

УДК 517.5:004.021

Применение нечеткой логики в системах интеллектуального управления светофорами

М. А. Стрижко, В. В. Червинский
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк
strizhko.mihail@yandex.ru

Аннотация

В статье рассмотрена актуальность использования систем светофорного управления транспортными потоками с замкнутым контуром на основе методов интеллектуального управления, в частности, нечеткой логики. Описана конфигурация аппарата нечеткой логики применительно к системам светофорного регулирования. Проведено модельное исследование разработанной системы на основе представления перекрестка как системы массового обслуживания. Проанализированы результаты моделирования. Выполнено сравнение интеллектуальной системы управления с системой управления с фиксированными длительностями фаз по таким показателям, как среднее время ожидания и средняя длина очереди автомобилей.

Введение

Существующие в настоящее время системы светофорного управления транспортными потоками на перекрестках различаются по структуре, степени участия человека в процессе и уровню централизации. Так, в зависимости от структуры они могут иметь замкнутый контур или разомкнутый.

Система с разомкнутым контуром не имеет данных о текущем состоянии объекта управления – транспортного потока. Дорожные контроллеры осуществляют переключение сигналов строго по заданному времени, длительности каждой фазы регулирования не изменяются. Такое управление принято называть жестким или фиксированным.

Структура системы с замкнутым контуром предполагает наличие обратной связи между техническими средствами и объектом управления [1]. Информация о состоянии транспортного потока автоматически собирается при помощи специальных датчиков – детекторов транспорта, а дорожные контроллеры после её обработки определяют режим работы светофоров. В этом случае продолжительность горения сигналов светофоров может изменяться в зависимости от интенсивности движения, что позволяет повысить эффективность управления. Такой метод светофорного регулирования называется адаптивным или гибким.

Ввиду постоянно увеличивающегося количества транспортных средств и интенсивности перевозок во всём мире, проблема оптимизации светофорного управления транспортными потоками является актуальной.

Системам адаптивного светофорного регулирования посвящены работы Г. Д. Антониади [2], А. А. Шинкарева [3]. Отдельное внимание алгоритмам светофорного регулирования уделяется в работе А. Ю. Кретьева [4].

Ввиду высокой динамики изменения характеристик транспортного потока, его оценка и формирование эффективных управляющих воздействий является достаточно сложной задачей. Решение данной задачи возможно при помощи современных интеллектуальных технологий, в частности, нечеткой логики [5]. Такой подход исключает необходимость определения четкого алгоритма управления и позволяет системе принимать решения подобно тому, как это делает человек. Следовательно, при непостоянстве характеристик рассматриваемого процесса и проблематичности его математического описания целесообразно применение интеллектуальных систем управления.

Разработанные на данный момент системы нечеткого светофорного управления существуют только в имитационных средах, хотя и показывают достаточную эффективность [6].

Разработка аппарата нечеткой логики

Управление на основе нечеткой логики предполагает задание функций принадлежности к тому или иному множеству каждой входной и выходной переменной [7]. В случае светофорного управления можно выделить такие нечеткие множества: МАЛО, СРЕДНЕ, МНОГО для количества автомобилей, подъезжающих к перекрестку, и времени горения сигнала светофора. Управление по такому принципу напоминает работу регулятора:

ЕСЛИ поток с севера города БОЛЬШОЙ И поток с востока МАЛЕНЬКИЙ, ТО пропускать поток с севера ДОЛЬШЕ.

ЕСЛИ поток с севера города СРЕДНИЙ И поток с востока СРЕДНИЙ, ТО пропускать поток с обеих сторон СРЕДНЕ.

Рассмотрим систему управления Х-образным перекрёстком, имеющим одну полосу движения в каждом направлении и, соответственно, 4 направления транспортных потоков. Так как движение во встречных направлениях осуществляется одновременно, имеем две входные переменные: «прибытие» – количество транспортных средств, движение которых в данный момент разрешено; и «очередь» – количество транспортных средств, ожидающих разрешающего сигнала светофора. Выходной переменной является приращение времени горения зеленого сигнала в текущем направлении движения. Здесь стоит отметить, что изменение длительности фаз регулирования возможно в определенных пределах во избежание бесконечного пропуска автомобилей в более загруженном направлении. В связи с этим задаётся минимальная фиксированная длительность фазы, а её приращение определяется на основе нечетких правил.

Для каждой нечеткой переменной задаются термы – нечеткие множества. В случае входных переменных отсутствие автомобилей в рассматриваемом направлении соответствует значению «почти ноль» (ZP), 2 автомобиля система воспринимает как «мало» (S), 4 – «средне» (M), 6 и более – «много» (B). Для выходной переменной нечеткое значение «почти ноль» (Z) соответствует нулевому значению приращения времени, значение «мало» (S) соответствует приращению времени, равному 2 секунды, «средне» (M) – 4 секундам, «много» (L) – 6 и более секундам.

Нечеткие множества каждой переменной и их сокращения приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Термы нечетких переменных

Прибытие		Очередь		Приращение времени	
Почти ноль	ZP	Почти ноль	ZP	Ноль	Z
Мало	S	Мало	S	Мало	S
Средне	M	Средне	M	Средне	M
Много	B	Много	B	Много	L

В графическом представлении функций принадлежности лингвистических переменных ось ординат отображает степень принадлежности нечеткой переменной к нечеткому множеству. По оси абсцисс для входных переменных

указывается количество автомобилей, считываемое детекторами транспорта. Для выходной нечеткой переменной ось абсцисс отображает приращение времени горения текущего сигнала светофора в секундах.

На рис. 1, 2 приведены графики функций принадлежности входных переменных «Прибытие» и «Очередь».

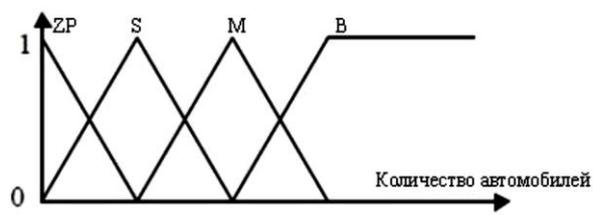


Рисунок 1 – График функции принадлежности для переменной «Прибытие»

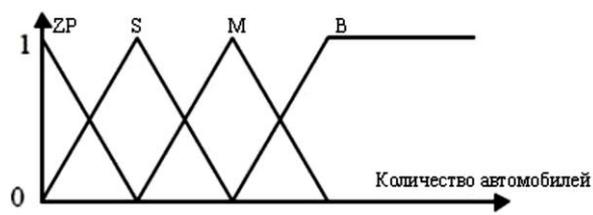


Рисунок 2 – График функции принадлежности для переменной «Очередь»

При рассмотренных значениях входных переменных их принадлежность к тому или иному нечеткому множеству равна единице. В случае же, если переменная принимает промежуточные значения, её принадлежность варьируется в пределах от 0 до 1, что влияет на принятие решения о принадлежности к соответствующему множеству выходной переменной.

График функции принадлежности для выходной переменной «Приращение времени» изображен на рис. 3.

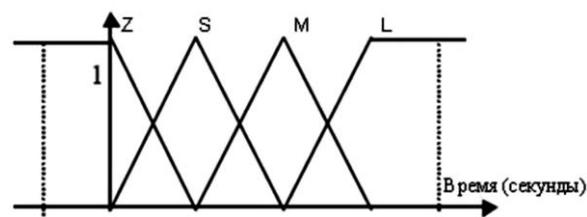


Рисунок 3 – График функции принадлежности для переменной «Приращение времени»

Конфигурация функций принадлежности системы осуществляется на основе экспертного наблюдения системы и окружающей среды. В зависимости от дорожных условий ширина функций принадлежности нечетких множеств и

их центр могут варьироваться и настраиваться в соответствии с обстановкой и условиями движения на каждом отдельном перекрёстке. Если перекрёсток чрезмерно загружен, подмножества входных переменных следует увеличить. В случае менее загруженных перекрёстков ширина функций принадлежности может быть уменьшена. Однако, следует отметить, что при управлении, основанном на нечеткой логике, переход от одного нечеткого подмножества к другому должен осуществляться плавно, поэтому необходимо, чтобы они перекрывали друг друга. Если перекрытие слишком малое или отсутствует, управление в системе будет иметь ступенчатый характер. Таким образом, степень перекрытия функций принадлежности должна составлять порядка 25 %. С другой стороны, если перекрытий слишком много, нечеткости в системе также будет слишком много, что сделает управление более размытым.

На следующем этапе конфигурирования составляются нечеткие правила системы управления, определяющие значение выходной переменной при всех возможных значениях входных переменных. Нечеткие правила системы управления в матричной форме представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Нечеткие правила системы управления

Прибытие/ Очередь	ZP	S	M	B
ZP	Z	S	M	L
S	Z	S	M	M
M	Z	Z	S	M
B	Z	Z	Z	S

Размер матрицы и количество правил равно количеству комбинаций функций принадлежности каждой из входных переменных. В данном случае входных переменных две, каждая из которых содержит по четыре функции принадлежности. Тогда количество правил равно шестнадцати.

Нечеткая система управления с помощью максимальной композиции находит степень истинности каждого из подзаключений правил. Когда выполняется правило, функция принадлежности выходной переменной («Приращение времени») устанавливается исходя из условий нечетких подмножеств («Прибытие» и «Очередь»). Когда степень значимости каждой нечеткой переменной найдена, они объединяются в одно нечеткое множество. Далее следует этап дефазификации, результатом которого получается действительное число [8].

Моделирование системы управления

Тестирование работы системы производится путем моделирования при помощи современных программных средств.

Модель основывается на представлении системы светофорного управления, как частного случая систем массового обслуживания, следовательно, может быть описана с использованием терминов теории массового обслуживания.

Система массового обслуживания (рис. 4) включает в себя входной поток λ , очередь и сервер μ_1 , который обслуживает поступающие заявки.



Рисунок 4 – Компоненты системы массового обслуживания

Охарактеризовать подобные системы возможно при помощи 6 параметров (Т, Х, С, К, Р, Z), где:

- Т, интенсивность прибытия;
- Х, интенсивность обслуживания;
- С, количество серверов;
- К, емкость очереди;
- Р, численность населения;
- Z, порядок обслуживания.

При моделировании транспортных потоков на перекрёстке емкость очереди К и численность населения Р считаются бесконечными, а порядок обслуживания Z определяется как FIFO (first in, first out – первый вошел, первый вышел). Это сокращает описание системы до 3 компонентов: Т, Х, С. Интенсивности (Т и Х) обычно стандартные: марковские (М), общие (G), детерминированные (D), хотя возможны и другие описания. С – количество серверов, является целым числом.

Очереди на изолированных перекрестках описываются как M/M/1, то есть:

- М, прибытие по Маркову (не зависит от предыдущих прибытий, распределение Пуассона);
- М, обслуживание по Маркову (время обслуживания не зависит от любого предыдущего времени обслуживания, но изменяется по распределению Пуассона в зависимости от типа транспортного средства, размера и возможности ускорения);
- 1, единый элемент управления (сервер) на перекрестке.

Таким образом, транспортный поток по каждой отдельно взятой полосе движения можно описать как ординарный (вероятность одновременного появления двух и более событий равна нулю), нестационарный (частота

появления событий $\lambda \neq const$), без последствия (не зависит от предыдущих событий).

Важным фактором также является наличие бесконечных входных и выходных очередей: сервер будет удерживать любое транспортное средство во входной очереди до тех пор, пока не будет выполнено обслуживание, и все обслуживаемые транспортные средства покинут систему [9].

Оптимизация пропускной способности в одном направлении через перекресток возможна путем достижения подходящего значения интенсивности обслуживания μ по отношению к интенсивности прибытия λ . Сложность расчета возрастает, когда рассматриваются конфликтующие потоки с различными значениями λ . Важно отметить, что соотношение μ и λ должно быть $\mu \geq \lambda$, в противном случае очередь будет постоянно увеличиваться.

Математическое представление транспортного потока в виде формулы (1) было предложено М. Дж. Бекманном. Оно позволяет

достаточно точно оценить среднее время ожидания автомобилей на перекрестке [10].

$$d = \frac{c-g}{c(1-\frac{q}{s})} \left(\frac{q_0}{q} + \frac{c-g+1}{2} \right), \quad (1)$$

где: d – среднее время ожидания автомобилей на перекрестке, с;
 c – длительность цикла регулирования, с;
 g – время горения зеленого сигнала светофора, с;
 q – интенсивность прибытия, авт./с;
 s – интенсивность обслуживания, авт./с;
 q_0 – величина оставшейся очереди, авт.

Для каждого обслуживаемого направления создается модель (рис. 5). На схеме слева направо: генератор поступающих транспортных средств; очередь; пропускной шлюз, разрешающий и запрещающий движение в соответствии с сигналами светофора; сервер, формирующий выходной поток.

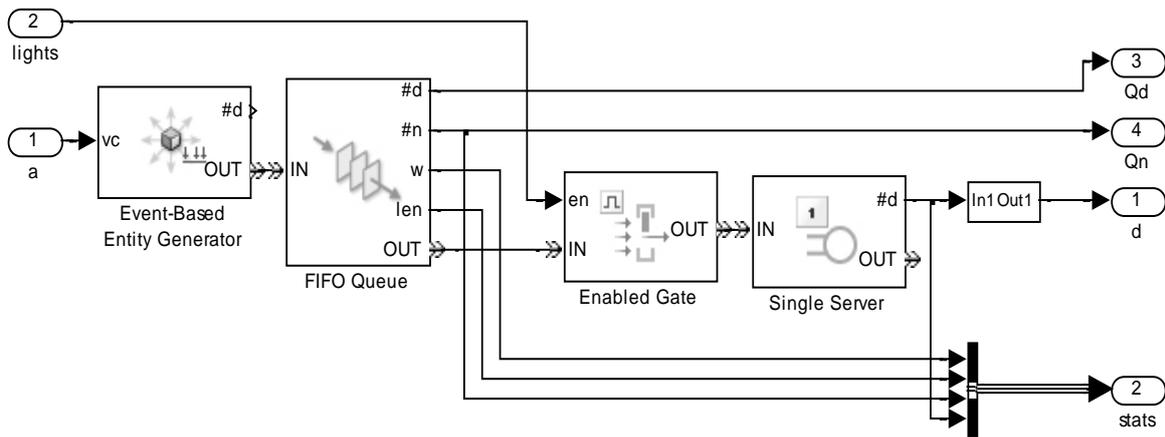


Рисунок 5 – Схема моделирования транспортного потока

Поступление автомобилей на перекресток имеет одинаковую интенсивность в каждом направлении и является случайным процессом с распределением Пуассона. Графики изменения количества автомобилей на перекрестке за каждый цикл регулирования приведены на рис. 6, 7.

Оценка качества управления производится по двум показателям: среднее время ожидания и средняя длина очереди. Для оценки эффективности нечеткой системы управления выполним сравнение её показателей с данными, полученными при фиксированном управлении. Длительность разрешающей фазы регулирования при использовании нечеткой системы управления варьируется в пределах от 29 до 35 секунд, для системы с фиксированным управлением равняется 32 секундам. Результаты моделирования приведены в табл. 3.

Согласно результатам моделирования, при использовании нечеткой системы управления

среднее время ожидания на перекрестке уменьшилось на 11%, а средняя длина очереди – на 8% по сравнению с управлением с фиксированными длительностями фаз.

Стоит отметить, что чем больше динамика изменения интенсивности транспортного потока, тем более эффективным будет адаптивное управление по отношению к фиксированному. Если же интенсивность транспортного потока относительно постоянна, показатели качества рассматриваемых систем будут близкими.

Таблица 3 – Результаты моделирования

Система управления	Ср. время ожидания, с	Ср. длина очереди, авт.
Fixed	10,2	6,8
Fuzzy	11,3	7,4

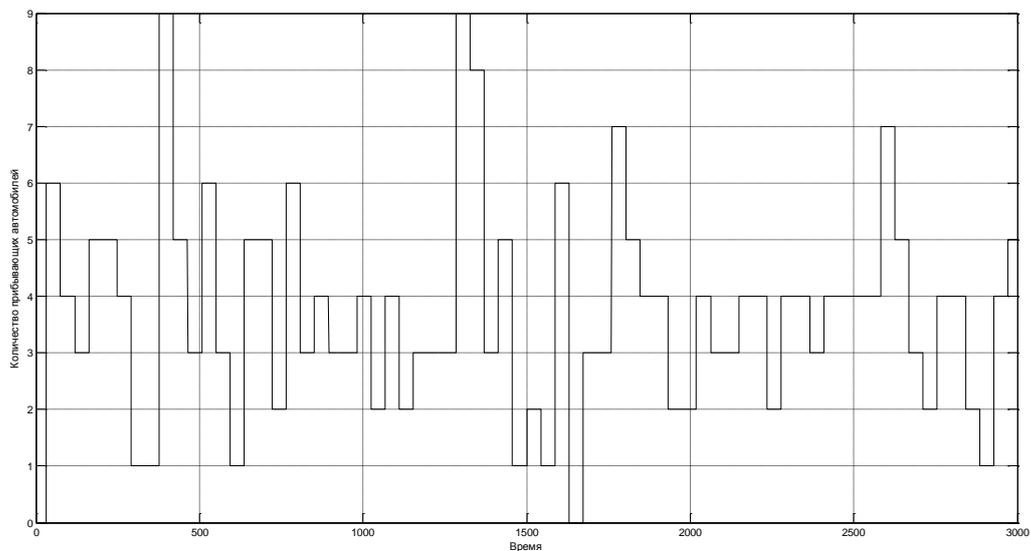


Рисунок 6 – График изменения количества автомобилей на перекрестке в направлении «север-юг»

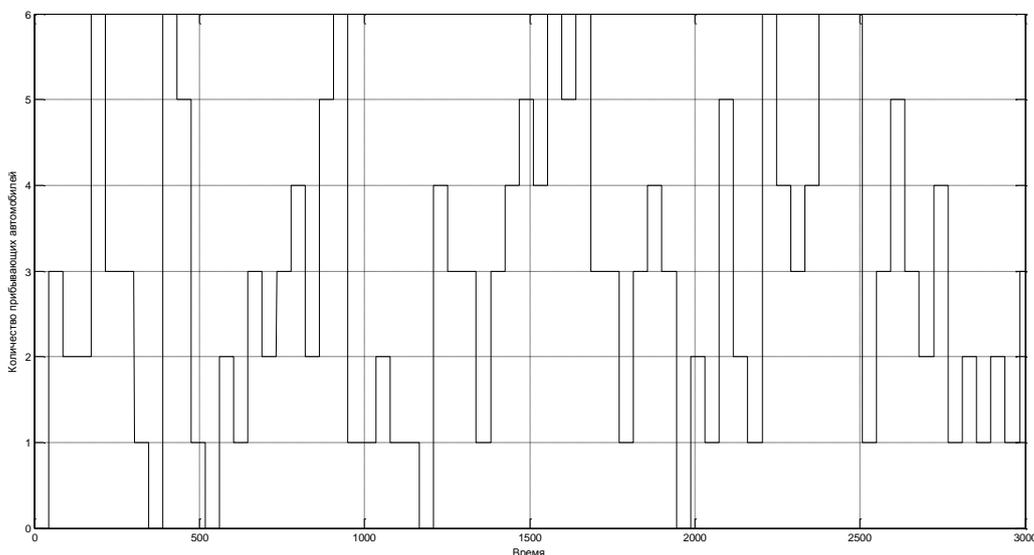


Рисунок 7 – График изменения количества автомобилей на перекрестке в направлении «запад-восток»

Выводы

Таким образом, в статье рассмотрена актуальность использования систем управления светофорами с замкнутым контуром на основе методов интеллектуального управления, в частности, нечеткой логики. Разработана система интеллектуального управления светофором на X-образном перекрестке с односторонним движением в каждую сторону. Проведено модельное исследование разработанной системы на основе представления перекрестка как системы массового обслуживания. Результаты моделирования показали улучшение качества работы системы управления светофором по таким показателям, как среднее время ожидания автомобилем в очереди и средняя длина очереди автомобилей.

Литература

1. Белов, Ю. В. Интеллектуальные средства и технологии инфраструктуры городского дорожного движения / Ю. В. Белов, А. Н. Полетайкин // Автомобильный транспорт. – Харьков: Изд-во ХНАДУ, 2014. – Вып. 35. – С. 13-21.
2. Антониади, Г. Д. Интеллектуальная система адаптивного управления работой перекрестка автомобильных дорог / Г. Д. Антониади, В. О. Архипов, А. А. Цуприков // Транспорт: наука, техника, управление. – М.: ВИНТИ, НТС, 2019. – №6. – С 210-215.
3. Шинкарев, А. А. Управление движением транспорта в крупных городах / А. А. Шинкарев // Управление в социальных и экономических системах: сборник

научных трудов / под ред. О.В. Логиновского. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – Вып. 3. – С. 117-125.

4. Кретов, А. Ю. Обзор некоторых адаптивных алгоритмов светофорного регулирования перекрестков / А. Ю. Кретов, И. Е. Агуреев, И. Ю. Мацур // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. – Вып. 7. Ч. 2. – С. 61–66.

5. Абрамова, Л. С. Постановка задачи оптимизации адаптивного управления дорожным движением / Л. С. Абрамова, Н. С. Чернобаев // Вісник ДІАТ. – Донецьк: Вид-во ПП Рекламно-виробнича фірма «Молнія», 2009. – №1. – С. 7–12.

6. Хаханов, В. И. Зеленая волна – облако мониторинга и управления дорожным

движением / В. И. Хаханов // Автоматизированные системы управления. – Харьков: ХНУРЭ, 2012. – Вып. 160. – С. 4–21.

7. Бураков, М. В. Нечеткие регуляторы: учеб. пособие. / М. В. Бураков. – СПб.: ГУАП, 2010. – 237 с.

8. Павлов, А. Н. Принятие решений в условиях нечеткой логики: учеб. пособие / А. Н. Павлов, Б. В. Соколов. – СПб.: ГУАП, 2006. – 72с.

9. Солнышкина, И. В. Теория систем массового обслуживания: учеб. пособие / И. В. Солнышкина. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. – 76 с.

10. Хейт, Ф. Математическая теория транспортных потоков / Ф. Хейт. – М.: Мир, 1966. – 284 с.

Стрижко М. А., Червинский В. В. Применение нечеткой логики в системах интеллектуального управления светофорами. В статье рассмотрена актуальность использования систем светофорного управления транспортными потоками с замкнутым контуром на основе методов интеллектуального управления, в частности, нечеткой логики. Описана конфигурация аппарата нечеткой логики применительно к системам светофорного регулирования. Проведено модельное исследование разработанной системы на основе представления перекрестка как системы массового обслуживания. Проанализированы результаты моделирования. Выполнено сравнение интеллектуальной системы управления с системой управления с фиксированными длительностями фаз по таким показателям, как среднее время ожидания и средняя длина очереди автомобилей.

Ключевые слова: светофор, транспортный поток, нечеткая логика, моделирование, система управления, перекресток.

Strizhko M., Chervinskiy V. Application of fuzzy logic in intelligent traffic light control systems. The article considers the relevance of using closed-loop traffic light control systems based on intelligent control methods, in particular, fuzzy logic. The configuration of the fuzzy logic apparatus in relation to traffic light control systems is described. A model study of the developed system based on the representation of the intersection as a queuing system was carried out. The analysis of modeling results is carried out. The comparison of an intelligent traffic light control system with a control system with fixed phase durations was carried out according to such indicators as the average waiting time and the average length of the queue of cars.

Keywords: traffic light, traffic flow, fuzzy logic, simulation, control system, junction.

Статья поступила в редакцию 26.05.2022
Рекомендована к публикации профессором Мальчевой Р. В.