

УДК: 656.13

Методика формирования многопрограммного управления изолированным перекрестком

А. А. Власов^{1,а}, И. А. Пильгейкина¹, И. А. Скорикова²

¹ ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»,
Россия, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28, к. 1318

² ООО РусСофт,
Россия, 440052, г. Пенза, ул. Чкалова, д. 52

E-mail: ^а vlasov_a71@mail.ru

Получено 14.09.2020, после доработки — 25.02.2021.

Принято к публикации 02.03.2021.

Наиболее простым и востребованным практикой методом управления светофорной сигнализацией является предрасчитанное регулирование, когда параметры работы светофорного объекта рассчитываются заранее и затем активируются согласно расписанию. В работе предложена методика формирования сигнального плана, позволяющая рассчитать программы регулирования и установить период их активности. Подготовка исходных данных для проведения расчета включает формирование временного ряда суточной интенсивности движения с интервалом 15 минут. При проведении полевых обследований возможно отсутствие части измерений интенсивности движения. Для восполнения недостающих значений предложено использование кубической сплайн-интерполяции временного ряда. Следующим шагом методики является расчет суточного набора сигнальных планов. В работе приведены зависимости, позволяющие рассчитать оптимальную длительность цикла регулирования и разрешающих движение фаз и установить период их активности. Существующие системы управления движением имеют ограничения на количество используемых программ регулирования. Для сокращения количества сигнальных планов и определения периода их активности используется кластеризация методом k -средних в пространстве длительности транспортных фаз. В новом суточном сигнальном плане длительность фаз определяется координатами полученных центров кластеров, а периоды активности устанавливаются элементами, вошедшими в кластер. Апробация на числовом примере показала, что при количестве кластеров 10 отклонение оптимальной длительности фаз от центров кластеров не превышает 2 с. Для проведения оценки эффективности разработанной методики на примере реального пересечения со светофорным регулированием, на основе натурных обследований схемы движения и транспортного спроса разработана микроскопическая модель для программы SUMO (Simulation of Urban Mobility). Оценка эффективности произведена на основе потерь транспорта, оцениваемых затратами времени на передвижение. Имитационное моделирование многопрограммного управления сигналами светофора показало снижение времени задержки (в сравнении с однопрограммным управлением) на 20 %. Предложенная методика позволяет автоматизировать процесс расчета суточных сигнальных планов и установки времени их активности.

Ключевые слова: светофорное регулирование, многопрограммное управление, временной ряд, кластеризация, k -средние

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (договор № 15361ГУ/2020 от 20.06.2020).

UDC: 656.13

Method of forming multiprogram control of an isolated intersection

A. A. Vlasov^{1,a}, I. A. Pilgeikina¹, I. A. Skorikova²

¹ Penza State University of Architecture and Construction,
28/1318 Herman Titov st., Penza, 440028, Russia

² RusSoft LLC,
52 Chkalov's st., Penza, 440052, Russia

E-mail: ^a vlasov_a71@mail.ru

Received 14.09.2020, after completion — 25.02.2021.

Accepted for publication 02.03.2021.

The simplest and most desirable method of traffic signal control is precalculated regulation, when the parameters of the traffic light object operation are calculated in advance and activated in accordance to a schedule. This work proposes a method of forming a signal plan that allows one to calculate the control programs and set the period of their activity. Preparation of initial data for the calculation includes the formation of a time series of daily traffic intensity with an interval of 15 minutes. When carrying out field studies, it is possible that part of the traffic intensity measurements is missing. To fill up the missing traffic intensity measurements, the spline interpolation method is used. The next step of the method is to calculate the daily set of signal plans. The work presents the interdependencies, which allow one to calculate the optimal durations of the control cycle and the permitting phase movement and to set the period of their activity. The present movement control systems have a limit on the number of control programs. To reduce the signal plans' number and to determine their activity period, the clusterization using the *k*-means method in the transport phase space is introduced. In the new daily signal plan, the duration of the phases is determined by the coordinates of the received cluster centers, and the activity periods are set by the elements included in the cluster. Testing on a numerical illustration showed that, when the number of clusters is 10, the deviation of the optimal phase duration from the cluster centers does not exceed 2 seconds. To evaluate the effectiveness of the developed methodology, a real intersection with traffic light regulation was considered as an example. Based on field studies of traffic patterns and traffic demand, a microscopic model for the SUMO (Simulation of Urban Mobility) program was developed. The efficiency assessment is based on the transport losses estimated by the time spent on movement. Simulation modeling of the multiprogram control of traffic lights showed a 20% reduction in the delay time at the traffic light object in comparison with the single-program control. The proposed method allows automation of the process of calculating daily signal plans and setting the time of their activity.

Keywords: traffic light regulation, multiprogram control, time series, clustering, *k*-means

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2021, vol. 13, no. 2, pp. 295–303 (Russian).

The work was supported by the Innovation Promotion Fund (contract No. 15361GU/2020 dated 20.06.2020).

1. Введение

Наиболее простым и востребованным практикой методом управления светофорной сигнализацией является предрассчитанное регулирование, когда параметры работы светофорного объекта рассчитываются заранее и активируются на перекрестке по таймеру [Власов, 2012]. Данный способ управления еще носит название «временно-зависимое управление». К достоинствам данного способа управления можно отнести следующее:

- простота и доступность реализации, достаточно иметь минимальный набор оборудования — дорожный контроллер и светофоры;
- достаточно высокая эффективность при организации регулярных обследований и обновления программ регулирования.

Основной недостаток данного способа управления связан с невозможностью автоматической корректировки режима работы при изменении интенсивности движения. Требуется повторное проведение натурных исследований и расчета нового сигнального плана.

С точки зрения методики формирования сигнального плана наиболее полно проработан вопрос разработки схемы пофазного разъезда и определения длительности фаз цикла регулирования [Webster, 1958; Шелков, 1995]. Вопросам подготовки данных для расчета сигнального плана и определения времени активности рассчитанных программ регулирования уделено недостаточно внимания. С точки зрения оптимальности управления каждому значению интенсивности должна соответствовать своя программа регулирования. На практике обычно ограничиваются использованием в течение активного периода суток 2-3 предрассчитанных программ регулирования.

Ю. Д. Шелков [Шелков, 1995] для определения времени активности программ регулирования предложил использовать график интенсивности движения. Определение необходимого количества программ регулирования определяется исходя из того, что при отклонении фактической длительности цикла от оптимальной в интервале 25 % не приводит к значительному увеличению транспортной задержки. Первую программу рекомендовано рассчитывать для интенсивности движения, соответствующей пиковому периоду суток. Для определения момента перехода ко второй программе уменьшают длительность цикла первой программы на 25 %.

Кашталинский А. С. [Кашталинский и др., 2017] предложил методику расчета сигнального плана, основанную на разбиении периода действия сигнального плана на 15-минутные интервалы с последующим их объединением в кластеры. Для решения задачи кластеризации использован метод «ближайшего соседа», известный также как метод одиночной связи. Мера близости объектов определялась в пространстве интенсивности движения по группам полос. По полученным усредненным значениям интенсивности движения выполняется пересчет программ регулирования.

Для приведенных методов характерны следующие недостатки:

- выделение времени работы программ регулирования в пространстве интенсивностей движения не позволяет учесть используемые при расчете ограничения на длительность фаз;
- используемый в методике [Кашталинский и др., 2017] метод «ближайшего соседа» не гарантирует объединение в одну программу регулирования интервалы с близкой по значениям интенсивностью движения, но расположенных на значительном временном расстоянии; тем самым искусственно увеличивается необходимое количество программ регулирования, что может создать проблемы с их использованием в дорожных контроллерах;
- иерархические алгоритмы кластеризации, к которым относится метод «ближайшего соседа», имеют склонность к формированию суперкластеров, включающих большую часть объектов классификации; применительно к формированию сигнального плана данный эффект ведет к его деградации до уровня однопрограммного управления.

2. Постановка задачи многопрограммного управления светофорным объектом

Рассмотрим задачу формирования сигнального плана на примере конкретного пересечения. В нашем распоряжении имелись данные натурных обследований пересечения ул. Измайлова и ул. Стрельбищенской г. Пензы. Данные были получены на основе камеральной обработки видеозаписей с 6:00 до 21:00 с интервалом 1 час. Решение задачи расчета суточного сигнального плана сформулируем в постановке [Webster, 1958; Шелков, 1995]. Длительность цикла регулирования определяется по формуле

$$T = \frac{1.5 \cdot \sum_J t_j + 5}{1 - \sum_N Y_n}, \quad (1)$$

где T — длительность цикла, с; $\sum_J t_j$ — сумма всех фаз, длительность которых фиксирована (переходных тактов, пешеходных фаз и т. д.), $j \in J$; Y_n — фазовые коэффициенты транспортных фаз, $n \in N$; J — множество фаз, длительность которых фиксирована; N — множество транспортных фаз, длительность которых подлежит определению.

Фазовые коэффициенты Y_n определяются следующей процедурой. Определяются фазовые коэффициенты y_k для каждой группы полос движения по формуле

$$y_k = \frac{q_k}{C_k}, \quad (2)$$

где q_k — интенсивность движения по группе полос движения, авт/ч; C_k — поток насыщения по полосе движения k , авт/ч.

Определение фазовых коэффициентов на множестве \hat{O} выполняется следующим образом:

$$Y_n = \max(y_m), \quad m \in \hat{O} \wedge m \in n. \quad (3)$$

Длительность зеленых сигналов для транспортных фаз g_n определяется по формуле

$$g_n = \frac{\left(T - \sum_J t_j\right) \cdot Y_n}{\sum_N Y_n}. \quad (4)$$

Схема движения предполагала следующий порядок движения:

- пропуск транспортных средств по ул. Измайлова (фаза № 1);
- пропуск пешеходов в выделенной фазе длительностью 14 с (фаза № 3);
- пропуск транспортных средств по ул. Стрельбищенской (фаза № 5);
- в фазах №№ 2, 4 и 6 реализованы промежуточные такты (промтакты) длительностью 3 с.

Произведен пересчет интенсивности в 15-минутные интервалы, полученные методом кубической сплайн-интерполяции временных рядов интенсивностей движения по группам полос. Общее количество программ регулирования в результате проведенного расчета составило 60. Следует учесть, что не все дорожные контроллеры имеют возможность использования такого количества программ, обычно их количество ограничено 8.

Для сокращения количества программ регулирования воспользуемся неиерархическими методами кластеризации по причинам, указанным ранее. Наибольшую популярность получил алгоритм k -средних. В основе метода лежит минимизация суммарного квадратичного отклоне-

ния точек кластеров от центров этих кластеров [Press et al., 2007; Vinnikov, Shalev-Shwartz, 2014; Amorim, Hennig, 2016]:

$$V = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in S_i} (x - \mu_i)^2,$$

где k — число кластеров, S_i — полученные кластеры, μ_i — центр масс всех векторов x из кластера S_i .

На каждой итерации алгоритма вычисляется центр масс для каждого кластера, полученного на предыдущем шаге; затем векторы разбиваются на кластеры вновь в соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе по выбранной метрике. Условие сходимости алгоритма предполагает, что на какой-либо итерации не происходит значимого изменения внутрикластерного расстояния.

В отличие от иерархических методов метод требует наличия гипотезы о наиболее вероятном количестве кластеров. В нашем случае их количество ограничено и варьируется от 8 до 16 (в зависимости от возможностей дорожного контроллера).

Кластеризация программ регулирования (рис. 1) методом k -средних выполнена с использованием пакета машинного обучения `scikit-learn`. Выделено 10 кластеров и определены координаты центров кластеров (центроиды).

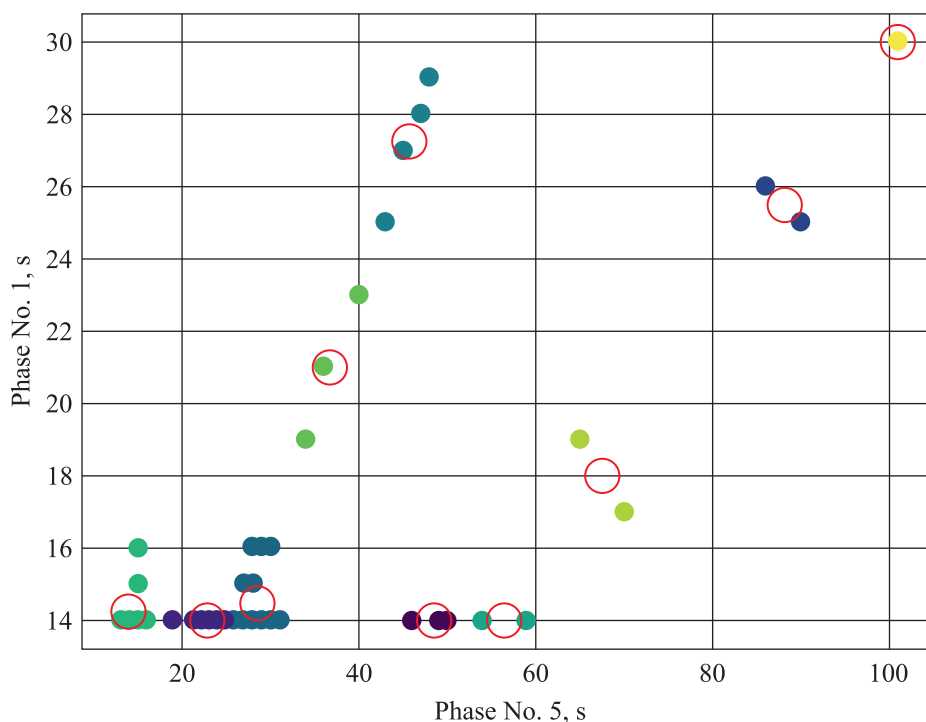


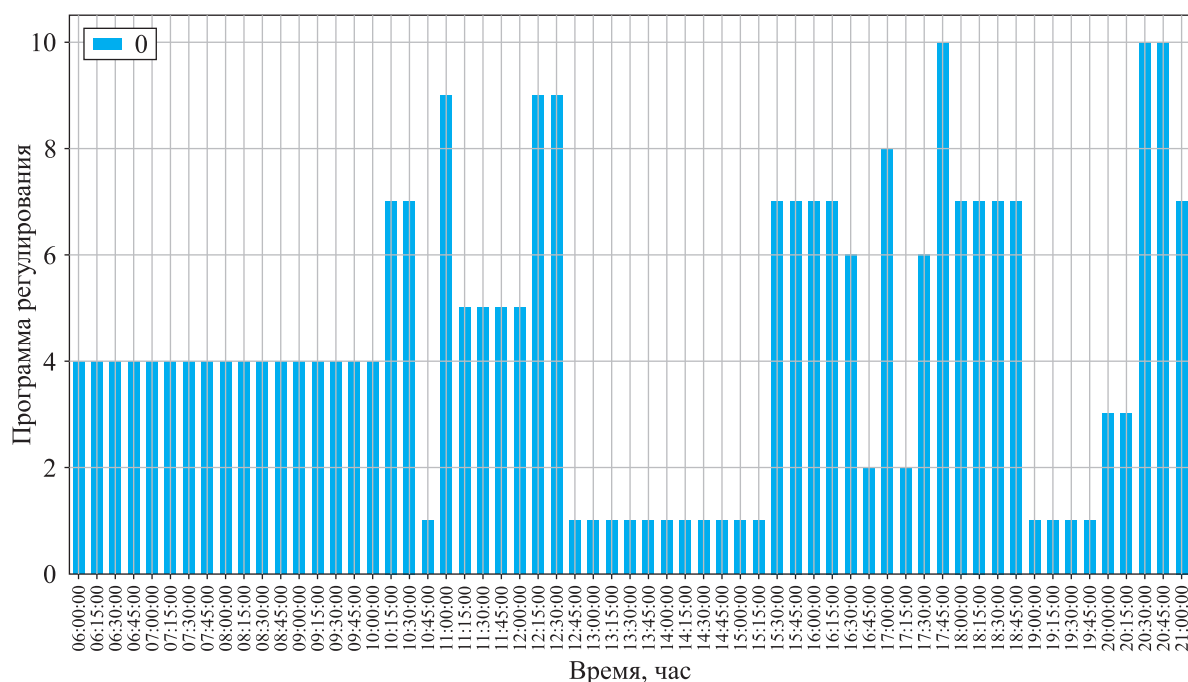
Рис. 1. Результаты кластеризации программ управления светофорным объектом в пространстве транспортных фаз *Phase № 1* и *Phase № 5*

При количестве кластеров 10 отклонение оптимальной длительности фаз от центров кластеров (обозначены красными кругами) не превышает 2 с для фазы № 5 и 3 с для фазы № 1. Таким образом, качество кластеризации применительно к задаче формирования сигнального плана методом k -средних можно считать удовлетворительным.

Применительно к задаче формирования суточных сигнальных планов координаты центроидов определяют длительности транспортных фаз программ регулирования (таблица 1), а индексы объектов кластера — периоды их активности (рис. 2).

Таблица 1. Длительность фаз сигнального плана центроидов

Программа	Длительность фаз, с						T_{Σ}
	1	2	3	4	5	6	
	Транспорт	Промтакт	Пешеходная	Промтакт	Транспорт	Промтакт	
1	29	3	14	3	14	3	66
2	88	3	14	3	26	3	137
3	14	3	14	3	14	3	51
4	56	3	14	3	14	3	93
5	37	3	14	3	21	3	81
6	23	3	14	3	14	3	60
7	48	3	14	3	14	3	85
8	46	3	14	3	27	3	96
9	68	3	14	3	18	3	109
10	101	3	14	3	30	3	154

Рис. 2. Периоды активности программ управления светофорным объектом *Programm*, полученных методом *k*-средних

3. Моделирование и оценка эффективности

Проведем оценку эффективности приведенного метода формирования сигнальных планов. Наиболее точным инструментом оценки решений по развитию транспортной системы или систем управления является микроскопическое моделирование [Власов и др., 2014; Власов, Макаров, 2018].

Для решения исследовательских задач наилучшим образом подходит программа SUMO (Simulation of Urban Mobility) [Krajzewicz et al., 2012]. Данная программа микроскопического моделирования распространяется по лицензии EPL 2.0 и относится к программному обеспечению с открытым кодом.

Микроскопическое моделирование включает три этапа: подготовку транспортной сети, транспортного спроса и сценария моделирования; собственно имитацию; составление отчетов и обработку результатов. Для корректного создания модели транспортная сеть и географическая подоснова конвертирована из карт Open Street Map. На основе проведенных полевых исследований при помощи инструмента NetEdit установлены количество полос и разрешенные направления движения. Переключение программ регулирования реализовано через расписание их переключения WAUT:

```
<WAUT startProg="1" refTime="100" id="w1">
  <wautSwitch to="4" time="900"></wautSwitch>
  <wautSwitch to="7" time="15300"></wautSwitch>
  ...
  <wautSwitch to="9" time="22500"></wautSwitch>
  <wautSwitch to="1" time="24300"></wautSwitch>
</WAUT>
```

Создание транспортного спроса произведено стохастическим образом программой jirrouter на основе натурных исследований интенсивности движения транспорта. Исходными данными для генерации транспортного спроса служили интенсивность на входах в модель и доли поворотных потоков на пересечениях.

Отчеты микроскопического моделирования доступны в файлах формата xml или переданы через socket — соединение модуля TraCI. Результаты моделирования представляются как в агрегированной форме по элементам транспортной сети, так и в дезагрегированной — в текущем состоянии объектов моделирования.

Оценка эффективности методов организации движения или систем управления светофорными объектами производится на основе потерь транспорта, оцениваемых на основе расхода топлива на передвижение или затрат времени на передвижение. На рис. 3 приведено сравнение времени ожидания транспорта на светофорном объекте при однопрограммном и многопрограммном управлении. Применение многопрограммного управления, рассчитанного по предлагаемой методике, обеспечивает снижение времени задержки на светофорном объекте (в сравнении с однопрограммным управлением) на 20 %.



Рис. 3. Время задержки транспорта при одно- и многопрограммном управлении на подходе по ул. Измайлова со стороны ул. Антонова в период с 6:00 до 14:00

4. Заключение

Методика формирования суточного сигнального плана на основе выборочных натурных обследований предполагает восполнение интенсивности движения с 15-минутными интервалами методом кубической сплайн-интерполяции, расчет длительности цикла регулирования с последующим сокращением размерности плана кластеризацией методом k -средних в пространстве транспортных фаз. Процесс расчета сигнальных планов и установки времени их активности полностью автоматизирован. Полученный по описанной методике сигнальный план полностью покрывает допустимые значения элементов светофорного цикла, обеспечивая эффективное управление светофорным объектом.

Наличие сезонных составляющих в транспортном спросе и его общий рост в связи с увеличением числа автомобилей у населения требуют проведения дополнительных исследований, направленных на разработку методики определения периода актуальности рассчитанных сигнальных планов.

Список литературы (References)

- Власов А. А. Адаптивные системы управления дорожным движением в городах: монография. — Пенза: ПГУАС, 2012.
Vlasov A. A. Adaptivnye sistemy upravleniya dorozhnym dvizheniem v gorodah: monografiya [Adaptive traffic control systems in cities: monograph]. — Penza: PGUAS, 2012 (in Russian).
- Власов А. А., Макаров И. В. Исследование эффективности использования адаптивного управления светофорным объектом // Актуальные проблемы автотранспортного комплекса: межвузовский сборник научных статей (с международным участием). — Самара, 2018. — С. 55–61.
Vlasov A. A., Makarov I. V. Issledovanie effektivnosti ispol'zovaniya adaptivnogo upravleniya svetofornym ob'ektom [Research on the effectiveness of adaptive traffic light object control] // Aktual'nye problemy avtotransportnogo kompleksa: mezhvuzovskij sbornik nauchnykh statej (s mezhdunarodnym uchastiem) [Current problems of the motor transport complex: interuniversity collections of research articles (international participation)]. — Samara, 2018. — P. 55–61 (in Russian).
- Власов А. А., Орлов Н. А., Чушкина Ж. А. Использование программы микроскопического моделирования SUMO для оценки эффективности алгоритмов управления транспортными потоками // Современная техника и технологии. — 2014. — № 9 (37). — С. 34–39.
Vlasov A. A., Orlov N. A., Chushkina Zh. A. Ispol'zovanie programmy mikroskopicheskogo modelirovaniya SUMO dlya otsenki effektivnosti algoritmov upravleniya transportnymi potokami [Use of the program of microscopic modelling SUMO for the estimation of algorithms of transport streams control efficiency] // Sovremennaya tekhnika i tekhnologii [Modern technics and technologies]. — 2014. — No. 9 (37). — P. 34–39 (in Russian).
- Шелков Ю. Д. (ред.) Организация дорожного движения в городах: методическое пособие. — М.: НИЦ ГАИ МВД России, 1995.
Shelkov Yu. D. (ed.) Organizaciya dorozhnogo dvizheniya v gorodah: metodicheskoe posobie [Organization of road traffic in cities: a methodological guide]. — Moscow: NIC GAI MVD Rossii, 1995 (in Russian).
- Кашталинский А. С., Малюгин П. Н., Петров В. В. Методика определения оптимальных параметров многопрограммного регулирования на изолированных перекрестках // Вестник СибАДИ. — 2017. — № 3 (55). — С. 53–62.
Kashtalinsky A. S., Malyugin P. N., Petrov V. V. Metodika opredeleniya optimal'nykh parametrov mnogoprogrammnogo regulirovaniya na izolirovannykh perekrestkakh [Method of determining optimal multiprogram control parameters on isolated intersections] // Vestnik SibADI [The Russian Automobile and Highway Industry Journal (SibADI)]. — 2017. — No. 3 (55). — P. 53–62 (in Russian).
- Amorim R. C., Hennig C. Recovering the number of clusters in data sets with noise features using feature rescaling factors // Information Sciences. arXiv:1602.06989 — 2016.
- Krajzewicz D., Erdmann J., Behrisch M., Bieker L. Recent Development and Applications of SUMO — Simulation of Urban Mobility // International Journal on Advances in Systems and Measurements. — 2012. — P. 128–138.

-
- Press W., Teukolsky S., Vetterling W., Flannery B.* Numerical recipes 3rd edition: the art of scientific computing. — Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- Vinnikov A., Shalev-Shwartz S.* K-means Recovers ICA Filters when Independent Components are Sparse // Proceedings of the International Conference on Machine Learning. — 2014. — P. 712–720.
- Webster F. V.* Traffic Signal Settings. Road Research Technical Paper No. 39. — London: Great Britain Road Research Laboratory, 1958.

