

УДК 621.926

Л.Г. Лавров, Н.А. Кузьмин

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ И УПРАВЛЕНИЕ ИМИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приводится пример применения экономико-математического и имитационного моделирования для исследования и оптимизации работы сложных систем. В качестве объекта принята работа группы автомобилей на маятниковом маршруте, снабжающих некоторым видом грузов склад клиента-потребителя со склада клиента-поставщика. В модель включены система воздействия на процесс помех и противодействующая этому система оперативного управления (сменно-суточное планирование и линейная диспетчеризация). Приведены краткие описания упомянутых алгоритмов функционирования системы, канала воздействия помех и системы оперативного управления.

*Ключевые слова:* моделирование, оптимизация, алгоритм, груз, маршрут, склад, система, управление, помеха, диспетчеризация.

Повышение эффективности перевозок грузов автомобильным транспортом невозможно без непрерывного совершенствования систем управления этим процессом. На уровне автотранспортного предприятия большой вес имеет подсистема оперативного управления перевозками. Изучение основных закономерностей функционирования этой подсистемы с целью ее последующей оптимизации на реальных производственных процессах (по причине высокого уровня их неопределенности) представляет довольно сложную задачу. Кроме того, следует иметь в виду, что такая методика требует слишком больших временных и материальных затрат и вряд ли может быть рекомендована для практического использования. Одним из практически приемлемых путей решения этой задачи является создание достаточно адекватной имитационной модели транспортного процесса как объекта управления, и системы управления этим процессом с последующим многократным анализом ее на ЭВМ. Такая методика позволяет быстро менять структуру системы управления, применяемую стратегию и основные ее параметры и, после анализа полученных результатов, выбирать наиболее оптимальный вариант. Экономическая эффективность такой методики очевидна.

В качестве объекта управления примем работу группы автомобилей, снабжающих некоторым видом груза склад клиента-потребителя, на маятниковом маршруте с обратным незагруженным пробегом. В этом случае моделированию подлежат два взаимосвязанных процесса: процесс перемещения автомобилей по маршруту и процесс перемещения единиц груза со склада клиента-поставщика на склад клиента-потребителя, а также процесс накопления и расходования груза на этом складе.

В процессе выполнения сменно-суточного задания любой автомобиль в любой момент времени может находиться в одном из девяти состояний:

- 1 - в автотранспортном предприятии;
- 2 - в первом нулевом пробеге;
- 3 - в очереди на пост погрузки;
- 4 - на погрузке на одном из постов погрузки;
- 5 - в движении с грузом;
- 6 - в очереди на пост разгрузки;
- 7 - на разгрузке на одном из постов разгрузки;
- 8 - в холостом пробеге;
- 9 - во втором нулевом пробеге.

Каждая единица груза может находиться в любой момент времени в одном из шести состояний:

- 1 - на складе клиента-поставщика;
- 2 - в кузове грузящегося автомобиля;
- 3 - в процессе перевозки;
- 4 - в кузове автомобиля, ожидающего разгрузки;
- 5 - в кузове разгружающегося автомобиля;
- 6 - на складе клиента-потребителя.

Реальному процессу перемещения автомобилей по маршруту в модели будет соответствовать последовательный переход автомобилей из одного состояния в другое. Тогда реальному процессу можно поставить в соответствие некоторый марковский процесс перехода объекта управления из одного состояния в другое, определяемый графом переходов анализируемой системы, представленным на рис. 1.

Переходу автомобилей из одного состояния в другое будет соответствовать дифференциальное уравнение вида

$$\frac{dx_i}{dt} = -\mu_{ij}P_{ij}x_i + \mu_{ki}P_{ki}x_k, \quad (1)$$

где  $x_i$  - текущее количество автомобилей в  $i$ -м состоянии;  $P_{ij}$  - вероятность перехода автомобиля из данного  $i$ -го состояния в последующее  $j$ -е;  $\mu_{ij}$  - интенсивность такого перехода, определяемая как величина обратная времени пребывания в данном  $i$ -м состоянии.

Для единиц груза по аналогии

$$\frac{dy_i}{dt} = -\eta_{ij}P_{ij}^r y_i + \eta_{ki}P_{ki}^r y_k. \quad (2)$$

С учетом того, что оба рассматриваемых процесса взаимосвязаны, можно принять

$$v_{ij} = \mu_{kl} q_H \gamma_c \quad (3)$$

для одноименных состояний, кроме  $v_{01}$  (интенсивность поступления груза на склад клиента-поставщика) и  $v_{60}$  (интенсивность расходования груза со склада клиента-потребителя). Эти величины должны быть определены в исходных данных.

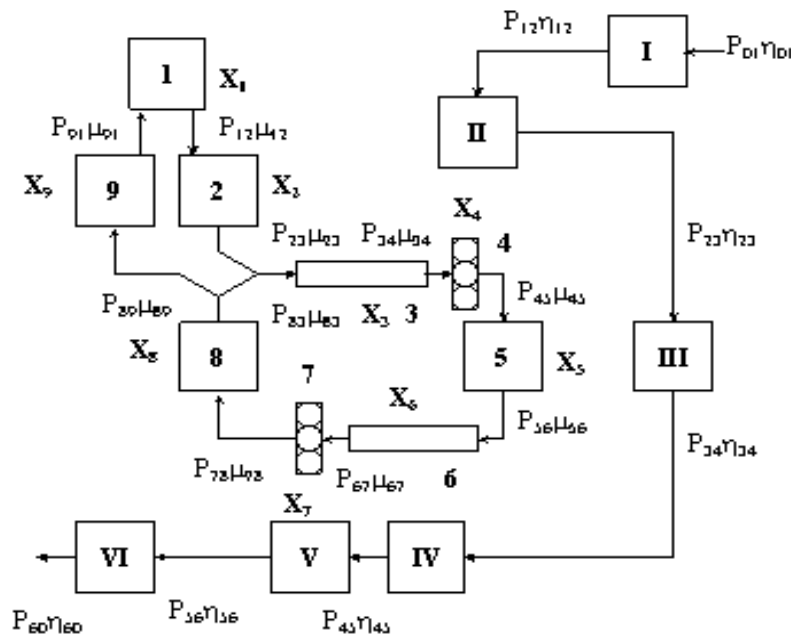


Рис. 1. Совмещенный граф перемещения автомобилей и единиц груза (римскими цифрами обозначены номера состояний для единиц груза)

Вероятности переходов автомобилей из одного состояния в другое используем для управления движением автомобилей. Для этого будем рассматривать их как булевы переменные, принимающие значение 0, если данный переход из одного состояния в другое необходимо запретить, и 1, если такой переход разрешен. Будем считать, что вероятности переходов  $P_{23}, P_{34}, P_{45}, P_{56}, P_{67}, P_{78}$  и  $P_{91}$  всегда равны единице. Вероятности  $P_{12}, P_{83}$  и  $P_{89}$  могут принимать значения 0 или 1 и связаны между собой следующей зависимостью: если  $P_{12} = 0$ , то  $P_{89}$  может принимать значения 0 или 1, если  $P_{12} = 1$ , то  $P_{89}$  может иметь только нулевое значение и наоборот. Для вероятностей  $P_{83}$  и  $P_{89}$  установим следующую зависимость:  $P_{83} = 0$ , если  $P_{89} = 1$  и  $P_{83} = 1$ , если  $P_{89} = 0$ .

Тогда моделируемым процессам можно поставить в соответствие представленный на рис. 1 следующий граф переходов автомобилей и единиц груза из одного состояния в другое.

Тогда перемещению автомобилей по маршруту и перемещению единиц груза могут быть поставлены в соответствие две системы дифференциальных уравнений (4) и (5), непрерывное интегрирование которых будет моделировать протекание обоих процессов.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx_1}{dt} = -\text{sign}(x_1)P_{12} \min \left\{ \frac{m_4 \delta_4 n_4}{2q_H \gamma_c t_{ц4}}; x_5 \frac{l_M}{v_{ТГ}}; \frac{m_7 \delta_7 n_7}{2q_H \gamma_c t_{ц7}}; x_8 \frac{l_M}{v_{ТХ}} \right\} + x_9 \frac{l_0}{v_{ТХ}}; \\ \frac{dx_2}{dt} = -x_2 \frac{l_0}{v_{ТХ}} + \min \left\{ \frac{m_4 \delta_4 n_4}{2q_H \gamma_c t_{ц4}}; x_5 \frac{l_M}{v_{ТГ}}; \frac{m_7 \delta_7 n_7}{2q_H \gamma_c t_{ц7}}; x_8 \frac{l_M}{v_{ТХ}} \right\}; \\ \frac{dx_3}{dt} = -\min \left\{ \frac{m_4 \delta_4 n_4}{2q_H \gamma_c t_{ц4}}; \left( x_2 \frac{l_0}{v_{ТХ}} + x_8 P_{83} \frac{l_M}{v_{ТХ}} \right) \right\} + x_2 \frac{l_0}{v_{ТХ}} + x_8 P_{83} \frac{l_M}{v_{ТХ}}; \\ \frac{dx_4}{dt} = -\frac{m_4 \delta_4 n_4}{2q_H \gamma_c t_{ц4}} + \min \left\{ \frac{m_4 \delta_4 n_4}{2q_H \gamma_c t_{ц4}}; \left( x_2 \frac{l_0}{v_{ТХ}} + x_8 P_{83} \frac{l_M}{v_{ТХ}} \right) \right\}; \\ \frac{dx_5}{dt} = -x_3 \frac{l_M}{v_{ТГ}} + \frac{m_4 \delta_4 n_4}{2q_H \gamma_c t_{ц4}}; \\ \frac{dx_6}{dt} = -\min \left\{ \frac{m_7 \delta_7 n_7}{2q_H \gamma_c t_{ц7}}; x_5 \frac{l_M}{v_{ТГ}} \right\} + x_5 \frac{l_M}{v_{ТГ}}; \\ \frac{dx_7}{dt} = -\frac{m_7 \delta_7 n_7}{2q_H \gamma_c t_{ц7}} + \min \left\{ \frac{m_7 \delta_7 n_7}{2q_H \gamma_c t_{ц7}}; x_5 \frac{l_M}{v_{ТГ}} \right\}; \\ \frac{dx_8}{dt} = -x_8 P_{83} \frac{l_M}{v_{ТХ}} + \frac{m_7 \delta_7 n_7}{2q_H \gamma_c t_{ц7}}; \\ \frac{dx_9}{dt} = -x_9 \frac{l_0}{v_{ТХ}} + x_8 P_{83} \frac{l_M}{v_{ТХ}}. \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dy_1}{dt} = -\mu_{34} P_{34} x_3 q_H \gamma_c + \eta_{01} P_{01}^r y_0; \\ \frac{dy_2}{dt} = -\mu_{45} P_{45} x_4 q_H \gamma_c + \mu_{34} P_{34} x_3 q_H \gamma_c; \\ \frac{dy_3}{dt} = -\mu_{56} P_{56} x_5 q_H \gamma_c + \mu_{45} P_{45} x_4 q_H \gamma_c; \\ \frac{dy_4}{dt} = -\mu_{67} P_{67} x_6 q_H \gamma_c + \mu_{56} P_{56} x_5 q_H \gamma_c; \\ \frac{dy_5}{dt} = -\mu_{78} P_{78} x_7 q_H \gamma_c + \mu_{67} P_{67} x_6 q_H \gamma_c; \\ \frac{dy_6}{dt} = -\eta_{60} P_{60}^r y_6 + \mu_{78} P_{78} x_7 q_H \gamma_c, \end{array} \right. \quad (5)$$

где  $l_m$  - длина маршрута, км;  $v_{\text{ТХ}}$  - техническая скорость движения автомобиля без груза, км/ч;  $v_{\text{ТГ}}$  - техническая скорость движения автомобиля с грузом, км/ч;  $m_i$  - число постов в  $i$ -м пункте погрузки (разгрузки);  $n_i$  - число погрузо-разгрузочных машин в  $i$ -м пункте погрузки (разгрузки);  $\delta_i$  - грузоподъемность погрузочной (или разгрузочной) машины в  $i$ -м пункте погрузки (разгрузки);  $t_{\text{ци}}$  - время цикла погрузочной (или разгрузочной) машины;  $l_0$  - длина нулевого пробега;  $q_H$  - номинальная грузоподъемность автомобиля;  $\gamma_c$  - статический коэффициент использования грузоподъемности.

Однако обычное решение этих двух систем не обеспечивает получения целочисленного решения и компенсацию ошибки квантования текущего времени. Поэтому для их решения применим чисто имитационный метод интегрирования. Сущность этого метода заключается в последовательной обработке состояний автомобилей в направлении, встречном их движению, начиная с девятого состояния. Содержание такой обработки разберем на примере перехода автомобилей из пятого состояния в шестое:

- 1) устанавливается номер обрабатываемого состояния (в данном случае - пятый);
- 2) проверяется количество автомобилей в рассматриваемом состоянии и, если оно равно нулю, обработка данного состояния завершается;
- 3) если в рассматриваемом состоянии автомобили есть, то путем проверки всех автомобилей маршрута устанавливаются те, которые находятся в данном состоянии;
- 4) для каждого находящегося в данном состоянии автомобиля производится увеличение текущего времени пребывания его в этом состоянии на величину периода интегрирования;
- 5) возрастает текущий пробег с грузом в данной езде на величину, равную произведению периода интегрирования на значение действующей в данный момент скорости движения с грузом;
- 6) количество единиц груза в рассматриваемом состоянии увеличивается на их количество в кузове данного автомобиля;
- 7) если текущий пробег с грузом в данной езде у рассматриваемого автомобиля меньше длины маршрута, то берется следующий находящийся в данном состоянии автомобиль и осуществляется переход к п.4 алгоритма, в противном случае - к п. 8;
- 8) определяется ошибка по пробегу за счет квантования времени как разность между значением текущего пробега с грузом и длиной маршрута;
- 9) находится ошибка по времени движения с грузом в данной езде как разность между полученным временем и частным от деления ошибки по пробегу на действующее значение скорости движения с грузом;
- 10) рассматривается накопленный за время в наряде пробег автомобиля с грузом путем увеличения его на длину маршрута;
- 11) вычисляется накопленное время движения с грузом путем увеличения его на время движения с грузом за данную ездку и уменьшения на ошибку по времени;
- 12) количество единиц груза в рассматриваемом состоянии уменьшается на фактическую грузоподъемность рассматриваемого автомобиля;
- 13) номер состояния увеличивается на единицу;
- 14) количество автомобилей в рассматриваемом состоянии уменьшается на один автомобиль;
- 15) количество автомобилей в последующем (шестом) состоянии увеличивается на один автомобиль;
- 16) текущее время пребывания данного автомобиля в последующем (шестом) состоянии устанавливается равным ошибке по времени, а его текущий пробег в новом состоянии обнуляется;
- 17) количество груза в шестом состоянии увеличивается на фактическую грузоподъемность автомобиля;

18) осуществляется переход к моделированию пробега с грузом следующего автомобиля, находящегося в данном состоянии;

19) после обработки всех автомобилей в данном состоянии осуществляется переход к моделированию следующего (по алгоритму) четвертого состояния.

Предлагаемый алгоритм позволяет не только обеспечить получение целочисленного решения и компенсацию ошибки квантования по времени, но и дает возможность вычислять результирующие показатели по каждому конкретному автомобилю, что существенно увеличивает степень его адекватности реальному процессу.

Приведенная ранее имитационная экономико-математическая модель маятникового маршрута соответствует случаю стабильных параметров транспортного процесса. Однако в реальных условиях параметры этого процесса подвержены заметным случайным и неслучайным колебаниям под воздействием различного рода помех. Главным образом это касается скоростей движения, продолжительности простоя под погрузкой и разгрузкой и интенсивности расхода груза со склада клиента-потребителя. Собственно наличие помех и обуславливает необходимость системы управления, компенсирующей воздействие этих помех.

В предлагаемой модели воздействию помех подвержены пять параметров: скорость движения с грузом, скорость движения без груза, производительность одного поста погрузки, производительность одного поста разгрузки и интенсивность расхода груза со склада клиента-потребителя. На любой из перечисленных параметров по каналу помех воздействуют одновременно две составляющие помехи.

Регулярная составляющая (в модели она названа постоянной) имеет вид одиночного импульса заданной в исходных данных ширины и амплитуды или синусоиды. Эта составляющая воздействует на скорости всех автомобилей сразу, на производительность всех постов погрузки, всех постов разгрузки, а также на интенсивность расхода груза со склада клиента-потребителя. С помощью этой составляющей можно имитировать колебания параметров модели в течение суток. Постоянная составляющая вычисляется в алгоритме по формулам соответственно:

- для синусоиды

$$P_d = P_n + \sigma \sin(\omega t + \varphi), \quad (6)$$

где  $P_d$  - действующее значение параметра;  $P_n$  - начальное значение параметра, заданное в исходных данных;  $\sigma$  - амплитуда постоянной составляющей;  $\omega$  - частота изменения;  $t$  - текущее время;  $\varphi$  - начальное значение фазы;

- для одиночного импульса

$$P_d = \begin{cases} P_n, & \text{если } t < t_n \text{ или } t > t_k \\ \sigma P, & \text{если } t_n < t < t_k, \end{cases} \quad (7)$$

где  $t_n$  - момент начала действия импульса;  $t_k$  - момент окончания действия импульса;  $\sigma$  - амплитуда импульса.

На регулярную составляющую накладывается случайная составляющая помехи, генерируемая через заданные в исходных данных интервалы отдельно для каждого автомобиля, каждого поста погрузки или разгрузки и для интенсивности потребления груза со склада клиента-потребителя. Случайная составляющая представляет собой нормальный случайный процесс  $\xi(t)$  с корреляционной функцией вида

$$\rho(\tau) = \sigma^2 y^{\omega^* |\tau|} \cos \omega_0 \tau, \quad (8)$$

где  $\sigma$  - среднеквадратичное отклонение;  $\omega^*$  - величина корреляции процесса;  $\omega_0$  - скрытая частота повторения.

Для генерации подобного процесса в модели используется следующий рекуррентный алгоритм:

- вычисляются два равномерно распределенных на интервале (0;1) последовательных числа по формуле

$$X[n] = \{X[n-1] + 3.14159\} - E\{X[n-1] + 3.14159\}, \quad (9)$$

где  $X[n]$  - определяемое равномерно распределенное число;  $X[n-1]$  - предшествующее ему такое же число;  $E(\dots)$  - целая часть от выражения в скобках;

- формируется значение вспомогательного случайного процесса («белый шум») с математическим ожиданием  $m_y = 0$  и дисперсией  $D_y = \sigma^2$ :

$$Y[n] = \sigma \sqrt{-2 \ln X[n-1]} \sin \pi X[n], \quad (10)$$

- генерируется значение случайной составляющей по выражению

$$\xi[n] = a_0 Y[n] + a_1 Y[n-1] + b_1 \xi[n-1] + b_2 \xi[n-2], \quad (11)$$

где  $a_0 = \sigma \alpha = \sigma \sqrt{(\alpha_1 \pm \sqrt{\alpha_1^2 - 4\alpha_0^2})/2}$ ;  $a_1 = \sigma \alpha_0 / \alpha$ ,  $b_1 = 2\rho \cos \gamma_0$ ;  $b_2 = -\rho^2$ ;  $\alpha_0 = \rho(\rho^2 - 1)$ ;

$\alpha_1 = 1 - \rho^4$ . Здесь  $\rho = e^{\gamma^*}$ ;  $\gamma^* = \omega^* \Delta t$ ;  $\gamma_0 = \omega_0 \Delta t$  ( $\Delta t$  - шаг генерации).

Система управления работой моделируемого объекта полностью имитирует действия управленческого персонала при руководстве работой маршрута. Структурная схема системы приведена на рис. 2.

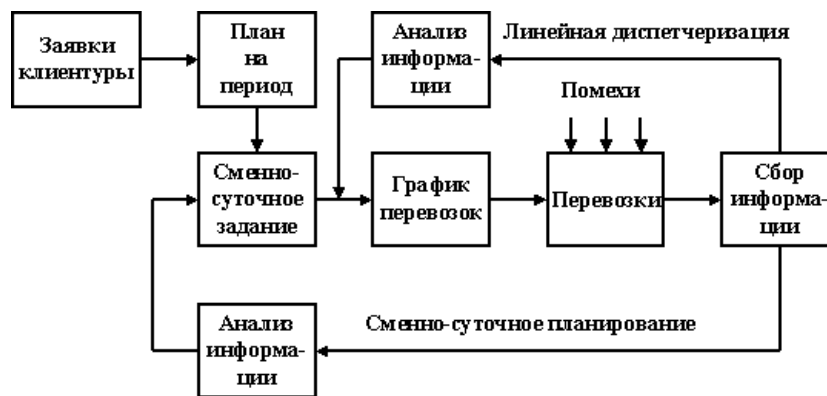


Рис. 2. Структурная схема системы управления

Система реализует два контура управления: сменно-суточное планирование и линейное диспетчерское руководство, причем по каждому контуру управления предлагаются альтернативные варианты стратегий управления, что дает возможность пользователю программы выбирать наиболее оптимальный вариант управления для конкретных условий работы маршрута.

Контур сменно-суточного планирования может осуществлять свои функции в соответствии с любой из четырех стратегий управления по выбору пользователя. Для задания той или иной стратегии необходимо только в исходных данных указать номер выбираемой стратегии – 1, 2, 3 или 4.

Независимо от принятой стратегии работа контура сменно-суточного планирования начинается с учета результатов работы за прошедший период и прогнозирования условий работы на планируемые сутки. Прогнозированию подлежат параметры, подверженные воздействию помех. В качестве метода прогнозирования в модели применен метод статистического прогноза по одной точке. Эта операция выполняется по формуле

$$P_k = m_p + \rho_u (P_{k-u} - m_p), \quad (12)$$

где  $P_k$  - прогнозируемое значение параметра на планируемые  $k$ -е сутки;  $m_p$  - математическое ожидание или нормативное (исходное) значение прогнозируемого параметра;  $\rho_u$  - нор-

мированная корреляционная функция, вычисляемая на основе данных о работе за предшествующий период;  $P_{k-u}$  - последнее известное значение этого параметра;  $u$  - число дней задержки информации, определяемое временем обработки путевых листов.

Точность прогнозирования оценивается средним квадратом ошибки:

$$e_k^2 = \sigma_p^2 (1 - \rho_u^2), \quad (13)$$

где  $e_k^2$  - ошибка прогноза;  $\sigma_p^2$  - дисперсия процесса изменения параметра.

Ошибка прогноза определяется в основном величиной периода задержки информации, который задается в исходных данных. После этого производится расчет объема перевозок по маршруту на планируемые сутки с учетом отклонений в выполнении плановых заданий за дни предшествующего периода.

Наличие отклонений, как и в реальных условиях, образуется из-за неполноты компенсации воздействий помех системой управления и неизбежной ошибки прогноза.

По первой стратегии объем перевозок на планируемые сутки рассчитывается из условий равномерного распределения образовавшегося «перевоза» или «недовоза» на данный момент по оставшимся дням периода моделирования по формуле

$$Q_k = \left( Q - \sum_1^{k-u-1} Q_k' - \sum_{k-u}^{k-1} Q_k \right) / [D - (k-1)], \quad (14)$$

где  $Q_k$  - планируемый объем перевозок на  $k$ -е сутки;  $Q$  - объем перевозок, планируемый на весь период моделирования;  $Q_k'$  - фактически выполненный объем перевозок за  $k$ -е сутки;  $D$  - продолжительность периода моделирования в сутках;  $k$  - номер планируемых суток;  $u$  - число дней задержки информации.

По второй стратегии управления планируемый объем перевозок определяется исходя из требования немедленного устранения образовавшегося «перевоза» или «недовоза» уже в течение планируемых суток:

$$Q_k = \frac{Qk}{D} - \sum_1^{k-u-1} Q_k' - \sum_{k-u}^{k-1} Q_k. \quad (15)$$

Если в двух первых случаях критерием для определения сменно-суточного задания являлось лишь требование обязательного выполнения планового задания за весь период моделирования, то в третьей и четвертой стратегиях учитывается и изменение запасов груза на складе клиента-потребителя.

При расчете объема перевозок на сутки по третьей стратегии его величина ежесуточно определяется как разность между емкостью склада потребителя груза и фактическим количеством его на складе:

$$Q_k = I_{\max} - I, \quad (16)$$

где  $Q_k$  - планируемый суточный объем перевозок;  $I_{\max}$  - емкость склада;  $I$  - текущее количество груза на складе.

Рассмотренная стратегия известна в научной литературе как стратегия постоянной периодичности заказа.

При использовании четвертой стратегии суточный объем вычисляется так же, как и в предыдущем случае, но только на те дни, когда количество груза на складе становится меньше установленного в исходных данных страхового запаса. В остальные дни назначается нулевой объем, и маршрут в эти дни не работает:

$$Q_k = \begin{cases} I_{\max} - S, & \text{если } I \leq S \\ 0, & \text{если } I > S \end{cases}, \quad (17)$$

где  $S$  - уровень страхового запаса.

Такая стратегия известна под названием стратегии с установленной периодичностью пополнения запасов до постоянного уровня.

После этого, на основании установленного суточного объема перевозок, результатов прогнозирования и данных о маршруте и используемом подвижном составе по формулам, известным из курса грузовых автомобильных перевозок, производится расчет потребного числа автомобилей, по желанию устанавливается резерв провозных возможностей, определяется число постов погрузки и разгрузки и вычисляется интервал движения и график выпуска автомобилей на линию, после чего происходит передача управления в контур линейной диспетчеризации.

В контуре линейной диспетчеризации осуществляется управление работой автомобилей на линии в процессе выполнения ими сменно-суточного задания. Управление основано на соблюдении равенства:

$$I = \min(R_{\text{пог}}; R_{\text{раз}}), \quad (18)$$

где  $I$  - интервал движения;  $R_{\text{пог}}$  - ритм пункта погрузки;  $R_{\text{раз}}$  - ритм пункта разгрузки.

Выполнение этого условия обеспечивает минимум времени простоя автомобилей в очередях на погрузку и выгрузку и минимум времени простоя постов погрузки и разгрузки в ожидании автомобилей. Осуществляется оно путем регулирования количества автомобилей на маршруте. В модели снятие автомобилей с маршрута или их добавление из резерва (если таковой имеется) производится изменением значений вероятностей переходов  $P_{12}$ ,  $P_{83}$  и  $P_{89}$  (см. граф переходов автомобилей):

- при  $P_{12} = 1$ ,  $P_{83} = 1$  и  $P_{89} = 0$  - происходит выпуск автомобилей на линию;
- при  $P_{12} = 0$ ,  $P_{83} = 1$  и  $P_{89} = 0$  - количество автомобилей на линии остается неизменным;
- при  $P_{12} = 0$ ,  $P_{83} = 0$  и  $P_{89} = 1$  - происходит снятие автомобилей с маршрута.

В контуре линейной диспетчеризации предусмотрено два варианта диспетчерского управления. Выбор того или иного варианта задается указанием его номера (1 или 2) в исходных данных.

Первый вариант диспетчерского управления соответствует наиболее применяющемуся «ручному» методу диспетчеризации и выполняется по следующему алгоритму:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{если } A_{\text{п}} - m_n > D_1 \text{ или } A_{\text{р}} - m_{\text{р}} > D_1 \text{ то } P_{12} = 0, P_{83} = 0, P_{89} = 1; \\ \text{если } A_{\text{п}} - m_n > D_2 \text{ и } A_{\text{р}} - m_{\text{р}} > D_2 \text{ то } P_{12} = 1, P_{83} = 1, P_{89} = 0; \\ \text{в остальных случаях} - P_{12} = 0, P_{83} = 1, P_{89} = 0. \end{array} \right. \quad (19)$$

Здесь  $A_{\text{п}}$  и  $A_{\text{р}}$  - количество автомобилей в пункте погрузки и пункте разгрузки соответственно;  $m_n$  и  $m_{\text{р}}$  - число постов погрузки и разгрузки;  $D_1$  и  $D_2$  - допустимое с точки зрения диспетчера количество автомобилей ( $D_1$ ) в очередях на погрузку или разгрузку и допустимое число свободных постов ( $D_2$ ) погрузки или разгрузки (величины  $D_1$  и  $D_2$  задаются в исходных данных).

Параметром первого варианта диспетчерского регулирования является периодичность вмешательства диспетчера в перевозочный процесс:

$$T = nt_{\text{инт}}, \quad (20)$$

где  $n$  - количество интервалов интегрирования между очередными диспетчерскими воздействиями (задается в исходных данных);  $t_{\text{инт}}$  - интервал интегрирования системы дифференциальных уравнений (задается в исходных данных) и чувствительность системы управления (величины  $D_1$  и  $D_2$ )

При моделировании с целью отладки перевозочного процесса оптимизации подлежат оба указанных параметра управления.

Второй вариант диспетчерского руководства больше соответствует случаю диспетчеризации в условиях действия автоматизированной системы управления грузовыми перевоз-



ками. Принцип работы контура диспетчеризации по этому варианту состоит в непрерывном накоплении данных о работе маршрута за определенный период, вычислении средних за этот период и в расчете потребного количества автомобилей для нормальной работы в реально действующих условиях. Далее с заданной периодичностью система управления сравнивает расчетное потребное число автомобилей на маршруте  $A_p$  с фактическим  $A_{\phi}$  и вырабатывает управляющее воздействие в соответствии со следующим алгоритмом:

$$\begin{aligned} \text{если } A_{\phi} > A_p, \text{ то } P_{12} &= 0, P_{83} = 0, P_{89} = 1; \\ \text{если } A_{\phi} < A_p, \text{ то } P_{12} &= 1, P_{83} = 1, P_{89} = 0; \\ \text{если } A_{\phi} = A_p, \text{ то } P_{12} &= 0, P_{83} = 1, P_{89} = 0. \end{aligned} \quad (21)$$

Параметрами этого варианта диспетчеризации является продолжительность периода накопления информации и, как и в первом варианте, периодичность управляющих воздействий.

Рассматриваемая модель, как уже отмечалось, представляет собой в действительности объединение целой группы моделей (движение автомобилей, перемещение груза, воздействие помех, работа системы управления, работа складов). Моделирование перемещения автомобилей и единиц груза осуществляется циклически, каждый раз за интервал времени, равный заданному периоду интегрирования. Для повышения точности моделирования в программу включен блок выявления и устранения ошибки квантования по времени. Перед каждым циклом скорости движения автомобилей, интенсивности погрузки, разгрузки и потребления склада клиента-потребителя изменяются в соответствии с заданным в исходных данных характером воздействия помехи. После выполнения заданного количества циклов моделирования происходит включение контура линейной диспетчеризации, который оценивает обстановку на маршруте и выдает управляющие воздействия путем соответствующего изменения значений вероятностных вентилей  $P_{12}$ ,  $P_{83}$  и  $P_{89}$ .

Моделирование работы склада клиента-потребителя осуществляется непрерывно параллельно с работой маршрута и заключается в определении количества груза в нем с учетом случайного характера поставки и потребления. При этом особо выделяются состояния: отсутствие груза на складе (состояние дефицита) и его переполнение с подсчетом степени и их продолжительности.

Признаком конца моделирования одного дня периода является либо выполнение планового суточного объема перевозок, либо истечение заданного времени в наряде. По любому из этих признаков контур линейной диспетчеризации путем соответствующего переключения вероятностных вентилей начинает снимать автомобили с маршрута и направлять их в парк. Возврат в парк последнего автомобиля не является признаком конца моделирования дня работы в том случае, если время работы склада истекает позднее конца работы маршрута.

В этом случае прекращается только моделирование работы маршрута, работа же склада (в данном случае уже только на расходование груза) продолжается до истечения времени его работы. Аналогично и в начале смены, если склад начинает работу на отпуск позднее, моделируется только работа маршрута и прием груза на склад клиента-потребителя.

После завершения моделирования дня работы всей системы программа производит расчет натуральных и экономических показателей как в целом по маршруту, так и по каждому конкретному автомобилю, а также выдает их на печать вместе с показателями работы склада.

Большой объем информации, выводимой на печать в конце каждого дня работы, в ряде случаев может усложнить работу с моделью, поэтому в программе предусмотрены четыре метки блокировки печати отдельных групп данных. Это дает возможность пользователю программы выводить на печать только те показатели, которые его интересуют в каждом конкретном случае.

После выдачи результатов дня работы программа передает управление в контур сменно-суточного планирования и приступает к моделированию следующего дня работы точно так же, как это было описано.

Признаком окончания моделирования всего заданного периода служит либо выполнение заданного планового объема перевозок на весь период, либо завершение моделирования последнего дня работы. В этом случае, завершив печать результатов последнего дня работы, программа вычисляет результирующие показатели за весь период моделирования, выводит их на печать и завершает работу.

На рис. 3 приведен мгновенный снимок экрана компьютера во время работы программы (анимация). В процессе ее работы белые точки (автомобили) перемещаются по маршруту, отображая их передвижение. Также меняются и отображаемые числовые значения.



Рис. 3. Мгновенный снимок экрана компьютера

Использование рассмотренной модели позволяет получить ответы на вопросы по оптимизации технологии, организации и особенно управлению транспортными процессами, если путем обычных расчетов получить их не удастся, а производственный эксперимент слишком дорог и требует больших затрат времени и материальных ресурсов.

По приведенному алгоритму написана программа *Dispm* на языке Fortran. Программа включена в пакет "Прикладных программ по коммерческой и технической эксплуатации автомобилей и транспортной логистике".

Дата поступления  
в редакцию 13.05.2010

L.G. Lavrov, N.A. Kuzmin

## SIMULATION AND CONTROL OF TRANSPORT PROCESSES

The paper gives an application example of economic-mathematical simulation for research and optimization of difficult systems operation. As a test subject a group of vehicles on the float route was selected. The group of vehicles supplies storehouses of clients with various kinds of cargo from the storehouses of providers. The simulation model takes into account the influences of hindrances system and counteraction operative management system (daily planning and linear scheduling). Short descriptions of both algorithms of systems operating, cart-action channel and operational administration system are given in the paper.

*Key words:* simulation, optimization, algorithm, cargo, route, warehouse, system, management, hindrance, scheduling.