управление на основе различных стратегий управления внутри цикла и регулирования смещений на сети перекрестков используют многие современные АСУДД, например SCATS, SCOOT и др. В результате перехода на заторовых участках к жесткому регулированию возникает возможность повысить безопасность движения, приблизиться к минимально возможным значениям длин очередей, задержкам, расходам топлива, снижению вредных выбросов, что выражается в экономическом и экологическом эффектах.

Некоторые адаптивные алгоритмы [1–3] также находят применение при разработке пакетов транспортного микромоделирования. В качестве средств реализации таких алгоритмов можно назвать, например, дополнительный модуль VAP/VisVAP к программе PTV Vision Vissim [4] для моделирования программируемых фаз и этапов средств управления сигналами, а также LISA+, в котором можно планировать, анализировать, оптимизировать сигнальные контроллеры. Встроенный в Vissim алгоритм работает по количеству проезжающих через перекресток автомобилей, где за-

прещающий сигнал включается, когда последний автомобиль на одной из дорог покидает перекресток [2].

Наряду с такими подходами, как транспортно-зависимое управление с оптимизацией параметров регулирования в реальном времени, применяется также мягкое программирование светофорных объектов с использованием нечеткой логики (НЛ). При использовании нечетких контроллеров достигается значительное повышение быстродействия процессов управления. В работе [5] были рассмотрены алгоритм мягкого регулирования на основе НЛ и особенности его реализации в среде AnyLogic [6], определены границы эффективности данного подхода.

В предлагаемой статье продолжено исследование адаптивных алгоритмов, а именно: разработаны модели разъезда очередей, поиска разрывов, поисковой оптимизации с использованием формулы Вебстера и их реализации в среде AnyLogic. Проводится сравнение возможного эффекта от их применения с работой светофора с фиксированной длительностью фаз. Представляется, что данное исследование может быть полезным, поскольку подобные оценки автору данной статьи не встречались.

Постановка задачи и реализация в среде AnyLogic

Рассмотрим схему расстановки датчиков, которая является стандартной для адаптивных алгоритмов

(рис. 1). Первый датчик (D1) устанавливается в удалении от светофора и считывает двигающиеся по дороге автомобили, датчик D2 устанавливается на линии светофора и убирает из счетчика покидающие участок *транспортные средства* (ТС). Датчик D3 устанавливается на отдалении от светофора и фиксирует количество ТС, покинувших зону за время работы зеленого сигнала светофора. Таким образом, можно вычислить число ТС, которые покинули участок дороги за прошлый цикл горения и успели подъехать к светофору за время работы красного сигнала. Аналогично считывается число ТС, движущихся в перпендикулярном направлении дороги.

Количество ТС и значения длительностей зеленых сигналов попадают в блок адаптивного управления, который выдает значения зеленого сигнала или значения $T_{сдвига}$, на которые следует изменить длительность зеленого сигнала светофоров. Параллельно при тех же условиях проведения экспериментов выполняется моделирование работы светофора с фиксированной длительностью фаз. В качестве параметра сравнения при моделировании будет использоваться *количество проехавших перекресток автомобилей* за одно и то же время для перекрестка, управляемого адаптивным светофором, и перекрестка с жестким регулированием.

Программный комплекс AnyLogic 7.2.0 University в своем составе имеет библиотеку дорожного движения, где алгоритмы адаптивного регулирования не представлены. Тем не менее, есть возможность определения наилучших значений длительностей фаз на основе оптимизации.

Элементы вышеназванной библиотеки генерируют поток машин и управляют перемещением автомобилей по дорожному полотну в имитационной модели, общий вид которой показан на рисунке 1. В интер-

фейсе модели есть возможность индивидуального задания максимального количества автомобилей и максимальной длительности зеленого сигнала для каждого светофора. Помимо расчетных данных о проехавших автомобилях, демонстрируется динамика изменения количеств ТС, получивших отказ в обслуживании по обоим методам регулирования. В данной модели, помимо библиотеки дорожного движения, для реализации алгоритмов работы светофоров используются диаграммы состояний, работа которых обеспечивает последовательную смену состояний светофора через определенные интервалы времени.

Развернутый перечень адаптивных алгоритмов приведен в [1–3], из которых в данной работе рассмотрены следующие.

1. Алгоритм, предусматривающий пропуск очереди, образовавшихся в период действия запрещающего сигнала (алгоритм разъезда очереди).

Данный алгоритм требует детектирования длин очередей на направлениях проезда через перекресток. Длина очереди может определяться как непосредственно, так и расчетным методом, путем сравнения числа автомобилей, прошедших через два контролируемых сечения – у стоп-линии и на некотором расстоянии от нее.

Идея алгоритма заключается в том, что на перекрестке располагаются два типа детекторов – D1 и D2. Детекторы D1 установлены на подъезде к перекрестку, они считывают количество автомобилей в момент, когда машины проезжают через них, и вносят их в память. Детекторы D2 удаляют автомобили из памяти в момент, когда они проезжают мимо детекторов. Как только память будет пуста, светофор переключается в красную фазу. Схема взаимодействия между детекторами и светофорами описана в [2]. В плане реализации

Рис. 1. Общий вид имитационной модели

Fig. 1. A general view of the simulation model

работа алгоритма на программном уровне выглядит следующим образом:

- на вход подаются показания датчиков количества автомобилей и начальное значение длительности зеленого сигнала;
- измеряется общее количество ТС в заторе (если таковой имеется);
- вычисляется время, необходимое для проезда ТС;
- проверяется верхняя граница длительности зеленого сигнала;
- устанавливается значение длительности зеленого сигнала.

Все вычисления происходят за 0.1 секунды до включения зеленого сигнала. Аналогичные действия производятся на перпендикулярном направлении перекрестка.

Недостатком алгоритма является неучет пропускной способности в каждом направлении. При возникновении затора на одной из полос это направление не успеет в полной мере разгрузиться, а противоположное направление быстро разгрузится и переключит фазу светофора.

2. Алгоритм поиска разрыва в транспортном потоке в направлении действия разрешающего сигнала на фиксированных значениях управляющих параметров.

Алгоритмы поиска разрыва ориентированы на учет изменения пространственной структуры потока и популярны из-за своей простоты. Если разрыв отсутствует, время работы зеленого сигнала на одном из направлений будет продолжаться до тех пор, пока не достигнет максимального значения. Использование данного подхода также целесообразно при разработке сети связанных перекрестков, поскольку при этом исключаются вычисления и обеспечивается своевременный сдвиг фаз.

Реализованный алгоритм базируется на учете дистанции между прибывающими к перекрестку автомобилями потока. При этом достаточно использования одного детектора D1, который располагается на подъезде к перекрестку и определяет расстояние между ТС. Если разрыва нет, то к работе зеленой фазы прибавляется отрезок времени $T_{\text{сдвига}}$, необходимый для передвижения автомобиля от детектора до стоп-линии. Схема взаимодействия между детекторами и светофорами описана в [2]. В плане реализации работа алгоритма на программном уровне выглядит следующим образом:

- на вход подаются значения датчиков количества ТС и начальное значение длительности зеленого сигнала;
- показания датчиков записываются в память;
- рассчитывается длина очереди;
- рассчитывается время, необходимое для проезда ТС ($tgterm$);
- сравнивается значение памяти с реальным значением показаний датчика числа ТС;

- при условии, что память не совпадает с реальным значением числа ТС, изменяется длительность зеленого сигнала на полученное значение $tgterm$.

Длительность зеленого сигнала ограничена 20 секундами снизу и 120 секундами сверху. Аналогичные действия производятся с перпендикулярным направлением движения.

Данный алгоритм учитывает только прибывающие к перекрестку автомобили. Если поток оказывается однородным и будет лишен явных разрывов, алгоритм перейдет в режим стандартной работы с фиксированными длительностями фаз. Также алгоритм теряет эффективность, если пачки ТС подходят сразу после включения разрешающего сигнала. В этом случае можно обеспечить беспрепятственный пропуск транспорта через перекресток путем сдвига момента включения фазы на величину основного такта, но данный алгоритм не обеспечивает такого сдвига. Отметим, что известны варианты комбинаций вышеуказанных алгоритмов, а также их различные модификации.

3. Алгоритм расчета средней задержки по формуле Вебстера (существуют также более точные оценки).

Данный подход позволяет адаптировать работу светофора за счет смены фазовых таблиц, заранее оптимизированных по критерию минимальной задержки и загружаемых в соответствии с показаниями локальных детекторов. Отметим, что сокращение задержек уменьшает раздраженность и психологическую утомляемость водителей, что, в конечном счете, уменьшает вероятность возникновения ДТП. В настоящее время наибольшее распространение получила методика Вебстера [7]. Рассмотрим алгоритм, где в качестве критерия эффективности управления используется значение транспортной задержки на перекрестке:

$$\bar{t} = f(T_c, t_{o1}, t_{o2}) \rightarrow \min.$$

В случае двухфазного светофора длительность цикла светофорного регулирования равна $T_c = t_{o1} + t_{p1} + t_{o2} + t_{p2}$, где $25 \leq T_c \leq 120$, $t_{o1}, t_{p1}, t_{o2}, t_{p2}$ – длительности основных и промежуточных тактов регулирования; $T_p = t_{p1} + t_{o2} = \text{const}$ – общая длительность промежуточных тактов регулирования. Длительность второго основного такта $t_{o2} = T_c - T_p - t_{o1}$.

Приведенный далее алгоритм [8] использует расчет задержки по формуле Вебстера, широко распространенной во многих странах. Данный подход позволяет оптимизировать пропускную способность перекрестка с использованием аналитического вида зависимости транспортной задержки от интенсивности движения. Несмотря на эмпирический характер зависимости, методика позволяет значительно снизить вычислительные затраты при настройке фазовых таблиц, а также использовать подход на сети перекрестков.

Описание разработанного алгоритма

1. Задание в качестве начального значения длительности цикла T_c минимально допустимого значения, расчет $t_{o1} = 0.1 \cdot T_c$ и t_{o2} .

2. Расчет транспортной задержки по всем подходам к перекрестку по формуле Вебстера.

По этой методике средняя задержка одного автомобиля в j -м направлении t_{ij} при известных параметрах цикла светофорного регулирования определяется следующим образом:

$$t_{ij} = \frac{T_c(1-\lambda_i)^2}{2(1-\lambda_i x_{ij})} + \frac{x_{ij}^2}{2q_{ij}(1-x_{ij})} - 0,65 \left(\frac{T_c}{q_{ij}} \right)^{1/3} x_{ij}^{(2+5\lambda_i)}, \text{ сек.},$$

где λ_i – эффективная доля i -й фазы в цикле регулирования, в течение которой обслуживается j -е направление; q_{ij} – приведенная интенсивность движения в j -м направлении, авт./сек.; x_{ij} – степень насыщения направления движения.

Заметим, что степень насыщения представляет собой отношение среднего числа ТС, прибывающих в j -м направлении к перекрестку в течение цикла, к максимальному числу ТС, которые могут покинуть перекресток в j -м направлении за эффективное время i -й фазы регулирования:

$$x_{ij} = \frac{q_{ij} T_c}{M_{nij} t_{\text{эф}i}},$$

где $t_{\text{эф}i}$ – эффективное время длительности фазы цикла; M_{nij} – поток насыщения (для двухполосного движения при ширине полос 3,75 м при расчетах принят $1980 \cdot 2 = 3960$ авт./ч [9]).

Первая часть уравнения формулы Вебстера представляет собой среднюю задержку ТС при условии их равномерного прибытия к перекрестку. Вторая часть зависимости учитывает случайный характер прибытия ТС. Эту дополнительную задержку приписывают, учитывая вероятность возникновения прибытия большого количества ТС, что может привести к кратковременному перенасыщению. Третий член введен в модель в качестве корректирующего коэффициента, снижающего величину задержки на 5–15 % [10].

3. Средняя задержка ТС на перекрестке в целом рассчитывается как средневзвешенное значение задержек для всех направлений перекрестка:

$$\bar{t}_i = \frac{\sum_j q_{ij} t_{ij}}{\sum_j q_{ij}},$$

где j – число направлений (подходов к перекрестку) второстепенной дороги. Суммирование выполняется по числу выделенных групп ТП.

4. Проверяются длительности основных тактов на соответствие требованиям безопасности перехода проезжей части пешеходами (в данном исследовании пешеходы не учитываются, поскольку на процесс сравнения алгоритмов данный фактор не влияет). Тем не менее, если $t_{o1} \leq t_{\text{пеш}}$, $t_{o2} \leq t_{\text{пеш}}$, $t_{\text{пеш}} = S_{\text{пеш}} / V_{\text{пеш}} + 5$, то $t_{o1} = t_{o1} + k$, $t_{o2} = T_c - T_p - t_{o1}$, переход к пункту 2, иначе – к пункту 5.

5. Продолжение процесса приращения и пересчета до тех пор, пока не будет достигнуто максимальное значение t_o , (принято $t_{o1} = 0.9 T_c$).

6. Повторение расчета параметров и соответствующих им средних задержек для всех оставшихся значе-

ний T_c . Окончательно выбираются те значения t_{o1} , t_{o2} , T_c , которым соответствует минимальное значение $\bar{t}_i$.

Наряду с описанным алгоритмом в данной работе выполняется непосредственная оптимизация пропускной способности перекрестка при различных интенсивностях в среде AnyLogic.

Результаты моделирования

Как известно, интенсивность ТП – это величина, обратная интервалу движения между машинами, или число ТС, проезжающих через сечение дороги за единицу времени (в данном случае за 1 минуту). Пусть низкой интенсивности соответствует величина 0.1 авт./мин., средней – 0.5 авт./мин. (30 авт./ч), высокой – 1.0 авт./мин. (60 авт./ч). В процессе моделирования был выполнен ряд экспериментов с исходными данными по интенсивности движения для конкретных пересечений Санкт-Петербурга. Эксперименты проводились при жестко фиксированных реальных значениях параметров работы светофоров и при включенном режиме адаптивного управления.

Эксперимент 1.

Пусть доминирует движение по одному направлению на улицах перекрестка (утро, движение в город). Направление север–юг – изменение в диапазоне от 0.1 до 1.0, юг–север – 0.1. Интенсивность в перпендикулярном направлении: запад–восток – 0.2 (низкая), 0.5 (средняя), 1 (очень высокая), восток–запад – 0.1. Фазы светофора: зеленый свет – 30 секунд, красный свет – 20 секунд. Длительность моделирования – 3 600 минут (примерно 50 циклов работы светофора).

Эксперимент 2.

На направлении север–юг по-прежнему интенсивность меняется в диапазоне от 0.1 до 1.0, а в направлении юг–север принимает значения «малая», «средняя» и «высокая». На направлениях запад–восток и восток–запад интенсивность малая. Таким образом, рассмотрен случай неравномерной загрузки подходов.

Эксперимент 3.

Фазы светофора: зеленый свет – 30 секунд (восток–запад), красный свет – 50 секунд (север–юг). Длительность моделирования – 3600 минут. Моделирование ситуации в час пик. Интенсивность движения в направлении север–юг средняя (0.5), в направлении юг–север высокая (0.7), в направлении запад–восток малая (0.2) и в направлении восток–запад достаточно высокая (0.6). Таким образом, здесь рассмотрен случай более равномерной загрузки перекрестка.

Исследование зависимостей при регулировании на основе НЛ

На рисунке 2 приведены расчеты для эксперимента 1, представленные статистическими зависимостями. Для необходимости понимания тенденций кривые также дополнены трендовыми зависимостями, достаточно хорошо аппроксимируемыми полиномами

4-й степени. Как видим, здесь положительный эффект от использования НЛ наблюдается при низкой интенсивности в направлении восток–запад, при средней и высокой интенсивности – в направлении север–юг.

Прирост пропускной способности доходит примерно до 26 %. Также можно заметить, что имеется положительный эффект порядка 15 % при высокой интенсивности в направлении восток–запад и при низкой интенсивности в направлении север–юг. Отрицательный эффект наблюдается при близких значениях интенсивности движения в перпендикулярных направлениях в окрестности средних значений и выше.

Видно, что при переходе через рубеж средней интенсивности пропускная способность при управлении с НЛ возрастает. Наибольший эффект при моделировании достигается при близких к максимальным интенсивностям встречного движения, например, при интенсивности 0.1 в направлении восток–запад, 0.1 – запад–восток, 1.0 – север–юг, 1.0 – юг–север получим прирост пропускной способности 42 % (рис. 3).

При проведении эксперимента 3 замечено, что средний процент прироста пропускной способности с использованием алгоритма на базе НЛ незначительный и составляет всего порядка 10 % (оценка за 5 экспериментов).

Исследование зависимостей при регулировании на основе алгоритма «пропуск очередей»

На рисунке 4 приведены результаты применения алгоритма «пропуск очередей» (ПрО) в соответствии с

экспериментом 1. Можно заметить, что положительный эффект порядка 15 % наблюдается лишь при высокой интенсивности в направлении запад–восток при низкой интенсивности в направлении север–юг. На рисунке 5 приведены соответствующие результаты работы данного алгоритма для эксперимента 2. Положи-

тельный эффект наблюдается при переходе средней интенсивности в направлении север–юг и достигает 15 % при высоких значениях интенсивностей в направлении восток–запад. Для эксперимента 3 получен средний процент прироста пропускной способности с использованием данного алгоритма в районе 7,6 %.

Исследование зависимостей при регулировании на основе алгоритма «поиск разрывов»

На рисунках 6 и 7 приведены соответствующие экспериментам 1 и 2 результаты по алгоритму «поиск разрывов» (ПР). Можно отметить, максимальный положительный эффект в среднем до 8 % достигается лишь при низкой интенсивности в направлении восток–запад и при высокой в направлении север–юг.

Здесь можно наблюдать наибольший положительный эффект порядка 10 % при средних и высоких интенсивностях в направлении восток–запад при переходе через рубеж средних интенсивностей в направлении север–юг. Для эксперимента 3 по данному алгоритму получен средний процент прироста всего 1,5 %.

Исследование зависимостей при регулировании на основе алгоритма поиска минимальной задержки по формуле Вебстера

На рисунках 8 и 9 представлены результаты экспериментов 1 и 2 для алгоритма поиска минимальной задержки.

Можно отметить, что положительный эффект доходит до 35 % при низкой интенсивности в направлении восток–запад и до 30 % при средней интенсивности в направлении восток–запад при средних и высоких интенсивностях в перпендикулярном направлении. При высокой интенсивности восток–запад положительный эффект наблюдается в диапазоне 20–40 % при изменении во всем интервале интенсивностей в перпендикулярном направлении.

Можно отметить, что положительный эффект в данном эксперименте возрастает и доходит в случае

Рис. 8. Эффект от использования алгоритма минимальной средней задержки для эксперимента 1

Fig. 8. The effect from using the minimum average delay algorithm for the experiment 1

Рис. 9. Эффект от использования алгоритма минимальной средней задержки для эксперимента 2

Fig. 9. The effect from using the minimum average delay algorithm for the experiment 2

высоких интенсивностей в направлении восток–запад до 48 % при высоких интенсивностях в направлении север–юг.

На рисунке 10 для эксперимента 2 показаны зависимости для средних задержек и минимальных средних задержек при минимальных, средних и высоких интенсивностях в направлении восток–запад в диапазоне интенсивностей в направлении север–юг.

Можно отметить, что с повышением интенсивности средняя задержка возрастает для всех серий эксперимента. Повышение пропускной способности при использовании адаптивного алгоритма также нарастает, что свидетельствует о его эффективности по сравнению с жестким управлением.

В эксперименте 3 средний процент прироста с использованием формулы задержки Вебстера составил примерно 31 %. Фазы светофора при данном наборе интенсивностей движения при минимальной задержке по этой формуле составили: зеленый свет – 10 секунд (восток–запад), красный свет – 5 секунд (север–юг).

Также для определения наилучших длительностей сигналов в обоих направлениях перекрестка в программе AnyLogic был выполнен так называемый оптимизационный эксперимент для 50 прогонов. Оптимизация выполнялась по критерию минимальной задержки, или максимальной пропускной способности перекрестка в условиях эксперимента 2 при высокой интенсивности в направлении юг–север. Можно заметить, что оптимизационный подход к настройке времени сигналов в данной серии экспериментов практически повторяет работу алгоритма минимизации средней задержки с использованием формулы Вебстера – гораздо более экономичный в вычислительном плане.

Оптимизация в условиях эксперимента 3 дала несколько другие значения длительностей сигналов по сравнению с алгоритмом методики Вебстера, а

Рис. 10. Зависимости значений средних задержек и минимальных средних задержек в секундах при минимальных, средних и высоких интенсивностях в направлении восток–запад в диапазоне интенсивностей в направлении север–юг

Fig. 10. Dependences of the values of average delays and minimum average delays in seconds at minimum, medium and high intensities in the east–west direction in the range of intensities in the north–south direction

именно: зеленый свет – 5 секунд (восток–запад), красный свет – 2.5 секунды (север–юг), что объясняется другим механизмом формирования задержки в имитационной программе.

Отметим, что оптимизация в данном эксперименте (средние значения в конфликтных направлениях) дала выигрыш на 8,5 % больше по числу проехавших перекресток ТС относительно рассчитанной по формуле Вебстера. Этот результат можно объяснить тем, что в данном случае непосредственная оптимизация дает более точный расчет длительностей фаз по сравнению с эмпирической формулой.

Эксперимент «Анализ чувствительности» показал, что при оптимальном значении длительности зеленого сигнала по всем направлениям отклонение интенсивности в направлении восток–запад в диапазоне $\pm 10\%$ в обе стороны от заданной настройки по вышеописанному алгоритму Вебстера получаем всего порядка 1 % ухудшения, то есть имеем достаточно пологую зависимость критерия оптимизации (разброс в обе стороны $(7\,500 - 7\,318) / 2 \cdot 7\,015 \times 100\% = 1,3\%$ ТС от оптимального значения проехавших ТС, равного 7015).

На рисунке 11 представлена сводная картина эффективности сравниваемых алгоритмов для высокой интенсивности север–юг для эксперимента 2.

Выводы

Представлены и обработаны данные, собранные при моделировании нескольких ситуаций на реальных перекрестках Санкт-Петербурга. Результаты моделирования показывают, что установка систем адаптивного регулирования позволяет уменьшить время простоя автомобилей (нагрузку на двигатели, расход бензина, вредные выбросы) по сравнению с обычным светофором в среднем от 5 до 50 %. В работе приведены конкретные проценты достигаемого эффекта. Оптимизационный принцип построения адаптивного регулирования показывает значительно больший эффект повышения пропускной способности перекрестка по сравнению с работой алгоритмов типа «пропуск очередей» и «поиск разрывов» в широком диапазоне изменения интенсивностей ТП. Промежуточное положение занимает алгоритм работы светофора с НЛ.

Литература

1. Кочерга В.Г., Шаталова Е.Е. Технические средства современных автоматизированных систем управления дорожным движением. Ростов н/Д., 2011. 108 с.
2. Кретов А.Ю. Обзор некоторых адаптивных алгоритмов светофорного регулирования перекрестков. Изв. Тульского гос. ун-та: Технич. науки. 2013. Вып. 7. Ч. 2. 390 с.
3. Кременец Ю.А., Печерский М.П., Афанасьев М.Б. Технические средства организации дорожного движения. М.: Академкнига, 2005. 279 с.
4. Пакет имитационного моделирования дорожного движения VISSIM. URL: <http://www.ptv-vision.ru/> (дата обращения: 09.07.2018).
5. Андронов С.А. Разработка и исследование имитационной модели светофорного регулирования на основе нечеткой логики в среде AnyLogic // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2015): тр. VII Всерос. науч.-практич. конф. М.: Изд-во ИПУ РАН, 2015. Т. 2. С. 443–449.
6. Система имитационного моделирования AnyLogic. URL: <http://www.xjtek.ru/anylogic> (дата обращения: 09.07.2018).
7. Webster F.V., Cobbe B.M. Traffic Signals. London, 1966, 111 p.
8. Вытяжков Д.В. Целевой поиск управляющих параметров светофорной сигнализации в автоматизированной системе управления дорожным движением // Сб. науч. тр. СевКавГТУ: Сер. Естественнонаучная. 2004. № 1.
9. Косолапов А.В., Жданов В.Л. Организация движения. Кемерово, 2013. 37 с.
10. Ахмадинуров М.М., Завалишин Д.С., Тимофеева Г.А. Математические модели управления транспортными потоками. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2011. 120 с.

Comparison the efficiency of adaptive algorithms of traffic control in AnyLogic

S.A. Andronov¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, andronov_00@mail.ru

¹ St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, 190000, Russian Federation

Abstract. The paper considers the issues of traffic flow simulation and management depending on traffic intensity. There are some simulation models that are developed and implemented in AnyLogic. These models relate to adaptive transport flow control algorithms

such as soft programming of traffic lights using fuzzy logic; queue-out; search for discontinuities in a transport flow; search optimization using Webster's formula; direct minimization of transport delays in the simulation process; soft programming of traffic lights using fuzzy logic.

During simulation modeling, including traffic conditions at the actual metropolis intersections, the author compares a possible effect from applying the above adaptive algorithms with the operation of a traffic light with a fixed phase duration for different traffic load. The paper presents diagrams of efficiency bounds of the considered algorithms in a wide range of parameter changes. The compared algorithms are sorted by the effect of the intersection capacity in the received initial data ranges.

The simulation results show that the installation of adaptive control systems allows reducing car standing time (engine load, gasoline consumption, harmful emissions) in comparison with usual traffic lights at average from 5% to 50%. The optimization principle of constructing adaptive control shows a much bigger effect of increasing intersection capacity comparing with the work of algorithms such as "passing queues" and "break searching" in a wide range of changes in traffic flow intensities. The traffic light algorithm with fuzzy logic occupies an intermediate position. The "sensitivity analysis" experiment in AnyLogic demonstrates a fairly flat dependence of the transport flow optimization criterion from the optimal intensity value of the passing vehicles.

Keywords: traffic light regulation, adaptive algorithm, simulation modeling, AnyLogic.

References

1. Kocherga V.G., Shatalova E.E. *Technical Means of Modern Automated Traffic Control Systems*. Rostov-on-Don, 2011, 108 p.
2. Kretov A.Yu. Overview of some adaptive algorithms of traffic light regulation at intersections. *Izvestiya TulGU. Technical Sciences*. Tula, TulGU Publ., 2013, vol. 7, part 2, 390 p.
3. Kremenets Yu.A., Pechersky M.P., Afanasyev M.B. *Technical Means of Organizing Traffic*. Moscow, Akademkniga Publ., 20054, 279 p.
4. *VISSIM Road Traffic Simulation Package*. Available at: <http://www.ptv-vision.ru/> (accessed July 9, 2018).
5. Andronov S.A. Development and research of a simulation model of traffic-light regulation based on fuzzy logic in AnyLogic. *Proc. 7th All-Russ. Sci. and Pract. Conf. on Simulation Modeling and its Application in Science and Manufacturing "Simulation Modeling". Theory and Practice (IMMOD-2015)*. Moscow, IPU RAN Publ., 2015, vol. 2, pp. 443–449 (in Russ.).
6. *The AnyLogic Simulation Modeling System*. Available at: <http://www.xjtek.ru/anylogic> (accessed July 9, 2018).
7. Webster F.V., Cobbe B.M. *Traffic Signals*. London, 1966, 111 p.
8. Vytyazhkov D.V. Target search for traffic signaling control parameters in an automated traffic management system. *Seriya "Estestvennonauchnaya" SevKavGTU*, Stavropol, 2004, no. 1 (in Russ.).
9. Kosolapov A.V., Zhdanov V.L. *Traffic Management*. Kemerovo, 2013, 37 p.
10. Akhmadinurov M.M., Zavalishchin D.S., Timofeeva G.A. *Mathematical Models of Transport Flow Management*. Monograph. Ekaterinburg, UrGUPS Publ., 2011, 120 p.

Примеры библиографического описания статьи

1. Андронов С.А. Сравнение эффективности адаптивных алгоритмов светофорного регулирования в среде Anylogic // Программные продукты и системы. 2019. Т. 32. № 1. С. 150–158. DOI: 10.15827/0236-235X.125.150-158.
2. Andronov S.A. Comparison the efficiency of adaptive algorithms of traffic control in AnyLogic. *Software & Systems*. 2019, vol. 32, no. 1, pp. 150–158 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.125.150-158.