

А.М. Валуев**ЕДИНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ
И УПРАВЛЕНИЮ ДВИЖЕНИЕМ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА***

Проанализированы возможности различных подходов к моделированию транспортных систем. Рассмотрена проблема представления с единых позиций движения технологического транспорта по пространственно распределенному производственно-логистическому объекту. Предложена общая модель транспортного процесса в формализме гибридных систем (событийно-переключаемых процессов), т.е. управляемых динамических систем с качественно-количественной динамикой, состояния которых изменяются на гиперповерхностях переключения. Проиллюстрированы элементы общей модели на примере динамики и выбора управлений для транспортных средств, загружаемых и разгружаемых накопителей грузов. Описаны возможные способы описания и выбора управления – в виде заданных законов управления, в т.ч. реализующих различные алгоритмы оперативно-диспетчерского управления, выбора управлений в интерактивном процессе и решения локальных задач оптимального управления. Описаны возможности использования модели для текущего прогноза и оперативного управления и организация имитационного моделирования исследуемых систем в целях обоснования параметров системы управления и самой управляемой системы. Рассмотрены вычислительные аспекты выполнения расчетов на модели в режиме прогноза и при решении задач оптимального управления.

Ключевые слова: технологический транспорт, производственная система, логистическая система, транспортная сеть, оперативно-диспетчерское управление, гибридная система, имитационное моделирование, оптимальное управление.

Введение

Существует большое количество пространственно распределенных систем, в которых перемещение грузов технологическим транспортом в их пределах составляет значительную долю их производственной деятельности. К их числу могут быть отнесены крупные карьеры минерального сырья, порты и сортировочные станции. Моделирование транспортного процесса (и смежных с ним погрузочно-разгрузочных процессов) в таких производственно-логистических системах может преследовать различные цели – от обоснования текущей расстановки транспортных средств (ТС) по грузопо-

токам до проектирования транспортной системы предприятия. Использование для этой цели вычислительной техники и вычислительных экспериментов прослеживается с 1960-х гг. [1]. Тем не менее многочисленные работы характеризуются, прежде всего, выявлением и использованием логики индивидуального процесса или сравнительно узкой сферы транспортных процессов [2–5].

Общепотребительные средства имитационного моделирования процессов типа GPSS мало отвечают двойственному, дискретно-непрерывному характеру динамики транспортных процессов, в которых сочетается движение

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования науки РФ в рамках базовой части государственного задания № 2014/113 НИТУ «МИСиС» (проект № 952).

отдельных ТС по однородным участкам транспортной сети, которое, как и процессы погрузки и разгрузки, естественно описывать с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений, с изменением качественного состояния движения (номера участка и, возможно, направления движения) в коммутаторах – местах сопряжения или пересечения участков. Аналогично качественное состояние (поведение) отдельного ТС изменяются в момент достижения пункта погрузки или разгрузки, а также в момент окончания погрузочного или разгрузочного процесса. В эти моменты процесс движения сменяется другим технологическим процессом. Такие качественные изменения (переключения) применительно к конкретному ТС происходят мгновенно, несколько раз за рейс; в описывающие их соотношения входят лишь значения переменных состояния в момент переключения (и, возможно, значения связанных с переключением переменных управления). Отсюда видно, что поведение такой системы как единого целого наиболее естественно описывается в форме гибридной, т.е. сочетающая качественную и количественную динамику, управляемой системы.

Гибридные системы как модели управляемых процессов движения были предложены отечественной научной школой еще в 1960-е гг. [6], однако такие модели, с фиксированным количеством участников движения на каждом этапе и с фиксированной последовательностью этапов, слишком просты для рассматриваемого применения. В моделях исследуемых транспортных процессов должно быть отражены следующие черты:

1. непостоянство состава участников процесса во времени (выход на линию собственных ТС и поступление транспортных средств извне);

2. однотипность поведения: участники процесса делятся на небольшое

количество классов, элементы каждого из которых различаются лишь своими параметрами;

3. последовательность качественных состояний для каждого участника процесса не фиксирована (например, такие состояния, как ожидание на коммутаторе, в пункте выгрузки и погрузки, возникают в зависимости от обстановки, в которой совершается очередной рейс);

4. управление может быть локальным (для одного участника процесса) или нелокальным (действие различных регулирующих устройств), распределенным во времени (текущее управление ТС) или одномоментным (назначение направления движения), дискретным или непрерывным по значениям, наконец, соответствующим заданному закону управления или определяемым из решения каких-либо локальных задач.

В силу наличия этих общих черт, не привязанных к конкретной системе, может быть введен класс моделей транспортного процесса в формализме гибридных систем на основании использования и обобщения опыта построения моделей дискретного автотранспортного потока, развитых в последние годы [7–9].

Следует отметить, что для целей имитационного моделирования различного рода массовых процессов, в т.ч. и процессов рассматриваемого типа, в последние годы широко применяется подход, называемый агентным моделированием. Этот подход основан на типизации объектов (с возможностью придания индивидуальных черт поведению отдельных объектов любого класса) и описании их поведения, а также взаимодействия с единичными объектами других классов. В рамках агентного подхода последнее может быть воспроизведено уже со значительными ограничениями. Но так удобно описывать лишь простое поведение

и взаимодействие, а поведение объектов, являющееся результатом решения задач управления, зависящих от параметров нескольких объектов, воспроизвести такими средствами затруднительно. В последнее время была выдвинута концепция представления технологического транспорта как системы самообучающихся интеллектуальных агентов [10], однако опыт ее применения пока неизвестен.

Кроме того, агентный подход не предполагает создание цельной модели, что, конечно, упрощает его компьютерную реализацию, зато и делает невозможным качественное (аналитическое) исследование поведения изучаемой системы и его зависимости от различных параметров.

Особенно стоит подчеркнуть возможности применения предлагаемой модели в ее конкретном выражении как средства прогноза и управления технологическими процессами. Несмотря на то, что непосредственное управление транспортными средствами выполняется их водителями (машинистами), центр оперативно-диспетчерского управления может предлагать водителям определенные временные рубежи на или желательные скорости движения для текущего рейса и его отдельных участков, обеспечивающие более эффективное использование таких ресурсов, как горючее или рабочее время машин или повышающие надежность выполнения производственных заданий. Для этого на модели могут ставиться и решаться многие частные и сравнительно простые задачи управления. Например: выбрать траекторию автосамосвала с минимальными затратами горючего от текущего положения до закрытого шлагбаума, зная период, на который он будет закрыт. Или, наоборот, обеспечить наиболее ранний момент прибытия под погрузку при заданном ограничении на расход горючего.

Общая модель транспортного процесса в производственно-логистической системе

Рассматриваемый тип транспортных процессов имеет как общие черты, так и отличия от автотранспортных потоков. Количественные отличия заключаются в относительной малочисленности ТС в производственной системе по сравнению с количеством движущихся автомобилей в городских дорожных сетях или на автомагистралях, соединяющих города. Отсюда вытекает то, что отсутствуют условия для регулярного формирования движущихся очередей (кластеров) – цепочек из следующих друг за другом на безопасном расстоянии ТС. Тем не менее, условия безопасности как связь между положениями и скоростями следующих друг за другом ТС должны быть учтены в моделях.

Основная качественная особенность рассматриваемых транспортных процессов заключается в возможности прямого централизованного управления всем парком ТС (по крайней мере в отношении назначения маршрутов). Непосредственное управление транспортными средствами со стороны их водителей при движении по назначенному маршруту также может быть регламентировано.

Активными элементами технологического процесса, изменяющими свое состояние непрерывным и (или) дискретным образом, являются:

1. транспортные средства;
2. последовательности (или совокупности) ТС – цепочки ТС на однородном участке транспортной сети, очереди на погрузку или разгрузку, очереди перед светофором, шлагбаумом или нерегулируемым коммутатором; совокупности ТС в резерве (в депо, на автобазе);
3. коммутаторы и управляющие ими регуляторы;
4. склады или иные накопители грузов (например, блоки подготовленной

к экскавации горной массы), снабженные погрузочным (выемочно-погрузочным) или разгрузочным оборудованием и соответствующими работниками.

Устройства погрузки и разгрузки рассматриваются как производственные ресурсы типа «механизм», которые могут централизованно закрепляться или динамически распределяться между возможными местами их работы. При этом элементы второго из перечисленных типов являются групповыми, остальные – одиночными.

Предполагается, что активные элементы перемещаются по транспортной сети, заданной в виде ориентированного графа, причем для некоторых сетей допускается переключение направления ее дуг. К отдельным узлам сети могут «прикрепляться» накопители ТС (места нахождения ТС в резерве, места образования очередей на погрузку или разгрузку).

Каждый (i -й) активный элемент характеризуется векторами параметров p_i , качественного состояния d_i и фазовым вектором x_i , компоненты которого непрерывно изменяются на этапе постоянства d_i и могут изменяться скачкообразно в момент переключения – смены значения d_i . При этом для групповых элементов может изменяться размерность d_i .

Двойственный характер динамики может быть проиллюстрирован как на примере движения ТС по маршруту, так и в отношении длительных погрузочных или разгрузочных процессов (например, заполнения или разгрузки железнодорожного состава – «подачи»). В простейшем случае, для прямолинейного горизонтального участка, без учета взаимосвязи между перемещениями ТС на одном участке, они могут быть описаны уравнениями ньютоновой механики относительно сетевой координаты s_i – расстояния от начала участка сети – и скорости, в которых ускорение является переменной управ-

ления; совместно с ними используются уравнения динамики массы горючего m_i и груза M_i в процессе движения по участку:

$$\dot{s}_i = v_i, \quad \dot{v}_i = a_i, \quad \dot{m}_i = F_{mi}(a_i, v_i), \quad \dot{M}_i = 0.$$

Напротив, в процессе загрузки, при использовании ресурсов-механизмов в количестве R_{MLi} (это может быть дискретная или непрерывная, скалярная или векторная переменная или константа), действуют уравнения динамики M_i

$$\dot{M}_i = F_{MLi}(R_{MLi}).$$

А при разгрузке – соответственно

$$\dot{M}_i = -F_{MULi}(R_{MULi}).$$

И при этом в обоих случаях

$$\dot{s}_i = 0, \quad \dot{v}_i = 0, \quad \dot{m}_i = 0.$$

Для саморазгружающихся ТС, если время процесса разгрузки не является пренебрежимо малым, используется другая переменная состояния – время с начала процесса разгрузки. Если же временем разгрузки пренебрегают, то событие начала и конца разгрузки отождествляются и их наступление влечет за собой мгновенное изменение значения M_i до нуля.

В целом, качественные изменения в транспортно-логистическом процессе состоят в окончании процесса погрузки или разгрузки, достижении коммутатора, служащего границей участка, перемещении в очереди, остановки (например, перед закрытым шлагбаумом) или возобновления движения и, возможно, изменения режима движения (таких, как набор скорости, равномерное движение, снижение скорости, движение в хвосте у предшествующего ТС). Далее они называются переключениями, т.к. они изменяют качественное состояние активного элемента или нескольких активных элементов.

Условием переключения как правило, является достижение монотонно

изменяющейся величиной своего порогового значения, а в общем случае – достижением траекторией гиперповерхности переключения в пространстве состояний. При движении по участку сети монотонно. Например, при движении ТС по участку сети величина s_i монотонно возрастает и переключение происходит, когда она станет равной длине участка, при разгрузке M_i монотонно убывает и разгрузка заканчивается, когда она упадет до 0, при движении ТС со скоростью, более высокой, чем предшествующее ТС, разница между текущим и минимальным безопасным расстоянием, зависящим от скоростей обоих ТС, монотонно убывает, пока не упадет до 0. Для последнего случая как раз и определяется гиперповерхность переключения:

$$S_{\text{SAFE}}(v_{i-1}(t), v_i(t), p_i) = s_{i-1}(t) - L_i - s_i(t).$$

Транспортный процесс разбивается моментами переключения состояния своих активных элементов – одиночных, групп и ТС в составе групп – на временные этапы, внутри которых характер динамики постоянен. Как одиночные элементы, так и ТС в составе очереди между переключениями, непосредственно их затрагивающими, подчиняются обыкновенным дифференциальным уравнениям с непрерывными, непрерывно дифференцируемыми правыми частями, зависящими от текущего качественного состояния d . Т.е., для l -го этапа

$$dx_i(t, l) / dt = f_i(d(l), x(t, l), u_i(t, l)), \quad (1)$$

где

$$u_i(t, l) \in A_{U_i}(d(l), x(t, l)). \quad (2)$$

Для регулятора-переключателя фазовой переменной является время нахождения в текущем состоянии. Применительно к таким фазовым переменным легко охарактеризовать переключения по заданной временной программе и некоторые другие виды переключения

(например, переключение железнодорожного светофора через определенное время после прохождения состава). Компоненты вектора $d(l)$ характеризуют состояния переключателей, очередей в целом, режим движения и другие характеристики отдельных ТС, например, номер предшествующего ТС в своей очереди.

В форме (1) может быть выражена и динамика состояния переключателей, но в этом случае зависимость правой части от управления отсутствует.

Очередное переключение, завершающее этап, и его момент $T(l)$ – определяются альтернативными условиями

$$\begin{aligned} g_{j(l)}(d(l), x(T(l), l), T(l)) &= 0, \\ j(l) &\in J(d(l)), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} g_j(d(l), x(T(l), l), T(l)) &< 0, \\ j &\in J(d(l)) \setminus \{j(l)\}. \end{aligned} \quad (4)$$

При этом предполагается, что

$$\begin{aligned} dg_j(d(l), x(t, l), t) / dt &> 0, \\ j &\in J(d(l)), \end{aligned} \quad (5)$$

если

$$0 \geq g_j(d(l), x(t, l), t) \geq -G_j. \quad (6)$$

Результатом переключения является изменение состояния нескольких компонент векторов d и, возможно, x (заметим, что ТС, перейдя из одной очереди в другую, изменяет переменную своего положения, поскольку она теперь измеряется относительно носителя новой очереди). Набор изменяемых компонент зависит от типа переключения и $d(l)$. Остальные компоненты сохраняют свои значения:

$$\begin{aligned} d_i(l+1) &= D_{j(l)}(d(l), v_{D_{j(l)}}(l)), \\ i &\in I_{D_{j(l)}}(d(l)), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} d_i(l+1) &= d_i(l), \\ i &\notin I_{D_{j(l)}}(d(l)), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 & x_i(T(l), l+1) = \\
 & = X_{j(l)}(d(l), x(T(l), l), T(l), v_{Dj(l)}(l), u_{Dj(l)}(l)), \\
 & i \in I_{X_{j(l)}}(d(l)), \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & x_i(T(l), l+1) = x_i(T(l), l), \\
 & i \notin I_{X_{j(l)}}(d(l)). \quad (10)
 \end{aligned}$$

На состояние после переключения могут влиять вектора управления переключением – соответственно с дискретнозначными $v_{Dj(l)}(l)$ и вещественными $u_{Dj(l)}(l)$ компонентами, подчиняющимися ограничениям

$$v_{D_i}(l) \in A_{v_{D_i}}(d(l)), \quad (11)$$

$$u_{D_i}(l) \in A_{u_{D_i}}(d(l), x(t, l), T(l)). \quad (12)$$

Ограничивая период рассмотрения временным диапазоном $[T_0, T_1]$ имеем в качестве начального условия

$$T(0) = T_0 \quad (13)$$

а для определения количества этапов условие

$$T(N) = T_1 \quad (14)$$

которое, как легко видеть, имеет форму условия (3). Таким образом, определена общая модель (1)–(14) транспортно-логистического процесса с транспортом циклического действия.

Заметим, что будучи по своей форме детерминированной, она тем не менее определяет случайный процесс, если управления задать как случайные величины и функции.

Возможные способы применения предложенной модели

С помощью моделей в форме (1)–(14) можно решать разнообразные задачи, связанные с выбором всевозможных параметров транспортно-логистической системы, организации транспортного процесса и управления им. Диапазон сложности этих задач может простирается от решения текущих и

локальных вопросов, начиная с выбора маршрута очередного рейса отдельного ТС и заканчивая обоснованием построения системы управления транспортным процессом и всей производственной или логистической системой в целом.

Как средство прогноза развития текущей ситуации модель требует знать исходное состояние всех активных элементов системы и определить выбор управлений $u_i(t, l)$, $v_{Dj(l)}(l)$ и $u_{Dj(l)}(l)$, подчиняющихся соответственно ограничениям (2), (11) и (12). Этот выбор может быть задан вручную оператором (диспетчером) или определяться принятыми предположениями о выборе управления – законами управления отдельными элементами системы. Под последними понимают «математическую форму преобразования задающих воздействий, возмущений, воздействий обратных связей, определяющего управляющие воздействия» [11, с. 9]. Законы управления могут быть заданы либо в виде формул, либо определены как решения простых частных задач выбора управления на основе модели. В частности, можно предположить, что водителям предписан режим наиболее эффективного расхода горючего, следование которому приводит к разным режимам управления ТС: набор скорости по заданной программе, равномерное или квазиравномерное движение со скоростью, обеспечивающей наименьший километровый расход горючего (при заданном наклоне и кривизне трассы) и снижение скорости до нуля или заданного значения на заданном рубеже, также по заданной программе. Последний возможный режим – поддержания минимальной безопасной дистанции до предшествующего ТС. Пример представления перехода между такими режимами и выбора управления в каждом из них с использованием соотношений типа (1)–(10) описан в работе [9]. С другой стороны, выбор

управлений переключениями на основе ограничений (11)–(12) может быть либо сделан вручную или подчинен заданному алгоритму оперативно-диспетчерского управления. Скажем, устанавливается нормативное время движения для каждой пары (коммутатор, место погрузки). ТС, достигающее очередного коммутатора, направляется к свободному или освобождающемуся до момента его возможного прибытия месту погрузки, к которому оно может прибыть раньше всех. Или же устанавливается приоритет транспортного обслуживания мест погрузки, и рейсы определяются в соответствии с ним.

При текущем управлении процессом краткосрочный прогноз может быть сделан на основе детерминированного представления модели, особенно если попутно нужно выбрать свободные управления, выполнив сопоставление возможных вариантов управления. При наличии достаточных вычислительных ресурсов может быть выполнен и многократный расчет реализаций транспортного процесса при вероятных отклонениях управления от номинального.

Более сложный случай употребления модели для текущего управления состоит в выборе программных управлений вместо стандартных режимов для отдельных активных элементов, исходя из текущих показателей эффективности функционирования управляемой системы. При фиксации программных управлений или законов управления для большей части активных элементов, для которых изменение управления в текущей обстановке невозможно или нецелесообразно, выбор управлений для остальных подчиняется требуемой задаче оптимизации на модели (1)–(14) с малым временным горизонтом порядка длительности одного рейса. Последовательность возможных переключений оказывается либо фиксированной, либо сводится к немногим

вариантам. Задача оптимизация выбираемых управлений является по форме близкой задаче, постановка и метод решения которой представлены в работе [6], а при определении $u_i(t, l)$ постоянными на этапе – к задаче, рассмотренной в работе [12]. Даже при наличии вычислительных возможностей не следует увеличивать временной горизонт решаемых задач, т.к. из-за неизбежного накопления значительных отклонений фактического состояния от расчетного за ряд транспортных циклов, делающих рассчитанные управления нереализуемыми.

Если же нужно обосновать параметры системы управления и самой управляемой системы, то протекание процесса в целом в течение характерного периода (например, суток) нужно имитировать на модели с учетом предполагаемых способов выбора управления, предполагая случайные отклонения фактических управлений от заданных.

В заключение следует отметить, что хотя модель (1)–(14) по своей форме представляется довольно громоздкой, ее численный расчет как в режиме прогноза с известными законами управления, так и при оптимизации отдельных управлений сводится к выполнению очень небольшого набора вычислений известных типов. Главная особенность состоит в том, что интегрирование системы обыкновенных дифференциальных уравнений частично сочетается с решением нелинейных уравнений (3). Однако на траекториях (1) соотношения (3) представляют собой уравнения от скалярного аргумента – времени, причем их левые части, согласно предположениям (5), монотонно возрастают по t . Выполняя численное интегрирование (1) с помощью разностных схем Рунге-Кутты, но с переменным шагом интегрирования, мы без труда определим расчетные формулы для $g_j(d(l), x(t, l), t)$, с помощью которых

корень можно найти методом секущих. При необходимости можно определить и формулы для $dg_j(d(l), x(t, l), t) / dt$ [13], что позволит воспользоваться и другими методами. Что касается задач оптимального управления на модели (1)–(14), то при фиксации последова-

тельности переключений и использования разностных схем с переменным шагом интегрирования они аппроксимируются задачами дискретного оптимального управления со смешанными ограничениями, методы решения которых отработаны [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев М.В., Яковенко Б.В., Яковлев В.Л. Опыт планирования работы карьерного транспорта с использованием математических методов и вычислительной техники. – М.: Недра, 1966. – 52 с.
2. Полянский В.М. Имитационное моделирование транспортных систем: Учебное пособие. – СПб.: СПГУВК, 1998. – 161 с.
3. Абрамов А.А. Математическое моделирование транспортных процессов: Учебное пособие – М.: РГОТУПС, 2002. – 127 с.
4. Просов С.Н. Модель кольцевой маршрутизации перевозок грузов помашинными отправлениями: Лабораторный практикум по курсу «Моделирование транспортных систем». – М.: МАДИ (ГТУ), 2004. – 40 с.
5. Мороз А.И. Модель динамики транспортных объектов на железнодорожной сети // Транспорт: наука, техника, управление. – 2009. – № 7. – С. 14–18.
6. Величенко В.В. О задачах оптимального управления для уравнений с разрывными правыми частями // Автоматика и телемеханика. – 1966. – № 7. – С. 20–30.
7. Глухарев К.К., Улюков Н.М. К теории автомобильных потоков // Труды МФТИ. – 2010. – Т. 2. – № 2. – С. 58–66.
8. Глухарев К.К., Валуев А.М., Калинин И.Н., Улюков Н.М. О моделировании автомобильных потоков на магистральной сети // Труды МФТИ. – 2013 – Т. 5. – № 4. – С. 102–114.
9. Валуев А.М. Моделирование транспортных процессов в формализме гибридных систем / Труды XIII Всероссийского Совещания по проблемам управления ВСПУ-2014. 16–19 июня 2014 г. – М., 2014. – С. 5033–5043.
10. Темкин И.О., Клебанов Д.А. Интеллектуальная система управления горнотранспортными комплексами: современное состояние, задачи и механизмы решения // Горный информационно-аналитический бюллетень. ОВ1. – 2014. – С. 257–266.
11. Теория управления. Терминология. Сборники рекомендуемых терминов, вып. 107 / Отв. ред. Б.Г. Волик. – М.: Наука, 1988. – 56 с.
12. Valuev A.M. A new model of resource planning for optimal project scheduling // Mathematical Modelling and Analysis. – 2007. – Vol. 12. – No. 2. – P. 255–266.
13. Birgin E., Evtushenko Yu. Automatic differentiation and spectral projected gradient methods for optimal control problems // Optimization Methods and Software. – 1998. – Vol. 10. – No. 2. – P. 125–146.
14. Валуев А.М. Численный метод для многошаговых задач оптимизации с пошаговым вычислением направлений спуска // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1987. – Т. 27. – № 10. – С. 1474–1488. **ПЛАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Валуев Андрей Михайлович – доктор физико-математических наук, доцент, профессор, e mail: valuev.online@gmail.com, НИТУ «МИСиС».

UDC 656.021

UNIFIED APPROACH TO MODELLING AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL TRANSPORT

Valuev A.M., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor, Professor, e mail: valuev.online@gmail.com, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

Possibilities of different approaches to transportation systems modelling are analyzed. The main topic of the paper is the problem of general representation of technological transport motion within a spatially distributed industrial and/or logistic object. The general model of such transportation process is developed in the form of a hybrid system (an event-switched process), i.e., a system with qualitative and quantitative dynamics which state changes on switching hypersurfaces. The model is a set of relationships of the following types: 1) ordinary differential equations representing continuous dynamics of active elements while the qualitative state does not change; 2) condition of switching, i.e., qualitative changes of the process in question; 3) formulas of state transformations due to switching events; 4) constraints on controls, pertaining both to stages between switching events and to switching events. Elements of the general model are exemplified with representation of dynamics and control choice for transportation units and loaded or unloaded stores (concentrators).

Different ways of description and choice of controls are presented, namely as given control laws that may express different algorithms of operative dispatch, interactive control choice and solution of local optimum control problems. Possibilities of the model use for current prognosis and operative control as well as organization of simulation aimed at substantiation of both control system and the controlled system itself. Computational aspects of the model usage are treated both for prognosis and optimum control problems solution.

Key words: technological transport, manufacturing system, logistics system, transportation network, operative control, hybrid system, simulation, optimum control.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was supported by the RF Ministry of Education and Sciences in the framework of basic part of state-assigned task No 2014/113 to MIS&S (Project No. 952).

REFERENCES

1. Vasil'ev M.V., Yakovenko B.V., Yakovlev V.L. *Opyt planirovaniya raboty kar'ernogo transporta s ispol'zovaniem matematicheskikh metodov i vychislitel'noy tekhniki* (Experience of quarry transport operation planning with the use of mathematical methods and computing machinery), Moscow, Nedra, 1966, 52 p.
2. Polyanskiy V.M. *Imitatsionnoe modelirovanie transportnykh sistem: Uchebnoe posobie* (Simulation of transportation systems. Educational aid), Saint-Petersburg, SPGUVK, 1998, 161 p.
3. Abramov A.A. *Matematicheskoe modelirovanie transportnykh protsessov: Uchebnoe posobie* (Mathematical modelling of transportation processes. Educational aid), Moscow, RGOTUPS, 2002, 127 p.
4. Prosov S.N. *Model' kol'tsevoy marshrutizatsii perevozok gruzov pomashinnymi otpravkami: Laboratornyy praktikum po kursu «Modelirovanie transportnykh sistem»* (Model of annular routing of cargo transportation by separate truck dispatch: laboratory workshop manual for discipline «transport systems modelling»), Moscow, MADI (GTU), 2004, 40 p.
5. Moroz A.I. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*. 2009, no 7, pp. 14–18.
6. Velichenko V.V. *Avtomatika i telemekhanika*. 1966, no 7, pp. 20–30.
7. Glukharev K.K., Ulyukov N.M. *Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta*. 2010, vol. 2, no 2, pp. 58–66.
8. Glukharev K.K., Valuev A.M., Kalinin I.N., Ulyukov N.M. *Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta*. 2013, vol. 5, no 4, pp. 102–114.
9. Valuev A.M. *Trudy XII Vserossiyskogo Soveshchaniya po problemam upravleniya VSPU-2014*. 16–19 iyunya 2014 (Proceedings of All-Russian Conference on Problems of Control ACPC-2014. 16–19 June 2014), Moscow, 2014, pp. 5033–5043.
10. Temkin I.O., Klebanov D.A. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. Special issue 1. 2014, pp. 257–266.
11. *Teoriya upravleniya. Terminologiya. Sborniki rekomenduemykh terminov*, vyp. 107. Otv. red. B.G. Volik (Control theory. Terminology. Collections of recommended terms, issue 107. Volik B.G. (Ed.)), Moscow, Nauka, 1988, 56 p.
12. Valuev A.M. A new model of resource planning for optimal project scheduling. *Mathematical Modelling and Analysis*. 2007, vol. 12, no 2, pp. 255–266.
13. Birgin E., Evtushenko Yu. Automatic differentiation and spectral projected gradient methods for optimal control problems. *Optimization Methods and Software*. 1998, vol. 10, no 2, pp. 125–146.
14. Valuev A.M. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki*. 1987, vol. 27, no 10, pp. 1474–1488.

