УДК 004.942:656

О. Ю. Лукомская
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Модели и алгоритмы оптимальности регулярных транспортных потоков с использованием интеллектуальных систем управления судопропуском

Представлена имитационная разработка модели оптимальной организации движения регулярных транспортных потоков, в основе которой лежит алгебраическо-алгоритмическое решение задачи организации обслуживания регулярных транспортных потоков в линейных транспортных коммуникациях, упорядоченная совокупность которых образует коммуникационную транспортную систему. Включение данной модели в интеллектуальную систему управления движением регулярных транспортных потоков позволяет оптимизировать в ней алгоритмы планирования и регулирования транспортных потоков.

Имитационная модель, транспортные потоки, линейные транспортные коммуникации, интеллектуальные транспортные системы, судопропуск

В настоящее время проблемой в сфере транспорта является точное регулирование (или управление) движения потоков транспортных средств, обеспечивающее оптимальное во времени и безопасное в движении функционирование транспортной системы. Первым базовым принципом в любой интеллектуальной логистической системе является правильная временная организация обслуживания потоков транспортных средств [1].

Объект временного планирования. Оборот транспортных потоков (ТРП) (или ресурсов) поддерживается множеством транспортных средств (ТРС) и коммуникационной сетью. Коммуникационная сеть определяется множеством линейных транспортных коммуникаций (в дальнейшем – трасс) и заданным на нем отношением графического порядка. Саму же трассу можно формально представить линейным графом $G\,(A, B)$, вершинам $a \in A$ которого сопоставлены пункты ($j = 1, n$) обслуживания (ПО) потоков (порты, шлюзы, склады, железнодорожные узлы и др.), характеризуемые прежде всего временем T_0 и связанной с ним интенсивностью q обслуживания, а дугам $b \in B$ – участки трассы, характеризуемые, в свою очередь, метрической протяженностью L_{jj+1}, максимально допустимой скоростью v_{jj+1} движения ТРС и связанной с нею пропускной способностью p трассы.

Для определенности будем полагать, что:

а) во множестве A выделены одна начальная и одна конечная вершины;

б) пункты обслуживания транспортной системы (ТС) имеют один вход и один выход;

в) транспортные потоки движутся по трассе во встречных направлениях;

г) внутри ПО может находиться одно ТРС;

д) движение ТРС по трассе – двухстороннее.

Основной целью временного планирования транспортных процессов в таких системах является минимизация или полное исключение нетехнологических потерь времени из-за неритмичной или несогласованной совместной работы двух основных субъектов ТП – «водитель – оператор ПО», упомянутых выше простоев и достигается она посредством решения задачи временной регуляризации движения ТРП посредством замены гладкой кривой движения потоков дискретной $f\,(N, t)$, где N – количество узлов дискретизации; t – временной интервал [2].

Основные случайные факторы, влияющие на качество управления регулярными транспортными потоками, – случайность значений времен входа ТРС в систему обслуживания и случайность значений времен обслуживания ТРС в ПО. Первый из них уместно отнести к оператору планирования, второй – к оператору регулирования хода ТП.

Физическая интерпретация процесса идентификации движения ТРП сводится к формулировке условий согласованного и непрерывного движения ТРС в системе обслуживания. После выполнения процедуры дискретизации они примут вид [2]:

1) согласованности:

$$\forall i=\overline{1,n};\quad \forall j=\overline{1,m};\quad \forall p=\overline{1,k},$$

$$\left[\left(\uparrow T_{ij_{\text{вх}}}+\downarrow T_{pj_{\text{вых}}}\right)-\left(\uparrow T_{i_{\text{вх}}}+\downarrow T_{p_{\text{вх}}}\right)\right]-T_{\text{пл}}=0, \quad (1)$$

$$\left|\left|\uparrow T_{ij_{\text{вх}}}-\downarrow T_{pj_{\text{вых}}}\right|-\left|\uparrow T_{i_{\text{вых}}}-\downarrow T_{p_{\text{вх}}}\right|\right|-2T_0=0, \quad (2)$$

$$\uparrow v_{jj+1\,\text{пл}}=\downarrow v_{j+1\,j\,\text{пл}},$$

где $T_{\text{пл}} = zT_0$ – плановое время прохождения ТРС по трассе (z – общее количество узлов дискретизации); $T_{ij_{\text{вх}}}$, $T_{pj_{\text{вых}}}$ $\left(T_{ij_{\text{вых}}}, T_{pj_{\text{вх}}}\right)$ – соответственно времена прихода i-го ТРС в j-й ПО и выхода из него; $T_{j_{\text{вх}}}, T_{p_{\text{вх}}}$ – времена входа ТРС на трассу;

2) непрерывности движения:

$$L: v_{\text{ср}_{\text{пл}}} - T_{\text{пл}} = 0,$$

где L – протяженность трассы; $v_{\text{ср}_{\text{пл}}} = \left(\sum_{j=0}^{m} v_{jj+1_{\text{пл}}} L_{jj+1}\right)\Big/ L$ – средневзвешенное по длинам участков трассы значение плановой скорости движения ТРС.

Коэффициент временного согласования движения встречных транспортных потоков [3]

$$K_{\text{с}} = 1-\frac{T_{\text{нт}}}{T_{\text{пл}}}.$$

При отсутствии нетехнологических временных $T_{\text{нт}}$ потерь ТРС при их движении по трассе $K_{\text{с}} = 1$. При этом наблюдается полная согласованность встречных транспортных потоков в сети, характеризуемая отсутствием в ней конфликтов между ТРС за обладание транспортным ресурсом. На практике из-за наличия различных временных задержек $K_{\text{с}} < 1$. Тогда возникает потребность в таком управлении ТП в сети, чтобы она стремилась вернуться в равновесное (или в близкое к нему) состояние.

Математическая формулировка задачи:

1. Пусть в эвклидовом подпространстве $\mathbf{M}_0 \subset \mathbf{M}$ задана система базисных векторов $\mathbf{x}_1$, $\mathbf{x}_2, \ldots, \mathbf{x}_{m+1}$, отождествляемых с номерами ПО, а результат $\overrightarrow{\mathbf{y}_0}$ (или $\overleftarrow{\mathbf{y}_0}$) упомянутой выше временной дискретизации представлен линейной комбинацией этих векторов в виде [3], [4]:

$$\left|\overrightarrow{\mathbf{y}_0}\right| = T_0\sum_{j=1}^{m+1} z_{0j}\mathbf{x}_j, \quad \left|\overleftarrow{\mathbf{y}_0}\right| = T_0\sum_{j=m+1}^{1} z_{0j}\mathbf{x}_j,$$

где z_{0j} – целочисленный коэффициент, равный количеству узлов дискретизации между смежным ПО.

2. Пусть последовательность времен прибытия ТРС во все ПО системы выражается векторами-строками

$$\left|\overrightarrow{\mathbf{p}_i}\right| = \left|\overrightarrow{\mathbf{y}_0}\right| + \left|\mathbf{c}_i\right|, \quad \left|\overleftarrow{\mathbf{p}_k}\right| = \left|\overleftarrow{\mathbf{y}_0}\right| + \left|\mathbf{c}_k\right|,$$

где $\left|\mathbf{c}_i\right| = \left|T_{i1_{\text{вх}}}, T_{i2_{\text{вх}}}, \ldots, T_{im+1_{\text{вх}}}\right|$, $\left|\mathbf{c}_k\right| = \left|T_{im+1_{\text{вх}}}, T_{im_{\text{вх}}}, \ldots, T_{i1_{\text{вх}}}\right|$ задают преобразование параллельного переноса вектора $\left|\overrightarrow{\mathbf{y}_0}\right|$ (или $\left|\overleftarrow{\mathbf{y}_0}\right|$) на величину $T_{i_{\text{вх}}}$ (или $T_{k_{\text{вх}}}$) в подпространстве $\mathbf{M}_0$, где $T_{i_{\text{вх}}}$ (или $T_{k_{\text{вх}}}$) – времена входа ТРС в систему обслуживания ТРП во встречных направлениях.

3. Введем в рассмотрение два подпространства $\mathbf{M}_1 \subset \mathbf{M}_0$ и $\mathbf{M}_2 \subset \mathbf{M}_0$ [6], на которые в ходе процесса регуляризации будем проецировать векторы $\left|\overleftarrow{\mathbf{p}_k}\right|$ и $\left|\overrightarrow{\mathbf{p}_i}\right|$. Сопоставим этим подпространствам одноименные прямоугольные матрицы размером $\overrightarrow{\mathbf{n}} \times m$ и $\overleftarrow{\mathbf{n}} \times m$ соответственно. В начале процесса регуляризации обе матрицы пусты, а в конце его примут вид:

$$\mathbf{M}_1 = \overrightarrow{\mathbf{Y}_0} + \mathbf{C}_1, \quad \mathbf{M}_2 = \overleftarrow{\mathbf{Y}_0} + \mathbf{C}_2,$$

где $\mathbf{C}_1$, $\mathbf{C}_2$ – матрицы значений времен входа ТРС в систему обслуживания, составленные из векторов $\left|\mathbf{c}_i\right|$ и $\left|\mathbf{c}_k\right|$; векторы $\overrightarrow{\mathbf{Y}_0}$ и $\overleftarrow{\mathbf{Y}_0}$ – постоянные составляющие матриц $\mathbf{M}_1$ и $\mathbf{M}_2$, обусловленные результатами временной дискретизации функций $f(N, t)$, а матрицы $\mathbf{C}_1$, $\mathbf{C}_2$ – переменные.

4. Ситуацию, когда два ТРС из встречных транспортных потоков одновременно находятся у противоположных входов ПО, будем считать конфликтной, приводящей к простою одного из ТРС [4].

5. Процедуре поиска конфликтных ситуаций сопоставим оператор F [2], осуществляющий проекцию вектора $\left|\overrightarrow{\mathbf{p}_i}\right|$ (или $\left|\overleftarrow{\mathbf{p}_k}\right|$) на матрицу $\mathbf{M}_2$ (или $\mathbf{M}_1$), а факту разрешения этих конфликтов – условие ортогональности указанных входных векторов соответствующим матрицам. Этому условию отвечают соотношения (1) и (2).

6. В силу необратимости времени и связанных с ним транспортных событий, ортогонализацию вектора $\left|\overrightarrow{\mathbf{p}_i}\right|$ (или $\left|\overleftarrow{\mathbf{p}_k}\right|$) будем проводить итеративным увеличением значений элементов вектора $\left|\mathbf{c}_i\right|$ (или $\left|\mathbf{c}_k\right|$) на величину T_0.

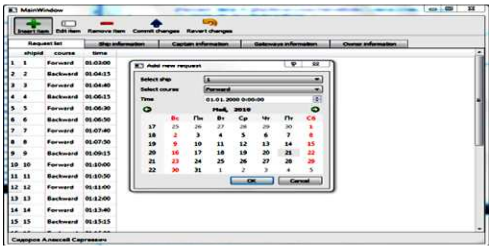
Теперь процедура временной идентификации движения транспортных потоков при $K_{\text{c}} = 1$ будет заключаться в поиске таких значений матриц $\mathbf{C}_1$ и $\mathbf{C}_2$, чтобы расстояния между векторами, обозначаемые знаком $||\ldots||$, были минимальными и кратными T_0, а матрицы $\mathbf{M}_1$ и $\mathbf{M}_2$ были взаимно ортогональны:

$$\left|\left|\left|\overrightarrow{\mathbf{p}_i}\right|,\ \mathbf{M}_2\right|\right| \to \min_{\left\{T_{ij_{\text{вх}}}\right\}},$$

$$\left|\left|\left|\overleftarrow{\boldsymbol{b}_k}\right|,\ \mathbf{M}_1\right|\right| \to \min_{\left\{T_{ij_{\text{вх}}}\right\}}$$

$$\left(\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2\right) = 0 \text{ или } \left(\mathbf{M}_2, \mathbf{M}_1\right) = 0.$$

Организованность потоков и вместе с нею организованность ТП удобно выразить матрицей $\mathbf{M}_3$ корреспонденций, образованной матрицами $\mathbf{M}_1$ и $\mathbf{M}_2$ и устанавливающей, какое ТРС с каким корреспондирует, в каком ПО и в какое время. Тогда, опираясь на [2], моделью временной организации ТРП в системе обслуживания потоков будем называть множества ТРС и ПО с заданным

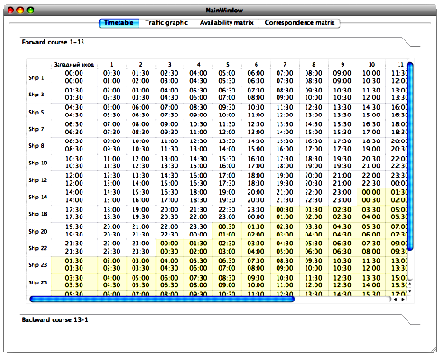


а

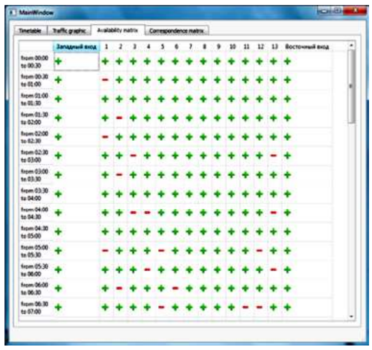
Таблица 2. Время движения судов от шлюза к шлюзу по каналу

Название узла	Время шлюзования/ шаг дискретизации	Расстояние до следующего шлюза, км	Скорость движения на данном участке, км/ч	Время движения, час	Время движения, мин
301		1,20	2,40	0,50	0:30
1	0:30	1,40	2,80	0,50	0:30
2	0:30	1,70	3,40	0,50	0:30
3	0:30	8,00	8,00	1,00	1:00

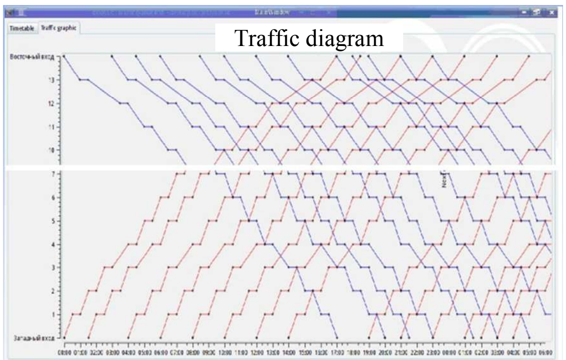
б



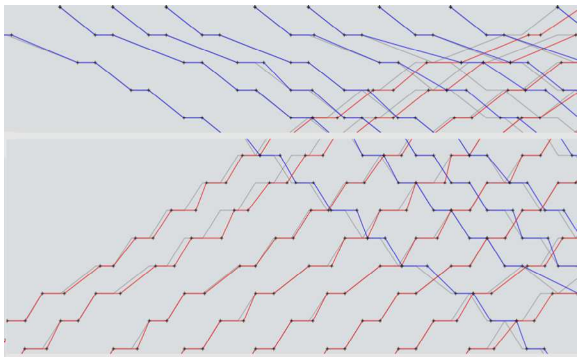
в



г



д



е

на них отношением пространственно-временной связности, представленном матрицей корреспонденций $\mathbf{M}_3$.

«Потоковая» формулировка задачи имеет вид

$$\left| \sum x_{ip_j} - \sum x_{p_j} \right| = 2^n T_0 ,$$

$$i \in I_I^+,\ j \in J_j^+,\ i \in I_I^-,\ j \in J_j^-,\ p \in P_p^-,\ j \in J_j^-,$$

$$p \in P_p^+,\ j \in J_j^+,\ 0 \le x_{ip_j}, x_{p_j} \le T_{\text{пл}},$$

$$0 \le v_{j,\, j+1_{\text{пл}}} \le v_{j,\, j+1_{\text{доп}}},$$

где $0 \le x_{ip_j}, x_{p_j} \le T_{\text{пл}}$, $x_{ip_j} = \left| T_{ij_{\text{вх}}} - T_{pj_{\text{вых}}} \right|$, $x_{p_j} = \left| T_{ij_{\text{вых}}} - T_{pj_{\text{вх}}} \right|$ – «временные» потоки, и соответствует закону сохранения и непрерывности потока, когда разность величин втекающего и вытекающего «временных» потоков в j-й вершине графа $G(A, B)$ должна равняться интенсивности обслуживания ТРС в ней (в рассматриваемом случае $2T_0$). При этом $n = 1$ ввиду линейности графа $G(A, B)$.

На рисунке приведены фрагменты программной реализации имитационной модели (С++/Qt_4): *а* – заполнение заявочного листа; *б* – номинального времени движения судов от шлюза к шлюзу; *в* – расписание движения судов через шлюзы; *г* – матрица свободности шлюзов; *д* – график движения судов по Волго-Донскому судоходному каналу; *е* – график исполненного движения судов с учетом регулирования в один из дней навигационного периода [2], [5]. И то и другое свидетельствует об отсутствии нетехнологических простоев судов.

Отметим, что представленная модельно-алгоритмическая разработка временной организации ТРП в линейных коммуникационных транспортных системах позволяет серьезно упростить алгоритмы планирования и регулирования транспортных потоков в интеллектуальных системах управления и может быть использована в железнодорожном и автомобильном транспорте, а также при временном согласовании работ укрупненных систем обслуживания ТРС – водных бассейнов, портов, железнодорожных узлов и пр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оппельт В. Основы техники автоматического регулирования. М.: Мир, 1960.
2. Кокаев О. Г. Об организации диспетчерского управления движением транспортных потоков в шлюзовых системах судопропуска // Транспорт: наука, техника, управление. М.: ВИНИТИ, 2005. № 12. С. 22–28.
3. Кокаев О. Г., Лукомская О. Ю., Селиверстов С. А. О технологии анализа транспортных процессов в современных условиях хозяйствования // Транспорт Российской Федерации. 2012. № 2. С. 30–34.
4. Лукомская О. Ю., Трифанов В. Н. Об управлении движением транспортных потоков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Автоматизация и управление. 2009. Вып. 5. С. 39–44.
5. Лукомская О. Ю. Система информационной поддержки планирования и регулирования транспортного процесса на внутренних водных путях // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Электротехника и автоматика. 2007. Вып. 1. С. 16–20.
6. Лукомская О. Ю. Планирование оперативного управления транспортным процессом на внутренних водных путях // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Автоматизация и управление. 2006. Вып. 1. С. 28–33.

O. Yu. Lukomskaya
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

MODELS AND ALGORITHMS OF OPTIMALITY OF REGULAR TRAFFIC FLOWS USING INTELLIGENT NAVIGATION PASS CONTROL SYSTEMS

Simulation model's development of optimum movement organization of regular traffic flows is presented. The model is based on algebraic–algorithmic solution of organization of regular traffic flows in the linear transport communications. Inclusion of this model in intelligent traffic control system of regular traffic flow allows to optimize the scheduling algorithms and regulation of traffic flows.

Simulation model, traffic flows, linear transport communications, intelligent systems, navigation pass