

на каждом шаге расчета $P(i)$, затем при расчете от первого шага до последнего определяются оптимальные управления $U(i)$ и конечное состояние системы $P(X)$ при оптимальном управлении.

Таким образом, использование метода динамического программирования позволяет производить совместное планирование поездообразования для произвольного количества станций полигона. При этом для каждой станции определяются такие варианты поездообразования, которые обеспечивают максимальный эффект для полигона в целом.

Получено 05.06.2007

A. A. Erofeev. Mathematical target setting of definition optimum alternative trains makeup on railroad system.

The purpose of trains makeup system and directions of its optimization is determined. It is offered for a choice of optimum variant trains makeup a method of dynamic programming. It is given graphic interpretation problems of formation of trains makeup variants and starch optimum. The mathematical description of range joint trains makeup is given. The range of influence and range of origin of correspondence of traffic volumes are allocated. Loadings are established on system and the parameters describing of trains makeup variant. The vector of a condition of system, an initial condition of system, function of transition and criterion function are determined. Managing influences which may be used by development of variants are established. Technological restrictions, impose on possible combinations of trains makeup variants on stations of range are given. The problem trains makeup is formulated and the sequence of its decision is determined. The opportunity of application of the described mathematical device in the practical purposes is determined.

Приведенная методика может быть использована для разработки управляющих алгоритмов и написания программного обеспечения.

Список литературы

- 1 **Аветикян, А. А.** Потенциал транзитности вагонопотоков / А. А. Аветикян. – М. : Транспорт, 1981. – 191 с.
- 2 **Тишкин, Е. М.** Автоматизация управления вагонным парком / Е. М. Тишкин. – М. : Интекст, 2000. – 224 с.
- 3 **Вол, М.** Анализ транспортных систем / М. Вол, Б. Мартин. – М. : Транспорт, 1981. – 516 с.
- 4 **Грунтов, П. С.** Эксплуатационная надежность станций / П. С. Грунтов. – М. : Транспорт, 1986. – 247 с.
- 5 Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте / под ред. П. С. Грунтова – М. : Транспорт, 1994. – 476 с.

Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2008. № 1 (16)

УДК 656.62(047)

Н. Н. КАЗАКОВ, кандидат технических наук; О. А. ТЕРЕЩЕНКО; ассистент, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ МУЛЬТИМОДАЛЬНОЙ ГРУЗОВОЙ ЛИНИИ

В настоящее время одной из сфер эффективного функционирования водного транспорта Республики Беларусь является использование его в системе мультимодальных перевозок экспортно-импортных грузов. Реализовать данную задачу с максимальным эффектом можно только в том случае, если рассматривать процесс функционирования мультимодальной грузовой линии как объект оптимизации.

Мультимодальная грузовая линия является сложной оптимизируемой системой, одним из методов исследования которых является имитационное моделирование. Изложена концепция создания имитационной модели мультимодальной грузовой линии с участием водного транспорта, построенной по модульному принципу. В качестве модулей предлагается использовать модули двух порядков, адекватно описывающих элементарные технологические операции и укрупненные операции перевозочного процесса.

Имитационная модель мультимодальной грузовой линии, построенная по предложенным принципам, позволяет моделировать параметры организации перевозочного процесса с участием нескольких видов транспорта в зависимости от различных факторов. При использовании результатов моделирования в оптимизационных моделях эксплуатационной науки в качестве исходных данных возникает возможность обоснования оптимальных параметров перевозочного процесса и процессов взаимодействия видов транспорта в зависимости от выбранных критериев.

Материал изложен на примере организации мультимодальной перевозки нефтегрузов Мозырского нефтеперерабатывающего завода в порт Вуковар с участием водного транспорта Республики Беларусь.

Тенденции мирового рынка в настоящее время сложились таким образом, что большинство грузовладельцев отказалось от традиционной системы доставки груза отдельными видами транспорта изолированно друг от друга, перейдя к интегрированной – мультимодальной перевозке. Система

мероприятий организации перевозок грузов и движения подвижных единиц по системе мультимодальных грузовых линий является важным резервом логистической эффективности доставки товара от грузовладельца до потребителя.

Несмотря на то, что мультимодальные и интер-

модальные перевозки широко применяются в мировой практике перевозок, в современной литературе до сих пор дается различное толкование терминологии смешанных перевозок [1]. В этой связи термины, используемые в статье, требуют пояснения и строгого определения.

Мультимодальной называется перевозка груза несколькими видами транспорта, при которой один перевозчик, или оператор, принимает на себя ответственность за всю перевозку груза от поставщика до потребителя, перевозка при этом осуществляется по единому транспортному документу.

На основании синтеза понятия «мультимодальная перевозка», установленного выше, и понятия «грузовая линия», используемого в эксплуатационной науке водного транспорта [2], можно раскрыть суть термина «мультимодальная грузовая линия». Под *мультимодальной грузовой линией* понимается организованная оператором перевозки система транспортного обслуживания грузопотоков прямого и обратного направлений между определенными пунктами погрузки и выгрузки, двумя или более видами транспорта, по единому транспортному документу, когда отправление транспортных единиц регламентировано установленными интервалами отправления (частотами), а их движение – графиком или расписанием.

В любой транспортной системе происходит непрерывный сложный динамический процесс, изменяющийся во времени. То есть к каждому фиксированному моменту времени исследуемая система принимает определенное состояние. Следовательно, процесс функционирования данной системы можно рассматривать как последовательную смену ее состояний. При этом функционирование сложной динамической системы – мультимодальной грузовой линии – представляет собой сочетание выполнения последовательных и параллельных элементарных операций.

Все методы, которые использовались для исследования технологических аспектов функционирования транспортных систем, можно разделить на три группы [3]:

- а) методы, основанные на эмпирических зависимостях;
- б) методы теории массового обслуживания;
- в) методы имитационного моделирования.

Методы исследования систем, основанные на эмпирических зависимостях, достаточно широко применялись до появления аналитического аппа-

рата описания стохастических процессов. Эмпирические зависимости, полученные для конкретных условий, имеют узкое, ограниченное данными условиями применение.

Аналитические зависимости теории массового обслуживания для определения характеристик функционирования систем базируются на относительно простых случаях (пуассоновское распределение входящего потока, одиночные, однородные заявки и т. д.), следовательно, при относительно невысокой детализации исследования специфических свойств системы они являются весьма приближенными.

Точный эксперимент, построение физических аналогов при моделировании систем, в том числе транспортных, связаны с большими затратами времени и средств, а во многих случаях сопряжены со значительными организационными трудностями. В таких случаях в качестве метода исследования различных аспектов функционирования сложной системы рекомендуется использовать методы имитационного моделирования, которые с развитием электронно-вычислительной техники получили широкое распространение в научных исследованиях и в решении практических задач.

В любой транспортной системе происходит непрерывный сложный динамический процесс, изменяющийся во времени, то есть к каждому фиксированному моменту времени исследуемая система принимает определенное состояние. Следовательно, процесс функционирования данной системы можно рассматривать как последовательную смену ее состояний. При этом функционирование сложной динамической системы – мультимодальной грузовой линии представляет собой сочетание выполнения последовательных и параллельных элементарных операций.

При моделировании транспортных систем в целях алгоритмической унификации часто используются принципы построения универсальных имитационных моделей [4]. Главным принципом при построении таких моделей является то, что все элементы изучаемой системы математически описываются единообразно в виде элементарной системы массового обслуживания – модуля.

Схематическое изображение модуля j -го порядка представлено на рисунке 1.

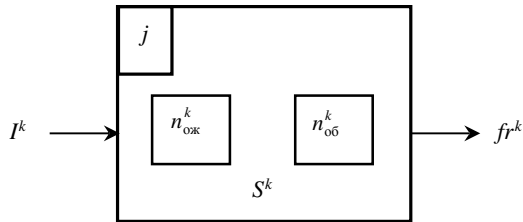


Рисунок 1 – Модуль M^j , описывающий элементарную операцию:

I^k – вектор входящего потока; fr^k – вектор выходящего потока;
 $n^k_{ож}$ – пост ожидания обслуживания; $n^k_{об}$ – пост обслуживания
 заявки; S^k – вектор состояния модуля

Процесс функционирования модуля j -го порядка – это последовательная смена состояний модуля, которая описывается выражением

$$M^j = \left| \begin{array}{l} S^{j-1} \xrightarrow{A^j_{пер}} S^j \\ I^j \xrightarrow{A^j_{преоб}} fr^j \end{array} \right|. \quad (1)$$

В результате нагрузки I^j на модуль посредством алгоритма перехода одного состояния модуля в другое $A^j_{пер}$ вырабатывается вектор нового состояния модуля S^j , а посредством алгоритма преобразования $A^j_{преоб}$ нагрузки в выходящий поток в модуле вырабатывается вектор fr^j выходящего потока. То есть модуль j -го порядка может быть однозначно задан совокупностью векторов I^j , fr^j , S^j , алгоритмов $A^j_{пер}$, $A^j_{преоб}$, задач b , решаемых модулем и множеством моментов делируемого времени t :

$$M^j = (t, b, I^j, fr^j, S^j, A^j_{пер}, A^j_{преоб}). \quad (2)$$

Следовательно, математической моделью системы, используемой для формального описания сопряжения модулей, являются множества

$$\bigcup_{i=1}^{n_{вх}} I, \bigcup_{i=1}^{n_{вых}} fr, \bigcup_{i=1}^{n_{сост}} S, \bigcup_{i=1}^{n_{пер}} A^j_{пер}, \bigcup_{i=1}^{n_{преоб}} A^j_{преоб}, \quad (3)$$

где $n_{вх}$, $n_{вых}$ – соответственно количество входных и выходных потоков системы; $n_{сост}$ – количество возможных состояний системы; $n_{пер}$, $n_{преоб}$ – количество алгоритмов перехода одного состояния в другое и алгоритмов преобразования входящих потоков в выходящие.

На основании модульного принципа описания имитационных моделей формализуется процесс функционирования мультимодальной грузовой

линии (модуля 1-го порядка), модель которой объединяет в себя модули:

– адекватно описывающие элементарные технологические операции (оформление документов, постановка судна на рейд, перевалка из вагонов в суда, маневровые операции с вагонами и т. п.) – модули 3-го порядка;

– характеризующие операции перевозочного процесса (обслуживание железнодорожного подвижного состава на технических станциях, движение флота по участкам; паузка и т. п.) – модули 2-го порядка.

Математически взаимосвязь модулей $(j+1)$ -го порядка, составляющих модуль j -го порядка, может быть записана в следующем виде:

1) при параллельном функционировании m модулей $(j+1)$ -го порядка для решения b -й задачи –

$$M_1^j = \left| \begin{array}{l} M_1^{j+1} \\ M_2^{j+1} \\ \vdots \\ M_m^{j+1} \end{array} \right| = \max_t \{M_i^{j+1}\}; \quad (4)$$

2) при последовательном функционировании m модулей $(j+1)$ -го порядка –

$$M^j = \left| M_1^{j+1} M_2^{j+1} M_3^{j+1} \dots M_m^{j+1} \right| = \sum_t M_i^{j+1}; \quad (5)$$

3) при сочетании параллельного и последовательного функционирования модулей

$$M_1^j = \left| \begin{array}{l} M_1^{j+1} \\ M_2^{j+1} \\ \vdots \\ M_m^{j+1} \end{array} \right| \left| M_{m+1}^{j+1} \dots M_{m+k}^{j+1} \right| = \max_t \left(\max_t \{M_i^{j+1}\}; \sum_t M_{m+i}^{j+1} \right). \quad (6)$$

При формировании имитационной модели мультимодальных грузовых линий элементарные операции могут быть адекватно описаны в виде трех видов модулей [5]: $P/P/n$, $P/P/1/\Pi$ и $P/P/n/\Pi$.

Физический смысл модулей типа $P/P/n$ заключается в следующем: в модуль поступает поток заявок I^j в случайные промежутки времени t . Закон распределения промежутков времени между поступлениями заявок может быть различным. Заявки выстраиваются в очередь и обслуживаются в порядке поступления. Модуль имеет n каналов обслуживания. Длительность обслуживания является случайной величиной. В исследуемой системе примерами модулей типа $P/P/n$ являются: средства механизации (n единиц), обслуживающие транспортное средство; локомотив (или их группа), работающий при накоплении вагонов в парке, и др.

При наличии приоритетного обслуживания заявок модули, характеризующие такие подсистемы, обозначаются $P/P/1/\Pi$ или $P/P/n/\Pi$, в зависимости от числа каналов обслуживания. В такой модуль поступает несколько входящих потоков заявок, каждый из которых подчиняется своему закону распределения. Заявки неравноценны по важности. Законы распределения промежутков времени поступления заявок, а также длительности их обслуживания могут быть различными.

С момента начала широкого применения вычислительной техники методы имитационного моделирования неоднократно применялись для исследования сложных систем, в том числе транспортных, поэтому алгоритмы функционирования

элементарных модулей вышеприведенных типов хорошо себя зарекомендовали и могут быть применимы при формировании модели группы мультимодальных грузовых линий без принципиальных изменений.

На основании обозначений (Mn_i – i -й элементарный модуль типа $P/P/n$, $Mn\Pi_i$ – i -й элементарный модуль типа $P/P/n/\Pi$) и технологии работы транспортных объектов модель операций по доставке груза в мультимодальном сообщении может быть описана в виде выражений (7)–(10). Изложение материала строится применительно к функционированию мультимодальной грузовой линии по доставке продукции Мозырского нефтеперерабатывающего завода в порт Вуковар (Хорватия). Схема водного пути представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Схема водного пути «Припять – Днепр – Дунай»

Модуль «Обслуживание железнодорожного подвижного состава на технических станциях Белорусской железной дороги»:

$$\begin{aligned}
 M_{об\ жс}^2 &= |MkF_1 \left| \begin{array}{c} M1F_1 \\ M1F_2 \end{array} \right| \left| \begin{array}{c} M1F_3 \\ M1F_4 \end{array} \right| M1F_5 \ M1F_6 \ M1F_7| = \\
 &= MkF_1 + \max(M1F_1; M1F_2) + \\
 &+ \max(M1F_3; M1F_4) + \sum_{m=5}^7 M1F_m, \quad (7)
 \end{aligned}$$

где MkF_1 – модуль грузовых операций с вагонами (k – количество каналов, осуществляющих грузовые операции, определяемое технологическим процессом); $M1F_1$ – накопление вагонов на состав; $M1F_2$ – оформление документов в Центре управления транспортным обслуживанием; $M1F_3$ – коммерческий осмотр состава; $M1F_4$ – технический осмотр состава; $M1F_5$ – подготовка состава к отправлению; $M1F_6$ – ожидание нитки графика; $M1F_7$ – отправление поезда.

Модуль «Обслуживание автомобильного подвижного состава»:

$$M_{об\ at}^2 = \left| MkF_1 \ M1F_1 \begin{vmatrix} M1_1 \\ M1F_2 \end{vmatrix} \ M1F_3 \right| = MkF_1 + M1F_1 + \max(M1_1; M1F_2) + M1F_3, \quad (8)$$

где MkF_1 – модуль технического осмотра и обслуживания автомобиля (k – число каналов обслуживания); $M1F_1$ – перемещение автомобиля к складу грузовладельца; $M1_1$ – оформление документов; $M1F_2$ – погрузка груза в автомобиль; $M1F_3$ – коммерческий осмотр груза.

Модуль «Обслуживание белорусского флота в портах Республики Беларусь»:

$$M_{р\ RB}^2 = \left| M1F_1 \ M1_1 \ M1_2 \ M1F_3 \begin{vmatrix} M1F_4 \\ M1F_5 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} M1F_6 \\ M1F_7 \end{vmatrix} \right| M1F_8 \ M1_3 = M1F_1 + \sum_{m=1}^2 M1_m + M1F_3 + M1F_8 + M1_3, \quad (9)$$

где $M1F_1$ – модуль постановки судна на рейд, расформирование состава; $M1_1$ – снабжение судов по системе комплексного обслуживания флота; $M1_2$ – ожидание грузовой обработки; $M1F_3$ – постановка судов к грузовому причалу; $M1F_4$ – грузовые операции; $M1F_5$ – оформление документов; $M1F_6$ – коммерческий и технический осмотры судов; $M1F_7$ – таможенное оформление груза; $M1F_8$ – вывод судна на рейд, формирование состава; $M1_3$ – отправление судна.

По аналогии можно описать все модули 2-го порядка. Тогда модель исследуемой мультимодальной грузовой линии может быть записана как последовательность модулей:

По аналогии можно описать все модули 2-го порядка. Тогда модель исследуемой мультимодальной грузовой линии может быть записана как последовательность модулей:

$$M_{М-В}^1 = \left| M_{об\ жс}^2 \ M_{д\ ж}^2 \ M_{ж-в}^2 \ M_{д\ в\ 1}^2 \ M_{шл1}^2 \ M_{д\ в\ 2}^2 \ M_{шл2}^2 \ M_{д\ в\ 3}^2 \ M_{шл3}^2 \ M_{д\ в\ 4}^2 \ M_{шл4}^2 \ M_{д\ в\ 5}^2 \ M_{шл5}^2 \ M_{д\ в\ 6}^2 \ M_{шл6}^2 \ M_{д\ в\ 7}^2 \ M_{п\ у\ 3}^2 \ M_{д\ в\ 8}^2 \ M_{шл3_1}^2 \ M_{д\ в\ 9}^2 \ M_{шл3_2}^2 \ M_{д\ в\ 10}^2 \ M_{п\ Д}^2 \ M_{д\ в\ 10}^2 \ M_{шл3_2}^2 \ M_{д\ в\ 9}^2 \ M_{шл3_1}^2 \ M_{д\ в\ 8}^2 \ M_{д\ в\ 7}^2 \ M_{шл6}^2 \ M_{д\ в\ 6}^2 \ M_{шл5}^2 \ M_{д\ в\ 5}^2 \ M_{шл4}^2 \ M_{д\ в\ 4}^2 \ M_{шл3}^2 \ M_{д\ в\ 3}^2 \ M_{шл2}^2 \ M_{д\ в\ 2}^2 \ M_{шл1}^2 \ M_{д\ в\ 1}^2 \right|, \quad (10)$$

где $M_{об\ жс}^2$ – модуль обслуживания железнодорожного подвижного состава на станции Барбаров; $M_{д\ ж}^2$ – движение от станции Барбаров до порта Мозырь; $M_{ж-в}^2$ – перевалка контейнеров-цистерн в порту Мозырь; $M_{д\ в\ 1}^2$ – движение по участку порт Мозырь – Киевский шлюз; $M_{шл1}^2$ – шлюзование в

Киевском шлюзе; $M_{д\ в\ 2}^2$ – движение на участке Киевский шлюз – Каневский шлюз; $M_{шл2}^2$ – шлюзование в Каневском шлюзе; $M_{д\ в\ 3}^2$ – движение по участку Каневский шлюз – Кременчугский шлюз; $M_{шл3}^2$ – шлюзование в Кременчугском шлюзе; $M_{д\ в\ 4}^2$ – движение на участке Кременчугский шлюз – Днепродзержинский шлюз; $M_{шл4}^2$ – шлюзование в Днепродзержинском шлюзе; $M_{д\ в\ 5}^2$ – движение по участку Днепродзержинский шлюз – Запорожский шлюз; $M_{шл5}^2$ – шлюзование в Запорожском шлюзе; $M_{д\ в\ 6}^2$ – движение по участку Запорожский шлюз – Нижнекаховский шлюз; $M_{шл6}^2$ – шлюзование в Нижнекаховском шлюзе; $M_{д\ в\ 7}^2$ – движение на участке Нижнекаховский шлюз – порт Херсон; $M_{п\ у\ 3}^2$ – заход в порт Херсон для ожидания разрешения на морской переход; $M_{д\ в\ 8}^2$ – движение на участке порт Херсон – шлюз Железные ворота II; $M_{шл3_1}^2$ – шлюзование; $M_{д\ в\ 9}^2$ – движение на участке шлюз Железные ворота II – шлюз Железные ворота I; $M_{шл3_2}^2$ – шлюзование; $M_{д\ в\ 10}^2$ – движение на участке шлюз Железные ворота I – порт Вуковар; $M_{п\ Д}^2$ – обслуживание флота в порту Вуковар.

Подобная форма описания имитационной модели мультимодальной грузовой линии приобретает особую значимость при осуществлении программной ее реализации, где каждый модуль 2-го или 3-го порядка программируется в виде подпрограммы, процедуры или функции.

Каждый модуль, как было сказано ранее, характеризуется параметрами [см. формулу (1)], идентифицирующими его работу по различным вариантам организации перевозочного процесса. Поэтому для того чтобы модель исследуемой системы адекватно описывала процесс ее функционирования, с учетом специфики каждого входящего в него модуля и технологии обслуживания каждой отдельной заявки, необходимо задавать не только технологические взаимосвязи модулей, но и параметры моделирования их работы, например, вид закона распределения времени обслуживания заявки, параметры этого закона, вид задачи, решаемой модулем, и т. д.

При помощи имитационной модели мультимодальной грузовой линии, сформированной по вы-

шеуказанным принципам, можно исследовать различные аспекты эксплуатации транспортных объектов, вопросы координации и взаимодействия видов транспорта, другие вопросы, например, связанные со спецификой организации мультимодальных перевозок [6]. При этом в зависимости от требуемой от исследователя точности расчетов им может быть выбрана различная степень детализации модели. При дальнейшей детализации модели модули 3-го порядка (технологические операции) могут быть, в свою очередь, представлены как совокупность модулей 4-го, 5-го и высших порядков, однако в этом случае следует учесть, что затраты машинного времени на моделирование такой системы значительно возрастают.

Получено 05.07.2007

N. N. Kazakov, O. A. Tereschenko. Imitating modeling work of the multimodal cargo line.

Now a sailing charter of Byelorussia effectively to use in system of multimodal transportations of export-import cargoes. To realize the given problem with the maximal effect it is possible only in that case if to consider process of functioning of a multimodal cargo line as object of optimization. The multimodal cargo line is difficult optimized system. One of methods of research of this system is imitating modelling. In article the concept of creation of imitating model of a multimodal cargo line with participation of a sailing charter is stated. It constructed by a modular principle. It is offered to use modules of 2 orders which describe elementary technological operations and the integrated operations of transportation process. The imitating model of a multimodal cargo line which is described in article allows to model parameters of the organization of transportation process with participation of several types of transport thus depending on various factors. The received results can be used in models of an operational science as the initial data. The opportunity of a substantiation of optimum parameters of transportation process and processes of interaction of types of transport is achieved depending on the chosen criteria. The material is stated by the example of the organization of multimodal transportation of petrocargoes Mozyr of an oil refining factory in port Vukovar with participation of a sailing charter of Byelorussia.

Список литературы

- 1 **Куренков, П. В.** Терминология смешанных перевозок / П. В. Куренков, А. В. Курбатова // Железнодорожный транспорт. – 1998. – № 7. – С. 66–68.
- 2 **Мальшкин, А. Г.** Организация и планирование работы речного флота / А. Г. Мальшкин. – М.: Транспорт, 1985. – 215 с.
- 3 **Уртминцев, Ю. Н.** Организация работы речного флота в условиях рынка (проблемы методологии) : дис. ... докт. техн. наук. 05.22.19 / Ю. Н. Уртминцев, Волжск. гос. акад. водн. трансп. – Н. Новгород, 2003. – 452 с. : ил.
- 4 **Бусленко, Н. М.** Моделирование сложных систем / Н. М. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 395 с.
- 5 **Тютюнов, Ю. П.** Исследование технологии работы железнодорожных узлов методом имитационного моделирования : дис. ... канд. техн. наук. 05.22.08 / Ю. П. Тютюнов, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель, 1995. – 249 с. : ил.
- 6 **Казаков, Н. Н.** Исследование эффективности освоения грузопотоков речным транспортом Республики Беларусь / Н. Н. Казаков // Комплексная эксплуатация видов транспорта: междунар. сб. науч. тр. / Белорус. гос. ун-т трансп. ; под ред. А. А. Михальченко. – Гомель : БелГУТ, 2004. – С. 71–77.