

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

УДК 656.22; 004.896

А. А. ЕРОФЕЕВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, А. Ф. БОРОДИН, доктор технических наук, АО «Институт экономики и развития транспорта», г. Москва

МОДЕЛИ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПОИСКА УПРАВЛЯЮЩИХ РЕШЕНИЙ В ИСУПП

Определены виды управления в интеллектуальной системе управления перевозочным процессом. Установлено, что информация, используемая при плановом управлении, обладает преимущественно алеаторной неопределенностью, а при диспетчерском управлении – эпистемологической. Приведены функции оценки эффективности управляющих решений при плановом и оперативном управлении перевозочным процессом. Предложено в зависимости от вида управления и типа используемой информации поиск эффективных управляющих решений выполнять с использованием априорных и апостериорных моделей. Определены структуры моделей и состав гибридных решателей задач.

В зависимости от наличия полной и достоверной информации о ходе перевозочного процесса и складывающейся эксплуатационной обстановки на железнодорожном транспорте используют различные виды управления. Всё их множество можно разделить на две основные группы: плановые и оперативные [1–3].

Формирование управляющих решений (УР) в интеллектуальной системе управления перевозочным процессом (ИСУПП) как при плановом, так и при оперативном управлении сопряжено с отсутствием полной и достоверной информации о ходе перевозочного процесса (ПП), а отдельные параметры или показатели качества являются неопределенными или случайными [4–6]. В связи с этим при формировании УР в условиях неполной информации необходимо учитывать информационную структуру эксплуатационной задачи, определяемую последовательностью процедур сбора информации, методов ее обработки и формирования УР.

Если формирование УР предшествует процедуре сбора информации (информация не успевает поступить до момента принятия решения), то УР определяется на основании статистических характеристик или известной выборкой возможных значений параметров. В таком случае выбор УР не зависит от текущих параметров внешней объектной среды и объекта управления. Например, при разработке плана формирования поездов в качестве исходных данных используются прогнозные значения параметров вагонопотоков, а не фактические. Если формирование УР следует после сбора информации, то при его разработке необходимо учитывать как исходные данные, так и эффективность уже реализованных УР. Например, управление расформированием составов на сортировочных горках.

Таким образом, информацию, используемую при разработке УР в ИСУПП предлагается разделить на априорную (не связанную с текущими параметрами объекта управления и окружающей среды) и апостериорную (появляется в результате сбора информации за объектом и средой). Информация первого типа используется преимущественно при решении эксплуатационных задач (ЭЗ) долго- и среднесрочного планирования. Решение задач оперативного детального планирования, диспетчерского управления, управления технологиче-

скими процессами в режиме реального времени требует использования апостериорной информации.

Классически выделяются две стороны неопределенности информации [7]:

- алеаторная неопределенность, непосредственно связанная с объектом управления;
- эпистемологическая неопределенность, связанная с отсутствием у субъекта полных знаний об объекте управления.

Алеаторная неопределенность обусловлена эволюцией свойств и поведения объекта. Данный вид неопределенности является неотъемлемым свойством объектов управления ИСУПП, обусловленным действием случайных факторов. Алеаторную неопределенность невозможно исключить полностью, а можно говорить о снижении неопределенности до конкретного уровня, достаточного с точки зрения процедуры принятия УР.

Эпистемологическая неопределенность является свойством объекта управления (ОУ) и может быть снижена за счет получения дополнительных сведений о его характеристиках и поведении. Данная неопределенность снижается за счет совершенствования системы сбора, хранения и обработки информации. Эпистемологическая неопределенность больше характерна для апостериорных моделей.

Плановое управление предусматривает процедуры разработки плана (в зависимости от величин эксплуатационной нагрузки, наличия ресурсов, условий окружающей среды) и последующую его реализацию в установленном периоде времени. При плановом управлении используется априорная, заранее собранная информация и имеется достаточно продолжительный период времени на разработку эффективного УР.

Наличие априорной информации и времени на ее обработку обеспечивает [8]:

- возможность заблаговременно определять потребность в необходимых ресурсах для реализации плана и (или) выбирать такой план действий, который можно реализовать с учетом имеющихся ресурсов;
- выбор более эффективных (адекватных) управлений за счет возможности использования методов поиска оптимальных решений, которые требуют значительных затрат времени (в том числе на этапе сбора информации);

- использование временного резерва на подготовку системы к реализации эффективного планового решения;
- максимальный эффект (минимум негативных последствий) при использовании плановых УР в смежных подсистемах ИСУПП, в том числе появляется возможность получения синергетического эффекта.

Недостатками планового управления являются:

- априорная информация имеет алеаторную неопределенность и не всегда адекватно и с необходимой степенью детализации описывает объект, предмет и среду управления;

- при планировании априорная информация дополняется прогнозной, так как момент начала разработки плана наступает раньше момента начала реализации и тем более момента окончания планового периода. В предельных случаях суммарный результат от реализации планов, полученных более эффективными «плановыми методами» может быть хуже результатов, полученных оперативными методами за счет значительной величины погрешности прогнозных исходных данных;

- плановое управление не позволяет в полной мере учесть неформализованное воздействие в системе управления (например, случайное влияние человеческого фактора или значимые изменения погодных условий);

- большие затраты времени (в некоторых случаях) на формирование альтернативных вариантов планов и выбор из них оптимального.

Для компенсации указанных выше недостатков плановое управление должно дополняться оперативным (диспетчерским). Оперативное (диспетчерское) управление ПП позволяет формировать и реализовывать в конкретной эксплуатационной обстановке максимально адекватные УР с учетом наличия апостериорной информации об объектах управления и состоянии внешней объектной среды.

Недостатками оперативного (диспетчерского) управления по сравнению с плановым являются:

- ограниченность выбора УР, так как часть эффективных решений невозможно реализовать из-за отсутствия времени;

- необходимость использования «упрощенных» методов выбора УР, из-за дефицита времени на сбор данных и их обработку;

- длительность цикла управления не всегда позволяет согласовать УР между подсистемами сложной системы.

В ИСУПП должны эффективно сочетаться преимущества плановых и оперативных видов управления и обеспечиваться своевременный переход между ними в зависимости от информационной осведомленности о складывающейся эксплуатационной обстановке.

Оценка эффективности УР будет различаться для планового и оперативного управления.

При плановом управлении производится поиск оптимальных УР с целью достижения максимального экономического результата:

$$F_i^{\text{план}}(\bar{a}_i, \bar{b}_i) = \{F_{1i}(\bar{a}_i, \bar{b}_i), \dots, F_{ji}(\bar{a}_i, \bar{b}_i), \dots, F_{yi}(\bar{a}_i, \bar{b}_i)\} \rightarrow \max \sum E_{ij}, \quad (1)$$

где F_i – вектор критериев оптимальности, характеризующих качество принятия УР на i -м этапе принятия решения; $i = 1, \dots, j$ – число этапов принятия решения;

$\bar{a}_i = \{\bar{a}_{1i}, \dots, \bar{a}_{pi}, \dots, \bar{a}_{ji}\}$ – вектор технических параметров на i -м этапе принятия решения; $\bar{b}_i = \{\bar{b}_{1i}, \dots, \bar{b}_{pi}, \dots, \bar{b}_{ji}\}$ – вектор технологических параметров на i -м этапе принятия решения; $j = 1, \dots, p$ – число подсистем ИСУПП, участвующих в разработке и реализации УР; $Y_i = 1, \dots, W_i$ – число критериев оптимальности на i -м этапе разработки УР; $\sum E_{ij}$ – функция оценки финансового результата от реализации УР на i -м этапе в j -й подсистеме; при установленных технических и технологических ограничениях;

- плановый объем перевозок $\Gamma_i^{\text{план}}$ должен соответствовать заявленному грузопотоку $\Gamma_i^{\text{заяв}}$:

$$\sum \Gamma_i^{\text{план}} = \sum \Gamma_i^{\text{заяв}}; \quad (2)$$

- надежность выполнения планируемых сроков доставки для всех корреспонденций грузопотоков $T_{\text{тех}}$ относительно их нормативных значений $T_{\text{норм}}$ должна стремиться к 1. Для всех корреспонденций

$$P\{T_{\text{тех}} \leq T_{\text{норм}}\} \rightarrow 1; \quad (3)$$

- непревышение потребностей инфраструктурных, путевых ресурсов и перевозочных средств $R_{\text{план}}^z$ относительно их наличного количества $R_{\text{нэл}}^z$ (с учетом горизонта планирования решаемой ЭЗ)

$$\{R_{\text{план}}^z\} \leq \{R_{\text{нэл}}^z\}. \quad (4)$$

При невозможности реализации эффективного УР с учетом накладываемых технических и технологических и иных ограничений, находится близкое к оптимальному УР, но для которого вышеуказанные условия выполняются.

Оперативное управление предполагает организацию функционирования системы в соответствии с заранее разработанным планом. При оперативном управлении оптимизация допускается только в рамках решения конкретной ЭЗ и в пределах объекта управления при условии, что оптимизированное УР не потребует изменения условий функционирования смежных подсистем и объектов.

Тогда функция эффективности оперативного управления может быть описана в общем виде выражением

$$F_i^{\text{опер}}(\bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{c}_i) = \{F_{1i}(\bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{c}_i), \dots, F_{ji}(\bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{c}_i), \dots, F_{yi}(\bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{c}_i)\} \rightarrow F_i^{\text{план}}(\bar{a}_i, \bar{b}_i), \quad (5)$$

где $\bar{c}_i = \{\bar{c}_{1i}, \dots, \bar{c}_{pi}, \dots, \bar{c}_{wi}\}$ – вектор неуправляемых параметров на i -м этапе принятия решения.

Множество параметров $\bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{c}_i$ можно представить как совокупность технических, технологических параметрических групп и неуправляемых параметров внешней объектной среды.

К группе технических параметров $\bar{a}_i = \{\bar{a}_{1i}, \dots, \bar{a}_{pi}, \dots, \bar{a}_{ji}\}$ относятся:

- для поездной работы: количество путей на перегонах и промежуточных станциях, количество поездных локомотивов с детализацией по сериям и видам работы, количество локомотивных бригад и т. п.

– для стационарной работы: количество бригад ПТО и ПКО в подсистемах станций, количество путей в парках технических и грузовых станций, вместимость грузовых фронтов и др.

К группе технологических параметров $\bar{b}_i = \{\bar{b}_{i_1}, \dots, \bar{b}_{i_n}, \dots, \bar{b}_{i_k}\}$ относятся:

– для поездной работы: нормы массы поездов, нормы длины поездов; наличие технологических «окон» и их продолжительность; тип графика движения поездов, план формирования поездов, схемы развоза местного груза и т. п.;

– для стационарной работы: технология работы сортировочной горки (с одним, двумя или тремя локомотивами); специализация путей в сортировочной парке, специализация маневровых локомотивов, количество подач-уборок на пункты местной работы, допустимые отклонения по длине и массе формируемых составов и т. п.

К неуправляемым параметрам $\bar{c}_i = \{\bar{c}_{i_1}, \dots, \bar{c}_{i_n}, \dots, \bar{c}_{i_v}\}$ относятся: наличие неисправностей в вагоне, погодные условия, запреты на перемещение отдельных категорий вагонов в межгосударственном сообщении и др.

В зависимости от постановки задачи управления отдельные группы параметров могут рассматриваться и как технологические, и как неуправляемые. Например, размеры движения поездов при разработке ГДП являются технологическими, а при разработке плана работы станции – неуправляемыми. В дальнейшем будем считать, что параметр относится к техническим или технологическим (управляемым), если для хотя бы одной подсистемы ИСУПП он таковым является. Параметр относится к неуправляемым параметрам, если ни одна подсистема ИСУПП не может сформировать УР, обеспечивающее изменение параметра.

Управляемые и неуправляемые параметры могут быть описаны количественно (норма массы поезда), в виде логических отношений (схема развоза местного груза) или иметь нечеткое описание (плохой бегун, сложные погодные условия и т. п.). В ИСУПП должны присутствовать механизмы описания и последующего сравнения параметров.

Для различных подсистем ИСУПП, помимо экономических, могут устанавливаться технические и технологические критерии оптимальности. К таким критериям можно отнести, например, оборот вагона, маршрутную скорость, потребность в перевозочных ресурсах, пропускную способность элементов инфраструктуры, выполнение договорных обязательств, производительность труда, потребность в локомотивах и локомотивных бригадах, затраты на топливно-энергетические ресурсы и др. Перечень критериев в зависимости от решаемой ЭЗ может изменяться в широком диапазоне, при этом на эффективность принятия УР количество критериев оптимальности и их структура влияния не оказывают. В результирующей целевой функции результаты УР оцениваются через приведенные экономические результаты.

В ИСУПП множество управляемых параметров $\{\bar{a}_i, \bar{b}_i\}$ являются как исходными данными для формирования рациональных УР, так и результатами функционирования задач ИСУПП.

Многие неуправляемые параметры подлежат идентификации как описывающие условия внешней среды:

$$F_i(\bar{a}_i, \bar{b}_i, \bar{c}_i) = F_{i+1}(\bar{a}_{i+1}, \bar{b}_{i+1}), \quad (6)$$

то есть при каких параметрах окружающей среды было получено УР и насколько оно оказалось эффективным. Множество $\{c_i\}$ является одним из составляющих базы знаний ИСУПП.

Таким образом, при управлении в ИСУПП необходимо из допустимого множества управляемых параметров $\{\bar{a}_i, \bar{b}_i\}$ сформировать такие УР, которые обеспечат максимум функции цели F .

В зависимости от вида управления и типа используемой информации поиск эффективных УР в ИСУПП предлагается выполнять с использованием априорных и апостериорных моделей.

Априорные модели – математические модели, используемые в принятии многокритериальных решений, в которых структура и вид обобщенного критерия постулируются вначале, т. е. вся информация, позволяющая сформировать УР, содержится в формальной модели задачи [9]. В ИСУПП априорные модели характерны для решения ЭЗ планирования (годового, среднесрочного и оперативного), в условиях преимущественно алеаторной неопределенности (формирование УР происходит до начала реализации технологического процесса).

Априорные модели ИСУПП предполагают использование гибридного решателя задач (ГБРЗ), в котором формирование УР включает 3 основных этапа: аппроксимация исходных данных, разработка базового УР и оптимизация (рисунок 1).



Рисунок 1 – Этапность формирования УР в априорных моделях

Аппроксимация. Аппроксимация исходных данных включает процедуры измерения параметров, контроля и идентификации информации об объекте управления. Сложность построения априорной модели решения ЭЗ зависит от сложности объекта управления. При определенном уровне сложности не достаточно только решения задачи «идентификация» параметров объекта управления, и приходится выполнять интерпретацию результатов измерений и наблюдений.

Разработка базового УР. Фундаментальной особенностью применения априорных моделей является многовариантность использования методов и средств реализации, которая следует из многовариантности интерпретаций любых данных, в которых есть случайность и неопределенность. Поскольку любая аппроксимация дает приближенный результат, в условиях многовариантности нет смысла искать наилучшие решения в отношении выбора моделей и методов их параметрического доопределения. В этом случае может формироваться как базовый УР, так и массив допустимых УР (удовлетворяющих установленным критериям и ограничениям) исходя из принципа непротиворечивости результата целям функционирования ИСУПП.

Оптимизация. Задача выбора и обоснования вариантов УР при построении априорных моделей осложняется еще и многокритериальностью такого выбора. Априорные модели должны позволять оперировать несколькими критериями оптимальности, обеспечивать использование новых критериев и формирования из них комплекс-

ных критериев. Сформированные варианты УР, методы и средства их реализации должны быть согласованы с исходными данными, с априорной информацией и с достигаемыми целями.

Апостериорные модели управления ПП оперируют информацией, которая становится известной после наступления событий в системе управления «после опыта». Необходимость использования апостериорных моделей определяется следующими причинами [10]:

- сформированные в априорных моделях УР не могут быть реализованы, так как изменились условия функционирования;

- априорные модели не позволили получить УР с необходимым уровнем детализации;

- при разработке априорных планов использовалась информация со значительной величиной погрешности, в связи с чем разработанные УР требуют уточнений.

Преимущественной областью использование апостериорных моделей следует считать процессы регулирования и диспетчерского управления. Их целью является обеспечение соответствия поведения ОУ его плановым параметрам.

По итогам функционирования апостериорные модели обеспечивают разработку УР, направленных на повышение эффективности функционирования системы и снижение эксплуатационных рисков. Кроме того, в процессе функционирования апостериорных моделей могут быть выявлены последовательности событий, не принадлежащие исходному множеству сценариев априорных моделей.

Апостериорный анализ также может стать базой для последующего априорного анализа, т. к. субъект исследования делает выводы, выходящие за рамки единичного процесса, последствием которого стало неблагоприятное событие. При этом он одновременно анализирует различные события, которые могли бы привести к такому или подобным нежелательным событиям.

В апостериорных моделях, помимо задачи снижения *алеаторной* неопределенности, важное место занимает проблематика снижения и компенсации *эпистемологической* неопределенности. Для этих целей необходимо уделять особое внимание совершенствованию технологий сбора и обработки информации.

Формирование апостериорных моделей предлагается рассматривать с позиции теории ситуационного управления [11]. Процесс ситуационного управления предполагает наличие элементов, представленных на рисунке 2.



Рисунок 2 – Обобщенная схема реализации ситуационного управления в ИСУПП

Анализатор формирует информацию по конкретной сложившейся эксплуатационной обстановке и выдает сообщения о необходимости вмешательства в процесс управления.

Классификатор относит информацию о текущей эксплуатационной обстановке к одному или нескольким классам ЭЗ, решение которых позволит сформировать УР.

Коррелятор, в зависимости от поставленной ЭЗ, формирует УР, если от экстраполятора поступает единственное УР, или передает информацию на блок выбора, если экстраполятор формирует несколько вариантов УР.

Экстраполятор, обеспечивает хранение массива решающих правил и определение тех из них, которые должны быть использованы при формировании УР при текущей эксплуатационной обстановке.

Блок выбора выбирает определенным образом УР из предложенных коррелятором по информации экстраполятора.

Значительное количество ЭЗ предполагает не только поиск одного эффективного УР, но и постоянное формирование УР в зависимости от складывающейся эксплуатационной обстановки и получаемой апостериорной информации. Например:

- для ведения поезда по нитке графика необходимо выбирать рациональную позицию контроллера локомотива, а при отклонении от графика – изменять станции обгона и скрещения поездов;

- при роспуске вагонов с сортировочной горки необходимо управлять тормозными усилиями замедлителей в зависимости от большого количества видов априорной (масса отцепа, величина отцепа, путь назначения вагона и др.) и апостериорной (направление и сила ветра, сопротивление качению колесных пар вагонов отцепа, скорость впереди идущего отцепа и др.) информации.

В таких случаях целесообразно говорить не об УР, а об управляемом процессе. При этом задача управления процессом разбивается на 2 подзадачи.

- 1 Прогнозирование поведения объекта управления в зависимости от внешних и внутренних факторов;

- 2 Поиск эффективных УР для каждого момента поведения объекта в зависимости от его прогнозируемого состояния.

Эффективное сочетание априорных и апостериорных моделей при описании технологических процессов в ИСУПП позволит сформировать заверченный цикл управления перевозками и обеспечить адаптивность системы к изменениям эксплуатационной обстановки.

Список литературы

- 1 Автоматизированные диспетчерские центры управления эксплуатационной работой железных дорог / П. С. Грунтов [и др.]; под ред. П. С. Грунтова. – М.: Транспорт, 1990. – 288 с.
- 2 Оперативное управление движением на железнодорожном транспорте / А. К. Угрюмов [и др.]. – М.: Транспорт, 1983. – 239 с.
- 3 Комплексная автоматизированная система управления железнодорожным транспортом (АСУЖТ): под общ. ред. А. П. Петрова. – М.: Транспорт, 1977. – 600 с.
- 4 Левин, Д. Ю. Теория оперативного управления перевозочным процессом / Д. Ю. Левин. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 625 с.
- 5 Бородин, А. Ф. Эксплуатационная работа железнодорожных направлений / А. Ф. Бородин // Труды ВНИИАС. – Вып. 6. – М.: ВНИИАС, 2008. – 320 с.

6 Ерофеев, А. А. Влияние сбоя в информационных системах дорожного уровня на организацию перевозочного процесса / А. А. Ерофеев // Транспортный комплекс в регионах: опыт и перспективы организации движения: материалы Междунар. науч.-практ. конф. ; под ред. А. А. Платонова. – Воронеж : Руна, 2015. – № 1. – С. 11–15.

7 Юдин, Д. Б. Математические методы управления в условиях неполной информации / Д. Б. Юдин. – М. : Советское радио, 1974. – 400 с.

8 Ерофеев, А. А. Система интеллектуального управления перевозочным процессом: модели поведения / А. А. Ерофеев // Транспортные системы: тенденции развития : сб. трудов Междунар. науч.-практ. конф. 26–27 сентября 2016 года ; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Б. А. Лёвина. – М. : МИИТ, 2016. – С. 380–383.

9 Априорное моделирование : учеб. пособие / Л. Л. Кротова [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Красноярск : СибГТУ, 2005. – 36 с.

10 Ерофеев, А. А. Принципы построения апостериорных моделей интеллектуального управления перевозочным процес-

сом / А. А. Ерофеев // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2020. – № 1 (40). – С. 31–36.

11 Поспелов, Д. А. Ситуационное управление: теория и практика / Д. А. Поспелов. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 288 с.

12 Сотников, Е. А. Интеллектуализация оперативного управления перевозочным процессом на уровне региональной дирекции управления движением / Е. А. Сотников // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2014) : третья науч.-техн. конф. с междунар. участием (18 ноября 2014 г., Москва, Россия). – М. : НИИАС, 2014. – С. 94–95.

13 Бородин, А. Ф. О гармонизации развития и использования железнодорожной инфраструктуры и перевозочных ресурсов / А. Ф. Бородин // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2015) : четвертая науч.-техн. конф. с междунар. участием (18 ноября 2015 г., Москва, Россия). – М. : НИИАС, 2015. – С. 135–139.

Получено 22.10.2020

A. A. Erofeev, A. F. Borodin. Models for description of search processes control decisions in ICSTP.

The types of management in the intelligent control system of transportation process are determined. It was found that under planned control information has mainly aleatory uncertainty, and under dispatch control – epistemological. The functions of assessing the effectiveness of control decisions in the planned and operational management of the transportation process are given. It is proposed, depending on the type of control and the type of information used, to search for effective control solutions using a priori and a posteriori models. The structures of the models and the composition of hybrid problem solvers are determined.