

- среднее время ожидания горочного локомотива одним поездом (для поездов, поступающих в расформирование);
- среднесуточное время занятия всех путей;
- среднесуточное время ожидания всеми грузовыми поездами;
- среднесуточное время простоя грузовых поездов по причине занятости бригады ПТО;
- среднесуточное время простоя грузовых поездов по причине занятости горочного локомотива.

Полученные результаты можно сохранять и обрабатывать с помощью табличного редактора Excel.

Представленная компьютерная модель подходит для изучения разнообразных участковых, сортировочных, грузовых, пассажирских и промежуточных станций. Использование данной программы на станциях позволит определить необходимую потребность технических и технологических параметров при изменении общего количества поездопотоков.

Применение данной программы в учебном процессе на кафедре «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения позволяет наглядно демонстрировать различные ситуации в работе станций при изменении их загрузки.

## **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЗАГРУЗКИ ОСТАНОВОЧНЫХ ПУНКТОВ ГОРОДСКОГО МАРШРУТНОГО ТРАНСПОРТА**

*А.А. Кажяев (науч. рук. О.Н. Ларин)*

*Южно-Уральский государственный университет,  
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76,*

*кафедра эксплуатации автомобильного транспорта*

### **Аннотация**

Рассмотрены вопросы моделирования движения маршрутного транспорта в целях оценки загрузки остановочных пунктов для заданных условий движения. Разработанные модели рекомендуются при оценке условий движения пассажирского транспорта на дублирующих и смежных маршрутах.

В контексте настоящего исследования используются следующие термины. *Дублирующие маршруты* – два и более маршрута, трасса движения транспорта (совокупность используемых для движения уличных дорог) по одному из которых в целом или в части (как правило, более 70% от общей протяженности трассы маршрута) совпадает с трассами движения транспорта по другим маршрутам, и которые на общих участках трассы совместно используют одни и те же остановочные пункты

(как правило, более 70% от общего количества остановочных пунктов по одному из маршрутов).

*Смежные маршруты* – маршруты, имеющие различные трассы движения, но совместно использующие некоторые участки дорожной сети или остановочные пункты на совмещенных трассах маршрутах. *Совмещенный участок маршрутов* – участок пути (сеть дорог) который совместно используется транспортными средствами с дублирующих или смежных маршрутов. На данном участке могут располагаться совмещенные либо нет промежуточные остановочные пункты. *Совмещенный интервал* – это промежуток времени между началом движения двух следующих друг за другом транспортных средств по дублирующим маршрутам.

Наличие смежных маршрутов может создавать определенную проблему в работе маршрутного транспорта, так как достаточно сложно согласовывать графики движения транспортных средств, работающих на смежных маршрутах, чтобы не было конфликтных ситуаций на смежных участках или промежуточных остановочных пунктах маршрутов. Потому что даже при полном согласовании начальных условий движения подвижного состава по смежным маршрутам (времени выхода машин с начального пункта на маршрут), условия движения транспорта, прежде всего, скорость движения на несмежных участках маршрутов, как правило, существенно различаются, что может приводить к синхронному (от греч. *synchronos* – одновременный) входу подвижного состава на смежные участки сети и синхронному прибытию на смежные остановочные пункты.

Термином синхроничность обычно обозначают группирование двух или более событий вокруг одного смыслового центра. Для того чтобы быть синхроничными два или более события должны произойти одновременно и иметь большое влияние друг на друга, но при этом они не должны иметь причинно-следственную связь друг с другом. Считаем, что данный термин можно использовать для характеристики эффектов (лат. *effectus* – исполнение, действие) одновременного прибытия транспортных средств дублирующих и смежных маршрутов на одни и те же остановочные пункты. Данные эффекты обусловлены рассогласованностью в графиках движения подвижного состава по различным причинам.

Если наличие смежных маршрутов может приводить (но необязательно) к конфликтам на сети, то наличие дублирующих маршрутов, как правило, является основной причиной возникновения конфликтов в работе маршрутных сетей. Работа дублирующих маршрутов сопровождается образованием очередей транспорта на остановочных пунктах, а также неравномерностью интервалов движения и наполняемости подвижного состава, что, как следствие, приводит к увеличению времени ожидания

пассажирами транспорта и негативно отражается на комфортности поездки. Равномерность прибытия транспортных средств на остановочный пункт, который обслуживается одним маршрутом, обеспечивается соблюдением необходимых интервалов движения. При регулярном движении очередей транспорта в ожидании захода на остановочный пункт не наблюдается. Соблюдение регулярности движения по маршруту контролируется диспетчерскими службами. Ситуация существенно меняется, если на отдельном участке автодорожной сети работает несколько маршрутов. Чтобы исключить образование очередей на остановочных пунктах необходимо согласовывать графики движения по смежным маршрутам путем корректировки времени начала движения по каждому из них. Однако если смежными маршрутами совместно используется несколько остановочных пунктов, полностью исключить образование очередей достаточно сложно, так как протяженность участков смежных маршрутов, скорость движения транспорта по ним, а также величина пассажирообмена на остановочных пунктах различаются.

Под *конфликтными* (от лат. *conflictus* – столкновение) ситуациями на смежных или дублирующих маршрутах понимаются взаимные обгоны транспортными средствами, образование очередей к остановочным пунктам из одновременно прибывающего подвижного состава. Возникновение конфликтов обусловлено образованием эффектов синхронного движения маршрутного транспорта по участкам маршрутной сети или синхронного прибытия на остановочные пункты.

Предлагается рассматривать два типа конфликтных ситуаций на смежных или дублирующих маршрутах. Первый тип: конфликты при движении. Для конфликтов данного типа характерно совершение одним (быстрым) маршрутным транспортным средством вынужденных обгонов или опережений другого (медленного) маршрутного транспортного средства. Взаимные обгоны маршрутного транспорта создают проблемы для движения транспортного потока, связанные с выездом маршрутного транспорта для обгона из правой полосы. Такой маневр в условиях интенсивного движения (коэффициент загрузки свыше 0,7) снижает скорость движения попутного транспорта на 20% и более.

Второй тип: конфликты на остановочных пунктах. Для конфликтов на остановочных пунктах характерно образование очередей из ожидающих места на них для посадки–высадки пассажиров маршрутных транспортных средств в количестве, превышающем возможности таких остановочных пунктов для их одновременного размещения.

В данном исследовании не рассматриваются конфликтные ситуации на остановочных пунктах, когда транспортные средства в связи с отсутствием свободного места на остановке не ожидают своей очереди в правом ряду, а осуществляют высадку пассажиров со второго ряда, либо

намеренно останавливаются во втором ряду для ожидания свободного места на остановочном пункте, тем самым создавая препятствие для движения попутного транспорта по второму ряду. Данные случаи являются типичными случаями нарушения водителями Правил дорожного движения и с ними следует бороться методами принудительного воздействия. Стоит заметить, что решение проблемы с формированием очередей маршрутного транспорта к остановочным пунктам создает условия для предупреждения подобных нарушений.

Формированию очередей большой протяженности из маршрутного транспорта, ожидающего обслуживания за пределами остановочного пункта на правой полосе дороги, приводит к систематическим задержкам маршрутного транспорта, увеличению времени рейса, снижению регулярности движения, к заторам на пересечениях дорог, к препятствиям движению переходов на разрешающий сигнал светофора и т.п. На образование очередей на остановочных пунктах, обслуживающих несколько смежных и дублирующих маршрутов, одновременно оказывают влияние различные факторы: число смежных и дублирующих маршрутов; интервалы движения транспорта по каждому маршруту; протяженность каждого маршрута; протяженность участков маршрутов; число остановочных пунктов по каждому маршруту; число остановочных пунктов на смежных участках; скорость движения по участкам маршрутов и диапазон отклонений; параметры остановочных пунктов; параметры подвижного состава, работающего на маршрутах; пассажирообмен остановочных пунктов на каждом из маршрутов и др.

Учитывая нормальный закон распределения средних скоростей движения маршрутного транспорта по смежным участкам сети, математическая модель движения транспортных средств по дублирующим и смежным маршрутам может быть представлена в детерминированном виде с усреднением характеристик движения.

Для определения момента наступления конфликтной ситуации на дублирующих маршрутах будем использовать следующие параметры.

На каждом из дублирующих маршрутов  $M_1$  и  $M_2$  работает определенное количество транспортных средств  $A_{1i}$  ( $i = 1, \dots, N$ ) и  $A_{2j}$  ( $j = 1, \dots, N$ ), движущихся со средними скоростями  $V_1$  и  $V_2$  по маршрутам и с заданными интервалами движения  $I_1$  и  $I_2$ . Время начала движения  $t_{01}$  и  $t_{02}$  отдельных транспортных средств  $a_1$  и  $a_2$  соответственно по маршрутам  $M_1$  и  $M_2$  является фиксированными величинами (устанавливаются расписанием).

Протяженность совмещенного участка  $l_{св}$ , который используется транспортными средствами  $A_1$  и  $A_2$ , определяется согласно схеме маршрутной сети и не может превышать протяженности любого маршрута ( $l_{св} < l_{M1}, l_{св} < l_{M2}$ ).

Совмещенный интервал движения по дублирующим маршрутам равен разности между началами движения второго  $t_{02}$  и первого  $t_{01}$  транспортных средств

$$I_{ce} = t_{02} - t_{01}. \quad (1)$$

За начало дублирующих маршрутов принимается место на маршрутной сети в точке начала маршрутов  $S_{01} = S_{02} = S_0$ . На определенном расстоянии  $S_k$  от начала маршрута находится место вероятного конфликта, в которое одновременно прибывают транспортные средства  $A_1$  и  $A_2$  через время движения по маршрутам  $t_{k1}$  и  $t_{k2}$  соответственно. В аналитическом виде это расстояние может быть записано следующим образом

$$S_k = \begin{cases} V_1 \cdot t_{k1} \\ V_2 \cdot t_{k2} \end{cases}. \quad (2)$$

Возможные варианты совмещенного движения транспортных средств на дублирующих маршрутах показаны на рис. 1 – 4.

Вариант движения маршрутного транспорта по двум дублирующим маршрутам при  $V_1 = V_2$ ,  $t_{02} = t_{01}$  является частным случаем варианта, изображенного на рис. 2, поэтому отдельно не приводится. Кроме такого, дублирующие маршруты с сочетанием таких параметров на практике, как правило, не встречаются.

Исследуем множество  $E(S_k)$  значений функции  $S_k(V, t)$  для различных значений переменных:

$$\begin{aligned} E(S_k) &< 0 \text{ при } V_2 < V_1, t_{02} > t_{01}; \\ E(S_k) &= \emptyset \text{ при } V_2 = V_1, t_{02} \neq t_{01}; \\ E(S_k) &= \{S_k \mid S_k \geq 0\} \text{ при } V_2 = V_1, t_{02} = t_{01}; \\ E(S_k) &> 0 \text{ при } V_2 > V_1, t_{02} > t_{01}. \end{aligned}$$

Первое и второе условия отражают ситуацию, когда между дублирующими маршрутами отсутствуют конфликты. Третье условие, как отмечалось выше, относится к частному случаю, когда теоретически на всем протяжении дублирующих маршрутов оба транспортных средства должны идти друг за другом без возможности обгона или опережения и изменения интервала движения. Только четвертое условие отражает ситуацию возможного наступления конфликта между маршрутами.

Пример конфликтной ситуации приведен на рис. 2. Из условия равенства пройденных путей обоими транспортными средствами до места наступления конфликта  $S_1 = S_2 = S_k$  может быть найдено время движения, через которое второе («быстрое») транспортное средство догонит первое («медленное») транспортное средство ( $V_2 > V_1$ ).

Время движения второго транспортного средства до наступления конфликта может быть представлено через  $t_{k1}$  следующим образом:

$$t_{k2} = t_{k1} - t_{02}. \quad (3)$$

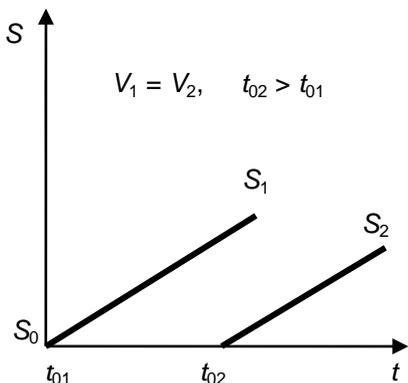


Рис. 1. Конфликтная ситуация не образуется

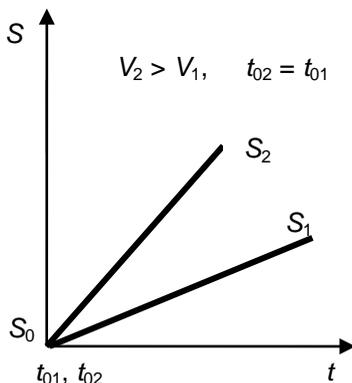


Рис. 2. Конфликтная ситуация не образуется

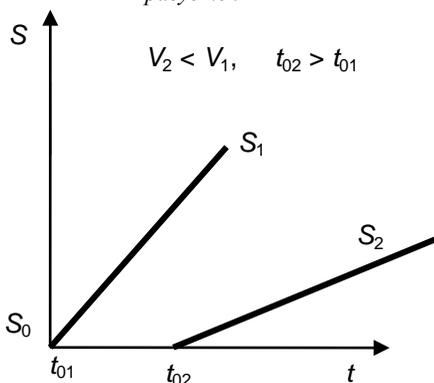


Рис. 3. Конфликтная ситуация не образуется

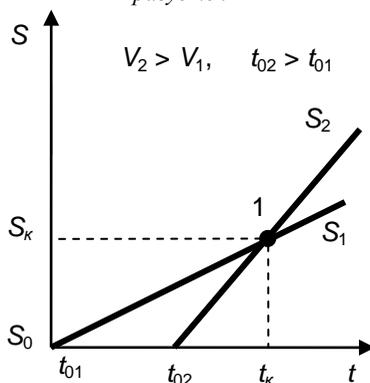


Рис. 4. В точке 1 образуется конфликтная ситуация

Подставляя выражение (3) в выражение (2) и решая систему относительно  $t_{к1}$ , найдем величину времени движения каждого транспортного средства до момента наступления конфликтной ситуации:

$$\begin{aligned} V_1 \cdot t_{к1} &= V_2(t_{к1} - t_{02}); \\ V_2 \cdot t_{к1} - V_1 \cdot t_{к1} &= V_2 \cdot t_{02}; \\ t_{к1} (V_2 - V_1) &= V_2 \cdot t_{02}; \\ t_{к1} &= V_2 \cdot t_{02} / (V_2 - V_1). \end{aligned} \quad (4)$$

Выражение (3) и (4) позволяют определить продолжительность времени движения второго и первого транспортного средства соответственно до момента наступления конфликтной ситуации. Однако конфликтная ситуация может не наступить, если расстояние пути до кон-

фликта будет превышать протяженность совмещенного участка:  $S_{\kappa 1} > l_{ce}$ . Протяженность  $S_{\kappa}$  определяется из выражения (2). Это утверждение также следует из условия, что если время движения  $t_{\kappa 1}$  первого транспортного средства до конфликта будет превышать время его движения  $t_{ce1}$  по совмещенному участку:  $t_{\kappa 1} > t_{ce1}$ , то конфликтная ситуация на маршрутах не образуется. Время движения  $t_{ce1}$  по совмещенному участку определяется через отношение протяженности совмещенного участка  $l_{ce}$  к скорости транспортного средства  $V_1$ .

При этом следует учитывать, что в интервале  $I_1$  между двумя следующими друг за другом транспортными средствами  $a_{1i}$  первого маршрута может находиться в движении несколько транспортных средств  $a_{2i}$  со второго маршрута. Соответствующее количество  $a_{2i}$  определяется по формуле

$$n_l = (I_1 - I_{ce}) / I_2. \quad (5)$$

Полученное значение  $n_l$  следует округлять в меньшую сторону. Значение  $n_l > 1$  свидетельствует о том, что в интервале  $I_1$  между транспортными средствами первого маршрута  $a_{1i}$  будет находиться  $n_l$  транспортных средств второго маршрута  $a_{2i}$ . Однако это еще не означает, что все  $a_{2i}$  в количестве  $n_l$  могут конфликтовать с  $a_{1i}$ . Конфликтная ситуация между ними возможна при условии

$$(t_{\kappa} + n_l \cdot I_2) \leq t_{ce1}. \quad (6)$$

Если выполняется условие (6), то число конфликтных ситуаций транспортных средств  $a_{2i}$  с каждым транспортным средством  $a_{1i}$  в интервале  $I_1$  равно  $n_l$ . Рассмотренная ситуация проиллюстрирована на рис. 5, где движение транспортных средств  $a_{1i}$  первого маршрута показано двойной линией, а движение транспортных средств  $a_{2i}$  второго маршрута показано одинарной линией.

Если условие (6) не выполняется, то число конфликтов  $a_{2i}$  с  $a_{1i}$  в интервале  $I_1$  составит  $n_l$ , которое рассчитывается по следующей формуле:

$$n_l = (t_{ce1} - t_{\kappa 1}) / I_2. \quad (7)$$

В окончательном виде число  $n_l$  конфликтов определяется следующим образом:

$$n_l = \begin{cases} (I_1 - I_{ce}) / I_2, & \text{при } (t_{\kappa} + n_l \cdot I_2) \leq t_{ce1} \\ (t_{ce1} - t_{\kappa 1}) / I_2, & \text{при } (t_{\kappa} + n_l \cdot I_2) > t_{ce1} \end{cases}. \quad (8)$$

Теперь необходимо определить общее количество конфликтных ситуаций  $N_l$  за общее время транспортных средств обоих маршрутов. В данном случае возможность наступления конфликта ограничивается продолжительностью движения транспортных средств по первому маршруту. Общее время движения по первому маршруту рассчитывается по следующей формуле

$$T_{1n} = t_{01n} + t_{ce1} = a_{n-1} I_1 + t_{ce1}, \quad (9)$$

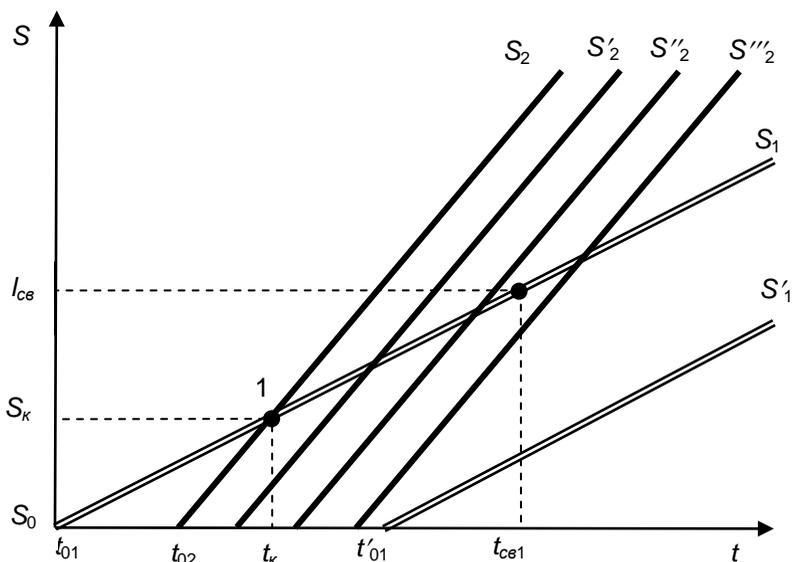


Рис. 5. Варианты конфликтных ситуаций для  $N_I$

где  $t_{01n}$  – время начала движения последнего транспортного средства  $a_{1n}$  по смежному участку.

За это время число конфликтных ситуаций не должно превышать количество рейсов  $n_{p2}$ , выполненных транспортными средствами  $a_{2i}$ , по второму маршруту за период  $T_{1n}$  движения транспортных средств  $a_{1n}$  по смежному участку:  $N_I \leq n_{p2}$ . За указанный период возможное число конфликтных ситуаций может быть определено из выражения

$$N_I = (T_{1n} - t_{k1}) / I_2. \quad (10)$$

Полученное значение  $N_I$  следует округлять в меньшую сторону. В итоге получим

$$N_I = \begin{cases} (T_{1n} - t_{r1}) / I_2, & \text{при } N_I \leq n_{p2} \\ n_{p2}, & \text{при } N_I = n_{p2} \end{cases}. \quad (11)$$

Время начала движения  $t_{01}$  и  $t_{02}$  по смежным маршрутам устанавливается расписанием движения. За начало движения транспортных средств по смежным маршрутам принимаются отдельные места на маршрутной сети  $S_{01}$  и  $S_{02}$  для «сходящихся» маршрутов, либо общий начальный пункт для обоих маршрутов  $S_0 = S_{01} = S_{02}$ , для «расходящихся» маршрутов. В последнем случае транспортные средства через определенное расстояние после начала движения по маршруту переходят на различные участки маршрутной сети. В этом случае конфликтные ситуации возможны только на участке совмещенного движения. Модель движения

транспорта на «расходящихся» маршрутах аналогична модели для дублирующих маршрутов.

Для «сходящихся» смежных маршрутов полученные выражения для дублирующих маршрутов могут быть модифицированы. Для смежных маршрутов за начало их совмещенного движения по сети является место соединения (как правило, пересечение дорог) их маршрутов  $S_{(см)0} = S_{(см)01} = S_{(см)02}$ . Протяженность участков маршрутов от начала движения  $S_{01}$  и  $S_{02}$  до места совмещенного движения  $S_{(см)0}$  определяется конфигурацией маршрутной сети и может быть рассчитано по формуле

$$S_{(см)1} = S_{(см)01} - S_{01}, \quad (12)$$

$$S_{(см)2} = S_{(см)01} - S_{02}. \quad (13)$$

Время начала движения транспортных средств по смежному участку определяется выражением

$$t_{(см)01} = S_{(см)1} / V_1, \quad (14)$$

$$t_{(см)02} = S_{(см)2} / V_2. \quad (15)$$

Совмещенный интервал сдвигания по смежным маршрутам составит

$$I_{св} = t_{(см)02} - t_{(см)01}. \quad (16)$$

В момент наступления конфликтной ситуации продолжительность времени движения первого транспортного средства по совмещенному участку маршрута составит  $t_{(см)к1}$ , а общая продолжительность времени движения транспортного средства по маршруту в целом может быть рассчитана по формуле

$$t_{к1} = t_{(см)01} + t_{(см)к1}.$$

Аналогичным образом определяется общая продолжительность времени движения второго транспортного средства по маршруту  $t_{к2}$  до наступления конфликтной ситуации. Время движения второго транспортного средства по совмещенному участку маршрута до наступления конфликтной ситуации  $t_{(см)к2}$  может быть представлено через  $t_{(см)к1}$  следующим образом

$$t_{(см)к2} = t_{(см)к1} - t_{(см)02}. \quad (17)$$

После прохождения конфликтной точки движение транспорта обоих маршрутов по совмещенному участку моделируется аналогичным образом как для дублирующих маршрутов по выражениям (2-9).

Для дублирующих маршрутов, на которых движение транспортных средства начинается не на совмещенном остановочном пункте, вычисления производятся аналогично как для смежных маршрутов.

Разработанные модели и алгоритмы рекомендуются к использованию при оценки условий движения маршрутного транспорта на дублирующих и смежных маршрутах, а также для оценки соответствия пропускной способности остановочных пунктов маршрутов количеству одновременно прибывающего пассажирского транспорта.