

УДК 656.13

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОПРОГРАММНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ИЗОЛИРОВАННЫХ ПЕРЕКРЕСТКАХ

А.С. Кашталинский, П.Н. Малюгин, В.В. Петров  
ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

**Аннотация.** Рассмотрена актуальность учета временной неравномерности транспортных потоков, позволяющего снизить задержки транспорта на регулируемых перекрестках в городах. Разработана методика определения оптимальных параметров многопрограммного светофорного регулирования, позволяющая учитывать суточную и внутрисуточную неравномерность транспортных потоков. Применение оптимизированных параметров многопрограммного регулирования позволит снизить задержки транспорта на перекрестках на 10-40% в течение суток по сравнению с однопрограммным регулированием.

**Ключевые слова:** суточная неравномерность транспортных потоков, внутрисуточная неравномерность транспортных потоков, многопрограммное регулирование, транспортная задержка, изолированный перекресток.

### ВВЕДЕНИЕ

Наиболее простой и часто применяемый метод управления светофорной сигнализацией – жесткое однопрограммное регулирование, когда параметры работы светофора рассчитываются для пикового периода и используются на перекрестке неизменно в течение суток. Его применение приводит к неоправданно высоким задержкам в межпиковый период суток и недостаточной пропускной способности перекрестка в периоды наибольшей загрузки транспортом – часы-пик [1]. Таким образом, при использовании однопрограммного регулирования игнорируется суточная и внутрисуточная неравномерности транспортных потоков (ТП). Эта проблема эксплуатации изолированных регулируемых перекрестков с однопрограммным регулированием решается внедрением многопрограммного регулирования, позволяющего учитывать суточные и часовые флуктуации интенсивностей ТП. Применение многопрограммного регулирования на изолированных перекрестках позволит повысить эффективность их функционирования за счет снижения транспортных задержек.

Целью данной работы является повышение эффективности функционирования регулируемых пересечений с учетом временной неравномерности ТП.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить теоретические предпосылки оптимизации параметров многопрограммного регулирования на перекрестке.

2. Разработать методику определения оптимальных параметров многопрограммного светофорного регулирования на изолированных перекрестках.

3. Провести оценку эффективности использования на изолированном перекрестке многопрограммного регулирования, параметры которого определялись с помощью разработанной методики.

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОПРОГРАММНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Управление светофорной сигнализацией на перекрестке осуществляется посредством следующих параметров [2]: длительность цикла; длительность фаз; длительность основных тактов; длительность промежуточных тактов; порядок фаз; состав фаз.

Для обеспечения эффективного функционирования перекрестка необходима организация наиболее приемлемого набора фаз регулирования и определение оптимального порядка их смены. Длительность промежуточных тактов для каждого конкретного перекрестка назначается в зависимости от его геометрии и порядка фаз. Исходя из этого, основными расчетными параметрами управления, определяющими эффективность функционирования регулируемых перекрестков, являются длительность цикла и длительности фаз регулирования. Длительности фаз уста-

## РАЗДЕЛ II. ТРАНСПОРТ

навливаются пропорционально значениям интенсивности наиболее загруженных направлений движения в фазах. Поэтому основным вопросом является назначение оптимальной длительности цикла на перекрестке.

Для определения оптимальной длительности цикла используются его параметры:

$$C = \frac{1,5L + 5}{1 - Y}, \quad (1)$$

где  $L$  – суммарное потерянное время за цикл регулирования, с;  $Y$  – суммарный фазовый коэффициент на перекрестке,

$$Y = \sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{s_i}, \quad (2)$$

где  $i$  – порядковый номер фазы регулирования;  $n$  – число фаз регулирования на перекрестке;  $y_i$  – фазовый коэффициент  $i$ -ой фазы;  $\lambda_i$  – интенсивность движения критического направления в  $i$ -ой фазе, ед/ч;  $s_i$  – поток насыщения критического направления в  $i$ -ой фазе, ед/ч.

Длительность разрешающего сигнала в фазах определяется следующим образом:

$$g_i = y_i \cdot (C - L) / \sum_{i=1}^n y_i, \quad (3)$$

Наиболее подходящим критерием для оптимизации длительностей цикла и фаз на регулируемых перекрестках является транспортная задержка [3].

Достаточно точной и распространенной [1] является методика расчета задержки, предложенная в североамериканском руководстве «Highway Capacity Manual 2000» (HCM) [4].

Величина средней задержки HCM определяется следующим образом:

$$d = d_1(PF) + d_2 + d_3, \quad (4)$$

где  $d$  – задержка одного автомобиля, с/ед.;  $d_1$  – постоянная задержка, с/ед.;  $PF$  – коэффициент прогрессии для постоянной задержки, учитывающий характер прибытия ТС к перекрестку;  $d_2$  – случайная задержка, с/ед.;  $d_3$  – начальная задержка из-за очереди транспортных средств, имеющейся к началу разрешающего сигнала, с/ед.

Расчет задержки по методике HCM предполагает разбиение времени суток на единичные временные интервалы протяженностью  $T$ . В качестве стандартных в методике используются интервалы протяженностью 15 минут, т.е.

для расчета значений задержек на перекрестке в течение суток используется 96 временных интервалов. Для каждого из интервалов вводятся исходные данные и определяются параметры задержки.

Постоянная задержка определяется по формуле

$$d_1 = \frac{0,5C(1 - g/C)}{1 - [\min(1, X) \cdot g/C]}, \quad (5)$$

где  $C$  – длительность цикла, с;  $g$  – длительность зеленого сигнала, с;  $X$  – степень насыщения.

Степень насыщения регулируемого направления определяется по формуле

$$X = \frac{C}{g} \cdot \frac{\lambda}{s}. \quad (6)$$

Случайная задержка определяется по формуле

$$d_2 = 900 T \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{8 k l X}{c T}} \right], \quad (7)$$

где  $T$  – продолжительность единичного интервала времени, ч.;  $k$  – коэффициент, учитывающий влияние адаптивного регулирования на величину дополнительной задержки, для перекрестков с жестким регулированием  $k=0,5$ ;  $l$  – коэффициент, учитывающий расстояние от предыдущего (по направлению движения) регулируемого перекрестка до рассматриваемого, для изолированных перекрестков  $l=1$ ;  $c$  – пропускная способность регулируемого направления ед./ч.

Пропускная способность регулируемого направления определяется по формуле

$$c = \frac{g}{C} \cdot s. \quad (8)$$

Задержка от очереди ТС определяется по формуле

$$d_3 = \frac{1800 \cdot Q_b(1 + u)t}{cT}, \quad (9)$$

где  $Q_b$  – очередь в конце текущего периода, ед.;  $u$  – параметр задержки;  $t$  – продолжительность неудовлетворительного периода, ч;  $c$  – пропускная способность регулируемого направления, ед./ч.;  $T$  – продолжительность временного интервала, ч.

Параметры  $t$  и  $u$  задержки  $d_3$  определяются системой уравнений

$$t = \begin{cases} 0 & \text{если } Q_b = 1; \\ T & \text{если } \frac{Q_b}{c(1 - \min(1, X))} > 1. \end{cases} \quad (10)$$

$$u = \begin{cases} 0 & \text{если } t < T; \\ 1 - \frac{cT(1 - \min(1, X))}{Q_b} & \text{если } t \leq T. \end{cases} \quad (11)$$

Транспортная очередь, образовавшаяся за текущий отрезок времени в модели НСМ определяется в соответствии с системой уравнений [4]

$$Q_n = \begin{cases} 0 & \text{если } X \leq 1, \\ cT(X - 1) & \text{если } X > 1. \end{cases} \quad (12)$$

Количество транспортных средств (ТС) в остаточной очереди к концу текущего интервала определяется разницей между количеством автомобилей, подъехавших к перекрестку в течение рассматриваемого периода и пропускной способностью направления за этот же период. Такое условие справедливо, если степень насыщения направления больше 1, в противном случае очередь не образуется.

Существующая модель очередей НСМ предполагает, что ТС водителей, не успевших проехать перекресток по условиям пропускной способности – к началу текущего интервала «исчезают» и не оказывают влияния на загрузку перекрестка в этом периоде. Это не соответствует реальному процессу движения транспорта на перекрестке.

Для исключения этого несоответствия предлагаем относить остаточную очередь (при ее наличии) от предыдущего временного интервала к текущему. И в зависимости от текущей загрузки регулируемого направления (степени насыщения) определять – происходит накопление остаточной очереди или ее убывание с последующим отнесением полученной остаточной очереди уже к следующему периоду. Поэтому для определения накопленной очереди  $Q_b$  к концу текущего интервала с учетом накопления или разъезда очереди, оставшейся после предыдущего интервала предлагаем следующую систему уравнений

$$Q_b = \begin{cases} Q'_b + Q_n & \text{если } X > 1; \\ Q'_b - cT(1 - X) & \text{если } X \leq 1, \end{cases} \quad (13)$$

где  $Q_b$  – накопленная очередь в конце текущего периода, ед.;  $Q'_b$  – накопленная очередь в

конце предыдущего периода, ед.;  $Q_n$  – остаточная очередь за текущий период, ед.

Предлагаемая система уравнений (13) позволяет определить количество ТС, не успевших проехать перекресток за текущий отрезок времени, проезд которых переносится на следующий отрезок. Таким образом, эти ТС формируют дополнительную загрузку следующего интервала. Данное увеличение отражается при расчете задержки от очереди  $d_3$ . Предлагаемая поправка модели накопления очередей с учетом выражений (13) более точно отражает реальную ситуацию на регулируемых перекрестках, а введение этой поправки позволит более точно определять целевой показатель при поиске оптимальных параметров светофорного регулирования на перекрестках. В целом, использование представленной методики определения задержек на перекрестке позволяет производить программную оптимизацию параметров светофорного регулирования в течение суток, что необходимо при организации многопрограммного регулирования.

Применение многопрограммного регулирования со сменой сигнальных программ (СП) в соответствии с суточным графиком подразумевает наличие периодов, в течение которых процесс изменения интенсивности регулируемых направлений можно рассматривать как стационарный аддитивный процесс вида

$$\lambda_i = \bar{\lambda}_i + \Delta\lambda_i, \quad (14)$$

где  $\bar{\lambda}$  – среднее значение интенсивности;  $\Delta\lambda$  – верхний усредненный предел аддитивной составляющей интенсивности;  $i$  – порядковый номер регулируемого направления.

Набор СП, используемый на перекрестке в течение суток можно представить в виде

$$\bar{u} = (P_1, P_2, \dots, P_K), \quad (15)$$

где  $K$  – число СП, используемых в течение суток на перекрестке.

Каждая СП характеризуется набором параметров регулирования

$$P_k = (C_k, \bar{G}_k^N, t_k^{вкл}, t_k^{выкл}, \Delta_k), \quad (16)$$

где  $k$  – порядковый номер СП;  $C_k$  – длительность цикла для  $k$ -ой СП;  $\bar{G}_k^N$  – вектор длительностей разрешающего сигнала ( $g_1, g_2, \dots, g_n$ ) для  $k$ -ой СП;  $t_k^{вкл}$  – время включения  $k$ -ой СП;  $t_k^{выкл}$  – время выключения  $k$ -ой СП;  $\Delta_k$  – временной интервал использования  $k$ -ой СП.

Длительность разрешающего сигнала, с учетом принимаемых допущений в конечном итоге, является функцией длительности цикла и интенсивности критических регулируемых направлений, что с учетом выражения (14) примет вид

$$g_j = f(C, \bar{\lambda}_i, \Delta\lambda_j). \quad (17)$$

Определение параметров регулирования и оптимального количества СП в течение суток, должно производиться с помощью критерия суммарной задержки на перекрестке. Задержка на перекрестке является функцией параметров светофорного регулирования и параметров ТП на этом перекрестке.

Смена СП на перекрестке предполагает наличие переходного периода, связанного с особенностями работы дорожного контроллера, управляющего светофорной сигнализацией [2]. При переходе с одной СП на другую, контроллер в течение нескольких циклов включает режим регулирования с минимальными длительностями фаз. В этот период эффективность функционирования перекрестка снижается. Показателем задержки, вызванной сменой СП на перекрестке является функция  $d_{смj}$ , она определяется как

$$d_{смj}(P_j, P_{j-1}) = \begin{cases} 0 & \text{если } P_j = P_{j-1} \\ \delta & \text{если } P_j \neq P_{j-1} \end{cases}, \quad (18)$$

где  $\delta$  – среднее время задержки ТС при смене СП;  $P_j$  – параметры СП на  $j$ -ом временном интервале;  $P_{j-1}$  – параметры СП на временном интервале  $j-1$ .

Таким образом, подразумевается, что на том временном интервале, на котором осуществляется смена СП возникает дополнительная задержка транспорта, которая учитывается только на интервалах смены СП.

С учетом этого общее время задержки в течение суток определяется суммированием задержек по каждому направлению на каждом временном интервале

$$D = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [(d_{ij}(P_j) + d_{смj}(P_j, P_{j-1})) \cdot \lambda_{ij}], \quad (19)$$

где  $D$  – суммарная суточная задержка на перекрестке, авт·ч;  $n$  – число регулируемых направлений на перекрестке;  $m$  – число единичных интервалов времени в течение суток;  $d_{ij}$  – средняя задержка одного ТС на  $i$ -ом на-

правлении в  $j$ -ый отрезок времени;  $\lambda_{ij}$  – интенсивность движения на  $i$ -ом направлении в  $j$ -ый отрезок времени.

Наличие выражений (18,19) позволяет определить некоторый оптимум количества сигнальных программ в течение суток, который позволит снизить задержки и при этом ограничит количество задержек, вызванных наличием переходных интервалов при смене сигнальных программ на перекрестке.

Перечисленные выражения (14-19) образуют модель многопрограммного регулирования на изолированном перекрестке, которая является основой для разработки методики и программного обеспечения, позволяющих в автоматическом режиме производить расчет оптимального количества СП, используемых в течение суток, а также оптимальные параметры для каждой СП с учетом внутрисуточной и суточной неравномерности ТП. Подобные алгоритмы разрабатывались как отечественными [5,6], так и зарубежными исследователями [7,8], однако их реализация направлена на оптимизацию параметров координированного управления перекрестками.

Для определения параметров многопрограммного регулирования, учитывающих внутрисуточную и суточную неравномерность ТП на изолированных перекрестках, разработана методика, реализованная в виде алгоритма поиска оптимального количества СП в течение суток и алгоритма оптимизации параметров каждой СП. В основу методики положены предлагаемая модель многопрограммного регулирования (14-19) и методика расчета задержек на перекрестке НСМ (4-12) с предлагаемой поправкой модели накопления и убывания очередей (13). Разработанная методика, на основе минимизации суммарной суточной задержки, позволяет объединять единичные временные интервалы в оптимальное количество кластеров, которые определяют периоды включения СП, а также позволяет оптимизировать параметры регулирования каждой СП.

Исходными данными для реализации методики являются: геометрические параметры перекрестка (число подходов, число полос движения), количество и состав фаз регулирования, переходные интервалы (потерянное время), динамика интенсивности движения по каждому регулируемому направлению с 15-ти минутным интервалом.

Схема алгоритма определения оптимального количества СП в течение суток представлена на рисунке 1.

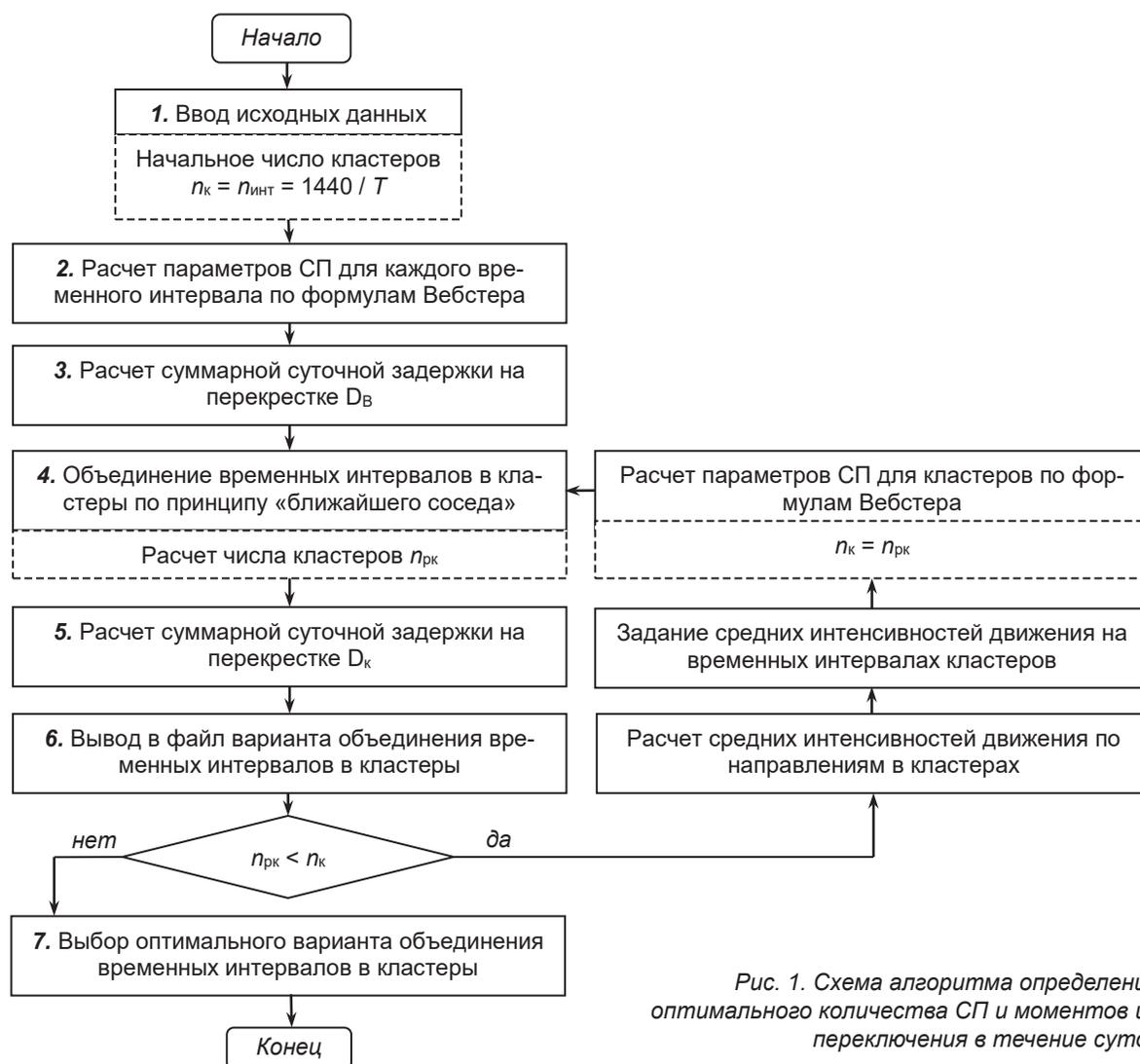


Рис. 1. Схема алгоритма определения оптимального количества СП и моментов их переключения в течение суток

Алгоритм основан на том, что смежные временные интервалы могут характеризоваться похожими параметрами движения транспорта и поэтому в течение этих интервалов возможно использование общей СП, если это рационально с точки зрения снижения задержек транспорта. В рассматриваемом случае объектами объединения являются единичные интервалы времени протяженностью 15 минут. Совокупность объединенных интервалов, для которых рационально использование общей СП, будем называть кластером.

После ввода исходных данных алгоритм предполагает расчет параметров СП для каждого временного интервала по формулам (1-3) который позволяет определить набор начальных параметров регулирования для каждого  $i$ -ого направления на каждом  $j$ -ом временном интервале

$$P_j = (C_j, g_{1j}, g_{2j}, \dots, g_{nj}), \quad (20)$$

где  $C_j$  – расчетная длительность цикла регулирования для  $j$ -ого временного интервала,  $g_{nj}$  – расчетная длительность разрешающего такта для  $i$ -ого регулируемого направления на  $j$ -ом временном интервале,  $n$  – число фаз регулирования.

Далее для рассчитанных параметров регулирования определяется средняя задержка ТС по методике НСМ, с учетом задержки от смены СП. Расчет позволяет оценить величину суммарной задержки на перекрестке для каждого  $j$ -ого временного интервала

С учетом выражений (18,19) суммарная задержка транспорта на перекрестке на  $j$ -ом временном интервале определяется уравнениями

$$D_j = \begin{cases} D_j(P_j) = \sum_{i=1}^m [(d_{ij} + \delta) \cdot \lambda_{ij} \cdot T] & \text{если } P_j \neq P_{j-1} \\ D_j(P_{j-1}) = \sum_{i=1}^m (d_{ij} \cdot \lambda_{ij} \cdot T) & \text{если } P_j = P_{j-1} \end{cases}, \quad (21)$$

где  $D_j$  – суммарная задержка автомобилей на перекрестке для  $j$ -ого временного интервала, авт·ч;  $d_{ij}$  – средняя задержка одного автомобиля на  $i$ -ом регулируемом направлении в течение  $j$ -ого временного интервала, ч;  $\delta$  – задержка, вызванная сменой СП на перекрестке;  $\lambda_{ij}$  – расчетная интенсивность  $i$ -ого регулируемого направления на  $j$ -ом временном интервале, ед/ч;  $T$  – длительность единичного интервала времени, ч.

Для объединения временных интервалов в кластер, определяющий период работы СП, в алгоритме используется принцип «ближайшего соседа». Он заключается в том, что если суммарная задержка  $D_j$  на перекрестке, при использовании на  $j$ -ом интервале параметров от предыдущего интервала  $P_{j-1}$ , оказывается меньше, чем задержка при использовании на нем параметров  $P_j$  (с учетом задержки  $\delta$  от смены СП), то  $j$ -ый интервал подсоединяется к существующему кластеру, т.е. для него принимаются параметры  $P_{j-1}$ . В противном случае – на  $j$ -ом интервале создается новый кластер с параметрами регулирования  $P_j$ .

Описанный принцип реализуется с помощью системы уравнений

$$P_j = \begin{cases} P_{j-1} & \text{если } D_j(P_j) > D_j(P_{j-1}) \\ P_j & \text{если } D_j(P_j) \leq D_j(P_{j-1}) \end{cases} \quad (22)$$

После первичного объединения интервалов в кластеры проводится усреднение интенсивностей движения в каждом кластере по формуле

$$\bar{\lambda}_{ik} = \sum_{j_{nk}}^{j_{kk}} \lambda_i / (j_{kk} - j_{nk} + 1), \quad (23)$$

где  $\bar{\lambda}_{ik}$  – усредненная интенсивность движения для  $i$ -ого направления в течение  $k$ -го кластера;  $j_{nk}, j_{kk}$  – порядковый номер начального и конечного интервалов кластера соответственно.

По полученным усредненным значениям интенсивности далее производится перерасчет параметров регулирования для каждого кластера по формулам (1-3) и процедура объединения интервалов в кластеры повторяется снова. Этот циклический процесс повторяется до тех пор, пока количество кластеров не перестанет уменьшаться (см. рис. 1).

Каждый полученный вариант объединения интервалов в кластеры со значением суммарной суточной задержки записывается в отдельный файл.

Далее из всех полученных вариантов кластеризации интервалов выбирается наиболее оптимальный по количеству полученных кластеров и по значению суммарной суточной задержки транспорта на перекрестке. Выбранный вариант кластеризации интервалов в дальнейшем используется в качестве исходного для проведения процедуры оптимизации параметров СП, схема алгоритма которого приведена на рисунке 2.

В начале процесса оптимизации параметров многопрограммного регулирования определяется число кластеров  $n_k$ , начальный и конечный интервалы включения СП, по формуле (19) определяется исходная суточная задержка  $D$  на перекрестке.

Далее для каждой СП методом покоординатного спуска определяются длительности разрешающих тактов, обеспечивающих минимизацию суточной задержки на перекрестке. Для этого проводятся следующие процедуры:

1) поочередно увеличивается длительность каждой фазы регулирования с шагом 1с, на каждом шаге запоминается значение суточной задержки  $D$ ;

2) для СП выбирается такой набор параметров, который соответствует минимальной суточной задержке  $D_{min}$ ;

3) процедуры 1,2 проводятся поочередно для каждой СП, до тех пор, пока не оптимизируются все СП.

По окончании процесса оптимизации полученные параметры многопрограммного регулирования и значение суточной задержки  $D$  выводятся в файл.

Представленная методика реализована в компьютерной программе на языке С, которая позволяет в автоматическом режиме рассчитывать оптимальные параметры многопрограммного регулирования на перекрестках с учетом суточной и внутрисуточной неравномерности ТП.

Для подтверждения эффективности предлагаемой методики, с помощью разработанного программного обеспечения были определены параметры многопрограммного регулирования для перекрестка проспект Космический – улица Индустриальная в городе Омске. В соответствии с исходными данными об условиях движения на перекрестке были определены оптимальные параметры СП, которые приведены в таблице 1. При расчете варианта многопрограммного регулирования для рассматриваемого перекрестка использовались следующие ограничения: максимальная длительность цикла – 180 с, минимальная

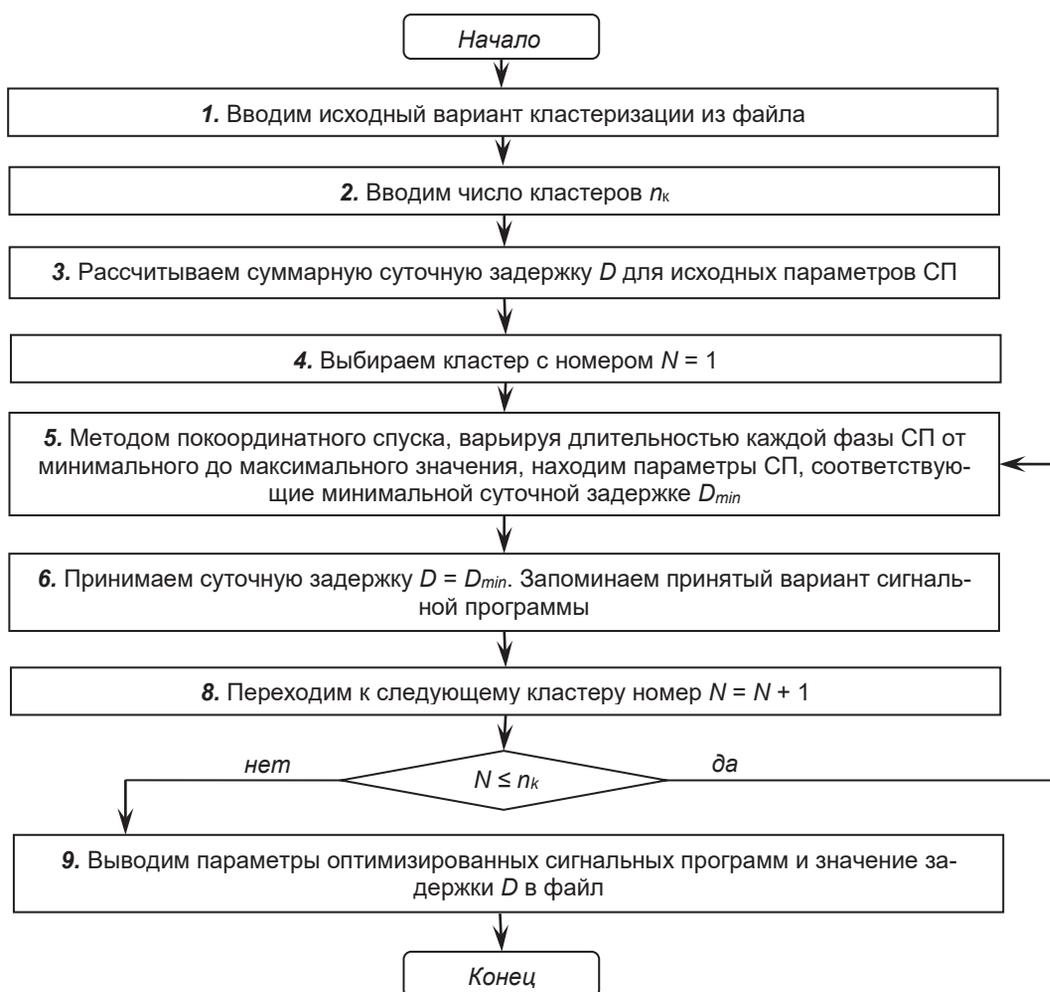


Рис. 2. Схема алгоритма оптимизации параметров СП

Таблица 1  
ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МНОГОПРОГРАММНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕКРЕСТКА ПР. КОСМИЧЕСКИЙ – УЛ. ИНДУСТРИАЛЬНАЯ В Г. ОМСКЕ

№ СП	Время включения	Параметры СП, с			
		$g_1$	$g_2$	$g_3$	C
1	0:00	24	22	15	70
2	06:45	21	22	15	67
3	07:15	55	74	42	180
4	09:45	42	39	34	124
5	18:30	62	67	42	180
6	18:45	62	58	51	180
7	19:30	36	36	21	102
8	20:15	13	22	15	59

Таблица 2

**СРАВНЕНИЕ СУММАРНОЙ СУТОЧНОЙ ЗАДЕРЖКИ ТРАНСПОРТА НА ПЕРЕКРЕСТКЕ  
ПР. КОСМИЧЕСКИЙ – УЛ. ИНДУСТРИАЛЬНАЯ В Г. ОМСКЕ ДЛЯ СУЩЕСТВУЮЩЕГО  
ОДНОПРОГРАММНОГО И ПРЕДЛАГАЕМОГО МНОГОПРОГРАММНОГО  
РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Суммарная суточная задержка на перекрестке, авт·ч		Показатели эффективности	
При однопрограммном регулировании	При предлагаемом много-программном регулировании	Абсолютный, авт·ч	Относительный, %
3423,3	2141,6	1281,7	37,4

длительность 1-й, 2-й, 3-й фазы – 15, 25, 18 с соответственно.

Для определения эффективности многопрограммного регулирования, параметры которого учитывают суточную и внутрисуточную неравномерность движения транспорта на перекрестке, было проведено сравнение величин суточной задержки для предлагаемого варианта многопрограммного регулирования и варианта однопрограммного регулирования, эксплуатируемого на рассматриваемом перекрестке в настоящее время. Результаты сравнения приведены в таблице 2.

### **ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

Представленная работа содержит решение задачи повышения эффективности регулируемых перекрестков в условиях высокой загрузки посредством учета временной неравномерности ТП.

По результатам работы сделаны следующие выводы:

1. Эффективным и простым методом, позволяющим учитывать временную неравномерность ТП на перекрестке, является многопрограммное регулирование.

2. Предложенная корректировка расчета остаточной очереди на перекрестке позволяет учитывать накопление и убывание очереди ТС в зависимости от степени насыщения регулируемого направления.

3. Разработанная модель многопрограммного регулирования на перекрестке, в которой учтена дополнительная задержка транспорта, возникающая при смене сигнальных программ, позволяет автоматизировать расчет и оптимизацию параметров многопрограммного регулирования на изолированных перекрестках.

4. Разработанная методика автоматизированного расчета параметров многопрограммного регулирования на изолированных пере-

крестках позволяет сгруппировать в кластеры единичные временные интервалы, в течение которых рационально использование общей СП исходя из уровня задержек транспорта.

5. Применение разработанного многопрограммного регулирования позволяет снизить суммарную суточную задержку на изолированных перекрестках на величину от 10 до 40%.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Кашталинский А.С. Снижение задержек на регулируемых перекрестках с учетом временной неравномерности транспортных потоков / А.С. Кашталинский // Транспортное планирование и моделирование: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – СПб: Изд-во СПбГАСУ, 2016. – С. 74-82.

2. Капитанов В.Т., Хилажев Е.Б. Управление транспортными потоками. – М.: Транспорт, 1985. – 92 с.

3. Брайловский Н. О., Грановский Б. И. Управление движением транспортных средств. – М.: Транспорт, 1975. – 110 с.

4. Highway Capacity Manual. // TRB, Washington, DC, 2000. – 1134 p.

5. Власов А.А. Эволюционный метод расчета режимов работы светофорной сигнализации / А.А. Власов, В.Ю. Акимова, М.В. Широков // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2009. – № 47. С. 97-99.

6. Власов А.А. Расчет режимов работы светофорного объекта в условиях насыщенного движения / А.А. Власов, Н.А. Орлов, Д.В. Портов, П.Б. Скрипкин // Современные проблемы науки и образования. 2014.– № 3. С.41.– Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21807377> (дата обращения: 20.05.2017).

7. Ratrout N. T. Developing optimal timing plans for cyclic traffic along arterials using pre-timed

controllers / N. T. Ratrou // WIT Transactions on state of the art in science and engineering, 2013. – vol. 66. – pp. 29-40.

8. Abbas M. Optimization of Time of Day Plan

Scheduling Using a Multi-Objective Evolutionary Algorithm / M. Abbas, A. Sharma, Y. Jung // Civil Engineering Faculty Publications. Paper 20, 2005. - 20 p.

## METHOD OF DETERMINING OPTIMAL MULTIPROGRAM CONTROL PARAMETERS ON ISOLATED INTERSECTIONS

A.S. Kashtalinsky, P.N. Maluygin, V.V. Petrov

**Annotation.** This paper demonstrates the relevance of accounting of traffic flows variability over time allows reducing intersection traffic delays in urban areas.

The method of determining the optimal parameters of multiprogram control, allows considering the daily and hourly traffic flows variability was developed. Application of the optimized parameters of multiprogram control allows reducing intersection traffic delays up to 10-40% during a day compared to single-program control.

**Key words:** daily traffic variability, hour traffic variability, multiprogram control, traffic delay, isolated intersection.

### REFERENCES

1. Kashtalinsky A.S. Snizhenie zaderzhkek na reguliruemyykh perekrestkakh s uchetom vremennoy neravnomernosti transportnykh potokov. [Delay reducing on the signal intersections with taking into account the traffic variability over the time]. Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Transportnoe planirovanie i modelirovanie» [Proc. of the International scientific-practical conference "Transport planning and modeling"], 2016, pp 74-82.

2. Kapitanov V.T., Khilazhev E.B. Upravlenie transportnyimi potokami [Control of traffic flows]. Moscow, Transport, 1985. 92 p.

3. Braylovsky N. O., Granovsky B. I. Upravlenie dvizheniem transportnykh sredstv [Control of vehicles motion]. Moscow, Transport, 1975. 110 p.

4. Highway Capacity Manual. // TRB, Washington, DC, 2000. – 1134 p.

5. Vlasov A.A., Akimova V.Yu., Shirokov M.V. Evolyutsionnyy metod rascheta rezhimov raboty svetofornoy signalizatsii [Evolutionary methods for counting of traffic lights operating modes]. Vestnik HNADU, 2009, no 47, pp 97-99.

6. Vlasov A.A., Orlov N.A., Portov D.V., Skripkin P.B. Raschet rezhimov raboty svetofornogo ob'ekta v usloviyah nasyshchennogo dvizheniya [Design procedure of traffic light control intersection in the conditions of the sated movement]. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya, 2014, no 3, pp 41.

7. Ratrou N. T. Developing optimal timing plans for cyclic traffic along arterials using pre-

timed controllers. WIT Transactions on state of the art in science and engineering, 2013, vol. 66, pp 29-40.

8. Abbas M., Sharma A., Jung Y. Optimization of Time of Day Plan Scheduling Using a Multi-Objective Evolutionary Algorithm. Civil Engineering Faculty Publications, Paper 20, 2005, 20 p.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кашталинский Александр Сергеевич (Россия, Омск) – преподаватель кафедры «Организация и безопасность движения» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: ask1188@mail.ru).

Kashtalinsky Alexander Sergeevich (Russian Federation, Omsk) – Lecturer, Department Traffic organization and safety of The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (644080, Mira, 5 prospect, Omsk, Russian Federation, e-mail: ask1188@mail.ru).

Малюгин Павел Николаевич (Россия, Омск) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Организация и безопасность движения» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: pmalugin@mail.ru).

Maluygin Pavel Nikolaevich (Russian Federation, Omsk) – Ph. D. in Technical Sciences, Ass. Professor, Department Traffic organization and safety of The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (644080, Mira, 5 prospect, Omsk, Russian Federation, e-mail: pmalugin@mail.ru).

Петров Валерий Васильевич (Россия, Омск) – кандидат технических наук, доцент, до-

цент кафедры «Организация и безопасность движения» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5, e-mail: p51@inbox.ru).

*Petrov Valery Vasilievich (Russian Federation, Omsk) – Ph. D. in Technical Sciences, Ass.*

*Professor, Department Traffic organization and safety of The Siberian State Automobile and Highway University (SibADI) (644080, Mira, 5 prospect, Omsk, Russian Federation, e-mail: p51@inbox.ru).*

УДК 621.793

## **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ МОДИФИЦИРОВАНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

*Д.Н. Коротаев<sup>1</sup>, Е.В. Иванова<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия;*

*<sup>2</sup>Военная академия материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева, Омский автобронетанковый инженерный институт, г. Омск, Россия*

**Аннотация.** Представлены результаты исследования влияния материалов легирующих электродов при электроискровом модифицировании стальных деталей транспортно-технологических машин на фазовый состав формируемых покрытий и поверхностных слоев. Установлено, что при обработке электродом на основе карбида титана с добавками никеля, хрома, алюминия и шеелитового концентрата, в покрытии образуется упрочняющая фаза – интерметаллид  $Ni_3(AlTi)$ . Кроме того, в работе приведены экспериментальные данные по влиянию газовой межэлектродной среды на толщину покрытия, плотность дефектов кристаллического строения материалов и трибологические свойства модифицированных поверхностных слоев и покрытий. Полученные результаты свидетельствуют об активном участии газовой среды в изменении физико-механических и трибологических свойств покрытий и поверхностных слоев. Так, при электроискровой обработке в атмосфере кислорода зафиксирована минимальная толщина покрытия (около 30 мкм) и максимальная износостойкость. Это связано с тем, что кристаллическое состояние поверхностей, полученных в кислородсодержащей среде, характеризуется повышенной плотностью дислокаций. Кроме того, согласно рентгенофазовому анализу, под микроразмерным покрытием располагается дисперсно-упрочненный поверхностный слой с образованием интерметаллидов, что также способствует увеличению степени упрочнения стальной поверхности.

**Ключевые слова:** электроискровое модифицирование, функциональное покрытие, фазовый состав, упрочнение, интерметаллиды, износостойкость.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Эксплуатационные свойства деталей транспортно-технологических машин и комплексов во многом определяются способностью конструкционного материала сопротивляться внешним воздействиям, среди которых значительная роль принадлежит трению и изнашиванию поверхностей.

Развитие автомобильной отрасли требует создания функциональных покрытий, способных повысить надежность и долговечность деталей машин и снизить их материалоемкость. Все большее распространение получают

технологии, использующие высокоэнергетические методы модифицирования [1, 2]. При этом, в неравновесных условиях нагрева и охлаждения происходит формирование принципиально нового, особого структурного состояния поверхностного слоя. В связи с этим обеспечение автотранспортных предприятий запасными частями с повышенной надежностью за счет поверхностного модифицирования изнашиваемых деталей является актуальной задачей, решение которой позволит избежать не только простоев машин, но и сэкономить трудовые, материальные и топливно-энергетические ресурсы.