

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИЙ ИНСТИТУТ
ИНФОРМАТИЗАЦИИ, АВТОМАТИЗАЦИИ И СВЯЗИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ»
(ОАО «НИИАС»)

ТРУДЫ

ТРЕТЬЕЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ.
КОМПЬЮТЕРНОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ.
ИСУЖТ-2014**

18 ноября 2014 года
МОСКВА

«Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование» (ИСУЖТ-2014): Третья научно-техническая конференция с международным участием (18 ноября 2014 г., Москва, Россия) Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте». Дочернее общество ОАО «РЖД» (ОАО «НИИАС»), 2014 г.

Конференция проводилась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

Утверждено к печати Программным комитетом конференции:

Сопредседатель

Гуляев Ю.В.,
академик РАН (ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва)

Сопредседатель

Матюхин В.Г.,
д.т. н. (ОАО «НИИАС», Москва)

Сопредседатель

Кузнецов Н. А.,
академик РАН (ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва)

Заместитель председателя

Доенин В. В.,
д.т.н., профессор (МГУПС, Москва)

Члены программного комитета:

Бородин А.Ф.,
д.т.н., профессор
(ОАО «НИИАС», Москва)

Гуда А. Н.,
д.т.н., профессор
(РГУПС, Ростов)

Кульба В. В.,
д.т.н., профессор
(ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН, Москва)

Лай Мань Зунг,
к.т.н., доцент (Ханойский политехнический университет, Ханой, Вьетнам)

Нгуен Куэн Кань,
к.т.н., доцент (Вьетнамский национальный университет, Хошимин, Вьетнам)

Ржевский Г.А.,
профессор
(Открытый университет, Лондон, Великобритания)

Рудаков К. В.,
член-корреспондент РАН
(ВЦ им. А. А. Дородницына, Москва)

Скобелев П.О.,
д.т.н., проф.
(НПК «Разумные решения», Самара)

Шаров В. А.,
д.т.н., профессор (Центр технологической координации ОАО «РЖД», Москва)

В сборнике представлены материалы конференции по следующим направлениям:

- Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте
- Компьютерное и математическое моделирование транспортных процессов и систем
- Интеллектуальные технологии в сложных системах
- Мультиагентные технологии в управлении
- Управление движением на железнодорожном транспорте
- Моделирование перевозочного процесса и транспортной логистики
- Управление железнодорожной инфраструктурой и энергоэффективностью
- Спутниковые и геоинформационные технологии в управлении
- Измерения, контроль и диагностика в задачах управления
- Прогнозирование и моделирование процессов управления безопасностью на железнодорожном транспорте

Общая редакция сборника трудов конференции — д.т.н. Матюхин В.Г., д.т.н. Строгонов В.И.



Приветствие от Российского фонда фундаментальных исследований

Уважаемые участники и гости научно-технической конференции ИСУЖТ-2014!

Российский фонд фундаментальных исследований приветствует участников и организаторов третьей научно-технической конференции с международным участием «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование» и искренне желает вам успешной работы.

Хочется отметить несомненную важность и междисциплинарную направленность данной конференции. Ее темы затрагивают чрезвычайно широкий спектр вопросов по развитию железнодорожного транспорта.

Области исследования, являющиеся предметом обсуждения вашей конференции – передний край современной науки.

Фонд в своей деятельности поддерживает эти исследования, учитывая важность, значимость и актуальность важнейших задач обеспечения безопасной эксплуатации сложных технических систем на железнодорожном транспорте.

Уверен, что эта международная конференция вызовет широкий интерес ученых, промышленников и бизнесменов, принесет участникам новые деловые контакты и знакомства, придаст дополнительный импульс процессу инновационного развития стран – участников конференции.

Искренне желаю всем участникам, гостям и организаторам конференции плодотворной работы, новых идей и позитивных перспектив.

С глубоким уважением,

Председатель Совета Российского фонда
фундаментальных исследований
Академик РАН

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'В.Я. Панченко', written in a cursive style.

В.Я. Панченко

СЕКЦИЯ №1

**УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕВОЗОЧНЫМ ПРОЦЕССОМ,
ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРЕВОЗОК**

Матюхин В.Г., Шабунин А.Б., ОАО «НИИАС», г. Москва

Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте – 2014

В состав ИСУЖТ входят комплексы задач, максимально покрывающие технологический цикл эксплуатационной работы, включая формирование нормативного и вариантного графика, планирование поездной и станционной работы на многосуточном и сменно-суточном горизонте с учетом состояния заявок на перевозку. Сформированный график движения поездов взаимосвязан с планами заставки бригад, подвязки локомотивов, проведения окон и приема-отправления поездов на станциях полигона. На основе этого графика выполняется адаптивное управление движением поездов в реальном времени с возвратом поездов в график движения в случае конфликтных ситуаций. Таким образом, тремя основными комплексами задач ИСУЖТ можно считать: построение нормативного и вариантного графика, управление тяговыми ресурсами и управление пропуском поездопотока.

Комплекс по управлению пропуском поездопотока по расписанию в настоящее время реализован на железнодорожных направлениях Москва – Санкт-Петербург и Санкт-Петербург – Буловская. В ходе реализации системы полностью подтверждена состоятельность выбранных принципов построения. Диспетчерские решения, традиционно относящиеся к области интуиции, производственного опыта и искусства управления, формализуются средствами ИСУЖТ.

На практике подтверждена возможность автоматического решения конфликтных ситуаций при управлении движением и автоматического построения диспетчерских расписаний с реализацией приоритетов поездов и учета интересов всех участников перевозочного процесса.

В 2014 году идет реализация подобных комплексов для Невельского и Оредежского диспетчерских участков Октябрьской железной дороги и 7-ми диспетчерских участков Восточно-Сибирской железной дороги.

Единые принципы построения системы реализованы и на комплексе задач управления тяговыми ресурсами. Работы по этому комплексу задач ведутся на Восточном полигоне, включающем четыре дороги Восточно-Сибирскую, Красноярскую, Забайкальскую и Дальне-Восточную. Принципиально новым является решение по автоматическому построению нормативного и вариантного графиков движения.

Таким образом, по всем трем упомянутым ранее основным составляющим проекта ИСУЖТ получены практические результаты. Идет процесс внедрения.

Наряду с упомянутыми задачами, в 2014 году в составе проекта ИСУЖТ появилось и новое важное направление. Это реализация задач в интересах ЦФТО.

Опыт внедрения.

Ход опытной эксплуатации разработанных комплексов управляющих задач ИСУЖТ показал, что такого класса задачи требуют более длительного этапа опытной эксплуатации, по сравнению с информационно-справочными задачами, которые в настоящее время в основном реализованы и эксплуатируются в РЖД.

Внедрение интеллектуальных задач в постоянную эксплуатацию и обеспечение высокой эффективности их применения требует длительной и кропотливой совместной работы разработчиков с диспетчерским персоналом и технологами. Требуется совместная работа

как в части формирования в ИСУЖТ достоверных и полных данных, так и для автоматической выработки и оптимизации управленческих решений.

Особое внимание в условиях совместной работы больших коллективов должно уделяться соблюдению базовых принципов проекта. Базовые принципы ИСУЖТ уже докладывались ранее и на конференциях и в тематических статьях. Их соблюдение обеспечивает унификацию решений и дает возможность декомпозиции задач ИСУЖТ на ряд подсистем при гарантии реализации действительно единой системы.

К числу наиболее важных принципов относятся:

- Нисходящая модель проектирования, которая обеспечивает контроль следования идеологии системы, максимальную генерализацию программных компонентов, определение стандартных протоколов взаимодействия и раннее прототипирование пользовательского интерфейса.
- Непрерывность развития и обучения системы, что является необходимым условием проектирования для отрасли с априорной неопределенностью и динамичностью внешней среды.
- Сетевая модель построения как современное средство создания сверхсложных систем за счет декомпозиции и слабосвязанного функционирования компонентов при сохранении единства реализации онтологии, комплексной динамической модели и контура адаптивного планирования.
- Процессный подход, обеспечивающий полноту автоматизации сквозных производственных процессов и исключение дублирования при разработке Системы.
- Реальный масштаб времени, как необходимое условие обеспечения ситуационности, а, следовательно, живучести транспортной системы.

В процессе практической реализации совместно с технологами и диспетчерским аппаратом выяснилось, что ряд сформулированных в ТЗ задач не был достаточно детализирован, как этого требуют сложные системы управляющего класса. Эта работа проводилась уже в ходе опытной эксплуатации. В ходе реализации увеличилось количество источников данных, неоднократно менялся пользовательский интерфейс. Особо значимым является увеличение количества факторов и ограничений для задач планирования. Только в ходе внедрения были добавлены такие факторы, как учет занятости путей вагонами, длин путей, весов поездов и профиля пути, занятости горловины станции, добавлен учет времени на разгон и замедление и многие другие. При том, что все они, безусловно, известны специалистам службы движения, детализация постановки задачи и обеспечение достоверных источников данных выполнялись по мере опытной эксплуатации

системы. Ситуацию усложняют выявляемые в процессе работы ранее неизвестные ошибки систем – поставщиков информации. Доказательство наличия ошибок в таких случаях, когда речь идет про эталонные значения, всегда требует особой тщательности и многократных проверок.

При реализации такой сложной системы как ИСУЖТ еще раз подтвердилась необходимость особого внимания к унификации всех фрагментарных решений.

Так, при реализации подпроектов появляется соблазн пройти по более простому пути, реализовав свои структуры и базы данных. На выходе получив множество разрозненных систем с уникальными архитектурными решениями, не задумываясь о последствиях как сопровождения этих подпроектов, так и коммуникации между разными подпроектами. Попытки таких реализаций препятствуют реализации единой системы и недопустимы.

Другим примером базового принципа является автоматическое адаптивное планирование. Этот принцип определяет суть проекта, ее интеллектуальную составляющую. Это задача колоссальной сложности, которую удалось преодолеть на конкретных задачах. Диспетчерский персонал решает эту задачу в ручном режиме постоянно. Существенным является, что дальнейший охват процесса интеллектуализации отрасли требует глубокого анализа технологами диспетчерской работы на всех этапах производственного процесса, формализация ее и перевод на принципы автоматического адаптивного планирования.

Дорожная карта ИСУЖТ

Говоря про перспективы, необходимо остановиться на дорожной карте ИСУЖТ – это предлагаемая комплексная программа реализации проекта на 2014-2017 годы.

Дорожная карта предлагает последовательную реализацию комплексов задач автоматического формирования графика, управления пропуском поездопотоков по расписанию и управление тяговыми ресурсами на основных направлениях грузопотоков: Кузбасс-Восток, Кузбасс-Север, Кузбасс-Запад, Кузбасс-Юг.

Фактически реализация дорожной карты позволит обеспечить эстафетную передачу поездопотока с одного диспетчерского участка на другой, в соответствии с графиком и согласованного по ресурсам в рамках полигона управления. Реализация программы должна опираться на отработанные в 2013-2014 годах комплексы задач, которые были рассмотрены выше.

Все комплексы представлены типизированными рабочими местами (АРМами) на уровне диспетчерских участков, дорожном и сетевом уровнях. Ключевым

результатом работы комплексов является создание/модификация графиков движения поездов разного горизонта планирования под динамические потребности грузоотправителей и синхронизированные с ними планы по управлению тяговыми ресурсами, работы станций и проведению работ по поддержанию и развитию инфраструктуры.

Обеспечивающие факторы реализации программы:

- Внедрение на главных направлениях высокоточной модели с периодичностью обновления 5 сек.
- Обеспечение мониторинга отклонения от графика;
- Обеспечение формирования актуального графика движения поездов с специализированным расписанием выделенных (дорогих) поездов;
- Интеллектуальный комплекс по построению графика для решения конфликтных ситуаций, автоматической подвязки подходов и построению диспетчерского расписания.

Реализация дорожной карты обеспечивает возможность перейти к качественно новому уровню функциональности – реализации логистики реального времени.

Логистика реального времени.

В динамике рыночных механизмов последних лет грузовладелец требует более высокого уровня обслуживания, доступности перевозки, дополнительных опций к базовой услуге, и, прежде всего, в организации доставки груза в срок. Вне зависимости от технологической возможности доставки и необходимости заблаговременной подачи заявки на перевозку. Реализация принципа клиентоориентированности в современных условиях требует пообъектного мониторинга и планирования как поездов, локомотивов, бригад, так и вагонов.

На основе реализованных комплексов задач ИСУЖТ может обеспечить поддержку таких логистических продуктов, как:

- пропуск транзитного поездопотока;
- обеспечение контейнерных и конрейлерных перевозок;

- контроль и гарантированный пропуск специализированных, «дорогих», поездов;
- согласованный подвод к портам и крупным объектам выгрузки;
- обеспечение подвода порожних вагонов к пунктам (станциям) массовой погрузки и другие.

Требование реального времени в этих условиях является принципиальным и напрямую связано с обеспечением эффективного использования ресурсов.

Важным требованием является ситуационность управления для обеспечения надежности и живучести транспортной системы. Перепланирование в этих случаях должно осуществляться «на лету», без останова и перезагрузки системы и планирования с начала.

Стихийность несогласованных корректировок, связанных с грузом, вагонами, тяговыми ресурсами и работой станций видится совершенно недопустимой. Оперативное регулирование эксплуатационной работы должно быть комплексным и взаимоувязанным по всем причастным службам. Что и обеспечивается при реализации изложенной выше дорожной карты.

Обеспечивающим фактором является пообъектное планирование и мониторинг движения грузов путем реализации вагонной модели, синхронизированной с поездной, локомотивной и бригадной моделями. Для достижения этой цели обеспечивается увязка в рамках единой идеологии процессов планирования поездной работы, тяговых ресурсов, реализация работы с заявками в ИСУЖТ во взаимодействии с ЦФТО и системой ЭТРАН.

Заключение.

Реализация всего комплекса мероприятий в рамках ИСУЖТ необходима для внедрения на сети инновационных технологий организации движения поездов по графику, охватывающих все элементы производственного процесса. Оптимизация грузового движения открывает дополнительные возможности для сокращения издержек железнодорожного транспорта, создания резерва пропускной способности, доставки грузов в установленные сроки и, как следствие, более качественное обслуживание клиентов РЖД.

Архипов Д.И., Лазарев А.А., ИГУ РАН им. В.А. Трапезникова, г. Москва

Минимизация максимального взвешенного временного смещения для заказов на доставку грузов между двумя станциями в условиях ограниченного движения составов

Введение

Имеются две станции, соединенные двухпутной железной дорогой. Необходимо выполнить множества заказов $N = \{J_1^1, \dots, J_n^1\}$ и $N = \{J_1^2, \dots, J_m^2\}$ на поставку грузов между станциями. Заказы множества N^1 необходимо доставить с первой станции на вторую, а заказы множества N^2 со второй на первую. Каждый заказ состоит из одного вагона. Все вагоны одинаковые. Так как железная дорога двухпутная, то расписания для множества N^1 и N^2 мы можем составить отдельно. Рассматриваемое множество, не умаляя общности, обозначим за $N = \{J_1, \dots, J_n\}$. Пусть r_j – момент поступления заказа J_j на станцию. Без потери общности предположим, что заказы пронумерованы в порядке их поступления. Каждый заказ имеет свою ценность $w_j > 0$.

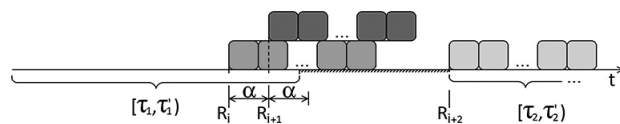


Рис. 1: Допустимые интервалы отправки

Доставка вагонов с одной станции на другую осуществляется поездам T_1, T_2, \dots, T_q , отправляющимися в моменты времени R_1, R_2, \dots, R_q и состоящими из k_1, k_2, \dots, k_q вагонов соответственно. Обозначим за p время движения состава между станциями, а за α – время, которое должно разделять моменты отправки двух поездов. Движение пассажирских поездов и плановые работы учитываются в предложенной модели с помощью допустимых интервалов отправки $[r_1, r_2), \dots, [r_2, r_2)$ (рис. 1). Поезда могут быть отправлены только в момент времени, принадлежащий одному из этих интервалов. Множество всех расписаний, в которых все заказы отправляются после своих моментов поступления и все поезда отправляются не мешая друг другу в допустимые интервалы, обозначим за Π . Для каждого заказа определён директивный срок $d_j = r_j + \delta$ – момент времени, до которого заказ может быть доставлен на станцию назначения без опоздания, где δ – запас времени на доставку. Пусть C_j – время доставки заказа J_j . Временное смещение заказа обозначим за $L_j = C_j - d_j$. Тогда целевая функция задачи записывается как:

$$\min_{\pi \in \Pi} \max_{j=1, n} w_j L_j$$

Задача минимизации общего времени выполнения заказов при ограничении на максимальное взвешенное временное смещение

Решим вспомогательную задачу. Дано множество заказов N и положительное число y . Задача заключается в составлении расписания $\Theta(N, y)$, удовлетворяющего условию:

$$\min_{\pi \in \Pi} R_i(\pi) \mid \max_{i=1, q} w_j L_j < y$$

Введем дополнительные обозначения. Для данного значения ограничения y для каждого заказа J_j может быть определен момент времени t'_j до которого данный заказ должен быть отправлен. Из ограничения на максимальное временное смещение имеем: $y > w_j(C_j - d_j) = w_j(C_j - r_j - \delta) \Rightarrow C_j < \frac{y}{w_j} + r_j + \delta$. Так как после отправки работы требуется ещё некоторое время p , чтобы она доехала до станции назначения, то получаем условие на момент отправки работы j :

$$C_j - p < \frac{y}{w_j} + r_j + \delta \Rightarrow t'_j = \frac{y}{w_j} + r_j + \delta - p \text{ (рис. 2).}$$

Заметим, что для любого значения δ и любого множества значений w_j мы можем свести данную задачу к задаче с весами w'_j и $\delta' = 0$ таким образом, что у каждой работы j моменты обязательной отправки t'_j будут теми же. Это может быть получено благодаря преобразованию весов:

$$t'_j = \frac{y}{w_j} + r_j + \delta = \frac{y}{w_j} + r_j \Rightarrow \frac{y}{w_j} + \delta = \frac{y}{w'_j} \Rightarrow w'_j = \frac{y}{\frac{y}{w_j} + \delta}$$

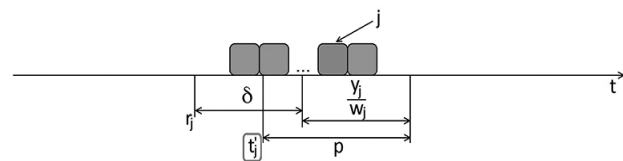


Рис. 2: Момент обязательной отправки

Таким образом, задача может быть сформулирована следующим образом: имеется множество из

$$n = \sum_{i=1}^q k_i$$

заказов, для каждого из которых определены момент поступления r_j и момент обязательной отправки t'_j . Цель – перевезти заказы на q поездах, каждый из ко-

торых тратит на дорогу время p так, чтобы каждый заказ был отправлен на поезде, отправляющемся в промежутке $R_m \geq [\max(r(T_m), T_{m-1} + \alpha)]$, и составленное расписание удовлетворяло целевой функции.

Введем функцию $[*]$, определённую на множестве моментов времени t . Для любого момента времени t_j значение функции равно:

$$[t_j] = \min_{t \in [\tau_1, \tau_1], \dots, [\tau_z, \tau_z], t \geq t_j} t,$$

т.е. $[t_j]$ – минимальный момент времени, превышающий t_j , принадлежащий одному из допустимых интервалов отправки.

Введем функцию $r(U)$, определённую на множестве заказов. Для любого множества заказов U значение функции равно: $r(U) = \max_{j \in U} r_j$, т.е. данная функция возвращает момент времени, к которому поступят все заказы из данного множества.

Введем семейство множеств $S_1 \subset S_2 \subset \dots \subset S_q$ – работы, которые должны уехать первым поездом (S_1), первым или вторым поездом (S_2), первым или вторым или третьим (S_3) и т.д. Для любого $i=1, n$ мощность множества (S_i) не может превышать количество заказов, которое можно увезти первыми i поездами, т.е. $|S_i| \leq \sum k_i = K_i$. Заметим, что до начала работы алгоритма построения $\Theta(N, y)$ не пусто только множество S_p , которое состоит из всех n работ. Будем говорить, что расписание π удовлетворяет набору множеств S_1, \dots, S_q , если $\forall i=1, n$ выполняется $S_i \in T_1(\pi) \dots \cup T_i(\pi)$.

Рассмотрим дополнения $\bar{S}_i = N \setminus S_i$ ко множествам S_1, \dots, S_q . Из определения множества S_i следует, что любой поезд, с номером больше чем i должен состоять только из заказов, принадлежащих множеству \bar{S}_i , т.е. $\forall l, q \geq l > i : T_l \subset \bar{S}_i$.

В расписании $\Theta(N, y)$ отправка поезда T_m в момент времени R_m должна удовлетворять следующим свойствам:

После отправки m -ого поезда все заказы из множества S_m должны быть отправлены, т.е. $S_m \subseteq T_1 \cup \dots \cup T_m$;

К моменту поступления $r(T_m)$ заказов из T_m должны поступить хотя бы k_m заказов, в том числе все заказы из S_m , т.е. $r(T_m) \geq \max(r(S_m), r_{k_m})$;

Момент времени R_m , определенный для поезда T_m , удовлетворяет следующему неравенству: $R_m \geq [\max(r(T_m), T_{m-1} + \alpha)]$.

Свойство 1 следует из определения S_m .

Свойство 2 следует из того, что для отправки первых m необходимо, чтобы поступило хотя бы K_m заказов и поступили все заказы из S_m , чтобы было выполнено свойство 1.

Свойство 3. Поезд m не может быть отправлен до того момента, как:

- поступят все работы из T_m ;
- $m-1$ -ый поезд освободит пути;

- момент времени будет принадлежать допустимому интервалу отправки.

Алгоритм построения расписания $\Theta(N, y)$

Алгоритм 1. На первом шаге рассматриваем формирование последнего поезда T_q . Учитывая, что $T_q \subseteq S_{q-1}$, выбираем из множества S_{q-1} k_q заказов с наибольшими значениями моментов поступления r_j и включаем их в поезд $T_q = \{J_{q_1}, J_{q_2}, \dots, J_{q_{k_q}}\}$, после чего переходим к формированию поезда T_{q-1} .

Так как один заказ не может быть включен в два разных поезда, то в поезд T_{q-1} могут войти только заказы из $T_{q-1} \subseteq (S_{q-2} \setminus T_q)$, не включенные в T_q , т.е. $\forall J_j \in T_i : t_j \geq R_i$. Выбираем k_{q-1} заказов из множества $(S_{q-2} \setminus T_q)$ и включаем их в T_{q-1} . На каждом следующем шаге поступаем аналогично. Таким образом, при формировании поезда T_j мы выбираем k_j заказов с наибольшими моментами поступления из множества $S_{i-1} \setminus (T_{i+1} \cup T_{i+2} \cup \dots \cup T_q)$ и включаем их в T_j .

После того, как все поезда сформированы, вычисляем их моменты отправки R_i , пользуясь свойством 3. Последовательно находим значения $R_1 = [\max(r(T_1))], \dots, R_q = [\max(r(T_q), T_{q-1} + \alpha)]$. Поочередно проверяем все заказы на выполнимость условия отправки: $\forall J_j \in T_i : t_j \geq R_i$. В случае, если все заказы удовлетворяют данному условию, считаем расписание π , удовлетворяющее целевой функции, найденным, после чего алгоритм прерывает свою работу. В случае, если обнаружены один или несколько заказов J_1, J_2, \dots, J_l , отправляемых в поездах $T_{i_1}, T_{i_2}, \dots, T_{i_l}$ соответственно, для которых t_j меньше либо равно моментам отправки их поездов, для каждого из таких заказов выполняется процедура включения во множества $S_{i_1-1}, S_{i_2-1}, \dots, S_{i_l-1}$ соответственно. Так как $S_1 \subseteq S_2 \subseteq \dots \subseteq S_q$, после включения каждого заказа J_x во множество S_x происходит включение заказа J_x во все множества S_{x+1}, \dots, S_q (рис. 3). В те множества, в которых J_x уже состоит, повторного включения не происходит.

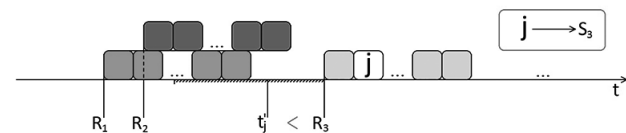


Рис. 3: Включение заказа j в S_3

После того, как включение выполнено и новые множества S_1, S_2, \dots, S_q составлены, проверяем их мощность. В случае, если мощность какого-либо множества превысила допустимое значение, т.е. $|S_i| > K_i$, алгоритм прерывается, делается вывод, что расписания, удовлетворяющего заданной целевой функции, не существует. Если мощности всех множеств корректны, алгоритм повторяет свое действие до тех пор, пока не будет найдено расписание без включений в S_i или пока

одно из множеств S_i не переполнится.

Лемма 1. Даны множества S_1, S_2, \dots, S_q . Для данного набора множеств алгоритм 1 сформировал поезд $T_1(\pi), T_2(\pi), \dots, T_q(\pi)$ и вычислил моменты отправки $R_1(\pi), R_2(\pi), \dots, R_q(\pi)$. Тогда, для любого расписания π' , удовлетворяющего множествам S_1, S_2, \dots, S_q , для любого номера поезда $i \in 1, \dots, q$ верно неравенство: $R_i(\pi) \leq R_i(\pi')$.

Доказательство. Будем сравнивать составы поездов расписаний π и π' , перебирая их в обратном порядке. Пусть на каком-то шаге, в поезде $T_i(\pi)$ нашелся заказ J_x , который отсутствует в $T_i(\pi')$. В таком случае в поезде $T_i(\pi')$ должен присутствовать заказ J_v , который отсутствует в $T_i(\pi)$.

Заметим, что при предыдущих сравнениях различий обнаружено не было, т.е.

$$T_{l+1}(\pi) \equiv T_{l+1}(\pi'), \dots, T_q(\pi) \equiv T_q(\pi').$$

Из того, что заказ J_x имеется во множестве $T_i(\pi)$, но отсутствует во множествах $T_l(\pi), T_{l+1}(\pi), \dots, T_q(\pi)$ следует, что он состоит во множестве $T_a(\pi)$, где $a < l$. Аналогичные рассуждения проводим для заказа J_v , делая вывод, что J_v содержится во множестве $T_b(\pi)$, где $b < l$. Заметим, что так как при формировании поезда $T_i(\pi)$ алгоритм 1 выбирал заказы с наибольшими значениями r_j , можно сделать вывод, что $r_{j_x} \geq r_{j_v}$, и так как $J_x \in T_a(\pi)$, то $R_a(\pi) \geq r_{j_x} \geq r_{j_v}$.

Кроме того, $J_x, J_v \in S_{l-1}$, так как оба расписания удовлетворяют набору множеств S_1, S_2, \dots, S_q . Отсюда следует, что в расписании π' можно поменять заказы J_x и J_v местами без сдвига моментов отправки поездов $R_1(\pi'), R_2(\pi'), \dots, R_q(\pi')$, и расписание будет удовлетворять набору множеств S_1, S_2, \dots, S_q . Последовательно выполняя аналогичные операции, получаем расписание π'' , удовлетворяющее S_1, S_2, \dots, S_q с поездами $T_1(\pi), T_2(\pi), \dots, T_q(\pi)$ и моментами отправки $R_1(\pi'), R_2(\pi'), \dots, R_q(\pi')$. Из свойства 3 следует, что $\forall i = 1, n: R_i(\pi'') \geq [\max(r(T_i), T_{i-1} + \alpha)] = R_i(\pi)$, т.е. $R_i(\pi') = R_i(\pi'') \geq R_i(\pi)$. Лемма доказана.

Теорема 1. Алгоритм 1 строит расписание $(N, y) \in \Pi$ удовлетворяющее критерию

$$\min_{\pi \in \Pi} R_i(\pi) \mid \max_{j=1, n} w_j L_j < y$$

Если алгоритм 1 прервал свою работу, то не существует такого расписания π , для которого верно $(wL)_{\max} < y$.

Доказательство. Пусть существует расписание π' удовлетворяющее критерию

$$\min_{\pi \in \Pi} R_i(\pi) \mid \max_{j=1, n} w_j L_j < y$$

Сформируем для него множества

$$S_1(\pi'), S_2(\pi'), \dots, S_q(\pi')$$

с помощью операции включения:

$$S_i(\pi') = \{J_{i_1}, \dots, J_{i_l}\} - \text{все заказы, для которых вы}$$

полнено неравенство $R_{i+1}(\pi') > t_{j_i}'$.

Рассмотрим работу алгоритма 1. Будем строить расписание π , пока $\forall i = 1, \dots, n$ выполняется $S_i(\pi) \subseteq S_i(\pi')$. Если алгоритм закончит свою работу, и данное условие будет выполнено, то, по лемме 1, построенное расписание будет удовлетворять критерию

$$\min_{\pi \in \Pi} R_i(\pi) \mid \max_{j=1, n} w_j L_j < y$$

Предположим, что на каком-то шаге нарушилось условие, и для какого-то $i \in 1, \dots, n$ стало верно $S_i(\pi) \not\subseteq S_i(\pi')$. Это значит, что в расписании π , построенном на данном шаге алгоритма, $\exists J \in T_i(\pi)$, где $R_{i+1}(\pi) > t_{j_i}'$, причем $J \notin S_i(\pi')$. Заметим, что так как расписания π и π' удовлетворяют $S_1(\pi), S_2(\pi), \dots, S_q(\pi)$, то по лемме 1 $R_{i+1}(\pi') \geq R_{i+1}(\pi) > t_{j_i}'$, следовательно, заказ $J \in S_i(\pi')$ – противоречие.

Алгоритм построения оптимального расписания

Алгоритм 2. Для построения оптимального расписания $\pi(N)$ будем действовать следующим образом. Построим расписание, в котором заказы отправляются по возрастанию моментов поступления. Тем самым мы получим расписание, удовлетворяющее условию минимума R_i для каждого поезда i . Рассмотрим заказ, на котором достигается максимум целевой функции $(w_j L_{j1})$. Пусть этот заказ в данном расписании отправляется m_1 -ым поездом. Так как алгоритм 1 строит расписание с минимальными моментами отправки поездов из всех возможных, удовлетворяющих критерию $(wL)_{\max} < y$, то при уменьшении значения y для существования расписания необходимо, чтобы заказ, на котором была достигнута целевая функция, был отправлен поездом с меньшим порядковым номером. Следовательно, для того, чтобы улучшить целевую функцию, необходимо отправить заказ j одним из поездов, отправившимся до поезда с номером m_1 , то есть мы должны включить работу j во множество S_{m_1-1} . Это значит, что если мы построим расписание $\Theta(N, w_{j1} L_{j1})$, то в нем заказ j будет отправлен одним из поездов, номер которого меньше m_1 , а целевая функция будет меньше, чем $w_{j1} L_{j1}$ и достигается на заказе j_2 , который отправлен поездом m_2 . Следующим шагом мы строим расписание $\Theta(N, w_{j2} L_{j2})$, в котором заказ j_2 должен быть отправлен поездом с номером меньше, чем m_2 , а значит заказ j_2 попадет во множество S_{m_2-1} . Будем повторять эту процедуру до тех пор пока не наступит такой шаг s , что расписания $\Theta(N, w_{j_s} L_{j_s})$ не существует. После чего говорим, что не существует расписания со значением целевой функции меньше, чем $w_{j_s} L_{j_s}$ и при этом существует расписание, полученное на s -м шаге со значением целевой функции $w_{j_s} L_{j_s}$, следовательно оно и будет оптимальным.

Теорема 2. Алгоритм 2 строит расписание π' , оптимальное по критерию $(wL)_{\max}$ и имеющее минималь-

ные моменты отправки всех поездов R_i среди всех расписаний с таким значением $(wL)_{\max}$.

Доказательство. Расписание $\pi^* = \Theta(N, y)$ имеет значение целевой функции, равное y' . Из несуществования расписания $\Theta(N, y')$ по теореме 1 следует, что расписаний, удовлетворяющих критерию $(wL)_{\max} < y'$, не существует, а значит расписание π^* оптимально по критерию $(wL)_{\max}$. Из леммы 1 следует, что расписание $\pi^* = \Theta(N, y)$ имеет минимальные моменты отправки всех поездов R_i среди всех расписаний со значением целевой функции $(wL)_{\max} < y'$. Теорема доказана.

Оценка сложности алгоритма

На каждом шаге алгоритма 1 происходит добавление заказа в одно или несколько множеств S_1, S_2, \dots, S_{q-1} . Так как алгоритм 1 строит расписание с минимальными моментами отправками из всех, удовлетворяющих критерию $(wL)_{\max} < y$, то при уменьшении значения y для существования расписания необходимо, чтобы заказ, на котором была достигнута целевая функция, был отправлен поездом с меньшим порядковым номером. Следовательно, на каждом шаге алгоритма 2 происходит включение заказа, на котором достигнута целевая функция в одно из множеств S_1, S_2, \dots, S_{q-1} , при этом выход заказа из каждого из этих множеств невозможен. Следовательно, суммарное число шагов алгоритмов 1 и 2 не превышает суммы мощностей множеств S_1, S_2, \dots, S_{q-1} , которая равна $K_1 + K_2 + \dots + K_q = O(n^2 / k_{\min})$. На каждом шаге алгоритма 1 выполняется подбор заказов во мно-

жества T_q, T_{q-1}, \dots, T_1 , на каждом шаге рассматривается не более чем K_q, \dots, K_2, K_1 заказов-кандидатов соответственно. Следовательно, сложность шага алгоритма 1 равна $K_1 + K_2 + \dots + K_q = O(n^2 / k_{\min})$. Из приведенных рассуждений следует, что общая трудоёмкость алгоритма 2 составляет порядка $O(\frac{n^2}{k_{\min}})$ операций.

Литература

1. В.В.Симонс. (1978). A fast algorithm for single processor scheduling. Proceedings of the 19 IEEE Annual Symposium on Foundations of Computer Science (стр. 246-252). New York: Ann. Arbor. Mich.
2. J.A. Hoogeveen. (1996). Minimizing maximum promptness and maximum. Math. Oper. Res., 100-114.
3. А.А.Лазарев. (2008). Теория расписаний. Оценка абсолютной погрешности и схема приближённого решения задач теории расписаний. Москва: МФТИ.
4. Лазарев, А. А., Архипов, Д. И., & Карпов, И. В. (2010). Polynomially Solvable Case of the NP-Hard Problem $1|r_j|L_{\max}$. International Conference on Project Management and Scheduling, (стр. 289-293). Tours.
5. Лазарев, А. А., Архипов, Д. И., & Мусатова, Е. Г. (2012). Задача минимизации максимального взвешенного временного смещения выполнения заказа для двух станций. Труды и пленарные доклады участников конференции УКИ'12 (стр. 1962-1967). Москва: ИПУ РАН.

Цельсова А.Ю., ИГУ РАН им. В.А. Трапезникова, г. Москва
Хоботов Е.Н., МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Разработка методики формирования маршрутов и расписаний движения грузовых поездов по железнодорожной сети

Введение

В нашей стране велика роль железнодорожного транспорта. Процесс ценообразования и конкурентоспособность во многом зависят от эффективности его функционирования. Совершенствование технологии работы железных дорог, и главным образом управление работой вагонного парка, является важной задачей для улучшения эффективности функционирования железных дорог России.

К основным процессам управления на железнодорожном транспорте относятся операции с грузовыми вагонами, связанные с погрузкой, сортировкой и формированием, перемещением, выгрузкой и регулированием их продвижения в порожнем состоянии. Для эффективного управления перевозками в отрасли создан и совершенствуется ряд автоматизированных систем, система автоматизированных диспетчерских центров управления перевозками, наращиваются возможности сети информационно-вычислительных центров [1]. Все это направлено на принятие рациональных решений по использованию перевозочных средств. Увеличение эффективности технологии работы с грузовыми вагонами делает железнодорожный транспорт более привлекательным для клиентуры и способствует привлечению грузопотоков.

Для того, чтобы обеспечить стабильность, ритмичность и устойчивость перевозочного процесса в условиях суточной неравномерности перевозок, необходимо оперативное перераспределение порожних вагонов в соответствии с непрерывно меняющейся обстановкой. Поэтому разработка принципов построения моделей и методов, позволяющих своевременно изымать образующие избытки парка на одних сортировочных станциях и компенсировать его недостаток на других, усиливая передачу порожних вагонов либо осуществляя сверхплановую погрузку в адрес соответствующих станций, является важной и актуальной [2-5]. Таким образом, регулирование парка порожних вагонов сводится, в основном, к разработке и реализации системы мер, обеспечивающих перемещение вагонов из районов, имеющих их избыток, в районы с недостатком погрузочных ресурсов.

Постановки задач

Рассмотрим постановку задачи, в которой необходимо выбирать маршруты доставки порожних вагонов с проходящими поездами.

Пусть задана железнодорожная сеть, включающая сортировочные станции. На каждой станции находится заданное количество порожних вагонов, которые требуется доставить к станциям дальнейшей погрузки с проходящими через станцию грузовыми поездами.

Доставка вагонов может осуществляться как одним, так и несколькими поездами путем прицепки соответствующего количества вагонов к поезду, проходящему через станцию, отправки и отцепки нужного количества вагонов на станциях назначения или на промежуточных сортировочных станциях, где эти вагоны будут прицепляться к другим поездам, следующим через эту сортировочную станцию позже. С помощью таких поездов ожидающие отправки порожние вагоны без дальнейших перецепок доставляются к станциям погрузки или на наиболее удобные станции для последующей их доставки с проходящими поездами на станции дальнейшей погрузки.

Для железнодорожной сети задана информация о поездах, проходящих по сети. О маршруте каждого поезда известны стоимость его выполнения, станция и время отправления, сортировочные станции, через которые поезд проходит по маршруту, время прибытия на них и отправления, а также конечная станция маршрута и время прибытия на нее. Известны станции дальнейшей погрузки порожних вагонов, а также штраф, выставляемый за простой каждого вагона. В каждый поезд может быть включено не более определенного количества вагонов, а вес перевозимых вагонов не может превышать заданную величину.

В задаче требуется из множества поездов определить такие поезда, которые позволят доставлять порожние вагоны от станций разгрузки до станций дальнейшей погрузки с целью минимизации количества перецепок, сокращения времени доставки, а также минимизации штрафов за простой.

Рассмотрим постановку задачи, в которой необходимо формировать маршруты движения поездов с порожними вагонами для их доставки к станциям погрузки.

Требования к работе железнодорожного транспорта и условия доставки порожних вагонов по железнодорожной сети, а также исходные данные аналогичны используемым данным в предыдущей задаче. Данную модель удобно использовать при большом накоплении порожних вагонов на станциях.

В задаче нужно сформировать маршруты движения поездов с порожними вагонами от станций разгрузки до станций дальнейшей погрузки с целью минимизации количества перецепок, сокращения времени доставки вагонов, минимизации штрафов за простой порожних вагонов. В дальнейшем это позволит наиболее эффективно управлять железнодорожными перевозками и доставлять грузы заказчикам.

Для решения этих задач предлагается использовать идеи и принципы, которые были предложены в [6-7] для решения задач, связанных с формированием маршрутов движения грузовых вагонов от станций отправления к станциям назначения с проходящими поездами, а также задач выбора маршрутов движения поездов по железнодорожной сети заданной конфигурации.

В этих работах предлагалось использовать для описания изменения количества вагонов в составе каждого поезда после прохождения сортировочной станции и изменения количества вагонов на сортировочных станциях после прохождения каждого поезда уравнения движения, которые строятся по аналогии с уравнениями, применяемыми в теории и методах управления дискретными системами и процессами [8-9].

Модель определения маршрутов сбора порожних вагонов с проходящими поездами

Рассмотрим принципы построения моделей для решения задачи, в которой необходимо выбирать маршруты доставки порожних вагонов с проходящими поездами.

Для решения этой задачи строится оптимизационная модель, принципы формирования которой основаны на использовании идей и принципов теории математического программирования [10-12] и управления дискретными процессами [8-9].

Изменение количества вагонов в составе q -го поезда после прохождения l -й станции могут быть представлены уравнением следующего вида:

$$U_q(l+1) = U_q(l) + \tilde{u}_q(l) - \tilde{v}_q(l), \tag{1}$$

$$U_q(l_{0q}) = 0, \quad U_q(n_q + 1) = 0, \tag{2}$$

$$0 \leq U_q(l) \leq L, \quad l = 1, \dots, n_q, \tag{3}$$

Где $U_q(l+1)$ – количество вагонов в поезде q после отправки с l -й станции; $U_q(l)$ – количество вагонов в поезде q перед прибытием на l -ю станцию; $\tilde{u}_q(l)$ – количество порожних вагонов, которые подцепляются к поезду q на l -й станции; $\tilde{v}_q(l)$ – количество порожних вагонов, которые отцепляются от поезда q на l -й станции; $U_q(l_{0q})$ – количество вагонов в поезде q на станции, которая является станцией отправления для q -го поезда, L – максимальное количество вагонов, которое может содержать любой поезд, где l_{0q} – станция

отправления q -го поезда, n_q – конечная станция маршрута q -го поезда.

Кроме количества вагонов в q -м поезде необходима также информация о типе вагона (с грузом или порожний), станции отправления и назначения каждого вагона в поезде, а также о ценности и весе вагона. Эта информация необходима для отцепки нужных вагонов на станции, через которую проходит поезд, и включения в состав поезда вагонов, ожидающихся на станции отправки, чтобы не нарушить ограничений на вес поезда.

Вес груза, который может перевозить любой поезд, не должен превышать заданной величины P . В связи с этим в модель вводится ограничение:

$$\sum_{j \in S_{lq}} \sum_{r=1}^M \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F \tilde{U}_{qf}^{jrh} (l+1) p_f - P \leq 0, \tag{4}$$

где p_f – вес вагона f -й весовой категории.

Уравнения, определяющие изменения в количестве грузовых и порожних вагонов на станциях после прохождения поездов, строятся таким же образом, как и уравнения динамики в теории управления дискретными процессами. Однако динамика в изменении количества грузовых и порожних вагонов на станциях после прохождения поездов в отличие от ранее рассмотренных уравнений динамики определяется порядком прохождения каждой станции поездами разных маршрутов.

На l -й станции не может храниться больше заданного количества вагонов \hat{W}_l , поэтому в модель вводят ограничения следующего вида:

$$\sum_{j \in I_{lq}} \sum_{r=1}^M \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F W_{lhf}^{qjr} (k) \leq \hat{W}_l, \quad l = 1, \dots, M, \quad k = 1, \dots, N_l. \tag{5}$$

Количество вагонов, которые можно отцеплять от поездов и прицеплять к ним на сортировочных станциях не может превышать определенной величины, поскольку имеются ограничения на максимальное количество вагонов, которое может содержать любой поезд, а также ограничения на максимальный вес поезда и на количество вагонов, хранящихся на станциях.

Для того, чтобы минимизировать штрафы, связанные с недоставленными заказчиком порожними вагонами, в модель включаются ограничения:

$$a_{ij}^{hf} - \sum_{q \in S_i} v_{qf}^{jih} (j) - y_{ij}^{hf} = 0, \tag{6}$$

а в оптимизируемом функционале минимизируется следующая сумма

$$\sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F y_{lj}^{hf}, \quad \text{где } y_{lj}^{hf} \text{ – вспомогательные пере-$$

менные ($y_{lj}^{hf} \geq 0$), определяющие количество вагонов, которые не удалось доставить заказчиком на станцию j со станции l .

Оптимизируемый функционал для такой модели может быть представлен в следующем виде:

$$F = \max \left\{ \begin{aligned} & \alpha_1 \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F \sum_{l=1}^M \sum_{\substack{q \in S_l \\ j=1 \\ l \neq j}}^M C_{ij}^{hf} v_{qf}^{jh} (j) - \\ & - \alpha_2 \sum_{l \in R_G} \sum_{f=1}^F \sum_{h=1}^H \sum_{\substack{j=1 \\ r=1 \\ r \neq j \\ r \in R_G}}^M \tilde{c}_{fh} v_{qf}^{jh} (l) - \\ & - \alpha_3 \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F \hat{c}_{lj}^{hf} y_{lj}^{hf} \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – весовые коэффициенты, \tilde{c}_{fh} – затраты на отцепку порожних вагонов от одного поезда на сортировочных станциях для ожидания «нужного» поезда и прицепку к этому поезду, \hat{c}_{lj}^{hf} – штраф за срыв доставки одного вагона h -й категории ценности и f -й весовой категории со станции отправления l на станцию назначения j .

Все переменные модели неотрицательны, т.е. все величины $U_{lq}, \tilde{u}_{lq}, \tilde{v}_{lq}, \tilde{U}_{qf}^{lh}(l), v_{qf}^{jh}(l), y_{lj}^{hf}$ могут принимать значения только большие или равные нулю. Расчеты модели сводятся к решению задачи линейного программирования с булевыми переменными.

В результате расчета модели определяются поезда, которые позволят доставлять порожние вагоны от станций разгрузки до станций дальнейшей погрузки с целью минимизации количества перецепок, сокращения времени доставки, а также минимизации штрафов за простой.

Модель формирования маршрутов сбора порожних вагонов

Рассмотрим принципы построения моделей для решения задачи, в которой необходимо формировать маршруты движения поездов с порожними вагонами для их доставки к станциям погрузки.

Для решения данной задачи также строится оптимизационная модель, принципы формирования которой основаны на использовании уравнений и идей, описанных в предыдущем пункте для решения задачи, в которой требуется выбирать маршруты доставки порожних вагонов с проходящими поездами.

Изменения количества вагонов в составе каждого поезда q после прохождения сортировочной станции l предлагается описывать с помощью уравнений движения, которые аналогичны уравнениям (1). Однако ограничения на количество вагонов в поезде q для этой модели имеют следующий вид:

$$0 \leq U_q(l) z_q \leq L, 0 \leq \tilde{u}_q(l) z_q \leq L, l=1, \dots, n_q, \quad (8)$$

где z_q – булевы переменные типа $\{0,1\}$.

Уравнения, которые определяют изменения количества вагонов и их типов в составе q -го поезда имеют такой же вид, как и в предыдущей задаче.

Ограничение на вес груза, который может перевозить любой поезд, имеет вид (4). Ограничения на количество вагонов, которые могут храниться на станциях в ожидании «подходящих» поездов, имеют вид (5).

Оптимизируемый функционал для такой модели имеет следующий вид:

$$F = \max \left\{ \begin{aligned} & \alpha_1 \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F \sum_{l=1}^M \sum_{\substack{q \in S_l \\ j=1 \\ l \neq j}}^M C_{ij}^{hf} v_{qf}^{jh} (j) - \\ & - \alpha_2 \sum_{l \in R_G} \sum_{f=1}^F \sum_{h=1}^H \sum_{\substack{j=1 \\ r=1 \\ r \neq j \\ r \in R_G}}^M \tilde{c}_{fh} v_{qf}^{jh} (l) - \\ & - \alpha_3 \sum_{q=1}^Q b_q z_q - \alpha_4 \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^M \sum_{h=1}^H \sum_{f=1}^F \hat{c}_{lj}^{hf} y_{lj}^{hf} \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где α_i – весовые коэффициенты ($i=1, \dots, 4$), b_q – стоимость движения поезда q по соответствующему маршруту на железнодорожной сети. Все переменные модели неотрицательны. Расчеты данной модели сводятся к решению задачи целочисленного линейного программирования.

В результате расчета модели формируются маршруты движения поездов с порожними вагонами от станций разгрузки до станций дальнейшей погрузки с целью минимизации количества перецепок, сокращения времени доставки вагонов, минимизации штрафов за простой порожних вагонов.

Таким образом, фактически определяется маршрут движения каждого порожнего вагона от станции разгрузки до станции дальнейшей погрузки. При этом выполняются ограничения на количество и вес вагонов в каждом поезде, а также на количество вагонов на станциях, на которых происходит перецепка вагонов с одного поезда на другой.

Величины $U_{lq}, \tilde{u}_{lq}, \tilde{v}_{lq}, \tilde{U}_{qf}^{lh}(l), v_{qf}^{jh}(l), y_{lj}^{hf}$ выбираются таким образом, чтобы максимизировать доход, получаемый от своевременной доставки порожних вагонов на станции погрузки и минимизировать затраты на количество перецепок на станциях, где порожние вагоны дождаются «подходящих» поездов, а также минимизировать штрафы за несвоевременную доставку порожних вагонов на станции дальнейшей погрузки.

Программная реализация системы

Компьютерную систему, позволяющую решать рассмотренные выше задачи, предлагается строить по модульному принципу. Каждый модуль такой системы выполняет определенные функции. В состав системы включены следующие модули:

- Модуль ввода исходных данных
- Модуль выбора моделей решения описанных выше задач

- Модуль расчета сформированных моделей
- Модуль автоматизации движения вагонов
- Модуль сбора, хранения и отображения информации, полученной в результате расчетов моделей и редактирования маршрутов.

С использованием предложенных в статье моделей было решено более тридцати задач, связанных с выбором и формированием маршрутов сбора порожних вагонов для их доставки к станциям погрузки. Проведенные расчеты задач показали, что с использованием разработанных моделей удается достаточно быстро определять такие поезда, которые позволят производить сбор порожних вагонов от станций разгрузки до станций дальнейшей погрузки, а также достаточно быстро формировать маршруты движения поездов с порожними вагонами от станций разгрузки до станций дальнейшей погрузки.

Результаты использования предлагаемых моделей и пакета численных методов оптимизации GLPK могут быть представлены на примере решения следующей задачи.

Пусть задана железнодорожная сеть, которая включает 50 сортировочных станций. На каждой станции находится заданное количество порожних вагонов от 0 до 30 штук, которые требуется доставить к станциям загрузки с проходящими через станцию поездами. Для каждого вагона известен штраф за несвоевременную доставку. По сети в соответствии с заданным расписанием и маршрутами совершают свои рейсы 7 поездов. О маршруте каждого поезда известны: станция и время его отправления, сортировочные станции, через которые поезд проходит по маршруту, время прибытия на них и отправления, а также станция назначения и время прибытия на нее. В состав каждого поезда может входить не более 40 вагонов.

В задаче требовалось определить маршруты движения поездов с порожними вагонами от станций разгрузки до станций дальнейшей погрузки, таким образом, чтобы минимизировать количество перцепков, сократить время доставки порожних вагонов, минимизировать штрафы за простой и за несвоевременную доставку к станциям погрузки. Расчеты задачи использовали 400 Мб оперативной памяти и заняли 80 секунд. В результате решения задачи были определены маршруты движения каждого порожнего вагона с проходящими поездами, станции, на которых производилась их перцепка с одного поезда на другой, если это требовалось, а также информация о порожних вагонах, которые не удалось вовремя на станции дальнейшей загрузки.

Заключение

Целью реформирования железнодорожного транспорта является повышение эффективности его работы, доступности, качества предоставляемых им услуг. Важно формирование единой, гармоничной транспортной системы, снижение совокупных народно-хозяйственных затрат на перевозки грузов и оптимальный сбор порожних вагонов, а также удовлетворение растущего спроса на услуги, предоставляемые железнодорожным транспортом.

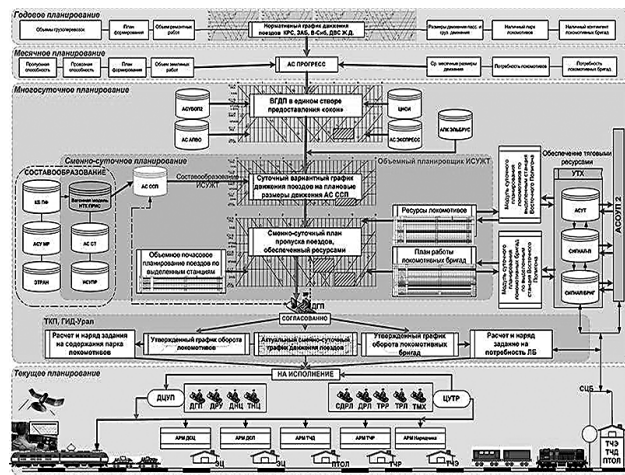
Литература:

1. Ковалев В.И., Елисеев С.Ю., Осьминин А.Т. Управление парками вагонов стран СНГ и Балтии на железных дорогах России: учебное пособие для вузов железнодорожного транспорта – М.: Маршрут, 2006, С. 5-17.
2. Липидус Б.М. Повышение производительности и эффективности железнодорожного транспорта на инновационной основе / Вестник ВНИИЖТ, 2012, № 5, С. 3-6.
3. Морозов В.Н. Поиск оптимальной технологии / Пульс управления, 2012, № 5, С. 6-9.
4. Большие маневры / Пульс управления, 2012, № 5, С. 10-13.
5. Виксне Д. Компромисс порядка. Минтранс, РЖД и операторы едины в оценке мер по управлению парком / Гудок, 2012, № 41, С. 4.
6. Хоботов Е.Н., Цельсова А.Ю. Модель формирования маршрутов движения вагонов от станций отправления грузов до станций назначения. Труды Второй научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» (ИСУЖТ-2013), 21-22 октября 2013 г., Москва, С. 87-88.
7. Хоботов Е.Н., Цельсова А.Ю. О выборе маршрутов движения поездов и вагонов при доставке грузов по железнодорожной сети. Тезисы Четвертой международной научно-практической конференции «Интеллектуальные системы на транспорте». С.-Петербург, 3-4 апреля 2014 г., С. 35-36.
8. Пропой А.И. Элементы теории оптимальных дискретных процессов. М.: Наука, 1973, – 256 с.
9. Болтянский В.Г. Оптимальное управление дискретными системами. М.: Наука, 1973, – 446 с.
10. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. – М.: Наука, 1983, – 382 с.
11. Галеев Э.М. Оптимизация. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010, – 336 с.
12. Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В. Курс методов оптимизации. – М.: Наука, 1986, – 328 с.

Капустин Н.И., ОАО «НИИАС», г. Москва

Технологическая архитектура принципов управления эксплуатационной работой на железной дороге в ПТК ИСУЖТ

Как показала практика, компьютерное и математическое моделирование сложного перевозочного процесса железных дорог невозможно без учета технологических принципов управления производственными процессами всех предприятий, причастных к перевозкам и не увязанных их между собой.



Структура планирования ресурсов и производственных процессов на железнодорожном транспорте в ПТК ИСУЖТ

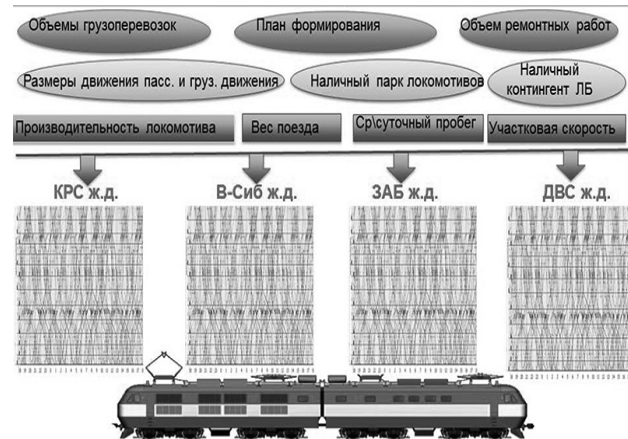
Технология планирования производственных ресурсов в перевозочном процессе на железнодорожном транспорте имеет сложную многоуровневую структуру, которая состоит из нескольких этапов:

- годовое;
- месячное;
- многосуточное;
- сменно-суточное;
- текущее планирование.

Во главу производственного перевозочного процесса в ПТК ИСУЖТ поставлен ГДП. На слайде вы видите, что все стрелки направлены к нему и от него.

Выполнение графика движения поездов – есть основа рационального использования пропускных способностей инфраструктуры и обеспечения единой технологии процесса перевозок.

Приведенный слайд очень сложно воспринимается, по причине значительного множества количественных факторов технического и технологического характера, влияющих на эксплуатационную работу.

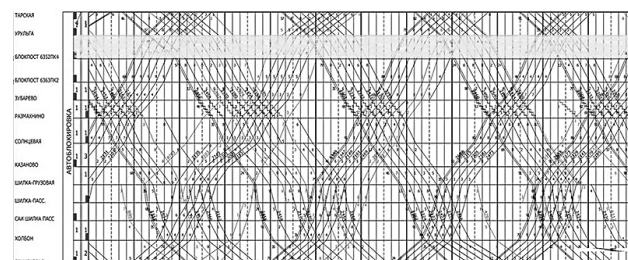


Разработка нормативного графика движения поездов на железных дорогах ВП

Годовое планирование

Над автоматизированной разработкой НГДП и его составляющих (на основе мультиагентных технологий) работает целое отделение ОАО «НИИАС», возглавляемое Абрамовым А.А. доклад, которого мы услышим ниже.

На основании обработки данных НГДП в АС Прогресс прогнозирует аналогичные показатели по месяцам в течение года.



Поступившая в разработку ВГДП на участке Урульга — Зубарево Забайкальской железной дороги

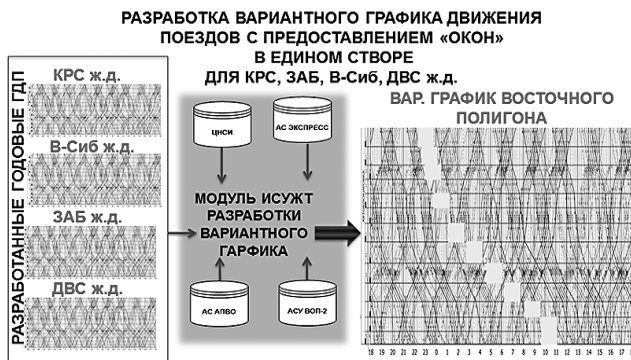
Многосуточное планирование на 3-7 суток

В модуле ПТК ИСУЖТ «ГРАФИК» заложен алгоритм разработки ВГДП с предоставлением «окон» в едином створе (прототип АС ЭЛЬБРУС).

Для его разработки и построения модуль использует информацию:

- на следующие сутки;
- из АС ЭКСПРЕСС – по размерам движения пассажирских поездов;

- из АС АВПО, АС ВОП2 - предоставление «окон» по ремонту инфраструктуры и ограничения скорости;
- суточный ВГДП с каждой железной дороги в LGX;
- на вторые и последующие сутки;
- из АС ЭКСПРЕСС размеры движения пассажирских поездов;
- из АС АВПО, АС ВОП2 - предоставление «окон» по ремонту инфраструктуры и ограничения скорости;
- из АС ПРОГРЕСС - размеры движения;



Многосуточное планирование поездной работы на железных дорогах (3-7 суток)

Полигонный ВГДП *не есть* основа организации движения поездов по расписанию (АС ЭЛЬБРУС).

Суточное планирование эксплуатационной работы по техническим станциям

Основой для разработки суточного СВГДП служит разработанный МВГДП в едином створе полигона.

В модуль разработки суточного ВГДП по всем техническим станциям ВП поступает откорректированная информация о прогнозных размерах движения из АС ССП. Детализированные актуальные размеры движения транзитных поездов поступают в БД ИСУЖТ из базы данных АСОУП2.



Разработка СВГД поездов с учетом реальных размеров движения

Одновременно с этим специалистами ОАО «НИИАС» разрабатывается модуль ПТК ИСУЖТ «СОСТАВООБРАЗОВАНИЕ» на основе динамической вагонной модели рабочего парка.

Реализация этой задачи позволит автоматизировать процесс составления и необходимость ручного ввода информации в АС ССП отпадет:

- автоматизировать и урегулировать процесс перемещения порожних вагонов;
- сократить их встречные пробеги;
- усовершенствовать технологические процессы управления;
- снизить нагрузку на инфраструктуру от непроизводительного перемещения подвижного состава;
- создать условия для перевозки дополнительных объемов грузов.

На основании поступивших прогнозных размеров движения грузовых поездов из АС ССП (далее из ПТК ИСУЖТ «СОСТАВООБРАЗОВАНИЕ») в ПТК ИСУЖТ реализован модуль суточного расчета нормативной потребности эксплуатируемого парка локомотивов по выделенным участкам тягового полигона, в том числе по депо приписки. Достоверность расчета по нормированию тяги, в т.ч. по мощности локомотивов, зависит от точности прогнозируемых размеров движения поездов по техническим станциям из АС ССП.

Оперативное нормирование

Дата: 14.11.2014

Модуль: ОПЕРАТИВНОЕ НОРМИРОВАНИЕ

Получено: 14.11.2014 14:00

№	Наименование расчетных участков	Время	Потребность локомотивов												Итого				
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12					
1	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	6:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	7:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	8:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	9:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	10:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	11:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	12:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	13:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	14:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	15:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	16:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	17:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	18:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	19:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	Муромский - Курск, Кривяцкая ИД	0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Итого			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Оперативное нормирование локомотивов на тяговых полигонах ВП

Сегодня тестирование показывает, что автоматизированные расчеты по нормированию к фактическому наличию локомотивов на полигонах по отчету ТОЗ2ВЦ расходятся на 3-5% в большую сторону, на такое же количество завышаются размеры движения поездов.

Для окончательного построения СВГДП предъявленные размеры движения из АС ССП, подкрепленные актуальными данными из АСОУП2 (далее с СЦБ) обрабатываются Объемными планировщиками модуля ПТК ИСУЖТ «ПОЕЗДА» с реализацией предъявленных размеров движения на нитки графика и оптимизацией их в почасовых интервалах по всем техническим станциям ВП.

По результатам работы планировщика «ПОЕЗДА» (по выходной таблице) можно оценить:

- ритмичность работы станции по приему и отправлению транзитных ТР поездов, в т.ч. поездов своего формирования СФ;

- достоверность прогнозного пропуска предъявленных размеров движения;
- фактическую пропускную способность станции (на основании контроля свободности и занятости приемо-отправочных путей на станции, в т.ч. к установленной норме простоя поездов по графику).



Обеспечение тяговыми ресурсами предъявленных объемов перевозок по техническим станциям по железным дорогам ВП

Результаты работы планировщика «ЛОКОМОТИВ»

Алгоритмы расчета очень сложные: Планировщику по локомотивам необходимо:

- смоделировать прогнозную работу всех технических станций по своевременному обеспечению поездов тягой в почасовых периодах в течение планируемых суток;
- подбора свободной нитки графика для отправления локомотивов резервом по регулировке;
- обеспечить остаток локомотивов в переходном резерве на следующие переходные сутки;
- соблюдение периодичности плановых видов ремонта и ТО2;
- обеспечить установленную технологию эксплуатации локомотивов на тяговом полигоне.

Планировщику по локомотивным бригадам еще сложнее, необходимо смоделировать прогнозную работу всех технических станций по своевременному обеспечению поездов, локомотивов контингентом ЛБ с учетом:

- соблюдения трудового законодательства;
- выполнения технологии работы ЛБ в установленном доле участия основного и оборотного депо;
- остатка резерва на следующие переходные сутки.

Алгоритм и результаты выходной таблицы имеют сложную форму.

Ниже представлена реализованная выходная форма результатов планирования модуля ПТК ИСУЖТ по работе объемных планировщиков по всем техническим станциям ВП (их более 70). (В закладке «ГОРИЗОНТ ПЛАНИРОВАНИЯ» зафиксирована работа объёмных и пообъектных планировщиков, в закладке «КАТЕГОРИЯ» их работа разграничена отдельно на

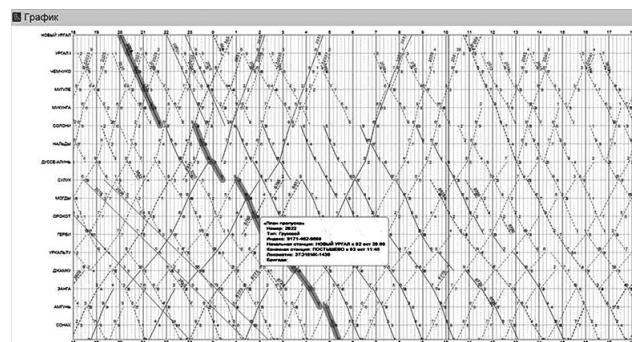
«ПОЕЗДА», «ЛОКОМОТИВ», «ЛБ»); Более 400 логических таблиц, которые имеют разную конфигурацию.

Суточное объемное планирование прибытия, отправления поездов по техническим станциям ВП

После:

- ритмичного, оптимального распределения грузовых поездов по ниткам графика;
- выбора ниток графика для выполнения регулировочных заданий по пересылке локомотивов резервом на станции дефицита локомотивов;
- обеспечения поездов локомотивами на всех станциях (с обеспечением переходного запаса на следующие сутки);
- обеспечением поездов и локомотивов необходимым контингентом ЛБ.

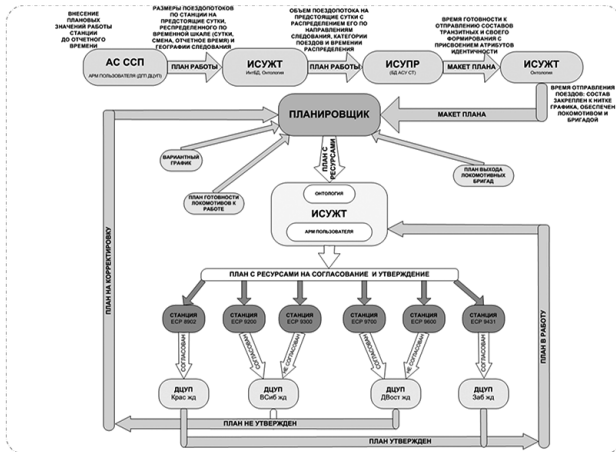
Разработанный СВДП (ПЛАН-ПРОПУСКА) с анализом в табличной форме (по часовым периодам) по каждой технической станции ВП должен поступать в ЦУТР руководителям диспетчерских смен, на станции ДСП на согласование.



План пропуска поездов

Если кем-то из руководителей ЦУТР, ДЦУП, станции предложенный вариант пропуска поездов не согласован, то конкретные замечания и предложения поступают обратно в модуль ПТК ИСУЖТ для доработки. И так будет повторяться, пока новый вариант не будет согласован.

Ниже показана структурная схема согласования.

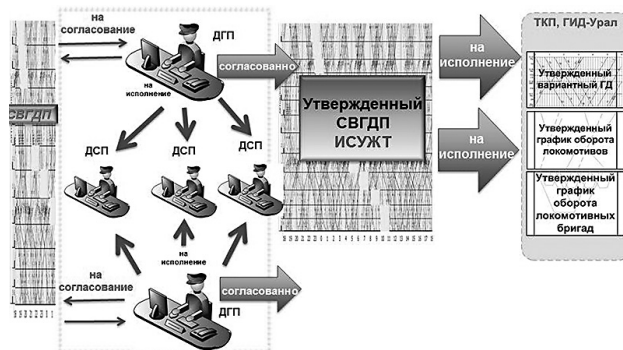


План схема работы модуля согласования составообразования в ПТК ИСУЖТ

После согласования утвержденный ВАРИАНТ, обеспеченный тяговыми ресурсами поступает на исполнение:

- в АС ГИД УРАЛ (СВДДП);
- в ЦУТР;
- диспетчерские центры ДЦУП;
- на предприятия ДСП и ТЧД;
- машинистам на локомотив.

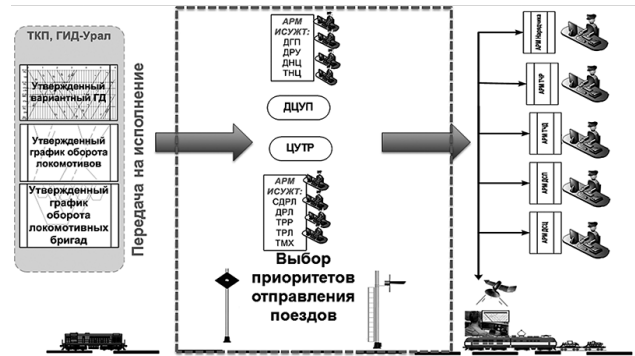
В последствие нитка графика через ГЛОНАС на компьютер локомотива.



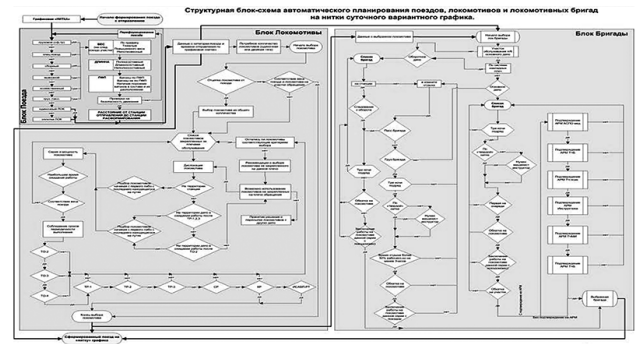
Сменно-суточное планирование и согласование приема/отправления поездов на технических станциях ВП

При текущем планировании реализуется качественная работа модулей пообъектных планировщиков ПТК ИСУЖТ с реализацией функций отправления поездов на запланированные нитки графика (по приоритетам), подвязки локомотивов к поездам (по их силе тяги и мощности с соблюдением технологии их работы), ЛБ к локомотивам и поездам (в соответствии соблюдения трудового законодательства и технологии работы по обслуживанию УОЛБ).

Алгоритм работы пообъектных планировщиков при текущем планировании «ПОЕЗДА», «ЛОКОМОТИВ», «ЛБ» имеет сложную конфигурацию и имеет вид:



Текущее исполнение графиков плана пропуска поездов, оборота локомотивов и локомотивных бригад на железных дорогах ВП



Текущее планирование. Алгоритм работы пообъектного планировщика с учетом соблюдения технологии и приоритетов

На рисунке показана выходная форма автоматической подвязки ЛОКОМОТИВА к ПОЕЗДУ и прогнозируемой нитке графика. Аналогичные выходные формы по поездам и ЛБ (АСУ ПОЛИГОН, АС ППЛБ).

ТАБЛО ПРОГНОЗА ГОТОВНОСТИ ЛОКОМОТИВА К ПОДВЯЗКИ К ПОЕЗДУ НА ДОРОЖЕ ДВС СТАНЦИИ ХАБАРОВСК II В НАПРАВЛЕНИИ РУЖИНО

7	СТАНЦИЯ	3	ПОЕЗДА		ЛОКОМОТИВ		6
			приб	отпр	приб	отпр	
1004	2500	8512-252-9700	12:50	56/57	4200t "A"/15n	13:20	13:20
2004	...	8512-252-9700	13:55	56/57	4200t "A"/15n	14:20	14:20
3004	...	8512-252-9700	13:55	56/57	4200t "A"/15n	14:20	14:20
4004	...	8512-252-9700	13:55	56/57	4200t "A"/15n	14:20	14:20
5004	...	8512-252-9700	13:55	56/57	4200t "A"/15n	14:20	14:20
6004	...	8512-252-9700	13:55	56/57	4200t "A"/15n	14:20	14:20

Текущее планирование локомотивов на технических станциях ВП

На приведенном примере реализована выходная форма ПТК ИСУЖТ, текущее 6 часовое планирование и регулирование прибытия и отправления грузовых поездов с локомотивами и локомотивными бригадами со станции Слодянка.

Однако в процессе осуществления перевозок на актуальный график непрерывно воздействует мно-

жество факторов: отказы технических средств, поддержка окон, неисправность локомотивов, дефицит тяги, контингента ЛБ, ДЕФИЦИТ пропускных способностей станции и т.д.

Планирование, регулирование, контроль исполнения

Маршрут	Локомотив	Станция назначения	Станция отправления	Время прибытия	Время отправления	Секунды	Минуты	Часы	Минуты	Секунды	Минуты	Секунды	Часы	Минуты	Секунды
Москва - Киев	ИЭМ	Киев	Москва	14:30	14:45	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Москва - Санкт-Петербург	ИЭМ	Санкт-Петербург	Москва	18:00	18:15	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

ИСУЖТ. Текущее планирование прибытия и отправления поездов

Для решения этих конфликтных ситуаций, т.е. ввоза поездов в расписание необходимо адаптировать

разработанный модуль ПТК ИСУЖТ Санкт-Петербург – Бусловская, Санкт-Петербург – Москва, позволяющий в реальном времени строить оптимальный ГДП и возвращать пассажирские и грузовые поезда в график.

Разработка и внедрение технологических принципов управления производственными процессами, взаимно увязанных между собой, при математическом моделировании в ПТК ИСУЖТ позволит:

1. Увеличить объемы перевозок в рамках существующей пропускной способности;
2. Обеспечить оптимальную ритмичность продвижения поездопотока;
3. Существенно улучшить показатели работы технических станций;
4. Сократить эксплуатационные затраты;
5. Оптимизировать контингент локомотивных бригад;
6. Усовершенствовать технологию управления тяговыми ресурсами;
7. Осуществлять пропуск поездов с соблюдением сроков доставки на любые расстояния;
8. Выполнять ремонтно-путевые работы с оптимальными сроками и максимальными объемами.

Бородин А.Ф., ОАО «НИИАС», г. Москва
Сайбаталов Р.Ф., ОАО «РЖД», г. Москва

Методы устранения эксплуатационных затруднений на основе оценки манёвренности и вариантных технологических режимов работы полигонов железнодорожной сети

Введение

Для повышения технологической эффективности использования железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава в условиях накопления избыточного вагонного парка нужны новые научно-методические решения. Такие решения должны содержать комплекс методов устранения затруднений в эксплуатационной работе полигонов железнодорожной сети, которые принципиально делятся на две группы:

- 1) методы, основанные на регулировании загрузки полигонов сети железных дорог, испытывающих затруднения (регулирование погрузки по назначениям, размещения парков порожних вагонов, направления транзитных вагонопотоков, подвода поездов);
- 2) методы, основанные на интенсификации работы полигонов сети железных дорог, испытывающих затруднения (интенсификация выгрузки и развоза местного груза, вывоза поездов с сортировочных и грузовых станций, интенсификация маршрутных перевозок и др.).

Вторая группа методов, в отличие от первой, позволяет локализовать возникающие затруднения и предотвратить их распространение по сети, но в конкретных условиях методы этой группы могут оказаться более затратными либо технически нереализуемыми. Поэтому применение указанных методов должно иметь расчетное обоснование.

Уровень организации транспортных потоков

Сетевые регулировочные меры четырех классов (ограничение поступления вагонов рабочего парка на полигон; интенсификация сдачи («сброс») вагонов рабочего парка с полигона; вывод порожних вагонов из участия в перевозочном процессе – в отстой на станции с незагруженной путевой емкостью или в нерабочий парк; вывод вагонов на железнодорожные пути необщего пользования) сегодня необходимо классифицировать на меры, проводимые железными дорогами самостоятельно, и меры, которые осуществимы только при взаимодействии: 1) с отправителями и получателями грузов; 2) с отправителями и получателями порожних вагонов; 3) с владельцами железнодорожных путей необщего пользования.

По отношению к полигону, испытывающему экс-

плуатационные затруднения, регулировочные меры могут быть как внутренними, так и внешними. Так, интенсификация сдачи вагонов с полигона может быть организована без уменьшения их приема – за счет повышения транзитности поступающих вагонопотоков и более рациональных весовых норм.

Рассмотрим два взаимодействующих полигона железнодорожной сети А и В (которые в общем случае могут не быть смежными либо принадлежать разным железнодорожным инфраструктурам).

Повышая уровень организованности транспортного потока, следующего на полигон В, в пространстве (по назначениям, весу и длине поездов) и во времени (по темпам подвода), полигон А затрачивает инфраструктурные и временные ресурсы Z_A . Полигон В при этом получает экономию соответствующих ресурсов Z_B ; чем выше упорядоченность транспортного потока, тем меньше потребность в перерабатывающих мощностях и емкости путевого развития.

Но, кроме того, полигон А сам для себя снижает риск неприема потока полигоном В, то есть снижает вероятность ситуации, когда экономические потери полигона А составят величину

$$R \gg E(Z_A),$$

где $E(Z_A)$ – стоимостная оценка затрачиваемых ресурсов Z_A .

Имеет место Р-модель стохастического программирования с целевой функцией минимизации вероятности превышения величины R над $E(Z_A)$:

$$P(R > E(Z_A)) \rightarrow \min,$$

ограничениями на привлекаемые ресурсы

$$Z_A \leq Z^*_A,$$

и на допустимые потери в финансовом результате

$$M[R(H_{\text{дост}}, H_{\text{обесп}}^{\text{потр}}, H_{\text{обесп}}^{\text{вмв}})] \leq R_{\text{max}},$$

где $H_{\text{дост}}$ – надежность выполнения сроков доставки грузов и порожних вагонов, не принадлежащих перевозчику (в том числе при перевозках с согласованным временем отправления и прибытия, устанавливаемым договором); $H_{\text{обесп}}^{\text{потр}}$ – надежность обеспечения при-

нятых заявок на перевозки грузов погрузочными ресурсами; $H_{обесп}^{ВВВ}$ – надежность обеспечения тяговыми ресурсами вывоза поездов с технических и грузовых станций.

Особенно важно учитывать это при организации взаимодействия железнодорожных инфраструктур разной принадлежности. Здесь нужно оценивать рассматриваемые риски, а не стремиться непременно получить с партнёра по перевозочному процессу оплату за дополнительные услуги по упорядочению потоков передаваемых транспортных единиц.

Манёвренность полигонов железнодорожной сети

Известно, что перенасыщение железных дорог вагонным парком снижает их манёвренность. Количественная оценка этого явления дана проф. Е.А.Сотниковым [1], предложившим коэффициент манёвренности полигона железнодорожной сети, вычисляемый по соотношениям фактического рабочего парка грузовых вагонов и его граничных значений:

$$\alpha_{ман} = 100 (P_{max} - P_{факт}) / (P_{max} - P_{техн}),$$

$$0 \leq \alpha_{ман} \leq 100\%,$$

где $P_{факт}$ – фактический рабочий парк грузовых вагонов, участвующих в перевозочном процессе, на путях железнодорожной инфраструктуры общего пользования; $P_{техн}$ – наибольший технически допустимый (рациональный) рабочий парк грузовых вагонов, участвующих в перевозочном процессе, на путях железнодорожной инфраструктуры общего пользования, при котором станции полигона обеспечивают беспрепятственный прием поездов; P_{max} – рабочий парк грузовых вагонов, участвующих в перевозочном процессе, на путях железнодорожной инфраструктуры общего пользования, при превышении которого все поезда на полигоне следуют с задержками на подходах к техническим и грузовым станциям.

Значение $\alpha_{ман} = 0$, когда $P_{факт} \geq P_{max}$ и все поезда следуют по полигону с задержками по неприему станциями. $\alpha_{ман} = 100\%$, когда $P_{факт} \leq P_{техн}$ и все поезда следуют по полигону беспрепятственно.

Таким образом, коэффициент манёвренности $\alpha_{ман}$ характеризует долю вагонопотока, которая при фактическом вагонном парке может следовать по полигону беспрепятственно – без задержек по неприему станциями, внешними стыковыми пунктами полигона, а также без задержек обмена вагонами с железнодорожными путями необщего пользования, выражающихся сверхнормативными остатками неподанных (неубранных) вагонов.

Теоретически, безусловно, правильной будет организация эксплуатационной работы, при которой $\alpha_{ман} = 100\%$. Однако в силу комплекса причин этот

идеал для отечественной железнодорожной сети недостижим уже десятки лет. Движенческая практика требует ответа на вопросы о том, как изменяются эксплуатационные показатели при снижении манёвренности железнодорожных полигонов, и какая степень потерь манёвренности является предельно допустимой.

Допустимое значение $\alpha_{ман}$ определяют четыре основных фактора: 1) $H_{гдп}^{пс}$ – надежность выполнения графика движения пассажирских поездов (в части опозданий пассажирских поездов из-за неудовлетворительной организации грузового движения); 2) $H_{дост}$; 3) $H_{обесп}^{погр}$; 4) $H_{обесп}^{ВВВ}$.

Необходимо для железнодорожного полигона вычислить функции $H_{гдп}^{пс} = f_1(\alpha_{ман})$, $H_{дост} = f_2(\alpha_{ман})$, $H_{обесп}^{погр} = f_3(\alpha_{ман})$, $H_{обесп}^{ВВВ} = f_4(\alpha_{ман})$, значения которых с повышением $\alpha_{ман}$ монотонно возрастают и стремятся к единице (см. рис. 1). Минимальное допустимое значение коэффициента манёвренности полигона

$$\alpha_{ман}^* = \max \{ \alpha_{ман(1)}^*; \alpha_{ман(2)}^*; \alpha_{ман(3)}^*; \alpha_{ман(4)}^* \},$$

где $\alpha_{ман(1)}^*$, $\alpha_{ман(2)}^*$, $\alpha_{ман(3)}^*$, $\alpha_{ман(4)}^*$ – значения $\alpha_{ман}$ при минимальных допустимых значениях соответствующих показателей надежности $H_{гдп}^{пс}$, $H_{дост}$, $H_{обесп}^{погр}$, $H_{обесп}^{ВВВ}$.

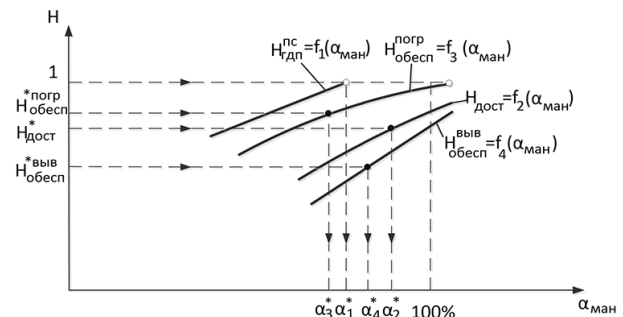


Рис.1

Допустимое значение $H_{гдп}^{пс}$ близко к единице. Потери манёвренности полигона не должны выходить за пределы, когда грузовые поезда и грузовые вагоны начнут занимать пути перегонов и станций в то время, когда графиком движения предусмотрено следование по этим путям пассажирских и пригородных поездов. Указанные пределы характеризуются значением $\alpha_{ман(1)}^*$.

Допустимые значения $H_{дост}$, $H_{обесп}^{погр}$, $H_{обесп}^{ВВВ}$ близки к единице в идеальных условиях эксплуатации, когда нет дефицита инфраструктурных и перевозочных ресурсов. В общем случае в затрудненных условиях работы указанные значения надежности меньше единицы. Их отыскание – технико-экономическая задача. Её нужно решать совместно для всех трёх компонентов надежности грузового движения, так как для их обеспечения используются общие ресурсы.

Таким образом, среди возможных значений $H_{дост} \leq 1$, $H_{обесп}^{погр} \leq 1$, $H_{обесп}^{ВВВ} \leq 1$ необходимо отыскать мно-

жество значений $\{N_{\text{дост}}^*; N_{\text{обесп}}^{\text{погр}}; N_{\text{обесп}}^{\text{вмб}}\}$, обеспечивающее минимум математического ожидания суммарных потерь в финансовом результате

$$F = M [R (N_{\text{дост}}^*, N_{\text{обесп}}^{\text{погр}}, N_{\text{обесп}}^{\text{вмб}})] \rightarrow \min$$

при соблюдении ограничений на доступные ресурсы

$$Z \leq Z^*.$$

Z является вектор-функцией от $\alpha_{\text{ман}}$, характеризующей инфраструктурные ресурсы (перерабатывающие способности сортировочных комплексов и грузовых терминалов, накопительные и регулирующие емкости путевого развития, пропускные способности станций, участков и внутриузловых ходов) и перевозочные ресурсы (парки подвижного состава, контингент локомотивных бригад).

Потери в финансовом результате R учитывают дополнительные расходы, связанные с обеспечением надежности в условиях существующих ограничений, и потери доходов, связанные как с рисками штрафных выплат за ненадлежащее исполнение обязательств по перевозочному процессу, так и с рисками снижения доходных поступлений из-за отказа части грузоотправителей от услуг железнодорожного транспорта.

Последнее обстоятельство требует дифференцированного подхода к организации работы в разных сегментах рынка транспортных услуг.

Расчет показателей работы вагонных парков

В ОАО «НИИАС» с участием специалистов ОАО «ВНИИЖТ», ОАО «ИЭРТ» и научно-производственного холдинга «Стратег» выполнено исследование маневренности полигонов железнодорожной сети и разработаны нормативы рационального соотношения вагонных парков и вместимости путей сортировочных, участковых и грузовых станций с учетом увеличения доли частных вагонов [2].

Исходя из результатов данного исследования, в ОАО «РЖД» разработана и утверждена Методика расчета показателей работы вагонных парков, позволяющих осуществлять мониторинг, анализ и оценку влияния избыточности парков на эффективность и результативность работы сети.

В рамках указанной Методики эффективность работы сети ОАО «РЖД» выражается в оценке влияния избыточности вагонных парков на показатели использования перевозочных ресурсов – скорости движения поездов, производительность локомотива, оборот грузового вагона, а результативность работы сети – в оценке влияния избыточности вагонных парков на объем выполняемых перевозок через возможности инфраструктуры в пунктах погрузки, выгрузки и в пути следования.

В методике предусмотрено определение величины рабочего парка грузовых вагонов по двум критериям:

технологически необходимого (потребного) для выполнения заданных объемов перевозок;

технически допустимого (рационального) по условиям сохранения маневренности подразделений железнодорожной сети.

При этом величина рабочего парка рассматривается отдельно на инфраструктуре общего и необщего пользования.

Технологически необходимый (потребный) рабочий парк грузовых вагонов, участвующих в перевозочном процессе, $P_{\text{раб.потр}}$ (в том числе на путях общего пользования инфраструктуры ОАО «РЖД» $P_{\text{раб.потр.оп}}$ и на железнодорожных путях необщего пользования $P_{\text{раб.потр.ноп}}$) определяется по родам вагонов и подразделениям сети, исходя из прогнозируемой перевозочной работы в месяце максимальных грузовых перевозок, а также прогнозируемых изменений груженого рейса вагона, коэффициента порожнего пробега и коэффициента транзитности вагонопотоков по техническим станциям (в части, зависящей от системы управления вагонными парками), (в частности, в зависимости от системы управления вагонными парками), коэффициента двоярных грузовых операций.

Технически допустимый (рациональный) рабочий парк грузовых вагонов, участвующих в перевозочном процессе, при котором станции полигона обеспечивают беспрепятственный прием поездов и беспрепятственный обмен вагонов с железнодорожными путями необщего пользования,

$$P_{\text{техн}} = P_{\text{техн.оп}} + P_{\text{техн.ноп}} = P_{\text{техн.ст}} + P_{\text{техн.уч}} + P_{\text{техн.ноп}}$$

где $P_{\text{техн.оп}}$, $P_{\text{техн.ноп}}$ – наибольший технически допустимый (рациональный) рабочий парк грузовых вагонов, участвующих в перевозочном процессе, находящихся соответственно на путях общего пользования инфраструктуры ОАО «РЖД» (в том числе на станциях $P_{\text{техн.ст}}$ и в поездах на участках $P_{\text{техн.уч}}$) и на железнодорожных путях необщего пользования.

Для железнодорожного полигона

$$P_{\text{техн}} = \Sigma P_{\text{техн.ст}} + \Sigma P_{\text{техн.уч}};$$

$$\Sigma P_{\text{техн.уч}} = \Sigma n_{\text{гдп}} m_{\text{ун}} / 24,$$

где $\Sigma n_{\text{гдп}}$ – сумма поездо-часов на участках полигона по нормативному графику движения поездов; $m_{\text{ун}}$ – унифицированная длина состава поезда, условных вагонов.

Рациональное соотношение вместимости путевого развития и рабочего парка вагонов для железнодорожной станции (пути необщего пользования):

$$\Phi_{\text{рац.ст(ноп)}} = (E_{\text{в.ст(ноп)}} - \Sigma E_{\text{отст}}) / (P_{\text{техн.ст(ноп)}} \omega)$$

где $E_{\text{в.ст(ноп)}}$ – вместимость путей станции (пути необщего пользования), предназначенных для нахождения на них грузовых вагонов, условных вагонов;

$\Sigma E_{\text{отст}}$ – в том числе путей для отстоя грузовых вагонов, не участвующих в перевозочном процессе, условных вагонов; ω – отношение средневзвешенной длины физического вагона на рассчитываемом полигоне (по существующей структуре вагонного парка) к длине условного вагона, $\omega = l_{\text{ср. физ}} / l_{\text{усл}}$.

Для железнодорожного полигона по станциям без учета участков и путей необщего пользования:

$$\Phi_{\text{рац.рег}} = 1,05 k_{\text{рег}} (\Sigma E_{\text{в.ст}} - \Sigma E_{\text{отст}}) / [\Sigma P_{\text{техн.ст}} \omega],$$

где 1,05 – коэффициент, учитывающий неравномерность размещения вагонных парков между станциями региона [1]; $k_{\text{рег}}$ – коэффициент, учитывающий необходимость регулирующей емкости путевого развития в регионах железных дорог: обслуживающих морские и речные порты либо подходы к ним; расположенных на основных загруженных направлениях сети ОАО «РЖД» обслуживающих перегрузочные пограничные переходы и крупные железнодорожные пути необщего пользования [3].

Вариантные технологические режимы

Меры по локализации и преодолению потерь маневренности железнодорожных полигонов должны базироваться на систематизации причин возникновения эксплуатационных затруднений, из которых только часть носит стихийный непрогнозируемый характер. Значительная часть возможных затруднений может быть смоделирована заблаговременно – в связи с плановыми работами по ремонту и реконструкции инфраструктуры, сезонными пиками перевозок пассажиров или определённых грузов и др.

Сегодня в ходе планирования ремонтных работ и перевозочного процесса от причастных руководителей и специалистов требуется совершение неформализованных действий и экспертно принимаемых решений, вызываемых:

1) выявляемой несбалансированностью предъявляемых вагонопотоков и доступной мощностью инфраструктуры в периоды производства ремонтных и строительно-монтажных работ; 2) необходимостью определения приоритетности работ по ремонту и реконструкции инфраструктуры внутри годового периода, в том числе при использовании метода сплошного закрытия главных путей на перегонах; 3) необходи-

мостью учета вариантов пропуска и отклонения поездопотоков, принимаемых на период работ по ремонту и реконструкции инфраструктуры, в бюджетных показателях дирекций производственного блока ОАО «РЖД».

Организация движения в периоды производства ремонтных и строительно-монтажных работ должна предусматривать не только варианты графики движения (основанные на форсированном использовании мощности ограничивающих элементов и увязке окон в створах сетевых направлений), но и наличие в нормативных графиках движения числа ниток, достаточных для пропуска поездов, отклоняемых с ремонтируемых направлений. Отклонение поездов с минимальными эксплуатационными потерями должно предусматриваться планом их формирования, с одновременной проверкой достаточности (а при необходимости – перераспределением) тяговых ресурсов.

Внедряемый в ОАО «РЖД» комплексный подход к ремонту и текущему содержанию инфраструктуры (определение сетевых полигонов единой технологии производства работ, рациональная длительность и периодичность закрытия перегонов и путей, рациональная цикличность и совмещение видов работ на пассажиро- и грузонапряженных направлениях) должен предусматривать меры по обеспечению маневренности полигонов и направлений железнодорожной сети.

Таким образом, взаимоувязанное планирование перевозочного процесса, ремонтных работ и бюджетных показателей требует полноценного перехода от вариантных графиков движения поездов на участках и направлениях к вариантным технологическим режимам работы полигонов железнодорожной сети.

Литература

1. Сотников Е.А. Эксплуатационная работа железных дорог (состояние, проблемы, перспективы). – М.: Транспорт, 1986. – 256 с.
2. Бородин А.Ф., Сотников Е.А. Рациональное соотношение вместимости путей станций и вагонных парков с учетом увеличения доли частных вагонов. – Железнодорожный транспорт, 2011. – № 3. – С. 8 – 19.
3. Бородин А.Ф. Эффективно использовать станционные мощности. – Железнодорожный транспорт, 2006. – № 6. – С. 37 – 43.

Захарова Е.М., Минашина И.К., МФТИ, г. Москва

Разработка и анализ алгоритмов оптимизации в задачах планирования на железнодорожном транспорте

1. Вступление

В последние годы большое внимание уделяется созданию и развитию систем поддержки принятия решений (СППР) в интеллектуальных транспортных системах. Одной из проблем, решаемых подобными системами, является построение оптимальных расписаний движения. Данная задача является достаточно трудоемкой, сложность которой зависит как от параметров и ограничений системы, так и от их количества. При этом сложнее всего найти именно оптимальное расписание при гарантии того, что не может быть найдено расписание, подходящего лучше найденного при учете поставленных условий.

Поиск наилучшего расписания можно аппроксимировать задачей поиска глобального экстремума. Для реальных задач выбора наиболее предпочтительного решения как экстремума целевой функции существует множество алгоритмов поиска искомой величины. Задача поиска оптимального решения в области управления железнодорожными перевозками характерна сложностью переменных фазового пространства и ограничений в нем, определяемых особенностью путевой инфраструктуры и технологическим процессом перевозки. Хорошо известные поисковые алгоритмы не всегда являются оптимальными применительно к сложным системам управления с большим количеством ограничений, поэтому возникает задача построения новых, более совершенных алгоритмов оптимизации.

В данной работе исследуется поиск наилучшего расписания движения и обеспечения поездов локомотивами как задача поиска глобального экстремума целевой функции. Основное внимание уделяется построению математической модели управления перевозочным процессом на основе технологии мультиагентных систем (МАС) и ее последующей оптимизации с использованием стохастического и генетического алгоритмов (ГА).

2. Постановка задачи

Задачу можно сформулировать следующим образом: имеются исходные данные - состояние и дислокация локомотивов на начало планируемого периода, их параметры; маршруты поездов с подобранными под них нитками вариантного графика. Необходимо сфор-

мировать схему прикрепления локомотивов к поездам на планируемый период, обеспечивающую наилучшее выполнение плана перевозок с соблюдением заданных ограничений и технологических нормативов работы локомотивов.

Данная задача может иметь множество решений разной степени оптимальности. Для качественной оценки какого-либо варианта назначения введем целевую функцию пары « i -й план отправления поезда (либо план пересылки локомотива резервом) – назначенный на него локомотив x_i » $u_{ij} u_i(x_i)$. План отправления поезда содержит в себе информацию о станциях и точном времени отправления и прибытия поезда, а также номер поезда. План пересылки локомотива резервом содержит информацию о резервной пересылке.

Целевая функция пары «план - локомотив» имеет следующий вид:

$$u_i(x_i) = C_1 \frac{T_s(x_i)}{N_1} + C_2 \frac{T}{N_2} + C_3 \frac{T_w(x_i)}{N_3} \quad (2.1)$$

Параметры функции оценки:

$C_1, C_2, C_3, N_1, N_2, N_3$ – настраиваемые и нормировочные коэффициенты.

$T_s = \text{NimeToService} - T - \text{TimeReturn}$ $T_s(x_i)$ – время, оставшееся до следующего ремонта с учетом времени движения локомотива на данном участке и времени возврата на ближайшую от точки прибытия станцию с необходимым типом ремонта.

$T = \text{TimeArr} - \text{TimeDep}$ T – время движения локомотива на данном участке.

$T_w = \text{TimeDepNext} - \text{TimeArr}$ $T_w(x_i)$ – время ожидания локомотивом отправления поезда.

Рассматривая оптимизацию прикрепления локомотивов к поездам в целом на всем участке планирования, будем использовать суммарную целевую функцию

$$F(X) = \sum_i u_i(x_i), \text{ которая равна сумме целевых функ-$$

ций, составляющих график планов пересылки. Рассмотрим суммарную целевую функцию как многомерную функцию векторного аргумента $X = [x_1, x_2, \dots, x_m] T$, где вектор X – какое-либо решение задачи назначения локомотивов на планы пересылки, представленное в виде

$$\begin{pmatrix} loco \\ \dots \\ loco \\ \dots \\ loco \end{pmatrix} (loco_1, \dots, loco_p, \dots, loco_m)^T,$$

где $loco_i$ – номер локомотива, назначенного на i -й план, m – количество планов пересылки поездов и резервных локомотивов на всем участке планирования. Тогда для решения задачи оптимизации планирования необходимо решить общую задачу поиска экстремума вышеупомянутой функции с заданными ограничениями:

$$\begin{aligned} F(X) &= \sum_i u_i(x_i) \rightarrow \text{extr}(\max); \\ X^* &= \arg \text{extr} F; g_j(X^*) \leq b_j, j = 1, \dots, k, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где X^* – искомое решение; $g_j(X) \leq b_j$ – заданные ограничения, k – их количество.

В общем случае алгоритм поиска экстремума выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= |A|^* x_n \quad x_{n+1} = |A|^* x_n \quad x_{n+1} = |A|^* x_n \\ X^{n+1} &= ||A|| X^n, ||A|| < 1, \end{aligned} \quad (2.3)$$

где A – итерационный оператор. Поиск производится на множестве ограничений, связанных с технологическими особенностями в железнодорожном комплексе. Тогда необходимо найти такой вид итерационного оператора A , чтобы описанный выше итерационный процесс сходил к наилучшему решению или к экстремуму функции $F(X)$.

3. Общая структура модели

Общая структура модели представлена на рисунке Рис.1.



Рис. 1. Общая структура модели

Данная работа состоит из двух этапов. Первым этапом является построение математической модели управления перевозочным процессом и разработка системы управления железнодорожными перевозками на основе мультиагентных технологий. Для решения поставленной задачи оптимизации назначения локомотивов на поезда применяется так называемый «жадный» алгоритм, т.е. на каждом шаге принималось локально оптимальное решение на основе локальной целевой функции пары «локомотив-план», просчитывая «полезность» влияния избранного решения лишь

на ограниченное количество шагов вперед. Как известно, этот алгоритм является гораздо более простым в реализации, чем другие алгоритмы оптимизации. Однако моделирование поставленной задачи таким методом часто приводит к неоптимальному решению на всем участке планирования. В связи с этим требовалось построить алгоритм глобальной оптимизации, адаптированный к данному типу задачи.

Данная задача оптимизации может быть решена при помощи двух совершенно разных подходов: методами математического программирования и ГА. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, учитывая которые, указанные подходы можно оптимально использовать при планировании в различных случаях. Методы математического программирования дают широкий выбор алгоритмов оптимизации различной скорости сходимости. В данной статье предложено использовать гибридный алгоритм, разработанный на основе модифицированных покоординатного метода и метода стохастической оптимизации. ГА позволяет найти решение к аналитически сложным задачам с использованием механизмов, основанных на биологической эволюции.

Таким образом, первый этап моделирования дает локально неоптимальное решение поставленной задачи, которое впоследствии используется как первоначальная точка для поисковых алгоритмов глобальной оптимизации.

4. Мультиагентная система управления перевозочным процессом

Наиболее эффективный анализ и прогнозирование динамических характеристик в задачах исследования реализуемости потока запросов при ограниченных ресурсах обеспечивают средства, основанные на теории МАС. МАС с учетом предоставляемых ими преимуществ – автономности, децентрализованности, индивидуального поведения с возможностью обучения и адаптации для составляющих их агентов – автоматизируют полный цикл работы в динамических системах управления ресурсами. Основными объектами системы являются: локомотивы и станции с набором параметров и стратегий; объект планировщика, выполняющий роль центрального синхронизирующего элемента, формирующего конечное расписание.

5. Алгоритм решения

Система получает на вход список станций и локомотивов с их параметрами, набор объемных планов пересылки локомотивов, а также сформированные ранее детальные маршруты поездов с подобранными под них нитками вариантного графика. Для каждого объемного плана пересылки планировщик уточняет

времена отправления и прибытия локомотива на станции, исходя из детального маршрута соответствующего поезда. Затем происходит пообъектное назначение локомотивов, наилучшим образом подходящих под тот или иной план пересылки. Опишем алгоритм пообъектного назначения локомотивов:

1. Для каждого времени, в которое по плану должен отправиться хотя бы один локомотив, составляется список станций отправления
2. В свою очередь для каждой станции:
 - 2.1. рассчитывается функция оценки всех существующих в указанное время на этой станции комбинаций «план- локомотив»;
 - 2.2. производится назначение на планы пересылки, существующие на этой станции в данное время конкретных локомотивов в соответствии с рассчитанной локальной целевой функцией;
 - 2.3. выбранные локомотивы назначаются на планы, их местонахождение и параметры обновляются в соответствии с планом пересылки для дальнейшей работы;
 - 2.4. переход на шаг №2 для следующей станции, либо переход к следующему по времени на шаг №1.
3. После выполнения алгоритмом шагов №1 и №2 для всех найденных времен отправления, планировщик формирует выходное сообщение системы в виде детальных маршрутов движения локомотивов с указанием поезда, к которому прикреплен локомотив, а также статуса локомотива.

Рассмотрим подробнее некоторые шаги алгоритма.

На шаге 2.1 агентами локомотивов, находящихся на данной станции в указанное время, рассчитывается локальная целевая функция (2.1) их возможного назначения на существующие в это время на станции планы пересылки. В случаях, если $T_s(x_i) < 0$ либо локомотив не соответствует заданным технологическим ограничениям, то он не может быть назначен для данного плана и комбинация «локомотив-план» выпадает из рассмотрения планировщика, а локальной целевой функции $u_i(x)$ присваивается заранее установленное минимальное значение U_{min} .

Чтобы избежать случаев, когда рассчитываемое на текущем шаге назначение приведет к тупиковой ситуации в дальнейшем, на данном этапе моделирования применяется ограниченный просчет влияния рассматриваемого назначения на будущие планы пересылки. Для этого при подсчете целевой функции кроме значения самой локальной функции $u_i(x)$ агенты локомотивов рассчитывают также следующие целевые функции:

$$U_i^q(x) = \sum_j u_j(x), \forall j \in D^q, q = 1, 2, \dots, Q(i, d), \quad (5.1)$$

где q – номер ветви в дереве планов, на которые локомотив x может быть последовательно назначен в случае его передислокации в соответствии с планом i ; d – заданная глубина, на которую строится дерево планов, зависящих от плана i ; $Q(i, d)$ – количество ветвей дерева для плана i с глубиной проникновения d ; D^q – множество планов пересылки ветви q .

После расчета функций $U_i^q(x)$ среди них выбирается одна с максимальным значением $U_i^{q_{max}}(x)^{MAX}$ и посылается агенту планировщика. Именно она учитывается при назначении локомотивов на планы пересылки на шаге 2.2.

Необходимо заметить, что выбор большой глубины проникновения d представляется невозможным из-за неприемлемо долгой работы системы. Поэтому на данном этапе моделирования приходится использовать небольшую глубину расчета и, соответственно, локально оптимизирующий «жадный» алгоритм для привязки локомотивов на последующем шаге.

На шаге 2.2 производится назначение конкретных локомотивов на планы пересылки, существующие на этой станции в указанное время, в соответствии с локальной целевой функцией, рассчитанной на предыдущем шаге. Планировщик выбирает для каждого плана из всех возможных на текущем шаге вариантов назначения локально оптимальный вариант с максимальной целевой функцией $u_i(x_i)$. При этом порядок обработки планов пересылки на станции зависит от продолжительности маршрута: планы, имеющие более длинный маршрут, обрабатываются в первую очередь.

Таким образом, была разработана система моделирования с использованием мультиагентного подхода, которая показала на практике способность успешно обходить множество технологических ограничений и выдавать достаточно адекватное, но локально оптимальное решение поставленной задачи.

6. Разработка поискового алгоритма оптимизации

Полученный с помощью МАС управления перевозочным процессом результат не всегда отражает оптимальное в целом решение задачи назначения локомотивов на поезда. Поэтому возникает необходимость в разработке алгоритма оптимизации, используя полученный результат как начальную точку для поиска глобального экстремума.

6.1. Гибридный алгоритм оптимизации

При более детальном изучении поставленной задачи и ее ограничений легко увидеть, что выявление области определения суммарной целевой функции $F(X)$ является далеко не тривиальной задачей. Происходит это из-за сильной зависимости компонент вектора X

друг от друга. Принимая к сведению неудобства, связанные с вычислением точного вида ограничений $q_i(x_1, x_2, \dots, x_m) \leq b_i$ для поставленной задачи оптимизации, традиционные методы локальной и глобальной оптимизации, как и выбранный в данной работе метод стохастической аппроксимации, представляются не применимыми к данной задаче в своем первоначальном виде. Поэтому предлагается использовать гибридный координатного метода и метода стохастической аппроксимации.

Рассмотрим процедуру оптимизации на основе метода Кифера-Вольфовица:

$$x_i^n = x_i^{n-1} + \alpha_n \frac{F(X^+) - F(X^-)}{2c_n}, \quad (6.1.1)$$

где α_n, c_n – параметры; $F(X^+)$ – суммарная целевая функция, взятая в некой точке $X^+ = (x_1, \dots, x_i^{n-1} + c_n, \dots, x_m)^T$ – точке со значением $x_i^{n-1} + c_n$ в «фиксированной» i -ой координате и просчитанными относительно нее зависимостями по другим «свободным» координатам; $F(X^-)$ – значение целевой функции в соответствующей точке:

$$X^- = (x_1, \dots, x_i^{n-1} - c_n, \dots, x_m)^T.$$

После расчета по описанной процедуре нового значения «фиксированной» координаты x_i^n происходит построение в соответствии с ним нового значения вектора X^n из области допустимых решений. Расчет зависимостей и построение относительно нового значения «фиксированной» координаты точки допустимого решения производится с помощью описанной в предыдущем разделе МАС управления перевозочным процессом.

Было доказано, что предложенный алгоритм оптимизации сходится к точке максимума оптимизируемой функции, если выполнены условия на соответствующие последовательности коэффициентов α_n, c_n :

$$\begin{aligned} \alpha_n > 0, \alpha_n \rightarrow 0, \sum \alpha_n = \infty, \\ c_n > 0, \sum \alpha_n c_n < \infty, \sum \alpha_n^2 / c_n^2 < \infty, c_n \rightarrow 0 \end{aligned} \quad (6.1.2)$$

В данной работе в соответствии с найденными условиями (6.1.2) были использованы следующие последовательности коэффициентов для оптимизирующей процедуры:

$$C_n = b_1 / \sqrt[4]{n}; a_n = b_2 / n, \quad (6.1.3)$$

где b_1 и b_2 – параметры, настраиваемые эвристическим путем в зависимости от свойств реального процесса.

Таким образом, был построен специальный гибридный алгоритм, учитывающий технологические особенности в железнодорожном комплексе и позволяющий находить глобальный максимум целевой функции $F(X)$ на множестве ограничений с неопределенной структурой.

6.2. Реализация генетического алгоритма

В данной работе исследуется модификация ГА в применении к задаче оптимизации многоэкстремальной функции. Для ГА необходимо дополнительно задать следующие параметры: размер популяции P количество популяций M ; количество наихудших особей D . Все параметры для станций и локомотивов записываются с исходным идентификатором $PI_d = 0$.

Для создания одной особи родительской популяции используется основной механизм привязки локомотивов на поезда, описанный выше. Для каждой особи на основе найденных решений план-локомотив создается матрица назначений – ее генотип:

$$M_{\text{Population_id}} = \begin{pmatrix} m_1(\text{PlanId}_1, \text{LocoId}_1, \text{PI}_d, A_1) \\ \dots \\ m_i(\text{PlanId}_i, \text{LocoId}_i, \text{PI}_d, A_i) \end{pmatrix}, \text{ где:}$$

PlanId – уникальный номер плана пересылки локомотива; LocoId – уникальный номер локомотива, назначенного на план PlanId (в случае если не найден ни один подходящий локомотив, $\text{LocoId} = -100$); PI_d – порядковый номер популяции; A – флаг ($A = 1$, если локомотив назначен, 0 – если нет).

Для каждой особи рассчитывается суммарная функция полезности, равная сумме полезностей всех пар план-локомотив. Данное значение хранится как значение функции приспособленности особи и используется в качестве количественной характеристики при селекции.

Кроссовер используется для генерации последующих поколений. Для создания дочерней особи из популяции отбираются два родителя – P_1 и P_2 , процесс селекции которых описывается уравнением:

$$m_i^{\text{child}_{-1}} = \begin{cases} m_i^{P_1}, & \text{если } A_{P_1} = 1 \\ m_i^{P_2}, & \text{если } A_{P_2} = 1 \text{ и } \text{LocoId}_{\text{PlanId}}^{P_1} \neq -100 \\ m_i^{P_1}, & \text{если } A_{P_2} = 0 \text{ и } A_{P_1} = 0 \end{cases}$$

Полезность каждой сгенерированной дочерней особи задается системой:

$$U_{\text{child}_i}(\text{LocoId}, \text{PlanId}) = \begin{cases} U_{P_1}(\text{LocoId}, \text{PlanId}), & \text{если } m_i^{\text{child}_{-1}} = m_i^{P_1} \text{ и } A_{P_1} = 1 \\ U_{P_2}(\text{LocoId}, \text{PlanId}), & \text{если } m_i^{\text{child}_{-1}} = m_i^{P_2} \text{ и } A_{P_2} = 1 \\ 0, & \text{если } A_{P_1} = 0 \text{ и } A_{P_2} = 0 \end{cases}$$

С некоторой вероятностью в популяции может произойти мутация. Для этого в генотипе особи-мутанта случайным образом определяется ген – PlanId и его параметр $\text{CurrentTime}_{\text{PlanId}}$. Все агенты локомотивов и станций откатывают все изменения до этого времени, затем планировщик снова назначает локомотивы на поезда, используя исходный алгоритм.

В конце генерации каждой популяции отбирается заданное число наихудших особей для удаления их из потомства. Генерация новых популяций прекращается или при достижении конечного размера популяции

или при улучшении функции полезности новой особи, не превышающей заданной точности ΔF . Лучшая особь с максимальной функцией полезности выбирается из списка всех сгенерированных особей. Если таких особей несколько, то выбирается та, что имеет наибольшее количество пар (N_{assign}).

7. Результаты

Созданная система моделирования железнодорожных грузоперевозок была протестирована на имитационных данных Восточного полигона.

7.1. Результаты работы гибридного алгоритма оптимизации

На вход построенной системы управления грузоперевозками были поданы следующие данные: 199 поездов, 220 станции, 462 перегона, 67 тяговых плеч, 240 объемных планов пересылки, 163 реальных плана пересылки локомотивов с поездом или резервом, 262 локомотива, данные об их расположении и параметрах, нормативные времена технических стоянок, весовые типы поездов.

Рассмотрим результаты работы предложенного гибридного алгоритма оптимизации. Для анализа его работы при различных вариациях последовательностей коэффициентов процедуры оптимизации a_n и c_n (6.1.3), удовлетворяющих найденным условиям сходимости (6.1.2), были проведены серии экспериментов с изменением параметров b_1 и b_2 указанных последовательностей (6.1.3). Ниже изображен процесс сходимости процедуры оптимизации при различных значениях параметров b_1 и b_2 (Рис. 2).

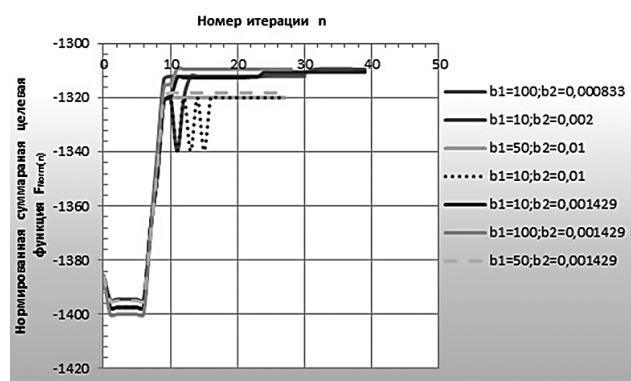


Рис. 2. Процесс сходимости процедуры оптимизации при различных значениях параметров b_1 и b_2

На рис.2 представлена график нормированной суммарной целевой функции F_{Norm}^n в зависимости от номера итерации n :

$$F_{Norm}^n = \frac{F(X^n)}{N_F \cdot m}, \tag{7.1.1}$$

где N_F – нормировочный коэффициент суммарной целевой функции.

Как видно из графика, при относительно больших b_2 , к примеру, $b_2=0,01$, процедура оптимизации сходится к локальному максимуму, однако, при уменьшении параметра b_2 происходит постепенный уход процедуры оптимизации от локального максимума и переход в сторону сходимости около глобального экстремума. Что касается параметра b_1 , логично предположить, что скорость сходимости процедуры оптимизации увеличивается с увеличением указанного параметра.

Было проведено исследование зависимостей количества итераций N^* , при котором достигается сходимость процедуры оптимизации в глобальном экстремуме, от значений параметров b_1 и b_2 , по результатам которого была найдена оптимальная пара параметров для последовательностей коэффициентов (6.1.3): $b_1=100$, $b_2=0,000909091$. С найденными значениями параметров процедура оптимизации выдала окончательное решение задачи назначения локомотивов на заданные планы пересылки, улучшенное на 7% от первоначального, что для реальных данных подобного масштаба является достаточно хорошим результатом.

Для оценки эффективности работы построенной системы грузоперевозок были рассчитаны качественные показатели использования эксплуатируемых локомотивов, представленные в табл. 1.

Таблица 1.

Качественные показатели работы МАС управления перевозочным процессом и процедуры ее дальнейшей оптимизации.

Этапы моделирования	МАС управления железнодорожными перевозками	Гибридный алгоритм оптимизации
Качественные показатели		
Среднесуточная производительность, W_L , ткм брутто	45642.8	98354.8
Среднесуточный пробег, S_L , км	453.91	517.88
Участковый оборот, Θ_L , ч. (за планируемый период в б часов)	4.67	5.27
Коэффициент эффективности использования эксплуатируемого парка локомотивов, K	0.68	0.83

Проанализировав представленные качественные показатели, можно прийти к заключению, что разработанная МАС управления железнодорожными перевозками предоставляет адекватное решение задачи планирования прикрепления локомотивов к поездкам, а построенный гибридный алгоритм оптимизации позволяет повысить эффективность использования эксплуатируемого локомотивного парка.

Таблица 2.

Параметр	Решение «жадного» алгоритма	Эффективность ГА				
		P=15, M=10, D=4(по F)	P=20, M=10, D=4(по F)	P=20, M=10, D=4 (N _{assign})	P=15, M=20, D=4 (N _{assign})	P=15, M=20, D=4(по F)
$F(X)$	139440	335760	210480	-109920	-109920	414960
N_{assign}	27	14	16	47	47	13
Время работы	1 м, 13 с	15 м, 24 с	22 м, 56 с	19 м, 13 с	9 м, 29 с	10 м, 31 с

7.2. Результаты моделирования генетического алгоритма

Для моделирования ГА были заданы следующие параметры: 566 станций, 772 объемных плана локомотива, 469 поездных плана, 4723 нитки маршрутов поездов, 783 реальных локомотива с их параметрами, 44 реальных поезда.

Из результатов моделирования видно, что в независимости от выбранного параметра оптимизации, ГА показывает лучшие результаты выполнения плана привязки локомотивов к поездам, чем исходный «жадный» алгоритм.

8. Выводы

В результате исследования была создана система моделирования грузоперевозок на Восточном полигоне с использованием мультиагентного подхода. Построенная МАС показала на практике способность успешно обходить множество технологических ограничений и выдавать достаточно адекватное решение поставленной задачи, удовлетворяющее всем условиям моделируемой системы. Для оптимизации полученного результата было предложено два различных алгоритма поисковой оптимизации задачи привязки конкретных локомотивов к планам пересылки, ис-

пользующих полученное с помощью МАС решение в качестве начальной точки. В качестве первого подхода был разработан специальный гибридный алгоритм, улучшающий качественные показатели системы и показывающий хорошее быстродействие и скорость сходимости. Использование ГА позволило улучшить первоначальное решение, оптимизируя как значение целевой функции, так и количество назначений локомотивов на поезда. Данная работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, грант №14.582.21.003.

Литература.

1. Пащенко Ф.Ф. «Введение в состоятельные методы моделирования систем; Ч. 2. Идентификация нелинейных систем», М.: Финансы и статистика, 2007.
2. Jeffrey W., Rosner R. Optimization algorithms: simulated annealing and neural network processing – Astrophysical Journal, Part 1, 1986, V.310, p.473-481
3. Барабашова О.В., Крушель Е.Г. Алгоритмы поиска экстремума функции многих переменных, ВолгГТУ, Волгоград, 2000 – 30 с.
4. Holland John H. Adaptation in Natural and Artificial Systems - MIT Press Cambridge, MA, USA – 1992.

Ерофеев А. А., *Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*
Старинская Н. А., *Государственное объединение Белорусская железная дорога, г. Минск*
Прудников П. Н., *СП ЗАО «Международный Деловой Альянс», г. Минск*

Интеллектуальные технологии в оперативном планировании грузовой работы Белорусской железной дороги

На Белорусской железной дороге продолжают работу по созданию Комплексной системы управления поездной работой (КС УПР БЧ), в рамках которой предприняты попытки реализации интеллектуальных технологий управления перевозочным процессом.

Очередным этапом стало создание Автоматизированной системы сменно-суточного планирования грузовой работы (АС ССП). Данная система разработана специалистами СП ЗАО «Международный Деловой Альянс» (г. Минск) при научном сопровождении сотрудников кафедры «Управление эксплуатационной работой» Белорусского государственного университета транспорта (БелГУТ). Заказчиком системы выступила служба перевозок Белорусской железной дороги. Начиная с августа 2014 года АС ССП находится в промышленной эксплуатации на всем полигоне Белорусской железной дороги. Интерфейс АС ССП приведен на рис. 1.

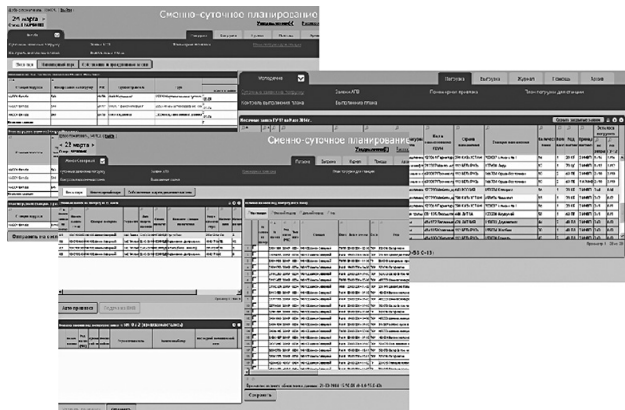


Рис. 1. Интерфейс АС ССП

Актуальность создания АС ССП predetermined увеличением уровня информатизации управления эксплуатационной работой на Белорусской железной дороге. Повышение детализации вагонной модели, усложнение структуры вагонного парка дороги, вызванное увеличением количества операторов подвижного состава вызывает значительное увеличение ограничений при использовании вагонов. При этом традиционная система сменно-суточного планирования погрузки-выгрузки была ориентирована на принятие экспертных решений разработчиками на всех уровнях управления, что в современных условиях затрудни-

тельно. Указанные особенности системы сменно-суточного планирования погрузки-выгрузки приводили к снижению эффективности использования вагонного парка за счет возможных излишних пробегов порожних вагонов, необеспечению заявок на перевозку соответствующим типом подвижного состава, рассогласованию планов выгрузки вагонов и дальнейшего их использования.

АС ССП проектировалась как базисная система для реализации интеллектуальных технологий в оперативном управлении перевозочным процессом. Отличие интеллектуальных систем от кибернетических, в которых реализуется постоянно действующий (всегда активный) алгоритм решения одного типа задач, состоит в том, что в них есть оценивание, запоминание и учет собственного поведения. То есть интеллектуальная система – это целенаправленная система выбора доминирующей (очередной) задачи из допустимого для данной интеллектуальной системы класса, поиск решения такой задачи, закрепления опыта решения ее и, если необходимо, изменение допустимого класса задач.

Целью создания АС ССП является автоматизация задач сменно-суточного планирования погрузки-выгрузки, решаемая за счет оптимизации использования подвижного состава для удовлетворения потребности клиентов в грузовых перевозках. Сменно-суточное планирование состоит из ряда отдельных задач, взаимосвязанных между собой. В рамках данного проекта решаются задачи расчета плана погрузки, выгрузки и планирования прикрепления вагонов к заявкам на погрузку.

Создание АС ССП направлено на повышение качества эксплуатации вагонного парка, совершенствование взаимоотношений БЧ с грузовладельцами и собственниками подвижного состава.

АС ССП состоит из двух основных функциональных подсистем:

- ♦ подсистема сменно-суточного планирования погрузки;
- ♦ подсистема сменно-суточного планирования выгрузки.

Функциональную структуру АС ССП дополняет архив планов, содержащий плановые и контрольные

формы по планированию погрузки и выгрузки за все отчетные периоды глубиной 13 месяцев с момента запроса.

Структурная схема подсистем погрузки и выгрузки АС ССП представлена на рис. 2.



Рис. 2. Функциональная структура АС ССП

Задачи, решаемые в АС ССП, разделены на три компонента:

- «Управление и регистрация информации»;
- «Планирование»;
- «Контроль и анализ».

Компонента «Управления и регистрации информации» обеспечивает решение следующих задач:

- пономерную привязку порожних вагонов к заявкам на перевозку грузов;
- пономерную привязку порожних вагонов по назначениям плана формирования для решения задачи их регулирования;
- передачу исходной информации в компоненту «Планирование»;
- предоставление динамической информации в компоненту «Контроль и анализ».

«Планирование» обеспечивает решение следующих задач:

- разработку сменно-суточных планов погрузки и выгрузки по объектам: станции, отделения дороги, районы управления, железная дорога;
- согласование, корректировку и контроль разработки сменно-суточного плана погрузки и выгрузки на всех уровнях управления;
- предоставление аналитической информации для решения задачи планирования погрузки и

выгрузки на всех уровнях управления;

- предоставление динамической информации в компоненту «Контроль и анализ».

Подсистема «Контроль и анализ» включает задачи:

- динамический контроль состояния объектов управления, связанных с решением задачи управления процессом погрузки и выгрузки;
- предоставление результатов и анализ процесса разработки сменно-суточного плана погрузки и выгрузки на всех уровнях управления.

При проектировании АС ССП применялся процессный подход описания функционирования системы. Для этого на основании СТП 09150.15.073-2008 «Порядок планирования поездной и грузовой работы Белорусской железной дороги» установлены основные бизнес-процессы сменно-суточного планирования, которые включают:

- сбор и предоставление исходных данных для разработки сменно-суточного плана погрузки;
- разработку и согласование проекта суточного плана погрузки;
- утверждение суточного плана погрузки дороги и подразделений;
- разработку и утверждение плана погрузки на 1-ую смену;
- разработку и утверждение плана погрузки на 2-ую смену;
- сбор и предоставление данных о дислокации вагонов с местным грузом из ВМД;
- последовательное установление плановых значений в процессе разработки суточного плана выгрузки и передача их на вышестоящие уровни разработки суточного плана выгрузки;
- последовательная корректировка значений суточного плана выгрузки и передача их на нижестоящие уровни управления;
- разработку и утверждение сменных планов выгрузки (на 1-ую и 2-ую смены) с передачей на нижестоящие уровни управления.

Следует отметить наличие тесных информационных и функциональных взаимосвязей между различными бизнес-процессами.

Для каждого бизнес-процесса регламентированы цели, период реализации, функции и необходимые исходные данные.

Описание реализации каждой из функций бизнес-процесса выполнено в виде сценариев, в которых установлены основные технологические операции, их исполнители (в качестве исполнителя, в том числе, может фигурировать автоматизированная система) и источники информации, необходимой для выполнения каждой из операций.

Для примера на рис. 3 приведен сценарий реализа-

ции функции «Разработка и согласование проекта суточного плана погрузки»

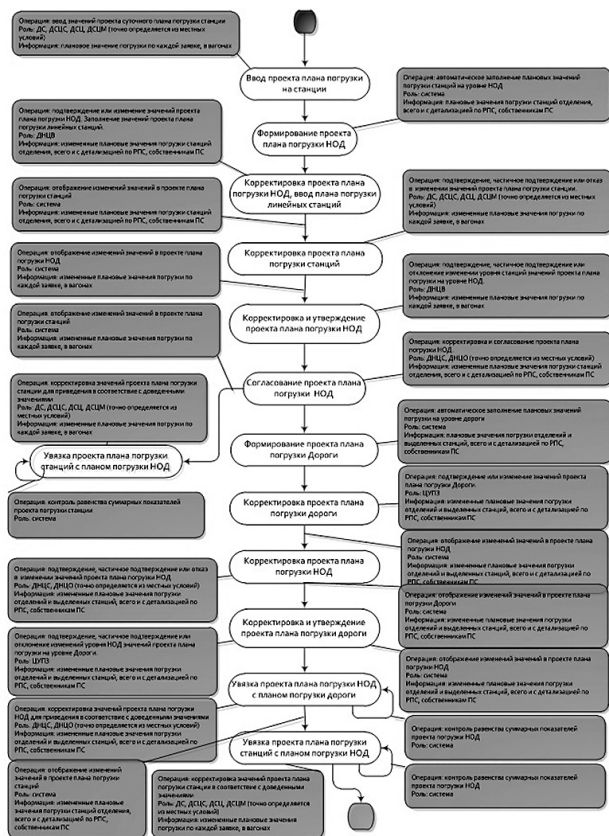


Рис. 3. Разработка и согласование проекта суточного плана погрузки

АС ССП функционирует на трех уровнях – линейном, отделенческом и дорожном. Пользователи системы аналогичным образом подразделяются на три группы, соответствующие уровням функционирования системы в целом:

пользователи уровня станции (независимо от подразделения станций на опорные и нет и, соответственно, прикрепления за опорными станциями функциональных возможностей планирования и управления данными за прикрепленные к ней станции);

пользователи уровня отделения дороги (без разделения полномочий по возможностям управления данными по районам управления местной работы в случае их наличия на отделении);

пользователи уровня дороги (уровень ЦУП).

По каждой реализуемой в АС ССП функции установлен порядок взаимодействия пользователей всех уровней. Например, на рис. 4 приведен порядок возможных действий пользователей при согласовании плана погрузки.

Особое внимание при создании системы уделялось максимальному использованию уже действующих на Белорусской железной дороге информационных си-

стем. Это, с одной стороны, позволило снизить затраты на разработку, а с другой – позволило ускорить процесс «привыкания» пользователей к новой системе.

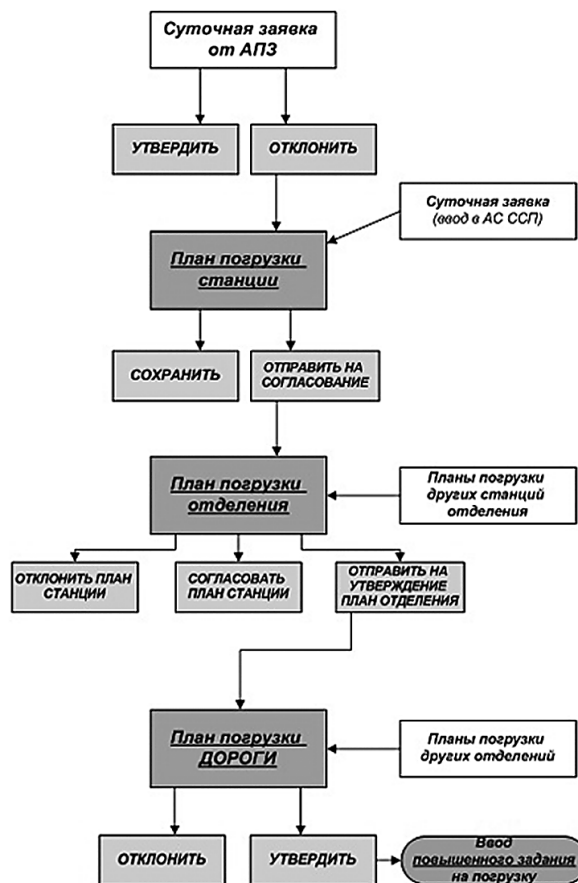


Рис. 4. Порядок возможных действий пользователей при согласовании плана погрузки в АС ССП

Исходными данными для сменно – суточного планирования в АС ССП являются месячные заявки ГУ-12 из системы АС «Месплан», суточные заявки на погрузку от клиентов железной дороги из системы АПЗ, технические нормы погрузки и выгрузки из подсистемы ТНЭРД, эталонные данные из классификаторов подсистемы ПЭ НСИ, а также набор справочных и оперативных данных о вагонах из системы ИАС ПУР ГП: паспортные данные о вагонах из картотеки, оперативная дислокация вагонов, операции по погрузке и выгрузке вагонов, перевод вагонов в рабочий/нерабочий парк и другие характеристики, необходимые для автоматизации процессов сменно-суточного планирования погрузки и выгрузки дороги.

Определенный интерес представляет реализованная в АС ССП функция определение плана выгрузки НОД на предстоящие (плановые) сутки в условиях ограниченной (неполной) исходной информации.

Для расчета плана выгрузки отделения используются следующие данные:

- $U_{ост}$, повагонное наличие вагонов с местным грузом, не включенных в план выгрузки на текущие сутки после его утверждения, на отделении (для выделенных станций отдельно и по остальным станциям отделения в сумме) на момент разработки плана выгрузки на предстоящие сутки $t_{пл}$;
- $U_{б.подх}$, повагонный ближний подход (наличие на каждом отделении) вагонов с местным грузом для каждого отделения дороги и выделенных станций в момент $t_{пл}$;
- $U_{д.подх}$, повагонный дальний подход (за пределами дороги) вагонов с местным грузом для каждого отделения дороги и выделенных станций в момент $t_{пл}$.

После завершения плановых суток в 17:00 (следующие отчетные сутки) каждый вагон проверяется на наличие проведенной с ним операции выгрузки в плановые сутки и суммированием определяется общее число вагонов, с которыми за плановые сутки произведена операция выгрузки: $U_{ост(+)}$, $U_{б.подх(+)}$, $U_{д.подх(+)}$ вагонов.

Определяется доля вагонов, с которыми выполнялась выгрузка (отношение числа вагонов, зарегистрированных в БД, с которыми производилась выгрузка к общему числу вагонов, зарегистрированных в БД):

$$k_{ост} = \frac{U_{ост(+)}}{U_{ост}}; k_{б.подх} = \frac{U_{б.подх(+)}}{U_{б.подх}}; k_{д.подх} = \frac{U_{д.подх(+)}}{U_{д.подх}},$$

а также определяется коэффициент превышения отчетной выгрузки $U_{в}$ (общее число выгруженных вагонов) за счет вагонов, сведений о которых не имелось в момент $t_{пл}$:

$$k_{доп} = \frac{U_{в}}{U_{ост(+)} + U_{б.подх(+)} + U_{д.подх(+)}.$$

Коэффициенты рассчитываются для каждого отделения и каждой выделенной станции отдельно. Итого устанавливается 232 коэффициента.

Статистические сведения о значениях $k_{ост}$, $k_{б.подх}$, $k_{д.подх}$... сохраняются в БД за период не менее 30 предыдущих суток.

Для каждой статистической выборки рассчитываются средние значения $k_{ост}^{ср}$, $k_{б.подх}^{ср}$, $k_{д.подх}^{ср}$, $k_{доп}^{ср}$ и среднеквадратические отклонения.

Планируемое значение выгрузки на предстоящие сутки определяется следующим расчетом:

$$U_{в}^{пл} = k_{доп}^{ср} (k_{ост}^{ср} U_{ост.пл} + k_{б.подх}^{ср} U_{б.подх} + k_{д.подх}^{ср} U_{д.подх}),$$

где – $U_{ост.пл}$, планируемый остаток вагонов с местным грузом на отделении дороги на 17:00, определяемый как разность между наличием вагонов с местным грузом на момент разработки плана $t_{пл}$ и планируемой выгрузкой вагонов в текущие сутки.

Применение данной функции позволило существенно повысить точность разрабатываемых планов выгрузки. В АС ССП реализованы и другие элементы интеллектуальных технологий. Например, корректировка плановых показателей работы подразделений на 2-ю смену в зависимости от реализации показателей за 1-ю. Или формирование сменно-суточных планов в условия ручного ввода повышенного задания на погрузку. Структура АС ССП позволяет и в дальнейшем продолжить работы по интеллектуализации планирования, в том числе за счет реализации процедур выбора сценариев реализации функций в зависимости от состояния проблемной среды функционирования.

В настоящее время АС ССП установлена и активно используется на всех объектах Белорусской железной дороги, участвующих в сменно-суточном планировании погрузки-выгрузки (станциях, отделениях, в Центре управления перевозками). Экономическая эффективность от создания АС ССП достигается за счет улучшения количественных и качественных показателей работы Белорусской железной дороги.

Установлено, что за рассмотренный период с 2014 по 2019 г. проект обеспечит порядка 1 558 тыс. долл. чистого экономического эффекта, срок окупаемости проекта составляет 2,2 года, внутренняя норма рентабельности составляет 45,67%, что превышает показатель рентабельности собственного капитала дороги, индекс рентабельности проекта больше 1. Таким образом, проект можно отнести к экономически эффективным.

В настоящее время на Белорусской железной дороге рассматривается вопрос о продолжении работ по развитию КС УПР БЧ, и в частности, о разработке системы сменно-суточного планирования поездной работы.

Абрамов А.А., ОАО «НИИАС», г. Москва

Немцов Э.Ф., ООО «ПрограмПарк», г. Москва

Еремин А.С., Научно-производственная компания «Мультиагентные технологии», г. Самара

Автоматизация разработки графиков движения поездов на основе мультиагентных технологий

1. Введение

Задача разработки графика движения поездов решается регулярно в организациях - владельцах инфраструктур железных дорог (в России – ОАО «РЖД»). Нормативный график движения поездов формируется 1 раз в год с корректировкой на летний период, варианты графики движения – гораздо чаще, под каждое «окно» для проведения ремонтно-путевых работ. Для повышения эффективности работы сети железных дорог, особенно в условиях сильных колебаний размеров движения, график движения может разрабатываться еще чаще, вплоть до каждой смены с актуализацией по трехчасовым периодам.

Разработка графика движения поездов в масштабе ОАО «РЖД» - трудоемкий и длительный процесс, требующий многократных циклов согласований между участниками процесса.

В настоящем докладе предлагается новый подход к автоматизации, основанный на мультиагентных технологиях, который позволяет сократить трудоемкость и длительность процесса разработки графика. Работа выполняется в рамках создания производственно-технического комплекса «Интегрированная система управления железнодорожного транспорта» (ПТК ИСУЖТ) ОАО «РЖД».

2. Железнодорожный опыт

Научные исследования в области применения ЭВМ для автоматизированного построения и оптимизации графика движения поездов ведутся с 1950-х годов. В этой связи необходимо отметить труды А.П. Петрова, Е.В. Ададунова (1961 г.), Б.А. Завьялова (1961 г.), Б.Дел Рио (1962 г.), А.Г. Барткуса (1694 г.), К. Суворова (1966 г.), И.Т. Козлова и Г.Н. Тихонова, Д.Ю. Джалилова.

К сожалению, можно констатировать, что эти разработки в настоящее время не применяются при разработке графика движения. По всей видимости, основной причиной этого является пакетный режим работы предлагаемых алгоритмов – они выдают результат работы «с нуля», и пользователь физически не имеет возможность указать алгоритму нужное направление поиска. Наибольший успех, вероятно, будут иметь

системы, обеспечивающие максимум интерактивности. Для этого должны быть разработаны алгоритмы, позволяющие взять частичный график движения, разработанный пользователем, и продлить его автоматически, а затем позволить пользователю поменять некоторые параметры построения и тут же отобразить полученный результат. При этом должен создаваться эффект «предугадывания» машиной замысла пользователя на несколько (или много) шагов вперед.

Говоря не о научных исследованиях, а об информационных системах, необходимо отметить наиболее распространенные в мире системы RailSys, OpenTrack, и, частично, MultiRail¹. В них успешно решаются следующие вопросы:

1. Унификация моделей инфраструктуры на основе неформального стандарта RailML (Railway Modeling Language) иерархического XML-подобного описания инфраструктуры, подвижного состава и расписаний.
2. Централизованное хранение данных, обеспечивающее единство данных и ускоряющее согласование.
3. Детализация разработки графиков до самого нижнего уровня: блок-участков, стрелок, станционных путей (вместе с тем, процессы грузовой работы на станциях не моделируются вовсе).
4. Используемые модели реалистично обнаруживают «коллизии» между поездами автоматически, на основе путевого развития станций, и не требуют заранее рассчитанных интервалов безопасного следования поездов (таких, как интервал одновременного прибытия на станцию). Т.е. эти параметры больше не требуется рассчитывать вручную.
5. Встроенные возможности имитационного моделирования позволяют оценить резервы, заложенные в графике, и, таким образом, оценить выполнимость графика до того, как по нему проследует первый поезд.

Следует отметить, что все вышеперечисленные системы помогают пользователю обнаруживать ошибки при построении графиков, но не прокладывают по-

¹ Де-факто стандарт ОАО «РЖД», АРМ инженера-графиста разработки ГВЦ ОАО «РЖД» (коллектив авторов под руководством Н.А. Ключева), несмотря на богатые функции редактирования и отображения графика, практически не автоматизирует саму разработку графика, поэтому не входит в перечень.

езда сами. А вместе с тем, именно прокладка поездов является достаточно трудоемким процессом, в особенности, если имеются жесткие ограничения: по количеству путей для скрещения поездов на станциях или по количеству путей на перегонах. Так, однопутный участок справедливо считается сложной, нелинейной задачей для графиста.

Таким образом, имеются различные направления автоматизации построения графика и ни одно из направлений не претендует на полноту решения задачи.

2. Опыт других отраслей

Процесс разработки графика движения имеет прямую аналогию с процессом проектирования в машиностроении:

1. Инженеры-конструкторы в машиностроении также, как и инженеры-графисты ОАО «РЖД», работают над конструкцией изделия коллективно. Для сложного изделия (автомобиль, самолет, судно) их количество может достигать 500 человек одновременно на один проект.
2. Разработка начинается с анализа потребностей потребителя (ср. с прогнозом грузопотоков в ОАО «РЖД») и выполняется на базе предыдущих проектов (нормативный график предыдущего года). Активная работа конструкторов начинается с задания на проектирования (приказ на разработку графика движения), по мере подготовки проекта переходит в стадию подготовки производства (совещания по подготовке к принятию нового графика движения).
3. На определенном этапе конструкторская документация «замораживается» (утверждается), как и нормативный график движения.

4. В ходе производства в конструкцию вносятся многочисленные изменения, повышающие ее технологичность и эксплуатационные характеристики (корректировка графика для летнего периода).

В машиностроении автоматизация проектирования, в силу большей степени формализации задач, проходила более интенсивно и глубоко, чем в железнодорожной отрасли. Эволюция систем автоматизированного проектирования (САПР) осуществлялась от CAD/CAE систем (машинное черчение, машинные расчеты) через PDM системы (управление документооборотом конструкторской документации) до PLM системы управления жизненным циклом изделия (рис. 1).

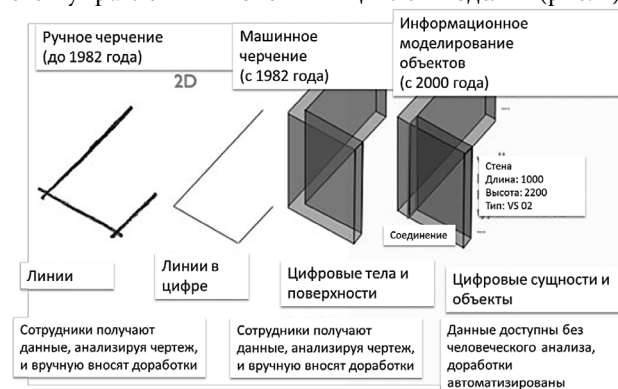


Рис. 1. Эволюция САПР-систем

Современные САПР-решения для машиностроения (например, от компаний Dassault, Siemens) уже в самом начале проектирования могут выявить проблемы, обычно выявляемые на гораздо более поздних стадиях разработки: автоматически выполняют анализ собираемости изделия, определяют области наложения, передают изменения от разработчика одного компонента к разработчику смежного, выполняют

Таблица 1.

Потенциал автоматизации разработки графика за счет перехода от задач простой отрисовки графика к задачам создания объектов и формирования связей между ними

Элемент информационной модели движения поездов	Преимущества для пользователя
Топология сети железных дорог	Контроль заполнения и непротиворечивости расписаний поездов от станции формирования до станции назначения.
Временные параметры перегонов и участковых станций	Автопрокладка нитки поезда без учета уже проложенных. Автокоррекция всей нитки при изменении одной точки.
Данные длин и числа путей по раздельным пунктам	Контроль обгонов и скрещений. Автопрокладка обгонов и скрещений.
Межпоездные интервалы	Автопрокладка нитки поезда с учетом уже проложенных. Автокорректировка расписания при изменении одной точки.
Показатели графика движения поездов (размер движения, участковая скорость, маршрутная скорость, неравномерность и др.)	Подбор графиков из архива по заданным параметрам. Автоматизация сравнения различных версий графиков. Контроль улучшения графика в ходе согласований.
Задание на разработку графика движения поездов	Контроль соответствия результата исходной задаче. Автоматическая прокладка поездов под заданные размеры движения и с заданными критериями оптимизации.

прочностные и температурные расчеты и т.п. Решения поддерживают формализацию бизнес-процессов разработки, зная, в каком порядке, кто и что должен сделать в случае возникновения определенных ситуаций.

Все эти возможности обусловлены прежде всего тем, что вместо рисования графических примитивов – линий, поверхностей и тел, современные системы машиностроения работают с объектами и их взаимосвязями, т.е. фактически с онтологией предметной области. Применительно к задачам построения графика движения, аналогичный подход может привести к следующим возможностям автоматизации (табл. 1).

Эти возможности не реализованы ни в одной из существующих систем. Во многом это обусловлено трудностями формализации предметной области для обеспечения применимости классических алгоритмов. В данной статье для решения задач автоматизации применяется мультиагентный подход.

3. Мультиагентный подход

В последние десятилетия в связи с бурным ростом компьютерных сетей и подключением в них все большего количества устройств невозможность централизованной обработки данных становится очевидной и все чаще для информационно-управляющих систем на РЖД применяется сетевый принцип и мультиагентные технологии.

При решении задачи построения графика агенты физических сущностей – станций, поездов, путей – объединены в одну p2p сеть (от англ. «peer-to-peer» – «каждый с каждым» и «равный с равным»), получают друг у друга все необходимые сведения о состоянии и динамике и согласуют принимаемые решения путем выявления конфликтов и проведения переговоров.

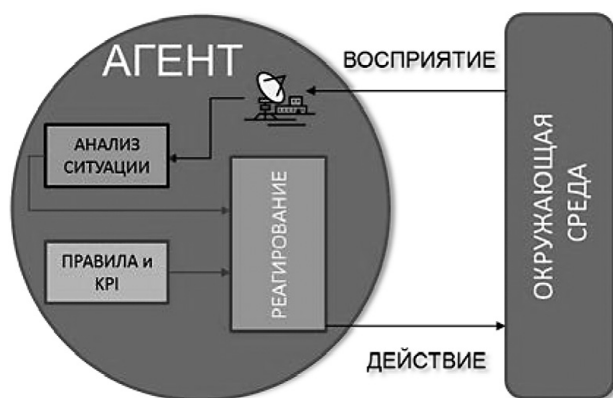


Рис. 2. Принципиальная схема одного агента мультиагентной системы

Первые разработки в нашей стране в этом направлении выполнены в НПК «Мультиагентные технологии» в тесной кооперации с ОАО «НИИАС» в рам-

ках создания интеллектуальной системы управления железнодорожным движением на платформе «Вектор» (ИСУЖТ), в котором агенты станций, поездов и участков путей в реальном времени самоорганизуются в расписание, гибко реагирующее на возможные нештатные ситуации. Разработанная система находится в опытной эксплуатации на полигоне Санкт-Петербург – Москва.

В создаваемой для решения задачи мультиагентной системе предлагается заданный размер движения и данные о «ценности» конкретных поездов, всю совокупность инфраструктуры и тяговых ресурсов представлять ПВ-сетью, представляющей собой самоорганизующийся план распределения ресурсов по задачам. Возникновение любого нового события может запускать адаптивную перестройку связей агентов потребностей и возможностей, которая заканчивается нахождением консенсуса агентов, в котором ни один агент не может более улучшить ситуацию.

Основные типы агентов разрабатываемой системы представлены в табл. 2.

В случае построения графика автоматически в начале работы системы для каждого участка инфраструктуры создается участковый агент. Данный агент получает информацию о требуемых объемах движения и порождает поездных агентов в необходимом количестве, добавляет в рой агентов перегонов и разделительных пунктов и инициирует начало взаимодействия агентов внутри своего роя. Пример взаимодействия приведен на рис. 3.

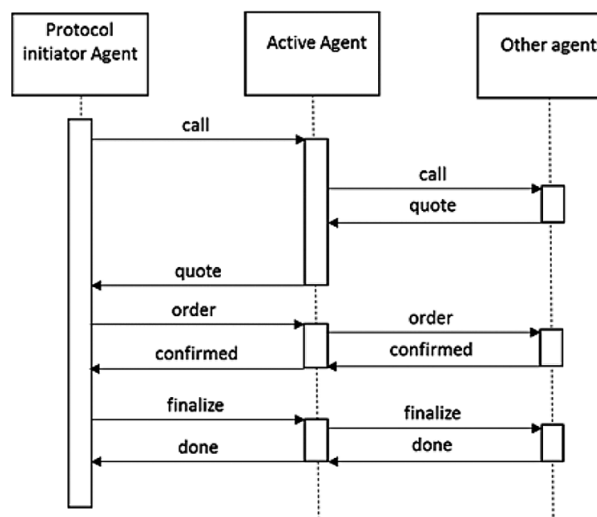


Рис.3. Один из протоколов переговоров между агентами

В ходе этого взаимодействия агенты предлагают варианты прокладки нитей графиков по участку, исходя из своих интересов. По этим вариантам, заданным набором параметров прокладки поездных нитей, очередности занятия ресурсов, последовательностей

Таблица 2.

Основные классы агентов мультиагентной системы для адаптивного планирования графиков движения поездов

Агент	Тип	Цели и задачи
Агент планируемого участка	Управляющий	Обеспечить требуемый размер движения, управление участковым роением агентов, взаимодействие с агентами соседних участков, агентом локомотивного депо, получение информации об исполненном движении
Агент поезда	Агент потребности	Проследовать по участку с минимальными стоянками, взаимодействие с агентами поездов на участке, поиск ресурсов для проследования
Агент «окна» для ремонтных работ	Агент потребности	Занять перегон для проведения ремонтных работ, взаимодействие с поездными агентами, поиск ресурсов для выполнения
Агент поезда-перегона	Агент потребности	Контроль интервалов: «Я должен ехать по правилам» Оценка резерва времени до следующего поезда: «А вдруг я здесь опоздаю!» Оценка резерва на нагон: «А вдруг я приду с опозданием!»
Агент раздельного пункта	Агент возможности	Пропустить требуемые размеры движения, закладка резервов на проследование по станции, решение конфликтов
Агент перегона	Агент возможности	Контроль путей на раздельном пункте: «Вы не разъедетесь!» Оценка оптимальности выбранной съемы скрещения: «Ты – подожди, а ты - проезжай!»

скрещивания и пр., система автоматически прокладывает поездные графики движения. Таким образом, агент может получить оценку предлагаемого ему варианта размещения поездов на участке, который можно оценить по ключевому показателю эффективности (Key Performance Indicator, KPI) – некоторой величине, являющейся совокупностью требуемых характеристик графика.

После согласования участкового решения внутри роя, участковый агент начинает взаимодействовать с соседними участковыми агентами для согласования на границах участка.

В случае построения системы вручную или автоматизированно агенты начинают работать после каждого действия пользователя, уведомляя его об обнаруженных проблемах и предлагая варианты решений.

4. Архитектура АРМ графиста ПТК ИСУЖТ

Архитектурно система состоит из четырех блоков:

- Веб-браузер с передаваемой ему по запросу клиентской частью приложения (HTML/javascript), взаимодействующей с веб-сервером АРМ графиста по протоколу AJAX.
- Веб-приложение, развернутое на веб-сервере платформы Вектор-М ПТК ИСУЖТ и обеспечивающее интерактивное построение графика, общую координацию компонент АРМ графиста.
- Онтологии, обеспечивающей хранение графиков и инфраструктуры, доступ к которой реализован по принципам REST API.

- Планировщика, выполняющего ресурсоемкие задачи прокладки.

Система функционирует на платформе Вектор-М в составе ПТК ИСУЖТ. Платформа Вектор-М (разработчик ООО «ПрограмПарк») предназначена для комплексной автоматизации процессов крупных предприятий и позволяет создавать распределённые системы произвольной топологии. Платформа обеспечивает связь между онтологией, веб-приложением и планировщиком, авторизацию пользователей, горячее резервирование. Место указанных компонент АРМ графиста в архитектуре ПТК ИСУЖТ приведено на рис. 4.

Результаты и выводы

В настоящий момент в системе реализован следующий функционал:

1. Автоматическое построение графика движения поездов на однопутных участках.
2. Автоматизированное построение графика движения на однопутных участках по технологии от ограничивающего перегона.
3. Добавление окон ремонтных работ.
4. Корректировка нормативов движения поездов.
5. Стыковка графиков движения соседних участков.
6. Интерактивная корректировка графика движения в «один клик» за счет перетаскивания участков поездов мышью.
7. Добавление поездов в существующий график движения.
8. Удаление поездов из графика движения.

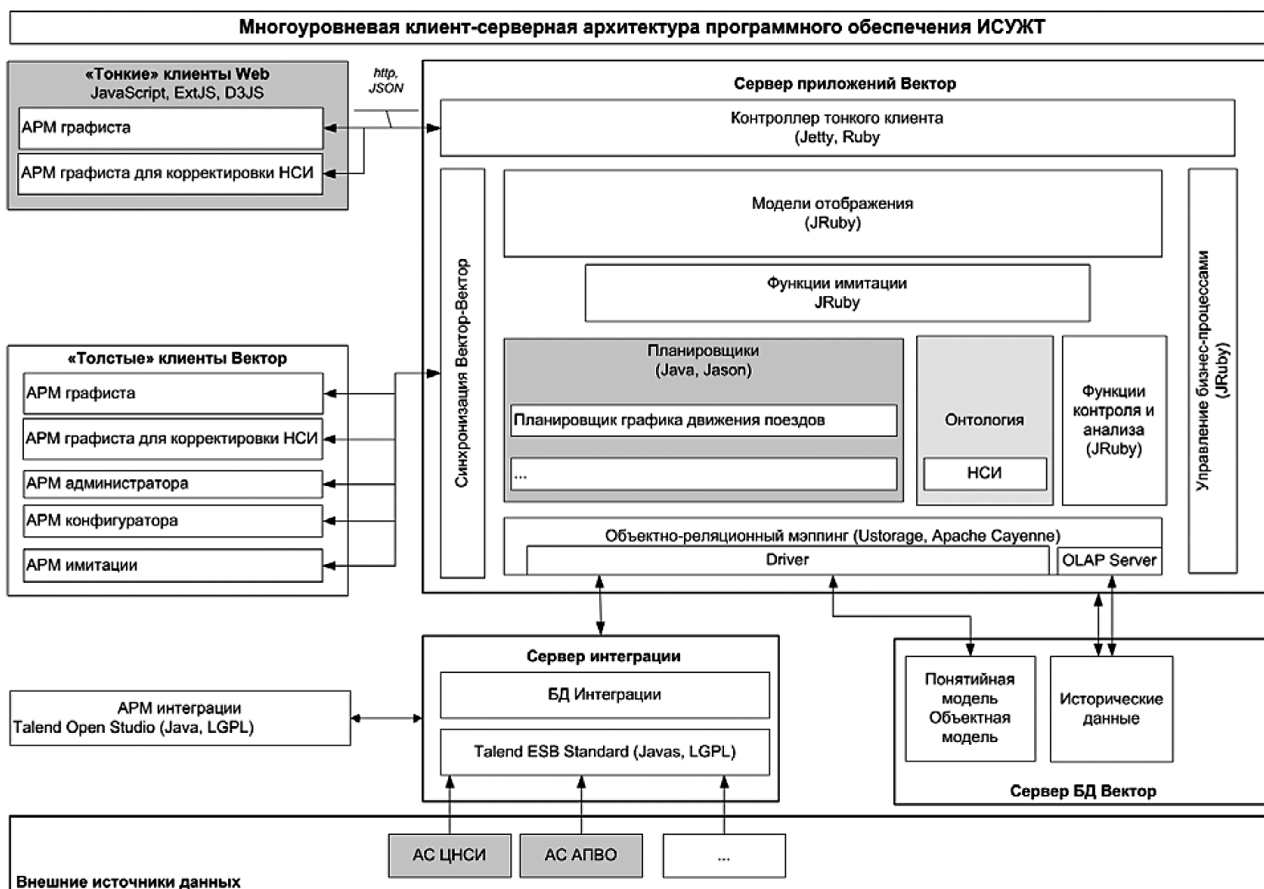


Рис.4. АРМ графиста в архитектуре ПТК ИСУЖТ

9. Предоставление пользователю выбора вариантов графика движения.
10. Автоматическая оптимизация текущего графика движения поездов.
11. Автоматический расчет показателей, характеризующих качество графика движения.
12. Импорт графика движения в различные форматы, включая .lgx.
13. Экспорт графиков движения из различных форматов, включая .lgx и .as7vg.

Примеры экранных форм приведены на рис. 5.

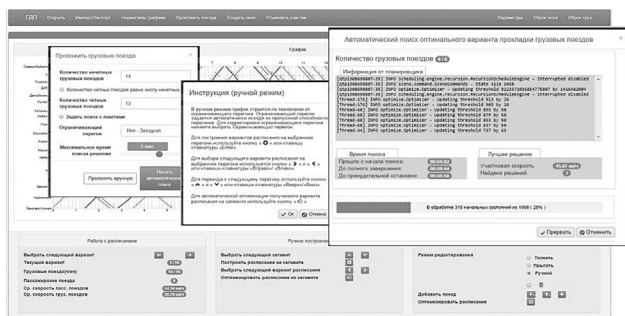


Рис.5. Примеры экранных форм АРМ графиста ПТК ИСУЖТ

При сравнении графика движения поездов, построенного системой в автоматическом режиме, с графиком движения поездов, построенного графистом вручную, без использования каких-либо средств автоматизации было выявлено, что система позволяет находить более эффективные решения.

Так, участковая скорость на участке «Лена Восточная – Северобайкальск» при ручном построении графистом была равна 39 км/ч, а в варианте, построенном системой – 42 км/ч. Максимальное количество поездов, проложенных графистом при ручном построении – 11 пар, при работе системы – 17 пар.

Следует отметить, что при построении своего решения графист может учитывать некоторые сложные для формализации критерии, которые могут не учитываться системой. Однако даже в этом случае, график движения, построенный системой, может служить первым приближением для будущего графика, сводя задачу графиста не к построению графика «с нуля», а корректировке и доводке предложенного системой графика.

Использование системы в качестве основного инструмента графиста при построении графика движения поездов позволит в разы сократить время разра-

ботки итогового графика, одновременно повысив его качество и показатели движения.

Дальнейшее развитие комплекса АРМ графиста ПТК ИСУЖТ следует ожидать в трех взаимодополняющих направлениях:

- Ускорение наиболее рутинных действий графиста за счет удобства работы и максимального использования моделей, данных для подсказок пользователю (например, перетаскивание границ окна «мышкой» с автоматической перепрокладкой поездов на места, освобожденные при сдвиге «окна» и перемещения их с места, занимаемого при сдвиге окна).
- Явная поддержка основных бизнес-процессов, связанных с разработкой графиков движения, на уровне статусов и состояний графиков, заданий на разработку, типовых схем потоков данных при доработке и согласованиях графиков.
- Доводка алгоритмов автоматического планирования на различных участках сети железных дорог ОАО «РЖД».

Машталер Ю.А., Матвиенко В.А., Алтунин В.П., ОАО «НИИАС», г. Москва
Такмазян А.К., ООО «Програмпарк», г. Москва

Мультиагентное решение задачи о суточном планировании назначения локомотивных бригад на явку в депо

Мультиагентные методы эффективно используются при решении задач оптимального планирования. Повышение быстродействия при распределенном подходе достигается за счет редукции большой централизованной задачи к множеству более мелких задач пониженной сложности и уменьшения вычислительной трудоемкости каждой из них путем замены глобальной целевой функции – локальными (как правило, более простыми).

В настоящей работе с использованием мультиагентной среды Jason решается задача о планировании назначения локомотивных бригад (ЛБ) на явку в депо на следующие железнодорожные сутки (с 18:01 текущих календарных суток до 18:00 следующих календарных суток).

I. Постановка задачи

Для обеспечения вывоза поездов на участке необходимо обеспечить локомотивы требуемым количеством локомотивных бригад (ЛБ). Для каждого депо на участке имеется наряд-задание по явке приписанных бригад в депо в течение планируемых суток. Каждое

наряд-задание для депо разделяется по участкам работы (обращения) локомотивных бригад (УОЛБ). Кроме того, наряд-задания для каждого УОЛБ разделяются по трехчасовым интервалам в течение железнодорожных суток. Таким образом, задача сводится к назначению потребного количества бригад на явку по каждому трехчасовому интервалу в течение планируемых железнодорожных суток для каждого УОЛБ.

Назначение бригад на явку выполняется строго с соблюдением трудового законодательства и приказа №7 от 5 марта 2004 г, отражающего особенности режима рабочего времени и времени отдыха для работников в составе локомотивной бригады (ЛБ). При назначении бригады на явку возможны ситуации нехватки бригад, когда бригаде будет сокращен домашний отдых или отменен выходной день. Наоборот, при избытке бригад, возможно продление для бригады домашнего отдыха или предоставление внеочередного выходного дня.

Продолжительность междусменного домашнего отдыха вычисляется как $ДО = КО * ПР - ПО$, где ПР – полное время работы бригады с локомотивом, ПО – время отдыха бригады в пункте оборота, КО – коэффициент отдыха (обычно равный 2.6). Однако

минимальный домашний отдых бригады не может составлять менее 16 часов.

Выходной день бригаде предоставляется за счет добавления 24 часов отдыха к планируемому отдыху после смены. Минимальная продолжительность выходного дня не может составлять менее 42 часов. Если бригада, находясь на выходном дне, по какой-либо причине отдыхает менее 42 часов, то ей должен быть предоставлен дополнительный выходной день взамен сорванного.

Кроме того, должны учитываться некоторые другие особенности работы ЛБ, отраженные в Приказе №7, например, нельзя выводить бригаду на работу в ночную смену три смены подряд. Ночной считается смена, в которую бригада находится на работе в любое время с 0 до 5 часов.

При формировании текущего среза локомотивных бригад, приписанных к данному депо, считается, что бригада находится в одном из следующих состояний:

1. Бригада находится в депо и ожидает отправления с локомотивом;
2. Бригада отправилась из депо и следует с поездом;
3. Бригада находится на отдыхе в пункте оборота ЛБ (ПОЛБ) и еще не назначена на отправление;
4. Бригада назначена и ожидает отправления с поездом или пассажиром из ПОЛБ в депо;
5. Бригада следует с поездом или пассажиром в депо
6. Бригада прибыла в депо;
7. Бригада находится на домашнем отдыхе или выходном дне;
8. Бригада находится на любом другом отвлечении от работы (больничный, отпуск, повышение квалификации и т.п.).

Поскольку минимальный междусменный отдых по нормативу составляет 16 часов, то, при условии запуска алгоритма планирования хотя бы дважды в сутки, мы можем при отборе бригад на явку в следующую смену рассматривать только категории с 4 по 7. При этом, все категории бригад рассматриваются в прогнозе на сутки, следующие за планируемыми (т.н. вторые сутки после текущих), и на третьи сутки. Таким образом, кроме плана составляется также и прогноз выхода бригад на период, следующий за планиваемым. Это позволяет нарядчику контролировать явку всего работающего контингента по данному депо.

II. Входные и выходные данные и критерии планирования

Входными данными для планирования являются:

1. Наряд-задание на содержание ЛБ на плановые сутки по депо приписки с указанием плановых участков работы ЛБ;

2. Пофамильный явочный состав ЛБ, приписанных к основному депо, с указанием текущего положения, состояния и истории операций;
3. Разрешение на работу по участкам работы, согласно данным контрольно-инструкторских поездок (КИП);
4. Фактические данные о времени работы и отдыха ЛБ с начала месяца, проценте выработки, основанном на индивидуальном задании – с учетом отпуска, больничных и других отвлечений в течение месяца (года), данные о переработке ЛБ (нарастающим итогом с начала года);
5. Нормы времени отдыха (домашнего и в пункте оборота) и выходного дня ЛБ (продолжительность)
6. Нормативы накладных времен по операциям следования ЛБ (продолжительность выполнения операций);
7. Информация о часовом сдвиге между участком обслуживания и Москвой.

Из пофамильного явочного состава локомотивные бригады распределяются по 3-х часовым периодам и сменам в соответствии с наряд-заданием, согласно следующей приоритетности по группам:

- 1) Сначала ЛБ, у которых в плановых сутках завершится полный домашний отдых или выходной день;
- 2) ЛБ в состоянии следования с поездом или пассажиром назначением в пункт оборота, отдыхающие в пункте оборота или следующие обратно в основное депо, у которых после возвращения в основное депо в плановых сутках завершится полный домашний отдых;
- 3) ЛБ, у которых можно сократить в плановых сутках полный домашний отдых до минимального допустимого времени по Приказу №7;
- 4) ЛБ в состоянии следования с поездом или пассажиром назначением в пункт оборота, отдыхающие в пункте оборота или следующие обратно в основное депо, у которых после возвращения в основное депо можно сократить полный домашний отдых до минимального допустимого времени по Приказу №7;
- 5) ЛБ, находящиеся на выходном дне в плановых сутках.

При этом, для всех ЛБ в рамках одной группы устанавливается дополнительный приоритет - фактическая выработка (в процентах от индивидуальной нормы) с начала месяца и с начала года. Например, если в группе 1 имеется несколько ЛБ, то выбирается та, у которой фактическая выработка меньшая. Расчет времени отдыха ЛБ (домашнего и в пункте оборота) осуществляется на основании приказа № 7. Расчет времени работы ЛБ осуществляется с использованием нормативов накладных времен по операциям следования.

При отсутствии поинтервальных норм, распределение ЛБ должно осуществляться равномерно по 3-х часовым периодам в пределах каждой смены.

В ситуации избытка бригад та ЛБ, у которой фактическая выработка с начала месяца и с начала года превышает нормы и/или больше, чем у остальных ЛБ для данного участка работы, будет условно избыточной в плановых сутках и ей рекомендуется предоставить дополнительный выходной день или увеличить домашний отдых.

При формировании прогноза на вторые и третьи сутки учитывается лишь плановое время отдыха бригады и, таким образом, вычисляется время явки бригады в депо после отдыха.

III. Описание метода решения

Для решения задачи предлагается использовать многоагентный подход: один агент верхнего уровня *main* служит интерфейсом между «пользователем» (которым в данном случае, является плагин интеграционной платформы) и рабочей средой, состоящей из множества агентов нижнего уровня, сотрудничающих для поиска решения задачи.

При старте все данные загружаются в главный агент-интерфейс (*main*). После этого он создает вспомогательные агенты-депо (*depot*), передавая им только локальные для депо данные. Поскольку планирование бригад на явку ведется независимо по каждому депо, агенты-депо действуют автономно по отношению друг к другу. На основании своих локальных данных, агент-депо порождает агенты-бригады (*team*) и агенты-участки обращения локомотивных бригад (*direction*), передавая им их атрибуты и другие необходимые данные. Поскольку назначение бригад ведется с разбивкой по трехчасовым интервалам, то агент *direction*, в отличие от агента *team*, не является конечным агентом в данной иерархии, а имеет своими потомками агенты – трехчасовые интервалы (*part*), для которых также служит диспетчером данных и потоков вычислений. Даже если наряд-задание приходит лишь с разбивкой по сменам (а не по интервалам), то на данном этапе производится дальнейшее равномерное разделение наряд-задания на (по возможности) равные части по трех-часовым интервалам, и передача этих редуцированных заданий в агенты *part*.

Таким образом, весь процесс разбивается на два этапа: первый – создание иерархии агентов, загрузка данных и инициализация, производится агентами верхних уровней: *main*, *depot*, *direction*. Второй этап – собственно планирование – происходит при взаимодействии агентов нижнего уровня между собой: *team* и *part*, которые, обмениваясь сообщениями, производят

назначение бригад на соответствующий временной интервал соответствующего УОЛБ (см. рис. 1).

Агент-интервал (*part*) хранит в своей памяти наряд-задание на заставку бригад на свой временной интервал на своем УОЛБ. Он является реактивным агентом, т.е. запускается лишь при запросе от агента-бригады (*team*) о наличии свободных вакансий в наряд-задании. Этот агент управляет процессом назначения, используя внутренние булевы переменные *Vacant* и *Busy*. Если первая из них имеет значение *true*, это значит наличие вакансии, и бригада назначается на явку в данный интервал безусловно. В противном случае выясняется, имеет ли вторая переменная значение *true*: т.е. агент сейчас занят рассмотрением другой заявки. Тогда бригаде отсылается сообщение «*busy*» – временный отказ, с возможностью позднейшего повторного обращения с той же самой заявкой, когда значение переменной *Busy* будет *false*.

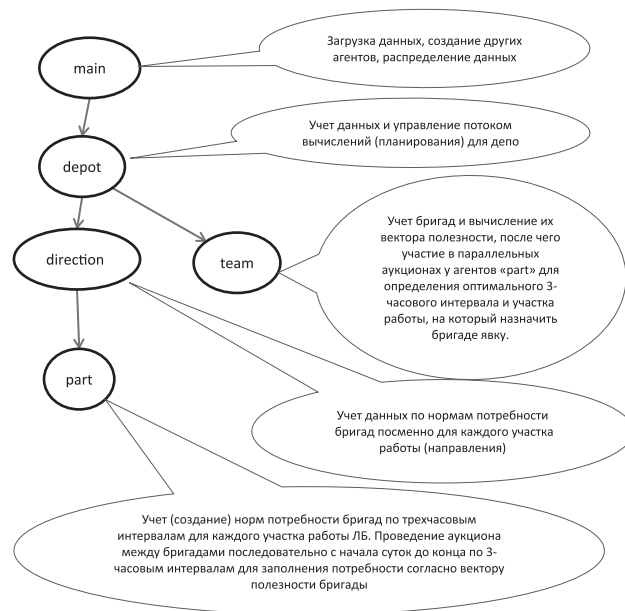


Рис. 1. Схема агентов в задаче о назначении бригад

Наконец, когда значение обеих переменных равно *false*, это означает, что все свободные вакансии по заставке на этот интервал заняты, и в данный момент нет других обрабатываемых заявок. Тогда агентом вызывается обработчик оценки возможности замены одной из уже заставленных в данный интервал бригад на вновь заявленную. Оценка происходит согласно функции полезности заставки бригады на данный интервал данного УОЛБ. Данная функция имеет векторную область значений, и вычисляется при инициализации агента-бригады.

Агенты-бригад (*team*) являются активаторами процесса планирования. Агент депо после инициали-

зации своих потомков и получении от них сообщений о готовности, запускает процесс планирования путем рассылки агентам бригад сообщения о начале работы. Каждый агент бригады имеет у себя список интервалов-участков, на которые он может теоретически быть назначен. Агент бригады пробегает по данному списку, посылая сообщения-заявки на постановку себя на данный интервал. Агент интервала рассматривает эти заявки и реагирует так, как было описано выше.

Каждая заявка содержит вектор-функцию, описывающую полезность назначения данной бригады на данный интервал данного участка. Значение этой функции определяются в первую очередь тем, повлечет ли данное назначение сокращение отдыха или срыв бригады с выходного дня. В последних двух случаях полезность безусловно ниже, чем при полном отдыхе бригады (причем при срыве с выходного дня она ниже, чем при сокращении отдыха). При равных условиях полноты (сокращения) отдыха, функции полезности различаются по проценту выработки бригадой рабочей нормы от начала месяца (или года): чем ниже выработка, тем выше полезность бригады.

Кроме того, необходимо учитывать, что существуют ограничения для разных бригад по работе на разных УОЛБ – проще говоря, чтобы быть назначенной на данный УОЛБ, бригаде нужно иметь разрешение по работе на нем, по результатам контрольно-инструкторских поездок (КИП). Таким образом, среди бригад возникает дополнительная иерархия по количеству разрешенных бригаде УОЛБ (для данного депо). Чем меньше число разрешенных для работы участков (это число должно быть больше нуля, иначе бригада не рассматривается для планирования), тем выше функция полезности у бригады. Это правило легко понять, если учесть, что в первую очередь нужно планировать именно бригады с наименьшим числом разрешенных участков работы, включающих данное депо.

Нужно при этом заметить, что планирование проводится в два этапа. Изначально функция полезности имеет векторный вид, где первая координата характеризует полноту отдыха бригады, вторая – процент выработки, и третья – для уже вернувшихся бригад – порядок их фактической постановки на явку по возвращении в депо. После первоначального плани-

рования выхода бригад проводится второй, корректирующий этап – где процедура взаимодействия бригад и интервалов в точности такая же, но с другой (скалярной) функцией полезности – учитывающей теперь только количество разрешенных участков работы при данном депо для данной бригады.

IV. Результаты

В результате работы мультиагентного алгоритма планирования на выходе получаем решение оптимизационной задачи по назначению бригад на явку. Локально для каждого интервала оптимальность следует по построению механизма отбора бригад при обслуживании заявок. Глобальная оптимальность обеспечивается монотонностью каждой из компонент функции полезности: действительно, для фиксированного участка с увеличением номера интервала функция полезности может только возрастать по всем координатам, как видно из ее построения.

Заключение

Предложен и реализован мультиагентный алгоритм оптимального планирования сменно-суточной заставки бригад на явку в депо, на следующие сутки. При планировании достигается оптимальность в смысле равномерности выработки рабочего времени бригад, равномерности коэффициента домашнего отдыха и регулярности предоставления бригадам выходного дня. Используемый алгоритм включает в себя решение задачи о назначениях путем переговоров агентов-исполнителей и агентов-задач. Планирование производится один раз в сутки в режиме реального времени и с достаточной для задачи скоростью – для депо время выполнения модуля составляет меньше одной минуты. Задача была реализована в рамках ввода в эксплуатацию первой очереди подсистемы управления тяговым хозяйством Восточного полигона.

Литература

1. «Положение об особенностях режима рабочего времени и времени отдыха, условий труда отдельных категорий работников железнодорожного транспорта, непосредственно связанных с движением поездов». Утверждено приказом МПС России от 5 марта 2004 г. N 7.

Ефремов Г.А., Ефремова А.П., ОАО «НИИАС», г. Москва

Управление движением поездов на полигонах Октябрьской дороги с помощью интеллектуальных многоагентных систем

Введение

Работа диспетчера связана с непрерывно возникающими конфликтами во время движения поездов (отклонения от графика, отказы технических средств, ремонтные работы и др.). Время реакции на события и на принятие решения диспетчером ограничено. Опыт каждого диспетчера непосредственно влияет на качество и скорость принятия решений. В настоящий момент практически отсутствуют системы поддержки принятия решений для поездных диспетчеров.

Отличительными особенностями направлений Санкт-Петербург — Москва, Санкт-Петербург — Буловская являются: 1) движение высокоскоростных пассажирских поездов 2) движение грузовых поездов по той же железнодорожной инфраструктуре, 3) высокая интенсивность движения.

Первая очередь задач проекта по созданию Единой интеллектуальной системы управления и автоматизации производственных процессов на железнодорожном транспорте – ИСУЖТ для пилотных полигонов Октябрьской дороги Санкт-Петербург – Москва, Санкт-Петербург – Буловская направлена на решение следующих актуальных проблем:

- возврат пассажирских поездов в график при возникновении их отклонений и нестандартных ситуаций [1-3, 5];
- построение плана пропуска для неграфиковых грузовых поездов;
- обеспечение безопасности пропуска высокоскоростных поездов (контроль установки маршрутов, закрытия переездов, установки режимов высокоскоростного движения, недопущение скрещения поездов «Аллегро», «Сапсан» и грузовых поездов с негабаритными или сыпучими грузами).

В рамках проекта устранение отклонений от графика движения и решение возникающих конфликтных ситуаций формируется на основе многоагентных технологий [4, 7].

Новым полигоном для внедрения апробованных алгоритмов ИСУЖТ выбран участок Санкт-Петербург – Невель. Данный полигон является однопутным участком с многопутной вставкой в пригородной зоне Санкт-Петербурга. Основной задачей на этом полигоне является решение конфликтов и построение плана пропуска на однопутном участке с целью минимизации скрещений и повышения участковой скорости грузовых поездов.

ИСУЖТ на полигоне Октябрьской дороги

Характеристика полигонов Октябрьской дороги приведена на рис. 1. Подробное описание полигонов Санкт-Петербург — Москва, Санкт-Петербург — Буловская приведено в [4, 9]. Основная особенность данных направлений – смешанное движение: наличие пригородных, пассажирских и высокоскоростных поездов, а на Буловском направлении большое количество грузовых поездов.

Вследствие наличия межгосударственного стыка актуальной является задача возврата пассажирских поездов в график в случае опоздания. Довольно часто возникают ситуации задержки поездов «Аллегро» и «Лев Толстой» в Финляндии. В этом случае диспетчеру необходимо перестраивать весь план пропуска, сдвигать времена проведения плановых окон, чтобы сократить отставания поездов от графика.

Направление Санкт-Петербург — Невель — многопутная линия в пригородной зоне СПб, однопутный участок от станции Новинка. Длина полигона 604 км, 48 станций. На участке есть пассажирская и сортировочная внеклассные станции.

Движением на направлении управляют 2 поездных диспетчера и старший диспетчер направления. Размеры движения на направлении по участкам: 15/14 пар пассажирских поездов, 51/2 пары пригородных поездов, 12/11 пар грузовых поездов.

Текущее состояние автоматизации на полигонах Санкт-Петербург—Буловская, Санкт-Петербург—Невель отличается от полигона Санкт-Петербург-Москва [4]. У диспетчеров на направлении Санкт-Петербург — Буловская отсутствует табло коллективного пользования, диспетчера работают в отдельных кабинетах, а не в едином диспетчерском центре. На ответвлениях полигона Санкт-Петербург — Буловская и ряде станций полигона Санкт-Петербург — Невель отсутствует система диспетчерской централизации «Сетунь», информация о поездном положении есть только по операциям прибытия и отправления. Также, по поездам, в том числе «Аллегро», отсутствует спутниковая информация об их дислокации и скорости. Задачи, решаемые подсистемой оперативного управления ИСУЖТ на полигонах Октябрьской дороги, приведены на рис.2.

Подробнее рассмотрим функции системы для диспетчерского управления движением поездов на примере ИСУЖТ для полигона Санкт-Петербург — Буловская.

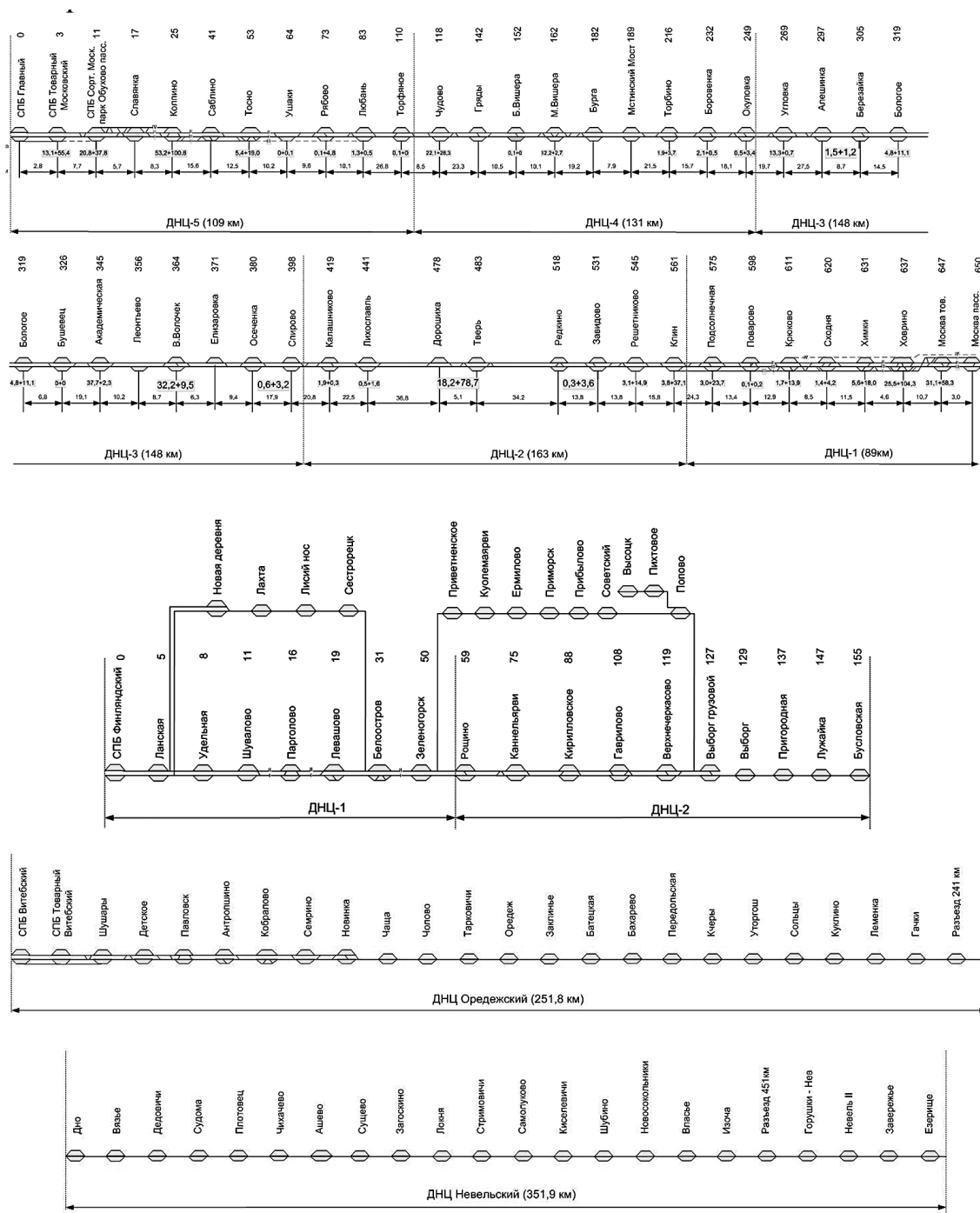


Рис.1. Полигоны Октябрьской дороги

Во-первых, это контроль. В настоящее время поездной диспетчер может контролировать движения поезда только по станциям, фиксируя события прибытия и отправления. Развитие системы диспетчерского контроля на рассматриваемом направлении позволяет контролировать и занятие всех блок-участков на перегоне. Устройствами спутниковой навигации оборудованы не все поезда, поэтому информация о скорости есть не по всем поездам. Следовательно, своевременно отследить остановку поезда на перегоне диспетчер все

же не в силах. Контроль длительности занятия блок-участков позволит своевременно оповестить диспетчера о возможной остановке поезда на перегоне.

Следующий блок предназначен для контроля течения технологических процессов. Он будет сопровождать действия диспетчера, как в штатных, так и нестандартных ситуациях. Функциональный блок будет предоставлять диспетчеру выбор действий в соответствии с текущими условиями и контролировать их исполнение. В случае опоздания поездов, например,

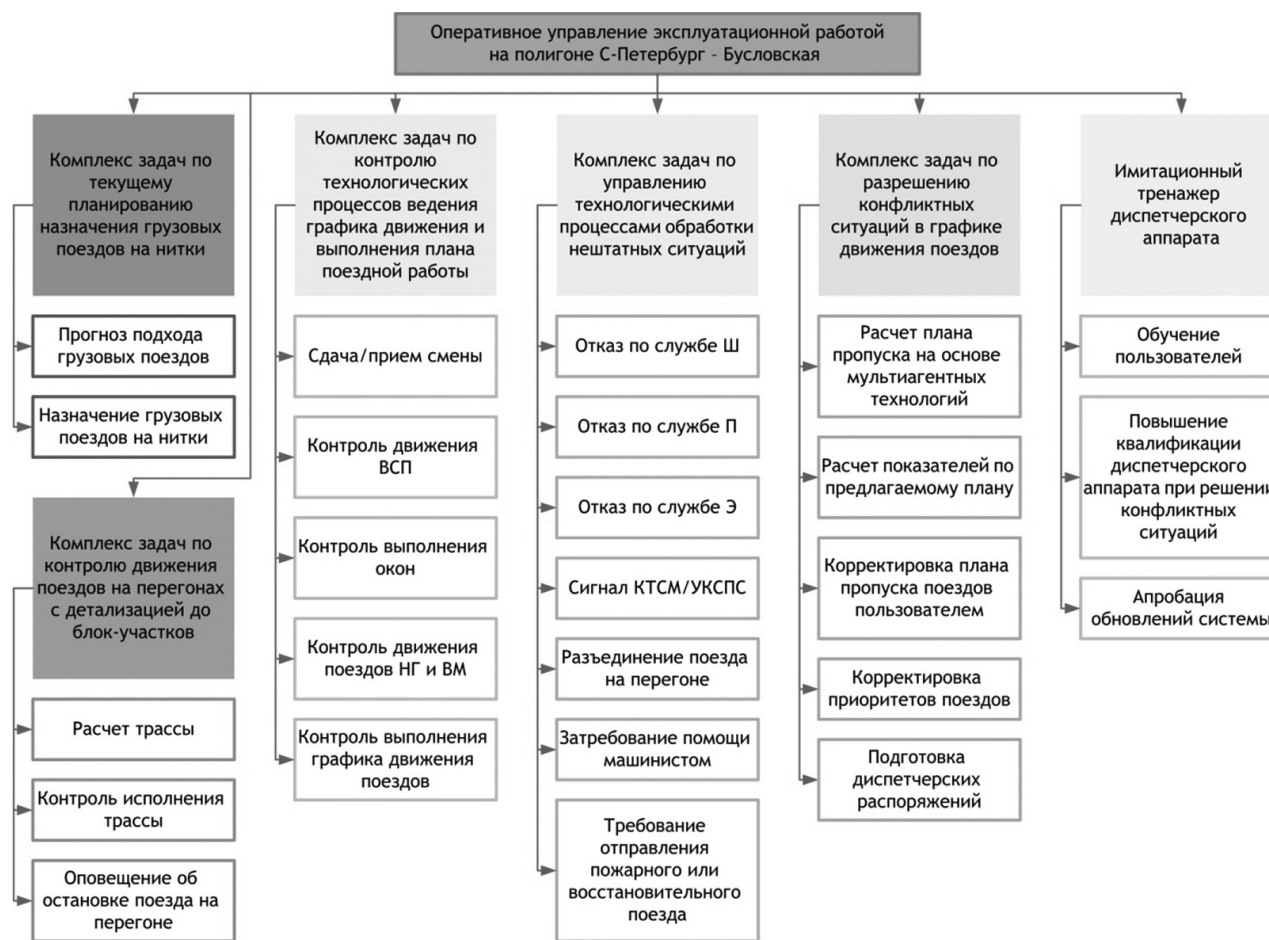


Рис.2. Комплексы задач, решаемые ИСУЖТ на Октябрьской дороге

вследствие какого-либо отказа, техпроцесс будет подсказывать диспетчеру запустить планировщик для построения плана пропуска после сбора всех необходимых данных по отказу.

Наконец, интеллектуальная составляющая системы заключается в построении плана пропуска поездов на основе мультиагентных технологий.

Полигон имеет несколько ответвлений, контролируемых другими диспетчерами, с которых могут поступать грузовые поезда (как в соответствии с нормативным графиком, так и диспетчерским расписанием). Поездным диспетчерам необходимо построить план пропуска этих грузовых подходов так, чтобы соблюсти все требования безопасности движения, местные условия пропуска, не нарушить движение пассажирских и пригородных поездов, не сорвать срок доставки груза. Кроме того, необходимо спланировать пропуск поездов своего формирования (на участке есть сортировочная станция Выборг).

Комплексы задач по текущему планированию и решению конфликтных ситуаций в автоматизированном режиме планируют пропуск поездов с учетом текущего

поездного положения (отклонения от графика пассажирских поездов, движение грузовых поездов диспетчерским расписанием), инфраструктурных ограничений (плановые окна, ограничения скорости, путевое развитие станций, занятость путей станции) и местных условий пропуска (приоритеты поездов, длины поездов и др.)

Новизна предлагаемого решения ИСУЖТ для полигонов Санкт-Петербург — Москва, Санкт-Петербург — Бусловская, Санкт-Петербург — Невель состоит в реализации следующих функций:

- назначение грузовых поездов на нитки графика, построение плана пропуска грузовых поездов;
- контроль движения и построение графика исполненного движения с точностью до блок-участка;
- мониторинг выполнения штатных технологических процессов;
- решение конфликтных ситуаций в реальном режиме времени с точностью до блок-участка;
- управление технологическими процессами обработки нештатных ситуаций.

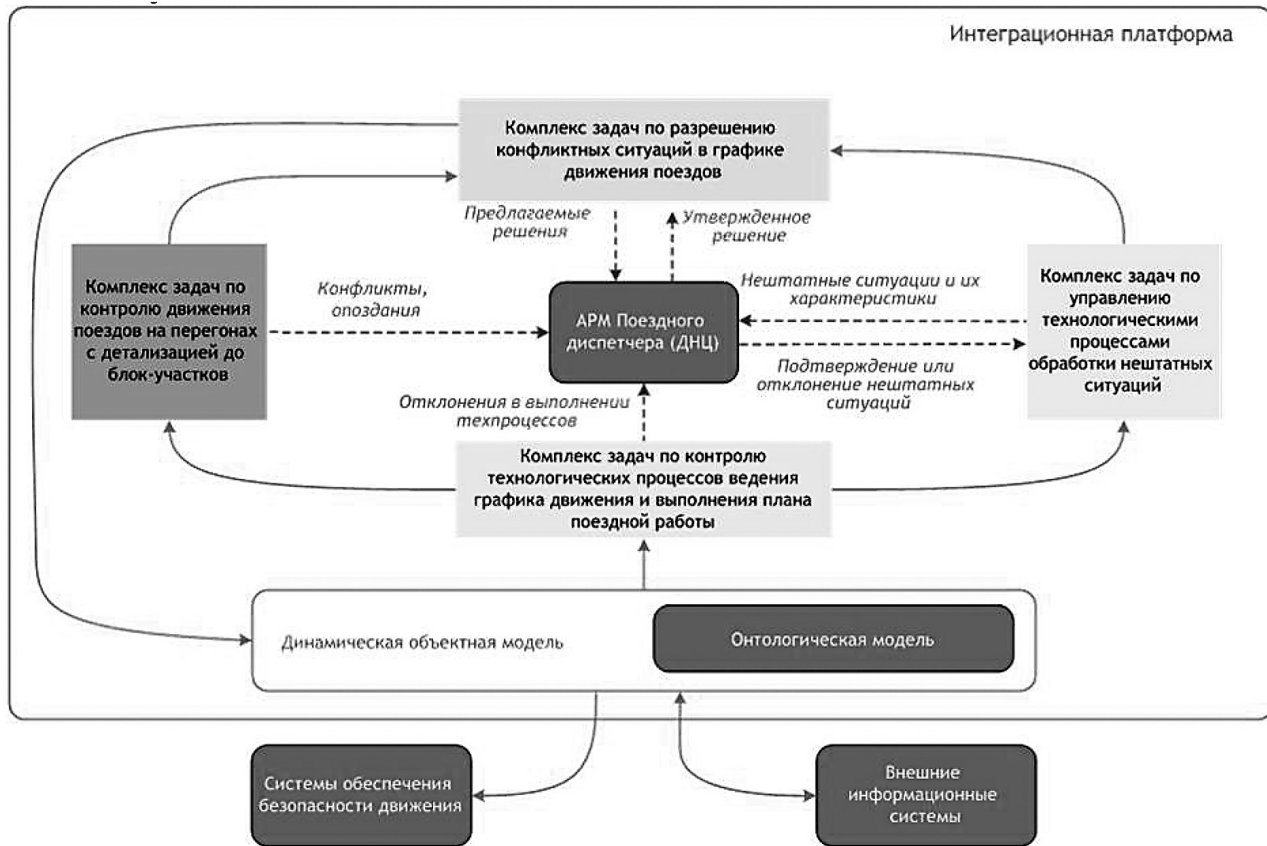


Рис.3. Взаимодействие ИСУЖТ с диспетчером

На основе данных из внешних систем по командам диспетчера в реальном масштабе времени строится план пропуска поездов. Построенный план вместе с его оценкой предлагается диспетчеру на утверждение. Диспетчер может откорректировать план пропуска, если, например, он знает об особенностях поездов, которых нет в автоматизированных системах. Например, может повысить приоритет любому поезду или группе поездов. После корректировок пользователя план пропуска ещё раз пересчитывается для исключения возможных конфликтов, которые пользователь мог не учесть. Затем план пропуска диспетчером утверждается и запускается задача контроля движения поездов. При возникновении отклонений, изменении времен подхода поездов план пересчитывается.

На полигоне Санкт-Петербург — Бусловская расчет плана пропуска на 6 часов вперед занимает порядка 20 секунд.

Уже проверена работоспособность и масштабируемость алгоритмов на трех полигонах Октябрьской дороги и ведется сбор данных для настройки алгоритма планирования пропуска на Восточно-Сибирской дороге.

При переходе на новые полигоны наиболее трудоемкой является задача обработки и подготовки дан-

ных для построения плана пропуска. План строится с точностью до блок-участка, что делает систему чувствительной к точности данных системы диспетчерской централизации.

Создание системы для пилотных полигонов Санкт-Петербург — Москва, Санкт-Петербург — Бусловская позволит повысить эффективность управления ресурсами железнодорожного транспорта в реальном времени и обеспечит управление движением поездов по расписанию (своевременное включение маршрутов и режимов на станциях проследования поездов) при возникновении нештатных ситуаций.

Поддержка диспетчерских решений для устранения отклонений в движении поездов от графика будет осуществляться в полнофункциональных рабочих местах, автоматизирующих сквозной процесс диспетчерского управления. Диспетчер с помощью полнофункционального АРМа сможет выполнять весь перечень должностных обязанностей, включая передачу сообщений и приказов другим диспетчерам, а также управляющих воздействий непосредственно на устройства автоматики и локомотив.

Задача назначения грузовых поездов на нитки графика позволит организовать движение грузовых поездов по расписанию. Для полигона Санкт-Петербург —

Бусловская данная задача критична по причине смешанного движения. Учитывая подход поездов, система назначает грузовые поезда на нитки графика, не допуская скрещения с поездами «Аллегро» при наличии сыпучего груза в поезде.

Новой задачей ИСУЖТ на участке Санкт-Петербург — Невель является интеграция с системой автоматической установки маршрутов (АУМ). Это позволит устанавливать маршруты не только в случае отсутствия отклонений при движении в полном соответствии с графиком, но и при значительных отклонениях от расписания, а также при утверждении плана пропуска поездов диспетчером при разрешении конфликтов.

Перспективами развития ИСУЖТ на полигонах Октябрьской дороги является: интеграция с автоведением для управления тягой. Дальнейшее тиражирование описанного решения на сеть железных дорог будет основой для движения всех типов поездов по расписанию.

Заключение

В настоящее время проверена применимость многоагентных технологий для возврата поездов в расписание. Архитектура разработанной системы позволяет декомпозировать задачу. Заложена масштабируемость системы: решение для полигона Санкт-Петербург-Москва с добавлением грузовых поездов адаптировано на полигоне Санкт-Петербург – Бусловская. В системе предусмотрено добавление новых данных: ограничений, технологий, правил, которые возникали в процессе эксплуатации. Разработанная система обучается, так как позволяет оперативно редактировать правила решения конфликтных ситуаций. В ИСУЖТ результаты разрешения конфликтов отображаются с помощью когнитивного интерфейса, что позволяет диспетчеру быстро оценить предложенное решение и предпринять необходимые действия.

Разработанная управляющая система введена в опытную эксплуатацию в ноябре 2013г на полигонах Санкт-Петербург-Москва, Санкт-Петербург – Бусловская, в процессе которой произведена более точная настройка параметров алгоритма разрешения конфликтов на основе многоагентных технологий, добавлено множество дополнительных ограничений и правил, которые были определены самими пользователями системы.

Литература

1. Матюхин В.Г., Шаров В.А., Шабунин А.Б. Управление железной дорогой онлайн/ Пульс управления, 2011. № 03. – С.24-29
2. Матюхин В.Г., Шабунин А.Б., Калущая А.П. Дороги проверяют / Пульс управления, 2012. № 05(09). – С.24-27.
3. Матюхин В.Г., Шабунин А.Б. ИСУЖТ. Концепция и реализация // Сборник трудов Первой научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» (ИСУЖТ-2012, Москва, 15-16 ноября 2012г). – М. – Изд-во ОАО «НИИАС», 2012. – С. 15-18.
4. Ефремов Г.А., Калущая А.П. Интеллектуальное диспетчерское управление движением поездов на направлении Санкт-Петербург - Москва// Сборник трудов Первой научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» (ИСУЖТ-2012, Москва, 15-16 ноября 2012г). – М. – Изд-во ОАО «НИИАС», 2012. – С. 55-57.
5. Матюхин В.Г., Шабунин А.Б., Калущая А.П. От продуманного решения к качественной реализации / Железнодорожный транспорт, 2013. №3. – С.20-22.
6. Шабунин А.Б., Ефремов Г.А., Калущая А.П. Использование мультиагентных систем в диспетчерском регулировании / Железнодорожный транспорт, 2013. №3. – С.23-27.
7. Шабунин А.Б., Чехов А.В., Ефремов Г.А., Дмитриев Д.В., Курбатов Е.В., Сазуров С.В., Бабанин И.О., Белоусов А.А., Кожевников С.С., Симонова Е.В., Скобелев П.О., Степанов М.Е., Царев А.В., Мунтян Г.Ю. Решение конфликтов в графике движения поездов в реальном времени с использованием мультиагентных технологий// Сборник трудов Первой научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» (ИСУЖТ-2012, Москва, 15-16 ноября 2012г). – М. – Изд-во ОАО «НИИАС», 2012. – С. 51-54.
8. Ефремов Г.А., Ефремова А.П., Курбатов Е.В. Диспетчерское управление движением поездов на основе интеллектуальных многоагентных систем // Сборник трудов Второй научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» (ИСУЖТ-2013, Москва, 15-16 октября 2013г). – М. – Изд-во ОАО «НИИАС», 2013. – С. 55-57.

Рябых Н.Г., ООО «ПрограмПарк», г. Москва

Захарова Е.М., Минашина И.К., Корчагин Т.А., МФТИ, г. Москва

Реализация привязки поездов на нитки вариантного графика с помощью решения задачи о назначениях

Вступление

Задача планирования расписания грузоперевозок является одной из наиболее сложных и актуальных задач, возникающих в рамках управления движением на железнодорожном транспорте. В задачу планирования расписания грузоперевозок можно включить задачу составления расписания движения поездов (а именно, выбор оптимального времени отправления поездов со станций), а также задачу привязки к поездам локомотивов и локомотивных бригад. При этом, хотя и эти задачи требуется решать в комплексе, задача составления расписания движения поездов является базовой, на которую впоследствии накладываются ограничения задач о прикреплении тяговых ресурсов.

В статье будет рассказано об одной из задач проекта, запланированного в рамках гранта РФФИ по конкурсу ориентированных фундаментальных исследований по актуальным междисциплинарным темам в интересах ОАО «РЖД». В данной работе будет описан способ составления расписания движения грузовых поездов, а именно привязка поездов на нитки вариантного графика движения с помощью сведения данной задачи к задаче о назначениях и решения ее методом аукционов.

Постановка задачи

Главное ограничение в задаче составления расписания движения поездов заключается в том, что для поездов нельзя выбирать произвольные времена отправления и прибытия на станции. Поезда, в соответствии с технологией, должны двигаться только по определенным ниткам вариантного графика, который составляется на основе нормативного графика движения поездов на каждые следующие железнодорожные сутки. Поэтому задачу составления расписания можно поставить как задачу поиска оптимальных ниток вариантного графика для поездов.

Формально задачу можно сформулировать следующим образом. На вход модуля планирования подаются следующие данные:

- Исходное расположение поездов на полигоне на начало планирования;
- Сформированные и готовые к отправлению поезда, находящиеся на станциях;
- План составообразования поездов на ближайшие сутки с указанием станции формирования и приблизительного времени завершения формирования каждого поезда;

- Вариантный график движения: набор ниток, на которые можно прикреплять поезда.

Для каждого поезда известно его текущее местоположение и маршрут до станции назначения. Задача заключается в том, чтобы оптимальным образом выбрать нитки вариантного графика, на которые требуется прикрепить поезд. При этом поезд необязательно должен занимать всю нитку целиком. Возможны случаи, когда по одной нитке движутся два или более поездов (на разных участках), а также случаи, когда один поезд следует по нескольким ниткам последовательно на разных участках.

Сведение к задаче о назначениях

Задача о назначениях – это стандартная математическая задача, она является типичным примером задачи комбинаторной оптимизации. В общей форме эту задачу можно сформулировать следующим образом:

- Имеется некоторое число работ (N) и некоторое число исполнителей (M) этих работ. Каждый исполнитель умеет выполнять некоторое количество P из этих работ ($0 \leq P \leq N$), причем эффективность выполнения «своих» работ у исполнителя разная: некоторые работы он умеет выполнять лучше, некоторые – хуже. Требуется распределить работы между исполнителями так, чтобы суммарная эффективность назначения была максимальной.

Для каждой пары <работа, исполнитель> вводится «функция полезности» U_{ij} – числовое выражение эффективности назначения данного исполнителя на данную работу. Таким образом, оптимизация в рамках данной задачи сводится к максимизации функции $\sum U_{ij}$ по всем назначениям исполнителей на работы при условии, что каждый исполнитель назначен не более чем на одну работу.

Рассмотрим, как свести задачу привязки поездов на нитки графика к задаче о назначениях:

- В качестве «исполнителей» будем считать поезда, которые требуется прикрепить к ниткам. Тогда главным требованием задачи о назначениях будет обеспечение работами всех исполнителей (что будет эквивалентно назначению всех поездов на нитки графика).
- В качестве «работ» возьмем нитки вариантного графика. Тогда условие, что «каждый исполнитель может выполнять некоторое количество ра-

бот» соответствует тому, что для каждого поезда имеется выбор, к какой нитке оказаться прикрепленным. При этом для некоторых пар <поезд, нитка> прикрепление вообще невозможно: это, например, происходит для случаев, когда маршрут поезда не имеет совпадений с маршрутом нитки.

Поскольку каждый поезд может быть назначен на разные нитки на разных фрагментах маршрута, то для решения общей задачи о прикреплении поездов на нитки будем решать последовательность задач о назначениях:

- Каждая задача о назначениях будет ставиться для отправления поездов с одной станции.
- Для каждой станции определим набор поездов, которые на данной итерации требуется запланировать к отправлению с данной станции. На первом шаге это поезда, которые находятся на данной станции на начало планирования, а также те, которые уже были запланированы к отправлению и текущая станция является следующей необработанной станцией их маршрута.
- После того как мы выполнили привязку поездов на одной станции (решили задачу о назначениях), мы знаем время, в которое каждый поезд прибудет на следующую станцию своего маршрута. На следующей итерации каждый привязанный поезд попадет в множество поездов «которые уже были запланированы к отправлению» (см. предыдущий пункт) в задаче о назначениях на следующей станции их маршрута.
- Таким образом, перед каждой итерацией мы можем вычислить количество поездов, которые требуется привязать на нитки вариантного графика на каждой станции планирования. Тогда в качестве обрабатываемой на данном шаге станции будем выбирать станцию, на которой это количество поездов максимально. Последовательно проходя все станции, мы выполним привязку всех поездов на всем протяжении их маршрутов.

Вычисление функции полезности

Ключевым вопросом для формулировки задачи привязки поездов на нитки как задачи о назначениях является правило вычисления функции полезности для каждой пары <поезд, нитка>. Вычисление функции полезности будем вести следующим образом. Сначала определим критерии, которые определяют эффективность назначения поезда на нитку. Таким критериями являются:

1. Время ожидания поезда. Поскольку долгий простой поездов на станциях нецелесообразен, время стоянки поезда на станции в ожидании следующей нитки должно быть, по возможности, маленьким.

Для этого критерия есть несколько нюансов использования:

- a. На станции формирования поезда этот критерий требуется учитывать с меньшим весом, исходя из того, что на станции формирования поезд может простаивать в ожидании отправления дольше, чем на промежуточных станциях по ходу движения.
 - b. Для станций смены бригад и локомотивов должно учитываться время на стоянку поезда для соответствующей смены.
2. Равномерность почасового отправления поездов:
 - a. Количество поездов, запланированных к отправлению в данный час, должно быть близко к среднему количеству поездов, которое надо отправить в час с этой станции. Среднее количество можно найти, взяв объемный суточный план отправления поездов и разделив количество поездов из этого плана на 24.
 - b. Требуется оставлять «свободные пропускные способности» на случай внепланового отправления поездов. Например, если в какой-то час со станции проложено 5 свободных ниток вариантного графика, а в другой час – только 2 нитки, то скорее надо назначать поезда на отправление в первый час, а не во второй.
 3. Процент совпадения маршрута поезда и нитки. Поезда надо по возможности привязывать к тем ниткам, маршрут которых полностью совпадает с маршрутом поезда. Тогда при назначении поезда не останется лишних «хвостов» ни от маршрута поезда, ни от нитки.
 4. Сохранение предыдущей подвязки поезда. Если поезд уже прикреплен на нитку на предыдущем участке, то надо стремиться сохранить текущую нитку.

Каждому критерию ставится в соответствие нормированное численное значение u_k , а затем вычисляется значение функции полезности для пары <поезд, нитка> как

$$U_{ij} = \sum_k c_k u_k,$$

где c_k – вес соответствующего k -го критерия. Веса подбираются экспериментальным образом в ходе настройки системы и могут быть указаны отдельно для разных участков полигона.

Заметим, что функции полезности имеет смысл вычислять только для тех ниток, для которых назначение поезда хотя бы теоретически возможно. Для остальных ниток значение функции полезности задаваться не должно. В множество невозможных ниток могут, например, попадать нитки, не имеющие пересечений с маршрутом поезда, или нитки с категорией, не подходящей под категорию поезда. Набор условий для та-

кого отсева ниток может задаваться отдельно для каждого фрагмента полигона.

Алгоритм решения задачи о назначениях с помощью аукционов

Задача о назначениях является частным случаем транспортной задачи, а она, в свою очередь, является частным случаем задачи линейного программирования. Эти задачи можно решать стандартным симплекс-методом, однако лучше использовать специализированные алгоритмы.

Самым распространенным алгоритмом решения задачи о назначениях является «венгерский алгоритм». Этот алгоритм был предложен в 1955 году и имеет вычислительную сложность $O(n^4)$, где n – количество работ и исполнителей (при условии, что эти количества одинаковые). Этот алгоритм можно модифицировать так, чтобы достичь времени выполнения $O(n^3)$. Данный алгоритм был реализован для решения исследуемой задачи о назначении поездов на нитки графика, но его производительность оказалась неприемлемой. Поэтому был найден другой алгоритм – решение задачи о назначениях с помощью аукционов.

Впервые метод решения задачи о назначениях с помощью аукционов был предложен Д. Бертсекасом в статье 1989 года [2] и был доработан им же и Д. Кастаном в 1992 году [3]. Алгоритм изначально предназначен для асимметричной задачи о назначениях, когда количество работ и количество исполнителей не совпадают. Основные идеи алгоритма заключаются в следующем:

1. Для каждой работы (в данном случае – для нитки) вводится понятие «цены» p_j . Это значение показывает дополнительную «стоимость», которую исполнитель (поезд) должен «заплатить», чтобы оказаться назначенным на данную работу. В начале алгоритма все нитки имеют нулевую цену.
2. На первом шаге берется произвольный поезд и назначается на нитку с максимальной функцией полезности. На этом же шаге происходит изменение цены данной «наилучшей» нитки следующим образом. Выбирается «вторая по полезности» нитка – это нитка, значение функции полезности (по данному поезду) для которой максимальное среди всех остальных, неприкрепленных ниток. В качестве цены «наилучшей» нитки устанавливается разность между «максимальным» и «вторым» значением функции полезности.
3. Смысл такой установки цены следующий. Допустим, для какого-то другого поезда максимальной функцией полезности также оказалась функция, вычисленная для этой, уже занятой нитки. Тогда, чтобы назначить новый поезд на эту нитку, предыдущий поезд требуется переназначить на другую

нитку – вторую по полезности. Но тогда суммарная полезность всего назначения понизится как раз на разность между максимальным и вторым значением функции полезности для первого поезда. Таким образом, чтобы суммарная функция полезности не стала меньше, от второго поезда требуется, чтобы это максимальное значение функции полезности для второго поезда превышало «второе» значение функции полезности второго поезда не менее чем на цену уже занятой нитки.

4. Таким образом, можно сказать, что поезда начинают «торговаться» за нитки, предлагая фиксированные суммы, но цены на нитки постоянно изменяются.

Итого, шаги алгоритма можно описать следующим образом:

1. Для неприкрепленного поезда i выбирается наилучшая нитка j :

$$j_i = \arg \max_{j \in A(i)} \{U_{ij} - p_j\},$$

где p_j – цена нитки j , $A(i)$ – множество ниток, допустимых для поезда i .

2. Вычисляется второе по величине значение «выгоды» от назначения поезда на нитку j_i :

$$w_i = \max_{j \in A(i), j \neq j_i} \{U_{ij} - p_j\}.$$

Если других возможных назначений поезда, кроме нитки j_i , нет, то w_i принимается равным $-\infty$.

3. Далее вычисляется новая цена для нитки j : $p_j = \max\{\lambda; U_{j_i} - w_i + \varepsilon\}$, где λ – пороговое значение (константа), ниже которого цену устанавливать запрещается, ε – малая величина порядка $1/N$.
4. Если $\lambda \leq U_{j_i} - w_i + \varepsilon$, то поезд i назначается на нитку j , а предыдущее назначение на нитку j сбрасывается (поезд i' , который ранее был назначен на нитку j , удаляется из множества прикрепленных поездов).
5. Шаги 1–4 повторяются до тех пор, пока все поезда не окажутся назначенными на нитки. В том случае, если количество ниток меньше количества поездов, алгоритм на каком-то шаге достигнет оптимального распределения поездов и набор назначенных поездов не будет далее изменяться. В этом случае также требуется остановить работу алгоритма.

Строгое доказательство сходимости данного алгоритма, а также обоснование выбора значений величин λ и ε приведено в статье [3].

Результаты и пути улучшения работы алгоритма

Для сравнения производительности решения задачи о назначениях с помощью венгерского алгоритма и алгоритма аукционов эти алгоритмы были реализованы на языке программирования *AgentSpeak*. Тестирование на модельных примерах показало, что уже на задачах размерности около 200×200 алгоритм аукционов показывает существенный прирост в скорости сходи-

мости по сравнению с венгерским алгоритмом: 20 секунд вместо 3–4 минут (данные временные показатели не стоит оценивать в абсолютном значении, поскольку *AgentSpeak* сам по себе довольно «медленный» язык). Оценка показывает, что алгоритм аукционов сходится за время около $N \log(N)$ и существенно выигрывает в производительности у венгерского алгоритма.

Далее алгоритм аукционов был реализован на языке *Java* в модуле планирования системы ИСУЖТ ВП1, который осуществляет привязку поездов на нитки графика на Восточном полигоне. Планирование производилось на 350 выделенных станциях, маршруты поездов включали в себя от 5 (поезда, заканчивающие свое следование) до 100 станций (поезда, следующие почти через весь полигон), общее количество поездов для привязки на нитки – около 2000. Общее время работы модуля привязки поездов на нитки составляет около 3 минут, что является приемлемым временем работы.

Возможные пути улучшения алгоритма заключаются в следующем:

- Помимо процедуры, описанной в предыдущем разделе, Бертсекас и Кастанон вводят процедуру «обратного» аукциона, когда не поезд подбирают нитки под себя, а наоборот – свободные нитки графика подбирают поезда, которые следует назначить «на себя». В этой процедуре также производится переопределение значения «пороговой» цены λ : пороговая цена теперь может меняться на каждом шаге. Общий алгоритм включает в себя как «прямую», так и «обратную» процедуру аукциона. Согласно исследованиям Бертсекаса и Кастанона, использование такого комбинированного аукциона в некоторых случаях может на порядок сократить время решения задачи о назначениях.

- В работе М. Завланоса, Л. Спесивцева и Г. Паппаса [4] приводится способ распределенного мультиагентного решения задачи о назначениях с помощью аукционов. В этом варианте аукциона каждый поезд представляется в виде агента. Процедура аукциона, описанная в предыдущем разделе, сохраняется (с некоторыми изменениями) для одного агента, но с помощью правильно организованного обмена знаниями между агентами удается также добиться прироста производительности. Текущая реализация алгоритма в системе ИСУЖТ ВП1 также является мультиагентной, но в качестве агентов фигурируют только агенты станций, которые хранят данные об уже запланированных поездах и управляют последовательностью, в которой решаются задачи о назначениях.

Литература

1. Таха, Хемди А., Введение в исследование операций, 7-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005: гл 5.4 Задача о назначениях.
2. Bertsekas, D. P. (1988). The auction algorithm: A distributed relaxation method for the assignment problem. *Annals of Operations Research*, 14(1), 105–123.
3. Bertsekas, D., & Castanon, D. (1992). A forward/reverse auction algorithm for asymmetric assignment problems. *Computational Optimization and Applications*, 1(3), 277–297.
4. Zavlanos, M. M., Spesivtsev, L., & Pappas, G. J. (2008). A Distributed Auction Algorithm for the Assignment Problem. In *Decision and Control, 2008. CDC 2008. 47th IEEE Conference on* (pp. 1212–1217).

Работа выполнена при поддержке гранта 13-01-13105 офи_м_РЖД «Качественный анализ и моделирование алгоритмов оптимизации мультиагентной системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте».

Хавторин А.М., ОАО «НИИАС», г. Москва

Учет загрузки инфраструктуры для принятия решения о согласовании уведомлений о предъявлении порожних вагонов для перевозки

Одной из комплексных задач, решаемых при создании функциональной подсистемы УФТО ИСУЖТ, является задача «Учет загрузки инфраструктуры для принятия решения о согласовании уведомлений о предъявлении порожних вагонов для перевозки».

На сегодняшний день вагонный парк российских операторов грузоперевозок составляет более 1.2 млн вагонов, и количество вагонов растет на 5-7%, опережая рост объема перевозок, из-за чего на сегодняшний день профицит вагонного парка составляет 25-30%.

Ежегодно вагонная база растет на 5-7%, опережая рост объема перевозок, из-за чего на сегодняшний день профицит вагонного парка составляет 25-30%. Действуя в условиях высококонкурентной среды, операторы стремятся создать «запас» порожних вагонов в тех узлах сети, где прогнозируется получение выгодных заказов на перевозку грузов. Другой распространенный сценарий – курсирование порожних вагонов «в режиме такси», обслуживая возникающие по ходу небольшие заказы.

Для РЖД перегон даже пустых вагонов является прибыльным, но эта прибыль значительно ниже той, которая может быть получена от перевозки грузов.

Таким образом, операторы и непосредственно РЖД сталкиваются со следующими проблемами:

- Возникновение переизбытка порожнего вагонного состава на станциях и перегонах, приводящего к затарам
- Перевозка избыточного количества порожних вагонов, не предназначенных под погрузку конкретного груза
- Срыв нормативных сроков доставки грузов
- Увеличение нагрузки на существующую инфраструктуру
- Снижение прибыльности грузоперевозок.

В итоге, ЦФТО как подразделение РЖД, ответственное за получение прибыли от грузоперевозок, сталкивается с необходимостью увеличивать объем продаж и прибыль при все возрастающем количестве помех.

Одним из способов решения перечисленных выше проблем может стать создание механизма ограничения отправки порожнего состава, перегружающего инфраструктуру станции погрузки. Результатом станет минимизация непродуктивного трафика порожних вагонов. Действующее федеральное законода-

тельство и внутренние регламенты РЖД декларируют равную доступность инфраструктуры для всех участников и дают крайне ограниченные возможности для ограничения отправок. Немотивированные же отказы в отправке порожнего состава могут повлечь за собой судебные иски и штрафные санкции. Аналогично, к штрафным санкциям приводит и срыв сроков доставки грузов.

Комплексная задача «Учет загрузки инфраструктуры для принятия решения о согласовании уведомлений о предъявлении порожних вагонов для перевозки» реализована на основе «Технологии расчёта прогнозной занятости перерабатывающих мощностей грузоотправителя на основе взаимодействия с системой ЭТРАН для обеспечения логического контроля за технологическими парками полигона дороги» от 2013 года, утверждённой вице-президентом ОАО «РЖД» С.М. Бабаевым.

При решении задачи обеспечивается подвод и подача под погрузку порожних вагонов в количестве, не превышающем реальные перерабатывающие способности грузоотправителя, в соответствии с положениями приказа Минтранс РФ №258, с одновременным выполнением следующих условий:

- Соблюдение основных положений Целевой модели рынка и основных направления развития структуры ОАО «РЖД»;
- Соблюдение принципов равнодоступности услуг инфраструктуры для всех участников рынка перевозок, перевозчиков и организаций, обслуживающих инфраструктуру железных дорог;
- Выполнение комплексной совместной технологии работы грузоотправителя и станции по организации подвода подвижного состава под погрузку с учётом данных заявок с указанием собственников подвижного состава, для минимизации маневровой работы и непроводительных простоев подвижного состава, как на путях станции, так и на путях клиента.

Ожидаемые результаты от решения задачи:

- Снижение нагрузки на инфраструктуру.
- Снижение расходов ОАО «РЖД» на выплаты по претензиям.
- Минимизация непроводительного простоя порожних вагонов.
- Минимизация непроводительного трафика.

Реализация комплексной задачи.

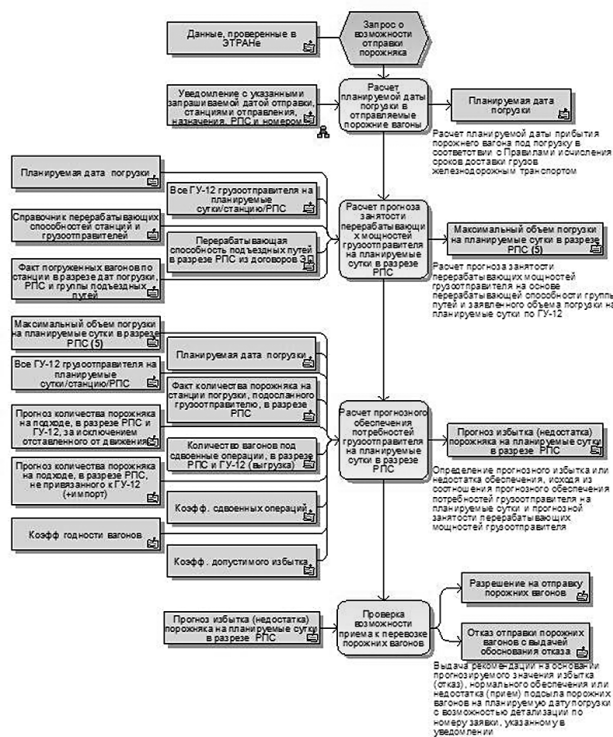


Рис. 1 Алгоритм принятия решения

Норма переработки для конкретного подъездного пути берется из данных договора на эксплуатацию данного подъездного пути или из договора на подачу и уборку вагонов. В случае отсутствия такого параметра в договоре допускается использование данных НСИ перерабатывающих способностей станций и грузоотправителей режима «Инфраструктурные ограничения» АС ЭТРАН.

Все подъездные пути, принадлежащие грузоотправителю, группируются в соответствии с их специализацией по родам подвижного состава.

Нормы переработки для каждой из таких групп суммируются.

Порядок расчета следующий:

1. Для расчёта максимального объёма погрузки грузоотправителя на планируемые сутки берётся минимум из суммы норм переработки группы путей по РПС и максимального объёма погрузки на планируемые сутки (берётся как разница между количеством вагонов, запланированных к погрузке, и количеством погруженных вагонов)
2. Для расчета прогнозного обеспечения планируемых суток для каждой группы заявок подсчитывается общее количество вагонов, находящихся в порожнем состоянии на станции погрузки, и подосланных под заявки этой группы, либо следующие данному грузоотправителю в порожнем

состоянии из-за границы через сухопутные погранпереходы (возврат из-под импорта), либо следующих в груженом состоянии в адрес грузоотправителя (сдвоенные операции).

Коротко о функциональной системе УФТО ИСУЖТ

Подсистема УФТО реализуется как открытая система и допускает наращивание функциональных возможностей.

Подсистема УФТО будет обеспечивать возможность модернизации как путём замены технического и общего программного обеспечения (ПО), так и путём совершенствования информационного обеспечения.

Коротко об ИСУЖТ

Один из ключевых принципов ИСУЖТ – объединение информации, технологических процессов и алгоритмов поддержки принятия решений в составе комплексных автоматизированных рабочих мест (АРМ).

Комплексные АРМ-ы должны заменить многообразие информационных систем, установленных на рабочих местах работников различных подразделений/филиалов ОАО «РЖД», сфокусировать их внимание на релевантной для данных работников информации, обеспечить возможность ее анализа, принятия решений и контроля над их исполнением в единой системе.

Основой комплексных АРМ ИСУЖТ являются:

- Единое информационное пространство системы, обеспечивающее полную ситуационную осведомленность;
- Тесная интеграция с действующими информационными системами и источниками данных;
- Алгоритмы поддержки принятия решений на базе технологии интеллектуальных агентов.

Технологии и результаты

Функциональная подсистема УФТО содержит программную реализацию алгоритма «Прогнозирование возможности отправки порожнего вагонного состава в соответствии с поданными уведомлениями», которая реализована на программной платформе Вектор-М, которая предоставляет современные технологии и средства разработки, такие как JRuby 1.7.4 и Java 7.25.

Программная платформа Вектор позволяет создавать и исполнять приложения самого широкого назначения, начиная с автоматизации работы диспетчерских служб, задействованных в различных технологических и производственных процессах, комплексных систем безопасности и мониторинга и паспортизации объектов.

В качестве основной базы данных для реализации комплексной задачи «Учет загрузки инфраструктуры для принятия решения о согласовании уведомлений о предъявлении порожних вагонов для перевозки» используется объектно-реляционная система управления базами данных компании Oracle - Oracle 11g.

Кан Ю.С., Кибзун А.И., Иванов С.В., МАИ, г. Москва

Оптимизационная модель назначения локомотивов для перевозки грузовых составов

Введение

Как отмечается в [1], в настоящее время значительное внимание уделяется повышению эффективности использования энергоресурсов на железнодорожном транспорте. При этом значительные потери энергоресурсов связаны с неэффективностью организации грузовых перевозок. В связи с этим возникает задача поиска стратегии эффективного назначения локомотивов для перевозки составов. В настоящей работе предлагается оптимизационная модель назначения локомотивов для перевозки грузовых составов на некотором участке железнодорожной сети. Предполагается, что составы на станциях формируются случайным образом.

Математическая постановка задачи

Пусть имеется S станций с номерами $s=1, \dots, S$ и J локомотивов с номерами $j=1, \dots, J$. Станции с номерами $1, \dots, D$ ($D < S$) являются также депо, в которых располагаются локомотивы.

Пусть распределение локомотивов по станциям необходимо производить в дискретные моменты времени $t=0, 1, 2, \dots, T$. Единица времени соответствует, например, трём часам.

Предположим, что за каждый промежуток времени $[t; t+1)$ может появиться не более одного состава по каждому направлению, задаваемому станциями отправления и назначения. Поскольку всего станций S , за каждый промежуток времени $[t; t+1)$ может появиться не более S^2 составов, а за весь период наблюдения – не более TS^2 составов. Будем использовать следующую нумерацию составов: составу, появляющемуся в промежуток времени $[t; t+1)$ и следующему от станции с номером n до конечной станции с номером $l \neq S$ присвоим номер

$$i = (t+T)S^2 + (n-1)S + l - 1. \quad (1)$$

При введённой нумерации составов по номеру состава можно однозначно восстановить время появления, конечный и начальный пункт маршрута. В частности, время появления

$$t(i) = \left\lfloor \frac{i}{S^2} \right\rfloor - T, \quad (2)$$

конечный пункт маршрута имеет номер

$$l(i) = S \left\{ \frac{i}{S} \right\} + 1, \quad (3)$$

начальный пункт маршрута имеет номер

$$n(i) = \left[\frac{i - (t(i)+T)S^2}{S} \right] + 1, \quad (4)$$

где $[\]$ — целая часть числа, а $\{ \}$ — дробная часть числа.

Отметим, что до момента $t=0$ могут быть образованы составы, которые уже ведутся локомотивами. Предположим, что все эти составы образуются с момента времени $t=-T$ до момента $t=0$. Присвоим этим составам номера по формуле (1), где n — начальная станция движения состава, l — конечная станция, а время меняется от $t=-T$ до $t=-1$. При такой нумерации по номеру состава также однозначно определяются по формулам (3)–(4) время отправления состава, его начальный пункт и пункт назначения.

Пусть I — множество номеров всех составов, возникающих как до момента времени $t=0$, так и номеров составов, возникших, начиная с момента $t=0$.

Введём случайные векторы $\xi_t = (\xi_t^{11}, \xi_t^{12}, \dots, \xi_t^{SS})^T$, $t=0, T-1$, с реализациями $x(t) \in \mathbb{R}^{S^2}$. Если в векторе $x(t)$ координата $x_{(n-1)S+l}(t)=1$, то в момент времени t возник состав, движущийся от станции n до станции l . Если же $x_{(n-1)S+l}(t)=0$, то состав с направлением движения от станции n до станции l не появился. Предполагается, что составы возникают независимо друг от друга, т.е. все случайные величины ξ_t^{nl} независимы. Пусть известна вероятность возникновения состава на каждой станции с заданным направлением движения $P\{\xi_t^{nl} = 1\} = p^{nl}$, которая не зависит от времени.

Опишем маршрут i -го состава с помощью функции $\eta_i(S_1, S_2)$, которая принимает значение 1, если в маршруте i -го состава станция S_1 предшествует станции S_2 , и 0 в противном случае. Предположим, что известно время движения τ^{ks} локомотива с составом от произвольной станции с номером k до произвольной станции с номером s .

Пусть масса μ_i груза, перевозимого i -м составом, является случайной и имеет нормальное распределение $N(\bar{m}_i, \sigma_i^2)$, причём все μ_i независимы. Предположим, что для каждого локомотива известна максимальная масса m_j^* состава, которую он может перевозить.

Введём переменные управления:

$$v_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если для обслуживания } i\text{-го состава в момент} \\ & \text{времени } t \text{ назначен } j\text{-й локомотив,} \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$u_j^{ks}(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й локомотив в момент} \\ & \text{времени } t \text{ отправляется от станции } k \text{ до станции } s, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Заметим, что k и s – это номера станций, на которых может находиться j -й локомотив в момент времени t и $t+\tau^{ks}$ соответственно. Эти номера станций будут находиться на маршруте движения i -го состава, если j -й локомотив назначен для перевозки этого состава. Если j -й локомотив остаётся на k -й станции, то будем считать, что $u_j^{kk}(t) = 1$. Если в момент времени t j -й локомотив находится в движении, то $u_j^{ks}(t) = 0$ для всех $k, s = 1, S$.

Введём переменные состояния системы, характеризующие положение локомотивов и составов на станциях, расположенных по маршруту движения составов:

$$z_i^s(t) = \begin{cases} 1, & \text{если в момент времени } t \\ & i\text{-й состав находится на станции } s \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

$$y_j^s(t) = \begin{cases} 1, & \text{если в момент времени } t \\ & j\text{-й локомотив находится на станции } s \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

Обозначим через $c(t)$ суммарный грузопоток к моменту времени t с учётом штрафа за перегонку локомотивов без груза.

Пусть известно состояние системы в начальный момент времени $t=0$: $z_i^s(0) = z_{i0}^s$, $i \in I$, $y_j^s(0) = y_{j0}^s$, $j = 1, J$, $s = 1, S$, $c(0) = 0$. Поскольку состояние системы рассматривается в момент времени $t=0$, управление системой $v_{ij}(t)$ и $u_j^{ks}(t)$ в моменты времени от $t=-T$ до $t=-1$ считается известным и его не нужно выбирать. Также считаются известными состояния системы $z_i^s(t)$ и $y_j^s(t)$ в моменты времени от $t=-T$ до $t=-1$.

Предположим, что в момент $t=0$ известна последовательность появления составов на различных станциях вплоть до момента $t=T-1$, т.е. предположим, что известна реализация $x(t)$ случайного вектора ξ_t . Это значит, что в момент $t=0$ известны номера всех составов, определяемые по формуле (1). Предположим, что масса i -го состава также известна и равна m_i , $i \in I$.

Рассмотрим динамику изменения положения j -го локомотива на s -й станции в момент времени $t+1$. Учтём, что j -й локомотив может появиться на s -й станции в момент времени $t+1$, если в момент времени $t+1-\tau^{ks}$ он отправился от станции с номером k до станции с номером s . В остальных случаях $y_j^s(t+1) = 0$. Таким образом:

$$y_j^s(t+1) = \sum_{k=1}^S u_j^{ks}(t+1-\tau^{ks}). \quad (5)$$

Рассмотрим динамику положения i -го состава на s -й станции в момент времени $t+1$:

$$z_i^s(t+1) = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq s}}^S \sum_{j=1}^J u_j^{ks}(t+1-\tau^{ks}) v_{ij}(t+1-\tau^{ks}) + \\ + z_i^s(t) \left(1 - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq s}}^S \sum_{j=1}^J u_j^{sk}(t) v_{ij}(t) \right) + \delta(s, n(i)) x_{(n(i)-1)S+I(i)}(t), \quad (6)$$

где $\delta(s, k(i)) = 1$, если $s = k(i)$, и $\delta(s, k(i)) = 0$, если $s \neq k(i)$. В уравнении (6) отражено, что i -й состав может появиться на s -й станции в трёх случаях. В первом случае i -й состав может прийти из k -й станции, если он отправился в момент времени $t+1-\tau^{ks}$ с помощью j -го локомотива, где τ^{ks} – время в пути от станции k до станции s . Второй случай соответствует ситуации, когда i -й состав в момент времени t находился на s -й станции и в момент времени $t+1$ там же остался. В противном случае второе слагаемое будет равно нулю, поскольку выражение, записанное в скобках, будет равно нулю в силу того, что i -й состав отправился на станцию с номером $k \neq s$ с помощью j -го локомотива. Третий случай соответствует ситуации, когда i -й состав появляется случайным образом на s -й станции. Третье слагаемое равно единице только в том случае, когда s -я станция является первой станцией с номером $n(i)$ маршрута i -го состава.

Запишем выражение для общего грузопотока к моменту времени $t+1$ с учётом штрафа за перегонку локомотивов без груза:

$$c(t+1) = c(t) + \sum_{i \in I} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^S \sum_{s=1}^S u_j^{ks}(t) r^{ks}(t) m_i v_{ij}(t) - \\ - \sum_{j=1}^J \gamma_j \sum_{k=1}^S \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq k}}^S u_j^{ks}(t) (1 - \sum_{i \in I} v_{ij}(t)), \quad (7)$$

где $r^{ks}(t)$ – длина пути локомотива, которую он пройдёт, начав движения в момент времени t от станции с номером k к моменту времени T , функция $r^{ks}(t) = \bar{r}^{ks} \min\{T-t, \tau^{ks}\}$, где \bar{r}^{ks} – длина пути, проходящего локомотивом от k -й станции до s -й станции в единицу времени, m_i – реализация случайной массы груза μ_i , перевозимого i -м составом, γ_j – штрафной коэффициент за перегонку j -го локомотива без груза. В уравнении (7) при фиксированном номере состава $i \in I$ только одно слагаемое в первой сумме равно единице, поскольку к локомотиву может быть приписан только один состав с единственным направлением движения. Данное слагаемое представляет собой произведение длины маршрута от k -й станции до s -й станции, умноженное на массу перевозимого груза. Вторая сумма соответствует штрафу за перегонку состава без груза. В ней j -е слагаемое будет равно γ_j , если j -й локомотив отправился от некоторой станции с номером k до станции с номером s и при этом к нему не прикреплен ни один состав.

Рассмотрим ограничения на управление.

Если j -й локомотив не может обслуживать некоторую станцию, то полагаем

$$u_j^{ks}(t) = 0, \text{ если } k \notin K_j \text{ или } k \notin \bar{K}_j, \quad (8)$$

где K_j – множество станций, которые может обслуживать j -й локомотив.

Поскольку в момент $t=0$ некоторые локомотивы могут быть задействованы для перевозок уже движущихся составов, то их нельзя использовать до окончания их движения. Пусть t_j – момент, после которого j -й локомотив можно использовать для перевозки составов. Причём $t_j = \tau^{ks} - \tau^k - 1$, если j -й локомотив в момент времени $t = \tau_j < 0$ начал двигаться от станции с номером k до станции с номером s , где τ^{ks} – время, которое этот локомотив будет задействован для перевозки состава. Если j -й локомотив не используется в момент времени $t=0$ для перевозки составов, то $t_j = -1$. Тогда

$$u_j^{ks}(t) = 0 \text{ для всех } k, s = \overline{1, S}, t = \overline{0, t_j}. \quad (9)$$

Будем считать, что для обслуживания состава не может быть назначено более одного локомотива, т.е. для каждого $i \in I$ не более, чем одна переменная v_{ij} , $j = \overline{1, J}$, равна единице:

$$\sum_{i \in I} v_{ij}(t) \leq 1. \quad (10)$$

Будем также полагать, что каждый локомотив не может обслуживать более одного состава, т.е. для каждого $j = \overline{1, J}$ не более, чем одна переменная v_{ij} , $j = \overline{1, J}$, равна единице:

$$\sum_{j=1}^J v_{ij}(t) \leq 1. \quad (11)$$

Будем считать, что направление движения локомотива может быть задано единственным способом, т.е. для каждого $j = \overline{1, J}$ не более, чем одна переменная u_j^{ks} , $k = \overline{1, S}$, $s = \overline{1, S}$ равна единице:

$$\sum_{k=1}^S \sum_{s=1}^S u_j^{ks}(t) \leq 1. \quad (12)$$

Также запрещено использовать локомотив до прибытия в конечный пункт маршрута, т.е. при $u_j^{ks}(t) = 1$, что соответствует ситуации, когда в момент времени t j -й локомотив назначен по направлению от k -й станции до s -й станции, выполнено $u_j^{s_1 s_2}(t + \tau) = 0$ для любых станций s_1, s_2 и $\tau = 1, \tau^{ks} - 1$, поэтому

$$u_j^{ks}(t) \sum_{\tau=1}^{\tau^{ks}-1} \sum_{s_1=1}^S \sum_{s_2=1}^S u_j^{s_1 s_2}(t + \tau) = 0. \quad (13)$$

Локомотив с номером j можно отправить с i -м составом от станции с номером s_1 до станции с номером s_2 только в том случае, когда локомотив находится на станции s_1 и станция s_1 предшествует станции s_2 в маршруте следования i -го состава, т.е. когда в следующем неравенстве правая часть равна единице:

$$u_j^{s_1 s_2}(t) v_{ij}(t) \leq z_i^{s_1}(t) \eta_i(s_1, s_2). \quad (14)$$

Локомотив с номером j может быть отправлен от станции k только в том случае, если он на ней находится:

$$u_j^{ks}(t) \leq y_j^k(t). \quad (15)$$

Следующее ограничение задаёт пропускную способность железнодорожного участка и соответствует количеству ниток по одному маршруту от станции k до станции s :

$$\sum_{j=1}^J u_j^{ks}(t) \leq a^{ks}(t), \quad (16)$$

$a^{ks}(t)$ – максимальное количество составов, которые можно отправить от станции k до станции s в момент времени t . Имеются ограничения на массу состава, перевозимого локомотивом:

$$v_{ij}(t) = 0, \text{ если } m_j^* < m_i. \quad (17)$$

Считается, что состав, находящийся на станции s , должен быть отправлен не позднее, чем через k временных промежутков после появления, т.е. не могут равняться единице более чем K переменных состояния системы $z_i^s(t)$ в различные моменты времени $t, \dots, t+K$:

$$z_i^s(t) z_i^s(t+1) z_i^s(t+2) \dots z_i^s(t+K) = 0, \quad (18)$$

Также считается, что локомотив не может находиться более L временных промежутков на станции s , если s не является станцией-депо ($s > D$), т.е. не более, чем L переменных состояния системы $y_j^s(t)$ в различные моменты времени $t, \dots, t+L$ равны единице:

$$y_j^s(t) y_j^s(t+1) y_j^s(t+2) \dots y_j^s(t+L) = 0, \quad s > D. \quad (19)$$

Обобщим условие (17) на случай случайной массы составов, т.е. потребуем, чтобы ограничение по массе состава выполнялось с заданной вероятностью, т.е.

$$v_{ij}(t) = 0, \text{ если } P\{m_j^* \leq \mu_i\} \geq 1 - \alpha, \quad j = \overline{1, J}, i \in I. \quad (20)$$

В качестве критерия качества управления выберем средний грузопоток с учётом штрафа за перегонку локомотивов без составов

$$\Phi_0(u, v) = M[c(T) | x(0), \dots, x(T)]. \quad (21)$$

Тогда согласно (7) получаем

$$\Phi_0(u, v) = \sum_{t=0}^T \left[\sum_{i \in I} \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^S \sum_{s=1}^S u_j^{ks}(t) r^{ks}(t) \bar{m}_i v_{ij}(t) - \sum_{j=1}^J \gamma_j \sum_{k=1}^S \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq k}}^S u_j^{ks}(t) (1 - \sum_{i \in I} v_{ij}(t)) \right], \quad (22)$$

где \bar{m}_i – средняя масса груза у i -го состава. Заметим, что по сути критерий (22) оценивает качество управления в момент времени $t=0$, т.к. управление в последующие моменты времени будут пересчитываться.

Таким образом, задача распределения локомотивов для перевозки составов состоит в максимизации критерия (22):

$$\Phi(u, v) \rightarrow \max_{u, v} \quad (23)$$

при выполнении ограничений (8)–(19), которые проверяются для динамической системы (5), (6). Здесь под u и v понимаются векторы, составленные из $u_j^{ks}(t)$ и $v_{ij}(t)$, $i \in I$, $j = 1, J$, $k = 1, S$, $s = 1, S$, $t = 0, T$.

Процедура принятия решений

Используем предложенную математическую модель распределения локомотивов по составам для формирования процедуры принятия решений для всех моментов времени $t=0, \dots, T$. С этой целью используем так называемую схему сценариев [2]. В этом случае процедура строится следующим образом.

1. Пусть решена задача (23) с начальным моментом $t=0$, тогда управление в момент $t=0$ будет выбрано. Пусть составы с назначенными локомотивами начинают двигаться и в момент $t=1$ занимают положение $z_i^s(1)$, $i \in I$, $s = 1, S$.
2. Пусть в момент $t=1$ появляются новые реализации $x(1), \dots, x(T)$ случайных векторов ξ_1, \dots, ξ_T , т.е. заново появляются составы. Будем теперь считать начальными векторами для системы (5), (6), (7) векторы $z_i(1)$, $y_j(1)$, $c(1)$, которые получаются после перехода от векторов состояния $z_i(0)$, $y_j(0)$, $c(0)$ в новое состояние с помощью найденного управления.

3. Решается задача (22) для нового начального состояния и новой реализации случайных векторов ξ_1, \dots, ξ_T . При этом интервал времени, для которого решается задача, составляет $[1, T+1]$. В результате этой процедуры находится управление в момент времени $t=1$.
4. Аналогичным образом находится управление на последующих шагах вплоть до момента времени $t=T$.

Заключение

В данной работе построена математическая модель оптимального назначения локомотивов для перевозок грузовых составов. Модель сформулирована как задача целочисленного стохастического программирования, для решения которой могут быть применены стандартные методы стохастического программирования [2].

Список литературы

1. Гапанович В.А., Епифанцев С.Н., Овсейчук В.А. Экономическая стратегия и электрофикация российских железных дорог / Под редакцией Г.П. Кутового – М.: Эко-Пресс, 2012.
2. Birge J., Louveaux F. Introduction to Stochastic Programming. New York: Springer-Verlag, 1997.

Машталер Ю.А., Матвиенко В.А., Алтунин В.П., ОАО «НИИАС», г. Москва
Такмазян А.К., ООО «Програмпарк», г. Москва
Захарова Е.М., МФТИ, г. Москва

Планирование и мониторинг содержания локомотивов на установленную сменно-суточную потребность

Вступление

В задачах оперативного планирования одной из наиболее важных задач является распределение и использование ресурсов в соответствии с заданной потребностью с учетом особенностей конкретной области применения. Основной целью создания данной системы является повышение экономической эффективности деятельности ОАО «РЖД» за счет автоматизации планирования и управления локомотивными парками путем повышения качества, достоверности и систематизации информации для принятия решений. В рамках данной области решением задач управления тяговым хозяйством осуществляет комплекс подсистем, занимающихся задачей обеспечения перевозочного процесса требуемым количеством тягового подвижного состава (ТПС), их эффективной работой, оптимизацией планирования содержания локомотивов на установленную потребность, а также мониторинга содержания и показателей их использования.

В данной работе рассматривается одна из комплексов подсистем, предназначенная для решения задачи сменно-суточного планирования содержания локомотивов на установленную потребность. Объектом автоматизации являются производственные процессы сменно-суточного планирования по управлению процессами содержания локомотивов на примере эксплуатационных локомотивных депо Восточного полигона.

Постановка задачи

Формальная постановка задачи выглядит следующим образом: необходимо сравнить ожидаемое на плановые сутки количество содержания ТПС в эксплуатируемом парке с установленным по норме количеством по всем депо приписки и суммарно на всем тяговом полигоне отдельно для каждого вида тяги. Если ожидаемое количество ТПС не соответствует норме сменно-суточного содержания суммарно по всему тяговому полигону, алгоритм начинает работу по управлению данной ситуацией за счет перевода ТПС из технологического резерва в одно из состояний эксплуатируемого парка и наоборот.

Мультиагентные системы

Данная задача реализуемости потока запросов при ограниченных ресурсах характеризуется наличием трудностей, связанных с анализом и прогнозированием динамических характеристик данной системы.

Наиболее эффективный метод решения в таком случае обеспечивается методами имитационного моделирования. При этом использование мультиагентных систем как одного из инструментов данного подхода позволяет реализовать гибкие механизмы динамического поведения, автономности и адаптации отдельных компонентов имитационной модели.

Основной особенностью использования мультиагентных систем является то, что каждый логический объект сопоставляется с соответствующим ему программным агентом, который в свою очередь представляет интересы данного объекта. Каждый агент стремится достигнуть определенной цели, используя при этом заложенные в него стратегии их достижения, при этом не противореча основным ограничениям всей системы.

Данная подсистема содержит в себе несколько типов агентов, обеспечивающих достижение решения поставленной задачи сменно-суточного содержания локомотивов на установленную потребность. Агент верхнего уровня служит интерфейсом между «пользователем» (которым, зачастую, является другой агент) и рабочей средой, состоящей из множества агентов нижнего уровня, взаимодействующих между собой для поиска решения задачи. Кроме того, главный агент координирует работу агентов нижнего уровня, а также служит для них хранилищем общих данных. Агенты регионов предназначены для основных расчетных действий алгоритма: прогнозирование состояния эксплуатируемого парка на начало и в течение суток планирования, решение проблем нехватки или избытка локомотивного парка по всему тяговому полигону и отдельным депо. Агенты путей и агенты станций предназначены для расчета оптимального маршрута и соответствующего ему кратчайшего времени движения между двумя определенными станциями.

Алгоритм решения

Первым этапом решения поставленной задачи является проверка соответствия эксплуатируемого парка ТПС суточной норме суммарно по тяговому полигону по видам тяги. Для этого данная подсистема получает на вход следующие данные:

- Пономерной график проведения планового технического обслуживания ТПС с детализацией по депо ремонта, видам ремонта на тяговом полигоне.

- Пономерной список ТПС с информацией о состоянии в эксплуатируемом парке на текущий момент по депо приписки.
- Норма содержания ТПС в эксплуатируемом парке на планируемый период (сутки) суммарно по тяговому полигону.

Далее производится расчет наличия ТПС в эксплуатируемом парке на текущий момент. Для этого формируется перечень ТПС, содержащихся в эксплуатируемом парке на текущий момент, из которого исключаются ТПС, которые переведутся в неэксплуатируемый парк с начала планирования до 18-00 (начала рабочих суток) и добавляются ТПС, которые вернутся в эксплуатируемый парк из ремонта. Полученный результат характеризует фактическое наличие ТПС на начало планируемых суток.

Расчет прогнозируемого количества ТПС на планируемые сутки осуществляется аналогичным образом, но при этом результат формируется в локомотиво-сутках.

Вторым этапом алгоритма является сравнение полученного прогнозируемого количества ТПС в локомотиво-сутках с установленной нормой содержания ТПС по данному тяговому полигону и решение проблем их соответствия – дефицита или профицита наличия ТПС.

В случае дефицита необходимо принять меры для восполнения недостающего количества локомотиво-суток содержания ТПС в эксплуатируемом парке за счет возможного перевода ТПС из технологического резерва, то есть из неэксплуатируемого парка. При этом восполнение производится в первую очередь по депо с большей нехваткой. Для этого сначала рассчитывается прогнозируемое количество локомотиво-часов для каждого депо приписки данного региона и также сравнивается с нормами содержания. При этом возможны ситуации профицита отдельных депо при общем дефиците на полигоне. Далее формируется список ТПС, находящихся в настоящий момент в технологическом резерве и по которым не принято решение о переводе в эксплуатируемый парк, согласно графику проведения технологического резерва ТПС. Поэтому необходимо рассчитать целесообразность вывода того или иного ТПС из свободного технологического резерва с тем, чтобы выведенные ТПС максимально восполнили бы дефицит локомотиво-суток содержания локомотивов в эксплуатируемом парке суммарно по тяговому полигону, минимизируя дефицит по каждому депо приписки в отдельности.

При этом нужно учесть, что отдельные депо могут остаться с дефицитом или профицитом потому, что дефицит может быть перекрыт ближайшими депо с профицитом, например, в случае если депо дислокации

ТПС в технологическом резерве находится дальше, а депо с профицитом – ближе от депо с дефицитом. Кроме этого нужно учесть, что в некоторых случаях для перевода ТПС в эксплуатируемый парк из технологического резерва может потребоваться время на проведение ремонта и дополнительное обслуживание после проведения ремонта.

Для проведения вышеуказанных расчетов система получает дополнительную информацию о минимально возможных временах перехода ТПС в эксплуатируемый парк из свободного технологического резерва. Далее производится расчет прогнозного количества локомотиво-суток нахождения этих ТПС в эксплуатируемом парке. Полученные данные предназначены для качественной оценки целесообразности вывода того или иного ТПС из свободного технологического резерва. После установления конкретных ТПС, дат и времени их вывода из технологического резерва информация об этом передается в модуль управления ремонтами, который заполняет план перевода ТПС в пономерном графике проведения технологического обслуживания.

В случае профицита алгоритм совершает аналогичные расчеты со следующими особенностями. Во-первых, для сокращения избытка ТПС осуществляется их перевод в технологический резерв при условии, что эти ТПС простояли более 3-х суток в оперативном резерве. Это необходимо для того, чтобы выведенные ТПС максимально сократили бы излишнее количество локомотиво-суток содержания локомотивов в эксплуатируемом парке суммарно по тяговому полигону, минимизируя профицит по каждому депо приписки в отдельности. Кроме этого, в первую очередь выбираются ТПС с наименьшим линейным пробегом от последнего ремонта. Также должно быть учтено, что для перевода в технологический резерв ТПС должен следовать от текущего местоположения до депо приписки (или ближайший к депо приписки пункт оборота - если после выхода из резерва потребуются только ТО), так как в течение этого времени данный ТПС относится к содержанию в эксплуатируемом парке.

Расчет для локомотивов, находящихся на чужом регионе (ДРЛ)

При решении задачи сменно-суточного содержания локомотивов на установленную потребность нужно отдельно учитывать время работы ТПС, находящихся на регионе, отличном от его участка работы. Данная подзадача аппроксимируется задачей поиска наикратчайшего пути между двумя станциями – станцией нахождения локомотива и ближайшей станцией региона работы локомотива. Для найденного пути рассчитывается время работы локомотива в локомотиво-сутках на данном регионе. Данное решение использу-

ется для дальнейшего прогнозирования содержания ТПС в эксплуатируемом парке по регионам. Таким же образом рассчитываются времена работы локомотивов в процессе возвращения на свой регион работы с других участков.

Данная задача решается на основе мультиагентного алгоритма Дейкстры-Схолтен [1] (в данном случае, в варианте Чанди-Мисра, описанном в [2]).

Задача поиска кратчайшего пути между станциями ставится следующим образом. Дана сеть из N станций железной дороги. Станции соединены между собой путями, так что из любой можно каким-либо маршрутом попасть в любую, проезжая через промежуточные станции. Таких соединительных путей всего M , считая пути от станции A до станции B , и от станции B до A – разными. Маршрутом называется последовательность станций, упорядоченная по мере прохождения по ним поезда. Заданы нормативные времена хода поезда (локомотива) от любой станции до соседней с ней. Время хода в обратную сторону, вообще говоря, различается. Требуется найти маршрут, за кратчайшее время соединяющий две наперед заданные станции.

С формальной точки зрения железнодорожная сеть представляется в виде взвешенного двунаправленного графа. Каждая станция описывается одним узлом графа (таким образом, граф состоит из N узлов и M ребер). Пути от станции до станции (с учетом направления) представляют собой ребра графа. Нормативные времена хода по пути между соседними станциями представляют собой веса ребер графа. Весом маршрута называется суммарный вес всех ребер соединяющих входящие в него соседние станции. Задача состоит в определении маршрута наименьшего веса между двумя заданными станциями.

Входными данными для данного этапа решения служит взвешенный граф с ребрами, соединяющими узлы в обоих направлениях. Вес каждого ребра (или «расстояние») соответствует нормативной длительности хода поезда от одной станции до другой. При старте все данные загружаются в главный агент-интерфейс. После этого он создает вспомогательные агенты-станции и инициализирует их начальные данные. Эти данные для каждой станции состоят из имени станции, имени главного агента (для связи с ним, на данном этапе главным агентом для станции считается агент пути), уникального идентификатора станции, нормативного времени хода до всех ее соседей, а также их идентификаторы.

Назовем вес каждого направленного ребра – «расстоянием» между узлами или «длиной» (с учетом направления). Метод заключается в асинхронной рассылке узлами графа, которыми, в данном случае, являются агенты станций, своим соседям информации

о расстоянии от исходного узла. Назовем агента автора сообщения о длине – предком, а получателя – потомком. При этом для разных сообщений каждый агент может выступать в обеих ролях. Агент обменивается с другими агентами сообщениями двух видов:

- сообщение $length(L)$, которое означает, что, по сведению агента-предка, длина пути от начальной точки до агента-потомка равна L ;
- сообщение ask , которое означает, что агент-потомок обработал полученное ранее сообщение о длине и сообщает об этом агенту-предку.

Для каждого агента при передаче сообщения о длине потомками являются все его соседи, кроме предка.

Каждый агент станции имеет две переменные, управляющие процессом поиска: длина пути, $length$, от начальной станции до текущей, и количество, num , сообщений о длине пути, разосланных потомкам, на которые не получен ответ.

Рассмотрим шаги алгоритма подробнее:

1. Начальное значение расстояния от начала маршрута для всех узлов графа равно бесконечности: $length = \infty$. Начальное значение разосланных сообщений без ответа $num=0$.
2. Главный агент получает запрос на поиск пути от станции A до некоторой другой станции B и посылает агенту A сообщение о длине пути от A до A : $length(0)$. Поиск заканчивается, когда главный агент получает от агента A сообщение ack .
3. Каждый агент, который хранит у себя конечное значение о длине пути, хранит также и имя агента-соседа, от которого он его получил. Этот сосед называется «предком».
4. Каждый узел, который получил сообщение $length$ от соседа, сравнивает полученное значение с хранящимся в своей ячейке.
 - 4.1 Если полученное значение меньше, чем хранимое, то:
 - посылает ранее запомненному «предку» (если он есть) сообщение « ack », об окончании обработки предыдущего значения длины пути;
 - записывает себе новое значение и запоминает соседа, от которого пришло данное сообщение, как «предка»;
 - рассылает всем остальным соседям сообщение о длине пути от начала до них, используя информацию о расстоянии до них;
 - увеличивает свою переменную num на то количество сообщений, которое он разослал.
 - 4.2 Если полученное значение $length$ больше хранимого, то агенту отправителю посылается сообщение « ack ».
5. Каждый узел, который получил сообщение « ack », уменьшает свое значение num на единицу. Если по-

сле этого оказывается, что $\text{num}=0$, то узел посылает сообщение «ask» своему «предку».

Данный алгоритм является мультиагентным вариантом алгоритма Дейкстры поиска кратчайшего пути на взвешенном графе. Поскольку алгоритм Дейкстры является «жадным» (монотонно меняется значение целевой функции длины пути для агентов), то его сходимость обеспечивается неотрицательностью длин ребер графа. Дейкстрой и Схолтен [1] было показано, что рассылка сообщений типа *ask* гарантирует передачу информации о завершении алгоритма управляющему агенту.

Итак, при выполнении алгоритма, гарантируется определение маршрута локомотива от станции дислокации в депо приписки. После чего, зная принадлежности станций соответствующим регионам управления, легко вычислить время нахождения локомотива (при условии, что он непрерывно в пути) на каждом проходимом им регионе.

Выводы

Данная работа посвящена разработке системы, решающей задачу сменно-суточного планирования содержания локомотивов на установленную потребность. Для обеспечения гибких механизмов динамического поведения, автономности и адаптации отдельных компонентов имитационной модели было предложено использование мультиагентного подхода. Мультиагентные методы эффективно используются при решении задач оптимального планирования для повышения быстродействия при распределенном

подходе за счет редукции большой централизованной задачи к множеству более мелких задач пониженной сложности и уменьшения вычислительной трудоемкости каждой из них путем замены глобальной целевой функции – локальными. Мультиагентные системы дают возможность составлять более реалистичные прогнозы за счет учета стратегий поведения и предпочтений каждого объекта в отдельности наилучшим образом, соответствующего всем поставленным условиям и ограничениям.

В работе разработан алгоритм для мультиагентной системы управления в железнодорожном комплексе, решающей задачу сменно-суточного планирования локомотивов на установленную потребность. Предложен алгоритм для осуществления планирования и управления процессами содержания ТПС на установленную потребность, а также мониторинга содержания локомотивов и показателей их использования, его реализация на языке *Jason*, а также приведены результаты работы этого алгоритма на практике на примере Восточного полигона.

Литература

1. E. W. Dijkstra and C. S. Scholten "Termination detection for diffusing computations" // *Information Processing Letters* 11, 1: 1–4, 1980.
2. K. M. Chandy and J. Misra "Distributed Computation on Graphs: Shortest Path Algorithms" // *Communications of the ACM*, November 1982, Volume 25, #11.

Феофилов А.Н., ОАО «НИИАС», г. Москва

Концепция интеллектуальной системы оперативного управления парком грузовых вагонов

В условиях развития рыночных отношений требуются такие методы управления, которые позволят управлять грузовыми перевозками не только по техническим нормам, но и по экономическим нормативам. В этой связи для описания функционирования железнодорожного транспорта была предложена новая экономическая модель управления грузовыми перевозками, полученная на основе методов оптимизации использования самого массового ресурса железнодорожного транспорта – вагонов грузового парка [1].

Соответственно для реализации указанной экономической модели оперативного управления необходимо разработать интеллектуальную систему управления парком грузовых вагонов, позволяющую повысить эффективность работы каждого диспетчера и смены в целом.

В настоящее время в ОАО «НИИАС» ведется разработка «Единой интеллектуальной системы управления и автоматизации производственных процессов на железнодорожном транспорте (ИСУЖТ)». Кроме того ОАО «НИИАС» провел две научно-технические конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» ИСУЖТ-2012 и ИСУЖТ-2013. Однако до сих пор в железнодорожной литературе не сформулировано определение интеллектуальной системы управления на железнодорожном транспорте. Конечно, на это есть свои причины.

На первом этапе развития кибернетики в популярной печати горячо обсуждался вопрос: может ли машина мыслить? Но ответа тогда найдено не было. Оказалось, что для ответа требуется, по крайней мере, знать, что такое мышление [2]. С тех пор прошло более 50 лет, в течение которых была разработана шахматная программа, способная обыгрывать гроссмейстеров, но до сих пор дать содержательное определение понятию мышления никому не удалось, хотя оно интуитивно известно каждому [3].

Поэтому с практической точки зрения весьма перспективными представляются исследования в области создания искусственного интеллекта, в которой проблема изучения моделирования мышления позиционирует от общих постановок к частным прикладным направлениям искусственного интеллекта (игра в шахматы, распознавание образов, моделирование поведения биологических и искусственных систем, принятие решений в системах управления и другие), по которым в дальнейшем, возможно, могут быть найдены конкретные решения.

Опираясь на исследования в области искусственного интеллекта, сформулируем технические требования к интеллектуальной системе управления парком грузовых вагонов (ИСУПВ). Для этого необходимо определить её основные отличия от ранее разработанной с участием автора системы управления вагонным парком ДИСПАРК.

Существующие в настоящее время информационные технологии, входящие в ДИСПАРК, предназначены в основном для обеспечения информационной поддержки принятия решений причастными работниками на всех уровнях управляющей вертикали ОАО «РЖД» на основе оперативной обработки баз данных о вагонном парке, представляющими собой сетевую, дорожные и вагонные модели линейного уровня.

Интеллектуальная система управления парком вагонов должна в дополнении к перечисленным иметь ещё качественно новые «интеллектуальные» свойства:

- 1) способность к целенаправленному поведению в любых производственных ситуациях;
- 2) способность к адаптации при изменении условий окружающей среды;
- 3) способность к обучению и формированию баз знаний о взаимодействии окружающей среды и ИСУПВ;
- 4) способность к применению полученных знаний для принятия решения и организации его исполнения в изменяющихся условиях окружающей среды.

Определим окружающую среду как дискретную ситуационную сеть пользователей, формирующую спрос на транспортные услуги. В зависимости от состояния окружающей среды и состояния ИСУПВ возникают различные производственные ситуации, требующие выполнения определенных действий ИСУПВ.

Под базой знаний ИСУПВ будем понимать семантическую модель управления парком вагонов, отражающую различные варианты технологий управления эксплуатационной работой в нормативных условиях и целенаправленные стратегии управления вагонными парками в нестандартных условиях.

Первые два требования к ИСУПВ представляют собой принцип рационального управления, который также использован и в системе ДИСПАРК. Отличие в том, что в ДИСПАРК рациональное управление реализуется оперативным персоналом, а в ИСУПВ этот принцип реализуется самой интеллектуальной программой управления. То есть интеллектуальная систе-

ма управления парком вагонов должна включать как традиционную модель управления на основе обработки баз данных о работе вагонного парка, так и принципиально новые модели принятия решений на основе использования баз знаний ИСУПВ.

Определим ИСУПВ как модель целенаправленного управления парком вагонов в любой производственной ситуации, которая может адекватно приспосабливаться к изменяющимся условиям окружающей среды на основе способности к обучению и формированию баз знаний по управлению парком вагонов.

Согласно модели ситуационного поведения профессора Д.А. Поспелова возможны два вида поведения системы в процессе управления – это нормативное и ситуационное поведение. Нормативное поведение системы определяется заданным набором нормативных предписаний, выполняемых в нормативных условиях работы. При нарушении нормативных правил система переходит к ситуационному поведению, которое характеризуется поставленными целями и определением плана их достижения [4].

Указанные нормативные предписания являются правилами постановки, которые представляют собой утверждения типа: «Если имеет место определенная производственная ситуация, то необходимо выполнить заданное действие». Эти постановки могут быть либо рациональными, имеющими осознанные цели, либо интуитивными – с неосознанными целями. Набор таких правил образует базу знаний ИСУПВ. Если решения значительной части производственных ситуаций будут описаны в виде правил постановки, то исходная производственная задача превращается в алгоритмическую задачу поиска решения, то есть будет решена [3].

Система ИСУПВ может работать в нормативном режиме, либо в режиме ситуационного управления (см. рис. 1). При нормативной работе система должна самостоятельно справляться с текущими проблемами, а диспетчер должен только контролировать её работу. В случае возникновения нестандартной ситуации, требующей вмешательства диспетчера, система переходит на режим ситуационного управления, выполняет анализ ситуации, производит поиск плана работы в соответствии с поставленными целями и затем выводит эту информацию диспетчеру. Диспетчер может либо принять этот план к исполнению, либо задать свой вариант плана и выполнить его. В случае удачного решения проблемы, система запоминает указанную производственную ситуацию и выполненное действие в виде нового правила постановки и записывает его в базе знаний ИСУПВ.

В начале эксплуатации ИСУПВ база знаний будет пустой, затем в процессе решения проблем диспет-

чером в режиме ситуационного управления система будет накапливать новые правила постановки и, в перспективе, диспетчер будет только контролировать работу системы в нормативном режиме. Таким образом, реализуется способность ИСУПВ к обучению и формированию баз знаний и способность к применению полученных знаний для принятия решения и организации его исполнения.

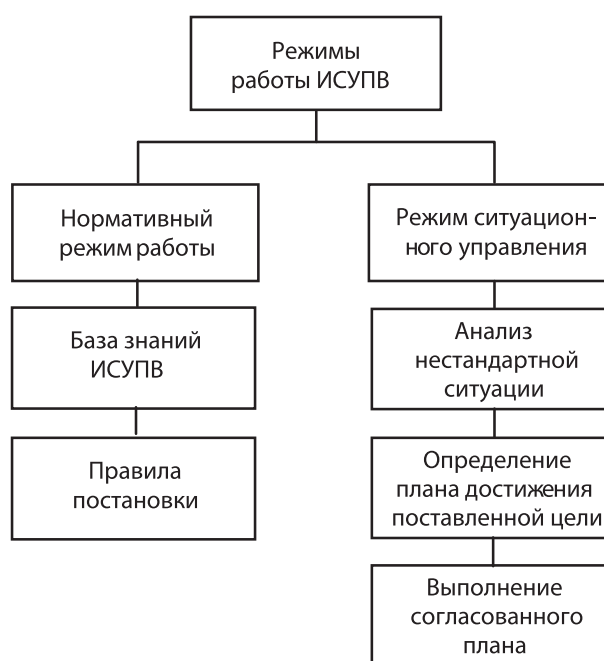


Рис. 1. Режимы работы ИСУПВ

Кроме интеллектуальных свойств ИСУПВ для реализации экономической модели управления должна обладать следующими аналитическими свойствами:

- 1) возможность выдавать пользователю не только оптимальный оперативный план работы, рассчитанный по определенному критерию эффективности, но и его стоимостную оценку в рублях, т.е. расчётные значения полученных доходов, эксплуатационных расходов и прибыли от перевозок;
- 2) пользователь может либо принять этот план к исполнению, либо задать свой вариант плана, но при этом система также рассчитает его стоимостную оценку;
- 3) по окончании смены система должна оценить фактические результаты работы по эксплуатационным и стоимостным показателям, а также оценить работу самого пользователя, например, по 4-х бальной шкале: неудовлетворительно; удовлетворительно; хорошо; отлично [5].

Для обеспечения выполнения заданных целей ИСУПВ должна содержать следующие функциональные подсистемы:

- почасового учёта использования вагонов рабочего парка;
- планирования грузовых перевозок;
- регулирования эксплуатационной работы;
- анализа эксплуатационной работы.

По составу подсистема ИСУПВ представляет собой модернизированный вариант существующей системы управления вагонным парком ДИСПАРК с расширенным составом функций. Перечисленные подсистемы ИСУПВ должны быть объединены с соответствующими подсистемами ДИСПАРК. Например, подсистема почасового учёта использования вагонов рабочего парка ИСУПВ должна не заменить, а дополнить существующую подсистему пономерного учёта вагонов ДИСПАРК.

Подсистема почасового учёта использования вагонов рабочего парка осуществляет учёт затраченных вагоно-часов рабочего парка и рассчитывает основные эксплуатационные (рабочий парк, оборот вагонов) и экономические (эксплуатационные расходы) показатели по затраченным вагоно-часам.

Подсистема планирования грузовых перевозок обеспечивает расчет оптимального плана перевозок на следующие сутки по выбранному критерию с определением его стоимостной оценки.

Подсистема регулирования эксплуатационной работы обеспечивает выполнение плана перевозок по критерию минимизации эксплуатационных расходов или минимизации затраченных вагоно-часов рабочего парка.

Подсистема анализа эксплуатационной работы по концу отчетных суток или по запросу в любой момент времени должна дать объективную оценку полученных результатов по натуральным и экономическим показателям.

Покажем на примере Центральной дирекции управления движением (ЦД) ОАО «РЖД», как практически должна функционировать указанная ИСУПВ.

На всех уровнях управления ЦД у всех лиц, принимающих решения (пользователей), имеются специализированные АРМы, объединенные в единую интеллектуальную систему управления.

Указанный АРМ постоянно в режиме реального времени осуществляет мониторинг соответствующего объекта управления, определяемого совокупностью

эксплуатационных показателей (погрузка, выгрузка, рабочий парк, сдача вагонов), характеризующих данный бизнес-процесс, прогнозирует его функционирование до конца суток и определяет возможные затруднения в работе в предстоящий период.

По определенному регламенту или при необходимости вмешательства в бизнес-процесс, АРМ выводит на экран для пользователя сообщение с анализом текущей ситуации, описанием выявленных затруднений и дает список возможных управляющих решений в данной ситуации с оценкой конечных результатов, как по технологическим, так и по экономическим показателям. Пользователь может либо выбрать любое из рекомендованных решений, либо предложить свой вариант. В этом случае АРМ рассчитывает оценку конечного результата и отправит полученное решение на исполнение.

В конце смены ИСУПВ даст экономическую оценку работы каждого пользователя и смены в целом. Таким образом, ЦД будет управлять грузовыми перевозками по экономическим критериям, а подсистема учета и анализа работы будет определять объективную оценку полученных результатов по технологическим и экономическим показателям.

Литература

1. Феофилов А.Н. О бизнес-модели управления грузовыми перевозками // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 9. – С. 16-19.
2. Шамис А.Л. Поведение, восприятие, мышление: проблемы создания искусственного интеллекта. – М.: Едиториал УРСС, 2005. – 224 с.
3. Уитби Б. Искусственный интеллект: реальна ли Матрица – М.: ФА-ИР-ПРЕСС, 2004. – 224 с.
4. Газе-Рапопорт М.Г., Поспелов Д.А. От амебы до робота: модели поведения. – Издание 2-е. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 296 с.
5. Феофилов А.Н. Универсальные критерии эффективности для интеллектуальной системы управления грузовыми перевозками / «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» (ИСУЖТ-2013): Труды второй научно-технической конференции, 21-22 октября 2013 г. – М.: ОАО «НИИАС», 2013. – С. 69-73.

Залуцкий М.И., ОАО «НИИАС», г. Москва

Совершенствование алгоритмов расчета перерабатывающей способности станций и железнодорожных путей необщего пользования в автоматизированных системах

В настоящее время для организации стабильной работы станции примыкания и железнодорожных путей необщего пользования требуется определение результирующей перерабатывающей способности.

При оценке инфраструктур общего и необщего пользования на возможность пропуска и переработки вагонопотока ключевым фактором является определение результирующей пропускной и перерабатывающей способностей станции примыкания и железнодорожных путей необщего пользования. Это обусловлено взаимодействием указанных технологических объектов друг с другом. Расчет без учета взаимодействия не показывает полную картину, а только узкие места в работе отдельного технологического объекта.

Предлагаемый подход к определению результирующей перерабатывающей способности станции состоит в построении ориентированного графа станции примыкания и железнодорожного пути необщего пользования, ребрами которого являются технологические элементы, а узлами их границы. Каждому элементу присваивается значение вагонопотока, следующего по элементу, и коэффициент загрузки технических устройств.

Объединенный граф представляет собой все возможные пути следования вагонопотоков по станции примыкания и железнодорожным путям необщего пользования. Начальными и конечными вершинами графа являются перегоны, прилегающие к станции примыкания. Из объединенного графа можно вырезать подграфы, используемые в дальнейшем для рассмотрения конкретной категории вагонопотока с индивидуальными характеристиками.

Особенностью предлагаемого подхода к определению результирующей перерабатывающей способности станции примыкания и путей необщего пользования является возможность установления ограничивающего элемента для отдельных категорий вагонопотоков на протяжении всего следования по станции примыкания и железнодорожным путям необщего пользования.

Преимущество в использовании связанного ориентированного графа для представления технологии работы станции примыкания и железнодорожного пути необщего пользования состоит в комплексном подходе, учитывающем технологию работы всех технологических элементов.

Построение графа, отображающего все возможные варианты следования вагонопотоков по станции примыкания и железнодорожным путям необщего пользования, позволяет учесть в расчетах вагонопотоки с различными базовыми характеристиками и технологию работы с ними, а также установить какое влияние они оказывают на перерабатывающую способность.

Алгоритм расчета состоит в определении для каждой струи вагонопотока технологического элемента с максимальным значением коэффициента использования пропускной или перерабатывающей способности. Указанный элемент будет ограничивающим. На основании информации о размерах вагонопотоков, следующих по ограничивающему устройству, и их характеристиках осуществляется расчет максимально допустимого потока, который можно адресовать на соответствующий железнодорожный путь необщего пользования.

На данный момент интегрированная оценка позволяет определить результирующую пропускную и перерабатывающую способности станции примыкания и каждого железнодорожного пути необщего пользования, участвующего в расчете, с учетом процента маршрутизации перевозок. Важность определения данного параметра подтверждается изменением возможностей инфраструктуры общего и необщего пользования по переработке вагонопотока в зависимости от его маршрутизации.

Преимуществом предлагаемого подхода является возможность его интегрирования с полигонными автоматизированными системами управления вагоно- и поездопотоками. Таким образом, используя данный алгоритм, представляется возможным прогнозировать путь следования вагонопотоков непосредственно с мест погрузки до мест выгрузки вплоть до грузовых фронтов, с учетом возможностей инфраструктуры не только общего, но и необщего пользования.

Расчет пропускной и перерабатывающей способностей станции примыкания и путей необщего пользования должен производиться с учетом уровня маршрутизации и доли обезличенного парка вагонов. Потому как результирующая перерабатывающая способность железнодорожных путей необщего пользования и станции примыкания при одном и том же путевом развитии и техническом оснащении может

изменяться в зависимости от неоднородности вагонопотоков, следующих в адрес путей необщего пользования, и количества вагонов, управляемых разными операторами подвижного состава.

Перерабатывающая способность комплекса железнодорожных путей необщего пользования и станции примыкания состоит из:

- расчета максимальной перерабатывающей способности каждого железнодорожного пути необщего пользования;
- расчета максимальной пропускной и перерабатывающей способности станции примыкания;
- определения результирующей перерабатывающей способности комплекса железнодорожных путей необщего пользования и станции примыкания.

Технология работы с поездами различных категорий влияет на величину перерабатывающей способности, как отдельных устройств, так и станции в целом. В зависимости от того, какой объем работы необходимо выполнить с вагонами, прибывающими в адрес путей необщего пользования, будет увеличиваться или уменьшаться нагрузка соответствующих технических устройств.

На первом этапе определяется перерабатывающая способность отдельных технических устройств для железнодорожных путей необщего пользования и железнодорожных станций примыкания (перегоны, парки, горловины, вытяжные пути и т.д.)

Для определения результирующей перерабатывающей способности следует составить схему графа, ребрами которого являются элементы станции и пути необщего пользования. Далее на них наносятся пропускная и перерабатывающая способности, рассчитанные в соответствии с Инструкцией по расчету наличной пропускной способности железных дорог.

Рассмотрим пример расчета перерабатывающей способности для входящего потока. Схема графа приведена на рисунке 1.

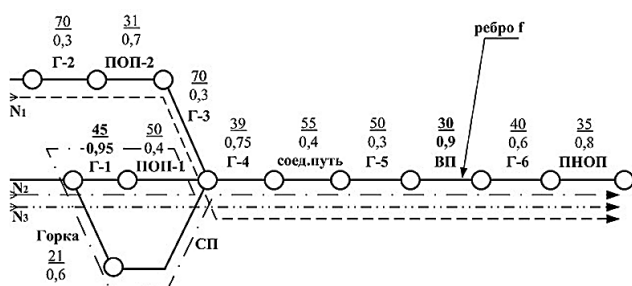


Рис.1. Пример схемы графа элементов станции примыкания и пути необщего пользования

Условные обозначения:

N_1, N_2, N_3 – вагонопотоки в адрес путей необщего пользования;

Г – горловина;

ПОП – приемо-отправочный парк;

СП – сортировочный парк;

ВП – выставочные пути;

ПНОП – путь необщего пользования;

50 – наличная перерабатывающая способность, составов/сут;

0,4 – коэффициент использования элемента.

Результирующая перерабатывающая способность станции примыкания и путей необщего пользования задается в виде пары значений либо в виде зависимости (нескольких пар значений):

$$\{ N_{вх}; Y_{м.приб} \},$$

Где $N_{вх}$ – результирующая мощность станции по входящему вагонопотоку на пути необщего пользования, вагонов/сут;

$Y_{м.приб}$ – уровень маршрутизации, при котором рассчитана $N_{вх}$:

$$Y_{м.приб} = N_{приб.м} / (N_{приб.м} + N_{приб.нм}),$$

где $N_{приб.м}$ – маршрутизированный вагонопоток;

$N_{приб.нм}$ – немаршрутизированный вагонопоток.

Величина $N_{вх}$ рассчитывается следующим порядком. Вводится ориентированный граф, ребрами которого являются элементы станции, по которым рассчитывается пропускная и перерабатывающая способность. На каждом ребре графа f заданы:

$n_{нал.f}$ – наличная пропускная (перерабатывающая) способность элемента станции f , составов/сут;

γ_f – технически допустимый уровень использования пропускной способности элемента станции f (с учетом величины парка маневровых локомотивов, доступного для привлечения к работе на станции);

Наличная пропускная способность для вагонопотока (вагонов/сут) по элементу станции f определяется:

$$N_f = n_{нал.f} m_f$$

где m_f – количество вагонов в составе.

На каждом подходе к станции примыкания заданы:

$N_{вх.м}, N_{вх.нм}$ – маршрутизированный (немаршрутизированный) вагонопоток на пути необщего пользования, вагонов/сут, поступающий на станцию с данного подхода.

На графе элементов станции определяется дерево D путей следования маршрутизированного (немаршрутизированного) вагонопотока на пути необщего пользования с каждого подхода к станции.

Далее рассмотрим порядок расчета для маршрутизированного (немаршрутизированного) вагонопотока:

На пути от подхода к пути необщего пользования выбирается ребро f с максимальным коэффициентом использования наличной пропускной способности. В соответствии с примером, для вагонопотока N_1 прибывающего с подхода А элемент ВП является ограничи-

вающим. Далее необходимо найти соотношение струй вагонопотоков, проходящих по данному элементу, и определить величину пропускной (перерабатывающей) способности для данной струи:

$$N_{\text{вх},j} = N_f N_j / \sum N_f,$$

где $N_{\text{вх},j}$ – результирующая мощность по j -ому входящему вагонопотоку на пути необщего пользования, вагонов/сут;

N_j – величина j -ого входящего вагонопотока, вагонов/сут;

$\sum N_f$ – суммарная величина входящего вагонопотока, проходящего по ребру f .

Соответственно перерабатывающая способность для вагонопотока N_1 будет равна:

$$N_{\text{вх},1} = 30m_{f1}N_1/(N_1+N_2+N_3).$$

Аналогичный расчет производится для остальных потоков, входящих на станцию.

Суммарная результирующая мощность станции примыкания, доступная для входящего вагонопотока на пути необщего пользования:

$$N_{\text{вх}} = \sum N_{\text{вх},j};$$

$$N_{\text{вх}} = 30m_{f1}N_1/(N_1+N_2+N_3) + 45m_{f2}N_2/(N_2+N_3) + 45m_{f3}N_3/(N_2+N_3).$$

Аналогичный расчет выполняется для выходящего потока с путей необщего пользования, результаты которого зависят от доли обезличенного парка вагонов.

При выполнении расчетов для входящего и выходящего вагонопотока, перерабатывающая способность всего комплекса станция примыкания – пути необщего пользования определяется, как минимальное из двух расчетных значений:

$$N_{\text{пер.итог}} = \min\{N_{\text{вх}}; N_{\text{вых}}\}.$$

Дальнейшее развитие алгоритмов определения результирующей перерабатывающей способности предполагает исследование влияния ряда базовых характеристик вагонопотоков: род груза, количество групп в составе и длина прибывающего поезда.

Рубцов Д.В., Галкин А.О., ОАО «НИИАС», г. Москва

Автоматизированная подготовка предложений по организации вагонопотоков на железнодорожном полигоне на основе исполненных вагонопотоков и ограничений инфраструктуры

Изменения плана формирования грузовых поездов регулярно осуществляются на региональном и центральном уровне Дирекций управления движением для оперативного ускорения продвижения вагонопотоков, обеспечения выполнения сроков доставки грузов, а также решения ряда других технологических задач. В условиях ограниченности производственно-экономических ресурсов одним из основных вариантов решения задачи освоения объемов перевозок является корректировка технологии организации вагонопотоков без наращивания производственных мощностей.

Существующие системы организации вагонопотоков должны обеспечивать автоматизированную поддержку принятия решений о внесении изменений в план формирования грузовых поездов.

Программный комплекс Автоматизированная система организации вагонопотоков (АСОВ), разработки ОАО «НИИАС», на данный момент является основным перспективным проектом в сфере задач

ведения, расчета и анализа плана формирования поездов. Основной инструментальной текущей очереди развития частично решает задачу автоматизации внесения изменений в план формирования. Решается задача создания цепочек технологических операций по корректировке плана формирования, позволяющих пошагово вести пользователя от причины, вызвавшей необходимость внесения изменений, до внесения изменения плана формирования поездов по нескольким станциям одновременно.

Дальнейшее развитие заложенной в данную систему идеологии должно предполагать: классификацию причин вызывающих необходимость изменения плана формирования грузовых поездов; анализ существующей технологии организации вагонопотоков, в том числе с учетом исполненных перевозок; автоматизированную выработку вариантов технологии организации вагонопотоков, их имитационную оценку, ввод в действие с возможностью гибкой настройки.

Регулярно возникающие причины изменения системы организации вагонопотоков, вызывающие необходимость внесения изменений в план формирования поездов, могут быть сгруппированы по возможным вариантам их решения. Уникальные, ни разу не повторяющиеся причины встречаются редко и, как правило, являются предпосылкой или следствием крупного нарушения существующей технологии организации вагонопотоков.

При классификации основных причин, инициирующих изменения плана формирования грузовых поездов можно выделить причины, полученные в результате **анализа исполненных перевозок**, а также причины, возникающие в оперативных условиях из-за **ограничений инфраструктуры**.

Выявление причин корректировки плана формирования на основе данных об исполненных перевозках должно предусматривать исследование ситуаций, когда на длительном отрезке времени происходит отклонение фактических вагонопотоков от технологии их продвижения в соответствии с планом формирования. Такие нарушения, как правило, связаны с тем, что на каком либо направлении появились технические возможности формировать назначение не предусмотренное планом формирования, но оптимизирующие работу станции по критерию сокращения простоя вагонов, а также критерию повышения эффективности использования возможностей путевого развития. Примером другой, обратной ситуации может быть станция, на которой не формируется назначение, предусмотренное планом формирования. Это может происходить по разным причинам: отсутствие вагонопотока соответствующего назначения, перенаправление данного вагонопотока на другие станции плана формирования, где есть резерв возможностей путевого развития для формирования групп соответствующих назначений и так далее.

В обоих случаях система должна вести автоматизированное слежение за изменениями структуры вагонопотоков и их проекцию на план формирования поездов. Осуществляя регулярный контроль по временным срезам различной глубины, система сможет выявлять конкретные назначения со станций плана формирования, которые нуждаются в пересмотре и изменении.

После автоматизированного выявления необходимости внесения изменений в план формирования поездов, а также определения типа причины должна происходить инициация создания корректировки плана формирования. Автоматизированная выработка решений по изменению плана формирования поездов на основе **анализа выполненных вагонопотоков** должна осуществляться в следующих направлениях:

- включение новых назначений на направлениях, где поезда формируются сверх плана формирования

грузовых поездов на протяжении длительного периода времени.

Система, при выявлении необходимости использования данного решения, должна инициировать создание корректировки плана формирования, включающей станции, формирующие назначения сверх плана формирования, описание данных назначений, а также групп и областей включения в их составе. Пользователю необходимо подтвердить автоматизированные предложения по переносу отдельных областей включения в новые назначения, или отменить их частично, либо полностью.

- исключение длительно отсутствующих в ходе назначений, не связанных с сезонностью перевозок различных родов груза, а также специализированных перевозок, с последующим распределением высвободившихся областей включения плана формирования.

Реализуя данное решение, система должна создавать корректировку плана формирования, включающую станции, на которых фактически не формируются определённые назначения, описание назначений фактически выполняемых, а также интерфейс перераспределения высвободившихся групп и областей включения. Интерфейс должен не просто предоставлять выбор из всех формируемых назначений, а представлять пользователю предлагаемый вариант распределения, основанный на расчете эксплуатационных затрат, когда дальнейшее следование вагонов будет наиболее эффективным.

- перераспределение отдельных областей включения между существующими назначениями для интенсификации процесса формирования поездов на сортировочных станциях и снижения простоя вагонов под накоплением.

Определяя необходимость применения данного решения, система должна формировать перечень назначений плана формирования, вагонопоток по которым на выбранном временном периоде не превышает заданного пользователем количества поездов в сутки. Далее, по выбранным пользователем назначениям, система автоматически должна создавать корректировку плана формирования со станциями зарождения данных назначений. Автоматическим предложением должно являться перераспределение областей включения таким образом, чтобы дополнить вышеуказанные назначения, стабильно поступающим на станцию потоком с сохранением экономической эффективности перевозки.

Анализ необходимости выполнения указанных выше изменений необходимо выполнять по настраиваемым срезам модели исполненных перевозок, с включением из учета оперативных корректировок пла-

на формирования поездов для устранения последствий различных нарушений и другого рода нештатных ситуаций, которые должны быть помечены в системе ведения базы плана формирования особым признаком. Отмеченные данным признаком станции, не должны быть доступны для автоматизированного добавления в корректировку плана формирования, созданную на основе анализа исполненных вагонопоездов, и могут быть только включены пользователем вручную.

Для анализа наличия причин изменения плана формирования, возникающих из-за **ограничений возможностей инфраструктуры** основополагающим подходом является использование результатов работы автоматизированной системы прогноза ресурсов сети (АС ПРОГРЕСС).

АС ПРОГРЕСС обеспечивает оценку возможности освоения прогнозных объемов перевозок с учетом существующих параметров инфраструктуры, обеспечения тяговыми ресурсами, а также необходимости проведения регламентных ремонтно-путевых работ, позволяет выявить узкие места и определить технологические объекты (участки и станции), нагрузка на которые будет превышать их пропускные и перерабатывающие способности.

Оценив плановую шахматку погрузки, переведя ее в плановые межстанционные корреспонденции и наложив их на сеть ОАО «РЖД» система получает, по сути, анализ исполненной модели перевозок не в разрезе прошлых периодов времени, а на плановый месяц. Так как АС ПРОГРЕСС использует нормативную технологию организации вагонопотоков, образование назначений сверх плана формирования невозможно, однако, анализу могут быть доступны назначения плана формирования, на которые фактически будет приходиться минимальное количество вагонов в сутки, что уже может служить причиной корректировки плана формирования.

По технологическим объектам, являющимся в соответствии с расчетом АС ПРОГРЕСС инфраструктурными ограничениями, также могут инициироваться корректировки плана формирования. Данные корректировки либо признаны временно снять ограничения, в связи с недолгим действием мероприятий их вызывающих, либо откорректировать технологию организации вагонопотоков так, чтобы исключить возможность повторного возникновения затруднений на выделенных технологических объектах.

Для подготовки предложений по организации вагонопотоков на железнодорожном полигоне по причине ограничений инфраструктуры должен осуществляться выбор основных ограничивающих элементов по направлениям внутри железнодорожного полигона, выделение назначений плана формирования, соз-

дающих нагрузку на данный элемент, и далее – анализ возможных вариантов:

- корректировки пути следования выделенных назначений;
- изменения областей включения выделенных назначений;
- отмены выделенных назначений с перераспределением потоков по другим существующим назначениям плана формирования.

Для автоматизированной подготовки предложений должна осуществляться имитационная проверка, моделирующая ситуацию, в которой нагрузка будет перераспределена на другие элементы полигона, с дальнейшим выявлением возможности возникновения новых инфраструктурных ограничений. При имитационной проверке должен формироваться полигон корректировки плана формирования, включающий все назначения, проходящие, начинающиеся или заканчивающиеся на ограничивающем элементе. Далее, по данным назначениям должна осуществляться проверка возможности изменения пути следования (для снятия нагрузки с ограничений по пропускной способности участков) и возможность изменения набора назначений. Оценка возможности корректировки параметров назначений плана формирования должна осуществляться на основе принципа достижения экономической эффективности с учетом эксплуатационных затрат. Ограничивающий элемент должен либо принимать участие в расчете с откорректированными характеристиками, либо быть исключен из расчета.

В качестве примера рекомендаций по корректировке плана формирования, можно рассматривать ситуацию с инфраструктурными ограничениями на направлении Батайск – порты Северо-Кавказской железной дороги. Генерируемая системой корректировка должна обеспечивать единую технологию работы станций Батайск, Тихорецкая, Краснодар-Сорт, Разъезд 9 км и Крымская. Данные станции формируют назначения, проходящие по ограничивающим участкам с высокими размерами пассажирского движения, что вызывает необходимость оптимального распределения поездопотоков по полигону.

Таким образом, система должна обеспечивать создание корректировки, включающей сами назначения с данных станций в направлении портов, а также вариант перераспределения вагонопотоков. Станция Батайск, работая на дальнем подходе, должна формировать назначения, необходимые для снижения времени накопления на станции Разъезд 9 км, а также сквозные назначения до станции Новороссийск. Для снижения загрузки участка Батайск - Тимашевская система должна представлять рекомендации по переключению части вагонопотока в назначения на станцию Тихорецкая, с

последующим включением групп в состав поездов в адрес станции Краснодар-Сорт. Кроме того, одним из вариантов предлагаемых решений может являться ввод новых сквозных назначений следующих кружностью через станции Тихорецкая и Краснодар – Сорт.

Выделение вагонопотоков для переключения может осуществляться на основе прогноза системы АС ПРО-ГРЕСС в части прогнозной мощности вагонопотока по каждому назначению, формируемому станцией.

Развитием данной задачи должно являться расширение блока предлагаемых решений, как в части корректировки существующих назначений, так и разработке методов оценки и адаптивной оптимизации плана формирования поездов на выделенном железнодорожном полигоне на основе технико-экономических критериев и анализа эксплуатационной обстановки.

Возвращаясь к примеру с полигоном доставки грузов в адрес морских терминалов – для формирования автоматизированных рекомендаций, одним из возможных вариантов решений является использование прогноза наличия грузов на морских терминалах, а также данных о текущей эксплуатационной обстановке.

В качестве мер, предлагаемых системой, можно рассмотреть:

1. Ускорение подачи и обработки на припортовых станциях и в портах:

Мероприятия данного типа используются как в ближнем, так и в дальнем подходе. Станция Разъезд 9 км должна обеспечивать формирование назначений в адрес припортовых станций с учетом уточненного заказа на подвод потоков, исходя из потребностей морских терминалов.

Станция Батайск, работая на дальнем подходе, должна формировать назначения с использованием заказа на подвод потоков, снижая время накопления на станции Разъезд 9 км в следующие сутки, и учитывая ограничения в возможности отправления поездов на участок Батайск – Тимашевская.

2. Отставление от движения невостребованного груза

Данные мероприятия должны реализовываться в дальнем подходе и использовать возможности направ-

ления Батайск – Тихорецкая – Краснодар-Сорт по размещению вагонов с невостребованной на текущий момент номенклатурой груза. В связи с недостаточным путевым развитием на станции Краснодар-Сорт, формирование поездов, для последующей временной отставки от движения должно осуществляться на станциях Батайск и Тихорецкая, с целью дальнейшего продвижения до станции Краснодар-Сорт. Формирование таких назначений должно происходить в соответствии с анализом наличия грузов на припортовых станциях. Вагоны с грузами, наличие которых близко к нормальному или превышает его на небольшой процент, должны следовать в сквозном кружном назначении до станции Краснодар-Сорт, вагонопотоки с грузами, находящимися в избытке, должны либо отставляться от движения на участке Батайск – Тихорецкая, либо следовать с переработкой по станции Тихорецкая, с последующим включением в назначение Краснодар-Сорт.

3. Организация судовой партии

Мероприятия по формированию составов в соответствии с судовой партией относятся к ближнему подходу и реализуются на путях станции Разъезд 9 км. На основе уточненного сводного заказа, станция должна осуществлять формирование соответствующих составу судовой партии назначений для снижения времени обработки на припортовых станциях.

Таким образом, развитие Автоматизированной системы организации вагонопотоков должно обеспечить эффективную технологию ведения и использования плана формирования грузовых поездов с использованием средств автоматизированной поддержки принятия решений на основе анализа оперативных и прогнозных изменений эксплуатационной обстановки и возможностей инфраструктуры.

Литература

1. Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД», 2006 – 527 с.
2. Бородин А.Ф. Технологическое обеспечение перевозочного процесса. – Железнодорожный транспорт, 2013. - № 3. – С. 33 – 36.

**Матюхин В.Г., Шабунин А.Б.,
Ефремов Г.А., Ефремова А.П., Тимченко А.Д.,** ОАО «НИИАС», г. Москва

Когнитивные технологии в проектах автоматизации диспетчерского управления на железнодорожном транспорте

Введение

Усложняющиеся технологические процессы на железной дороге, повышение автоматизации процессов требует нового подхода к проектированию системы, который сфокусирован не только на технологиях, но также учитывает человека как важный элемент человеко-машинной системы.

Кроме того, одним из результатов исследования удобства использования системой является экономический фактор: более удобная система снижает затраты на обучение и уменьшает вероятность значительных переделок системы на этапе внедрения.

Помимо этого в сложных транспортных системах (железнодорожных, авиационных) выделен целый класс ошибок экипажа и диспетчеров из-за чрезмерных физических воздействий и психоэмоциональных нагрузок, эргономических недостатков техники [1, 2]. В этой связи стала очевидной необходимость внедрения системы поддержки принятия решений, включающей комплекс организационно-методических, научно-исследовательских, проектировочных и экспертных работ, направленных на учет физиологических, антропометрических и психологических характеристик и свойств человека на всех этапах разработки, создания и эксплуатации [2].

В существующих системах использован машиноцентрический подход при создании сложных технических систем. Данный подход исходит из постулата, что машина все может, а из-за ограниченных психофизиологических возможностей человека не достигается ожидаемая эффективность и снижается безопасность. В русле машиноцентрического подхода главная задача наук о человеке виделась в приспособлении человека к диспетчерскому управлению путем медицинского и психологического отбора, повышения возможностей за счет соответствующих тренировок и специальной подготовки, профилактики развития и коррекции неблагоприятных функциональных состояний [2].

В настоящее время ОАО «РЖД» уделяет большое внимание внедрению интеллектуальных автоматизированных систем [3-6]. Применение мультиагентных технологий позволяет решать сложные задачи оптимизированной корректировки расписания движения в реальном времени (порядка 5-10 секунд). Это дает возможность диспетчерам разного уровня получать и сравнивать разные варианты предлагаемых расписа-

ний. Для быстрого анализа предлагаемых расписаний и принятия решения необходимы новые пользовательские интерфейсы. Но ответственность за принятие каких-либо действий остается за диспетчерским персоналом. Проблеме представления результатов интеллектуальных вычислений лицу, принимающему решение (диспетчеру), не уделено достаточного внимания.

Все вышеперечисленное подтверждает актуальность задачи представления необходимой информации для диспетчерского персонала ОАО «РЖД» в доступной и наглядной форме. Для снижения количества ошибок из-за несовершенства языка общения между техническими средствами и человеком, для увеличения объема воспринимаемой информации, а также для быстрого анализа решений, разработанных интеллектуальными системами, предложено использовать когнитивные технологии при разработке пользовательских интерфейсов.

Основные принципы использования когнитивных технологий при проектировании интерфейсов

Основные когнитивные процессы, происходящие в работе диспетчера—это прогнозирование и принятие решений по управляющим воздействиям в условиях неполноты информации и временных ограничениях. Доступная на момент принятия решений информация может быть неполной, сложной или противоречивой. Эти факторы приводят к тому, что есть потребность в анализе этой информации со стороны СППР и предоставлении её в понятном и непротиворечивом виде.

В настоящее время диспетчерский персонал получает информацию из разнородных автоматизированных систем, в которых информация представлена по-разному. Различные интерфейсные решения вызывают трудности восприятия информации и требуют больше времени для привыкания. У пользователей формируется доверие к системе только тогда, когда она ведет себя предсказуемо и предлагает компетентные решения.

Основные принципы построения когнитивных интерфейсов, используемые в работе:

- антропоцентрический подход,
- информационная архитектура,
- модульность пользовательского интерфейса.

При разработке интерфейса с позиций антропо-

центрического подхода человек рассматривается не как специфическое звено технической системы, а как субъект труда, осуществляющий сознательную, целенаправленную деятельность, используя в ходе ее реализации технические устройства для достижения поставленной цели в конкретных условиях среды обитания. Таким образом, условия обитаемости и технические устройства включены в деятельность человека. В этой связи исследование и проектирование деятельности определяются в качестве главной задачи. Для этого используются следующие шаги проектирования деятельности:

- ♦ описать события, на которые необходимо реагировать,
- ♦ для каждого из событий описать,
 - возможные эффекты от его действия;
 - критерии, по которым можно обнаружить, что событие произошло;
 - необходимые взаимодействия между оператором и системой;
 - результат, ожидаемый от действий системы.
- ♦ декомпозировать действия системы на задачи, исходя из взаимодействия человек-машина.

Для создания удобного интерфейса используется структурирование выводимой информации в диспетчерском приложении и проектирование информационного пространства автоматизированного рабочего места, способствующее выполнению задач и интуитивному доступу содержимому.

Элементы диспетчерского АРМ разделены на модули, исходя из выполняемых задач. При этом для разных диспетчерских ролей общие элементы выполнены в едином стиле, что упрощает обучение пользователей новой системе и упрощает понимание реакции системы на пользовательские воздействия.

Примеры разработанных решений

Когда диспетчер принимает решение взять ручное управление над ситуацией, то ему не обязательно знать тонкости всех алгоритмов работы, которые используются в СППР, но ему необходимо знать текущее состояние и какие критерии использует СППР в своей работе.

Таким образом, зная общие принципы поведения системы и набор predetermined параметров, доступных для изменения, диспетчер может влиять на решение, предлагаемое системой, и получать ожидаемый результат.

В рамках работ по созданию интерфейсов для диспетчеров Центра по управлению тяговыми ресурсами (ЦУТР) с использованием когнитивных технологий нами предложены следующие решения в части мнемонической схемы железнодорожного полигона.

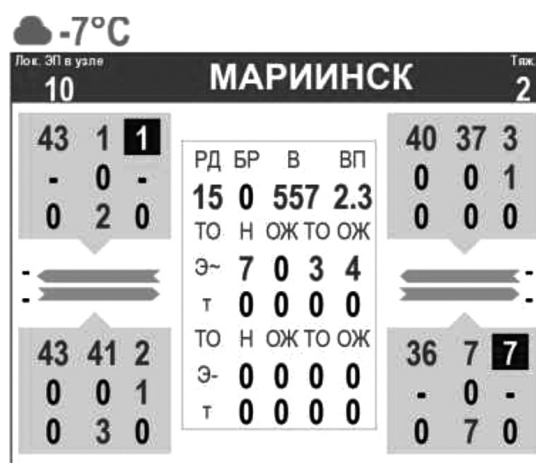


Рис.1. Знак станции

Знак железнодорожной станции состоит из следующих логических частей: ядро станции, секции на приём и отправление.

В ядре станции содержится информация:

- об оперативном резерве (в случае простоя более установленной нормы ячейка подкрашивается),
- количество отставленных от движения транзитных грузовых поездов,
- количество вагонов рабочего парка и простой транзитных вагонов без переработки.

В секции на прибытие отображена информация о:

- количестве грузовых поездов, прибывших с начала суток, с разделением на транзитные и в расформирование,
- количестве локомотивов, следующих в ремонт; количестве сходов локомотивов с кольца и наличии локомотивов в узле с «красным» и «желтым» пробегом,
- количестве локомотивных бригад, работающих 2 ночи подряд; количестве бригад, готовых к работе с оборота и количестве бригад, прибывших в узел с нарушением режима с начала суток.

В секции на отправление:

- всего грузовых с начала суток, а также количество поездов, готовящихся к отправлению и количество поездов, необеспеченных тяговыми ресурсами;
- количество локомотивов резервом с учетом отклонения от выданных регулировочных заданий;
- количество локомотивов в узле в ожидании работы более 4 часов;
- факт заставки бригад на трехчасовой интервал;
- количество бригад на отдыхе, готовых к работе.

Для интегральной оценки дорожной ситуации разработан ряд агрегированных показателей по ключевым станциям диспетчерских участков, находящихся под контролем ЦУТР. Приведем описание некоторых из них.

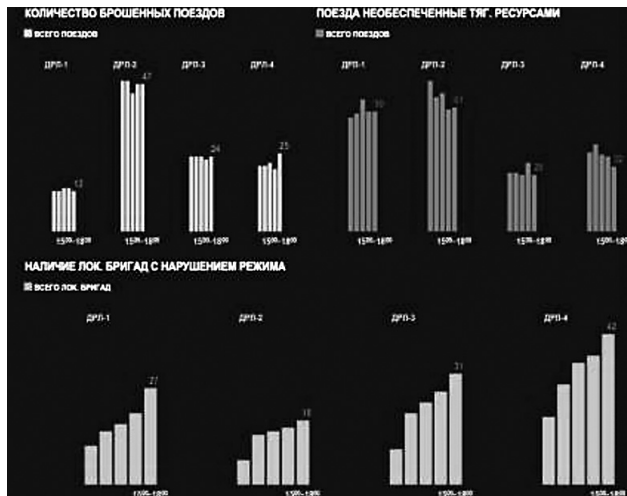


Рис.2. Агрегированные показатели для старшего локомотивного диспетчера

Агрегированные показатели

Для старшего локомотивного диспетчера с учетом технологии работы созданы следующие показатели (см. рис. 2):

- количество брошенных поездов по участкам локомотивных диспетчеров по трёхчасовым интервалам;
- количество поездов, необеспеченных тяговыми ресурсами по трёхчасовым интервалам;
- количество бригад, следующих с нарушением режима.

Для сменного инженера дирекции тяги (см. рис.3):

- дислокация локомотивов на дорогах полигона (с разделением на эксплуатируемый и неэксплуатируемый парк);
- заставка локомотивных бригад по депо (плановая и фактическая).

Заключение

Использование когнитивных технологий позволило разработать набор унифицированных интерфейсных решений, с помощью которых осуществляется деятельность диспетчера и руководящего персонала с системой поддержки принятия решений с учетом компетенций каждого из них. При этом интуитивно понятное представление информации и разработанных показателей снижает фактор ошибки в принятии

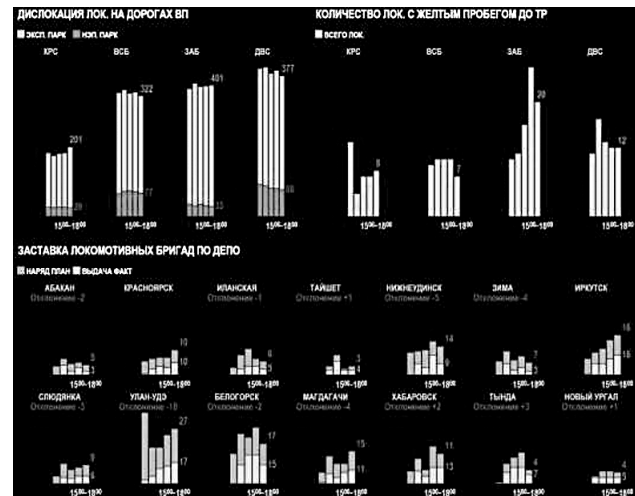


Рис.3. Агрегированные показатели для сменного инженера дирекции Тяги

решения и снижает время, необходимое на принятие предложенного решения и оценку последствий.

Литература

1. Платонов Г.А. Эргономика на железнодорожном транспорте. – М.: Транспорт, 1986.
2. Чунтул А.В. Эргономист, №30. – 2013г. – С. 9-25.
3. Матюхин В.Г., Шаров В.А., Шабунин А.Б. Управление железной дорогой онлайн/ Пульт управления, 2011. № 03. – С.24-29.
4. Матюхин В.Г., Шабунин А.Б., Калущая А.П. Дороги проверяют / Пульт управления, 2012. № 05(09). – С.24-27.
5. Ефремов Г.А., Калущая А.П. Интеллектуальное диспетчерское управление движением поездов на направлении Санкт-Петербург – Москва// Сборник трудов Первой научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте» (ИСУЖТ-2012, Москва, 15-16 ноября 2012г). – М. – Изд-во ОАО «НИИАС», 2012. – С. 55-57.
6. Матюхин В.Г., Шабунин А.Б., Калущая А.П. От продуманного решения к качественной реализации / Железнодорожный транспорт, 2013. №3. – С.20-22.
7. Шабунин А.Б., Ефремов Г.А., Калущая А.П. Использование мультиагентных систем в диспетчерском регулировании / Железнодорожный транспорт, 2013. №3. – С.23-27.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 13-07-13167 офи-м-ржд.

СЕКЦИЯ №2

КОМПЬЮТЕРНОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ, МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕВОЗОЧНОГО ПРОЦЕССА И ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКИ

Мороз А. И., *Институт проблем транспорта РАН, г. Москва*

Логико-динамическая модель и проблема разработки Интеллектуальной системы управления железнодорожным транспортом

В докладе представлена модель, которая описывает динамику транспорта на железнодорожной сети, и обсуждается её отношение к проблеме разработки интеллектуальной системы управления железнодорожным транспортом. При этом под интеллектуальной понимается такая техническая или программная система, в которой, во-первых, решаются задачи управления, которые человек или группа людей либо вообще не способны их решать, либо не способны решать в реальное время, и, во-вторых, вырабатываются такие управления, которые более эффективны, чем управления, вырабатываемые людьми, в частности, являются оптимальными по заданному критерию оптимальности. В железнодорожной компании такими задачами, в частности, являются (1) управление движением транспорта на всей сети и разработка оптимальных маршрутов и графиков движения по ним [1]; (2) управление функционированием компании средствами динамического финансового планирования, которая называется проблемой бюджетирования; (3) управление взаимодействием компании с другими секторами экономики страны. В докладе рассматривается только первая задача.

В процессе разработки логико-динамической модели в [2, 3] использовалась плодотворная идея, изложенная в монографии [4], рассматривать положение движущихся поездов на сети не в каждый момент времени, а в течение периода, когда они находятся на одном и том же блок-участке. В этом случае движение поездов рассматривается как изменение их дислокаций в дискретном времени.

При решении проблем управления должны быть определены вводимая в управляющий орган информа-

ция, множество значений, которые могут принимать средства управления, и задан алгоритм получения конкретных значений средств управления, соответствующих конкретным вводимым данным. В качестве входной информации железнодорожной системы управления рассматривается поездная обстановка на всех железнодорожных ветках и на станциях. А именно, рассматривается дислокация поездов на всех ветках сети, называемая В-дислокацией, и распределение поездов в очередях на отправление на всех станциях сети, называемое S-дислокацией. Средствами управления являются сигналы светофоров и команды на приём и отправление поездов со станций.

Если обозначить В-дислокацию в k -м цикле как $Z(k)$, S-дислокацию как $G(k)$, действие управлений как $u(k)$ и алгоритм управления как $H(Z(k), G(k))$, то теоретическое представление управляемой системы в дискретном времени имеет вид

$$u(k) = H(Z(k), G(k)), \\ (Z(k+1), G(k+1)) = F(Z(k), G(k), u(k)).$$

Тогда при рассмотрении движения транспорта на железнодорожной сети задача состоит в описании, что представляют собой $Z(k)$ и $G(k)$, идентификации отображения F и синтезе алгоритма H .

1. Модель процессов для сети в форме декомпозиции

Для описания процессов на железнодорожной сети, когда всей системой управляет один орган, модель в форме логико-динамической программной системы разработана в [2]. В качестве компьютерной программы она управляет всеми светофорами на сети и управ-

ляет приёмом и отправлением поездов на всех станциях. В настоящем докладе железнодорожная система рассматривается как декомпозиция на определённое число регионов и в каждом регионе полномочия его органа управления распространяются только на ветки и станции своего региона. При этом, маршруты движения поездов могут проходить через несколько регионов. В этом случае возникают задачи со многими органами управления и разными законами функционирования в разных регионах. В частности, возникает задача согласования действий органов управления регионов, когда управление поездами переходит от одной системы управления к другой, т.е. задача описания их взаимодействий. Это взаимодействие происходит в форме обмена поездами и обмена информацией. В этом случае программная ИСУ будет представлять собой систему, которая состоит из определённого числа взаимодействующих подсистем управления.

При разработке теории для этого случая потребовалось введение понятий межрегиональной ветки, виртуальной станции и матрицы соответствий.

Пусть регионы пронумерованы и s -й обозначается как R^s . Число блок-участков на ветке $[p,j]$, соединяющей станции S^p и S^j , где $S^i \in R^s$, обозначается как $n_{bu}(s,p,j)$.

Обмен поездами происходит через ветки, граничные станции которых принадлежат разным регионам. Такие ветки будем называть *межрегионными*.

Так как граничные станции межрегионных веток взаимодействуют между собой, то в моделях каждого региона обе должны быть отнесены к каждому из них. Но для каждого региона одна из этих станций ему не принадлежит и на неё не распространяются полномочия его органа управления. Поэтому в этом регионе эта станция будет называться *виртуальной*. Динамика состояний межрегионной ветки зависит от органа управления принимаемой станции, поэтому эта динамика определяется моделью того региона, для которого она является входящей.

Реальные станции каждого региона будем называть *г-станциями*, а его виртуальные станции – *в-станциями*. Таким образом, каждый регион характеризуется множествами *г-станций* и *в-станций*.

В-дислокация на ветке $[p,j]$, соединяющей станции S^p и S^j , в текущем временном цикле формализуется пятимерной матрицей $Z_0(s,p,j,r,m)$, где s – номер региона, m – номер блок-участка. Событие {в s -м регионе на m -м блок-участке ветки $[p,j]$ нет поезда} кодируется как $Z_0(s,p,j,1,m)=0$, $Z_0(s,p,j,2,m)=0$, $Z_0(s,p,j,3,m)=0$. Событие {в s -м регионе на m -м блок-участке ветки $[p,j]$ находится штатный поезд, движущийся по маршруту с номером nM } кодируется как $Z_0(s,p,j,1,m)=1$, $Z_0(s,p,j,2,m)=nM$, $Z_0(s,p,j,3,m)=0$. Событие {в s -м регионе на m -м блок-участке ветки $[p,j]$ находится внештат-

ный поезд с приоритетом $PR \geq 1$, движущийся по маршруту с номером nM } кодируется как $Z_0(s,p,j,1,m)=-1$, $Z_0(s,p,j,2,m)=nM$, $Z_0(s,p,j,3,m)=PR$.

В-дислокация в следующем $(k+1)$ -м цикле формализуется аналогично матрицей $Z(s,p,j,n,m)$.

$$Z(s,p,j,n,m) = \alpha(q(s,p,j,m))Z_0(s,p,j,n,m-1) + (1-\alpha(q(s,p,j,m)))Z_0(s,p,j,n,m), \quad (1)$$

где $\alpha(r) = 0$ при $r \leq 0$ и $\alpha(r) = 1$ при $r > 0$ и $q(s,p,j,m)$ – значение сигналов светофоров.

S-дислокация, т.е. распределение поездов в очередях на отправление с S^j на ветку $[j,L]$ с заданными временами их отправления, формализуется матрицей $G(s,j,L,r,m)$, где s – номер региона, $r = 1, 2, 3$ и m – номер позиции в очереди на эту ветку. Событие {в s -м регионе очередь на отправление поездов со станции S^j на ветку $[j,L]$ отсутствует} кодируется как $G(s,j,L,1,m)=10^n$, $G(s,j,L,2,m)=0$, $G(s,j,L,3,m)=-1$ для всех m , где число 10^n значительно больше времён отправления всех поездов. Событие {в s -м регионе в очереди на отправление со станции S^j на ветку $[j,L]$ на m -й позиции стоит штатный поезд с временем отправления T и движущийся по маршруту с номером nM } кодируется как $G(s,j,L,1,m)=T$, $G(s,j,L,2,m) = nM$, $G(s,j,L,3,m)=0$. Событие {в s -м регионе в очереди на отправление на ветку $[j,L]$ на m -й позиции стоит внештатный поезд с приоритетом $PR \geq 1$, временем отправления T и движущийся по маршруту nM } кодируется как $G(s,j,L,1,m)=T$, $G(s,j,L,2,m)=nM$, $G(s,j,L,3,m)=PR$.

Значения $q(s,p,j,m)$ сигналов светофоров на входах блок-участков и на входах станций определяются следующим образом. Красному сигналу на входе m -го блок-участка ветки $[p,j]$ s -го региона соответствует $q(s,p,j,m) = 0$, желтому соответствует $q(s,p,j,m) = 1$ и зелёному соответствует $q(s,p,j,m) = 2$. Алгоритм их задания должен обеспечить выполнение следующих требований: (1) на любом блок-участке должно быть не более одного поезда и (2) продвижение поездов по ветке должно быть наиболее быстрым. В [2] показано, что если допускается наличие движущихся поездов на смежных блок-участках, то на железнодорожных ветках $q(s,p,j,m)$ определяются по следующей рекуррентной формуле:

$$q(s,p,j,n_{bu}(s,p,j)+1) = u(s,p,j), \\ q(s,p,j,m) = \alpha(q(s,p,j,m+1)) - |Z_0(s,p,j,1,m)| + 1, \quad (2)$$

$$m = n_{bu}(s,p,j), n_{bu}(s,p,j)-1, \dots, 1,$$

где $u(s,p,j)$ задаёт орган управления станции S^j s -го региона при приёме поездов с ветки $[p,j]$.

Далее, средством управления является задание позиций принимаемых на станции поездов в очередях на отправление и задание им времён отправления. Это за-

дание, а также команды на отправление поездов, приводят к перестройке этих очередей. Алгоритм задания указанных позиций и перестройки очередей разработан в [2]. Он назван *G-алгоритмом*. Последний обеспечивает выполнение следующих требований: (1) в очереди на каждую ветку не должно быть двух поездов с одним и тем же временем отправления; (2) график отправления штатных поездов не должен быть нарушен, т.е. они должны быть отправлены точно в своё время; (3) время отправления внештатных поездов является минимально возможным и они должны стоять в очереди согласно их приоритетам.

Модель взаимодействия регионов разработана в [3].

Так как закон динамики каждого региона описывается в переменных его модели, то в процессе взаимодействия необходимо выполнять преобразование переменных одного региона в соответствующие переменные другого региона.

Для этого вводятся дополнительные элементы модели, называемые *матрицами соответствий*. В [3] эти матрицы определяются и описан алгоритм вышеуказанного преобразования переменных. А именно, для каждого региона R^s и для каждой его межрегионной ветки по матрице соответствий определяется номер региона, из которого она исходит, и идентификатор этой ветки в переменных этого региона.

Укрупнённая схема алгоритма моделирования динамики транспорта на железнодорожной сети изображена на Рис. 1. На ней показано, как преобразуется состояние сети (Z_0, G_0) в текущем k -м цикле в состояние (Z, G) в $(k+1)$ -м цикле.

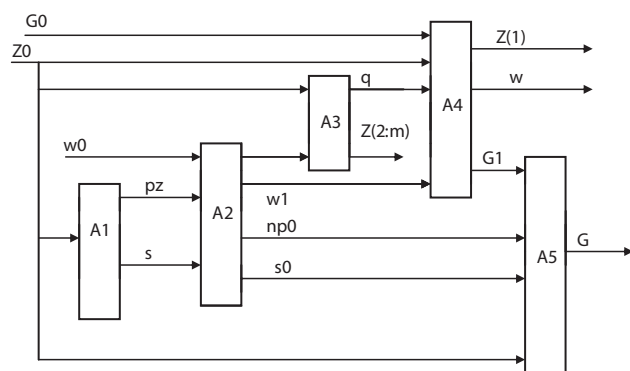


Рис. 1. Схема моделирования динамики на сети.

В блоке A1 для $j=1, \dots, ns(t)$, где $ns(t)$ – число g -станций региона R^t , определяются $s(j)$ – количества поездов, находящихся на входных ветках станций S^j , и двумерный массив pz – номеров этих веток.

В блоке A2 определяется $s_0(j)$ – количество поездов, которые принимаются на S^j , и двумерный массив np_0 упорядоченных по времени отправления этих поездов с S^j , $j=1, \dots, ns$. Также определяются значения сигналов светофоров $u(j)$ на входах станции S^j . При приёме по-

ездов изменяется число поездов на станции S^j , что регистрируется в выходе w_1 блока A2.

В блоке A3 моделируется динамика дислокаций согласно уравнению (1). А именно, определяются значения сигналов светофоров q на всех ветках сети и дислокации поездов $Z(2:m)$ на всех блок-участках, кроме первого. Входом этого блока являются текущие значения Z_0 дислокаций и значения $u(t,p,j, nbu(s,p,j)+1)$ сигналов светофоров на входах станций.

В блоке A4 определяется изменение состояния сети в результате отправления поездов со станций. Здесь вычисляются неопределённые в блоке A3 состояния первых блок-участков всех веток и они регистрируются в выходе $Z(1)$. В связи с отправлением поездов определяется их новое число w на станциях и определяются пятимерные массивы G_1 , в которых отражены изменения в очередях.

Блок A5 содержит алгоритм преобразования очередей на отправление на станциях в результате приёма поездов. Входом блока являются массивы G_1 , np_0 , s_0 и Z_0 . Информация о Z_0 требуется, чтобы установить, является ли принимаемый поезд штатным или внештатным, так как соответствующие им алгоритмы преобразования очередей различны.

2. Интервальное регулирование и модификация алгоритма управления

В современных системах управления движением поездов используются системы интервального регулирования. Они обеспечивают безаварийное движение на железнодорожных ветках. При их использовании реализуются такие В-дислокации, что между поездами всегда имеется по меньшей мере один свободный блок-участок. Если сигналы светофоров задаются согласно алгоритму (2), то может оказаться, что на каких-то смежных блок-участках будут находиться движущиеся поезда. Это значит, что этот алгоритм не удовлетворяет требованию системы интервального регулирования.

Далее представлен один возможный алгоритм задания значений сигналов светофоров $q(s,p,j,m)$, который удовлетворяет требованию указанной системы, а именно требованию, чтобы между поездами на ветке имелся по меньшей мере один свободный блок-участок.

Пусть фиксирована ветка $[p,j]$. Если на последнем, т.е. на $nbu(s,p,j)$ -м блок-участке нет поезда, то допускается перемещение всех поездов на один блок-участок по ходу движения. Формально это задаётся следующим образом. Если $z(s,p,j,1, nbu(s,p,j)) = 0$, то задаётся $q(s,p,j,m) = 1$ для $m=1, 2, \dots, spj$. Если же на нём есть поезд и при этом ему открыт доступ на станцию, т.е. вы-

полняется $|z(s,p,j,1,nbu(s,p,j))| = 1$ и $q(s,p,j,nbu(s,p,j)+1) > 0$, то также задаётся $q(s,p,j,m) = 1$ для всех m .

Если на $nbu(s,p,j)$ -м блок-участке есть поезд и при этом доступ на станцию ему закрыт, т.е. выполняется $q(s,p,j,nbu(s,p,j)+1) = 0$, то следует найти интервал из двух или более свободных блок-участков с наибольшим номером блок-участков и допустить перемещение поездов, движущихся перед ним, на один блок-участок, а остальным поездам закрыть движение. Формально следует найти такой максимальный $m_0 > 1$, что $z(s,p,j,1,m_0) = 0$ и $z(s,p,j,1,m_0-1) = 0$ (последнее означает, что на m_0 -м и на (m_0-1) -м блок-участках нет поездов). Если такой m_0 не существует, то полагается $q(s,p,j,m) = 0$ для всех m . Если же такой m_0 существует, то полагается $q(s,p,j,m) = 1$ для $m = 1, 2, \dots, m_0-1$ и $q(s,p,j,m) = 0$ для $m=m_0, m_0+1, \dots, nbu(s,p,j)$.

Для выполнения вышеуказанного требования на дислокации также требуется модификация общего алгоритма формирования команд на отправление поездов со станций. А именно, следует дополнить общий алгоритм следующим фрагментом. Если все условия для отправления поезда на ветку $[j,L]$ выполнены и если на первом блок-участке этой ветки есть поезд, то поезд на этот блок-участок не отправляется и состояние на нём определяется только динамикой на этой ветке. Если же на указанном блок-участке нет поезда, а на втором блок-участке есть поезд и значение сигнала светофора на входе третьего блок-участка равно нулю, то поезд на первый блок-участок не отправляется и состояния первого и второго блок-участков определяются динамикой на ветке $[j,L]$.

Этим алгоритм определения требуемых значений $q(s,p,j,m)$ определён. Далее он назван Q-алгоритмом.

3. Укрупнённая схема расчёта графиков движения грузовых поездов

Расчёт оптимальных маршрутов для грузовых поездов и графиков их движения согласно Q-алгоритму и G-алгоритму производится на компьютере следующим образом.

- (1) Задаётся начальная поездная обстановка $Z_0(s,p,j,r,m)$ на железнодорожных ветках и $G_0(s,j,L,r,m)$ на станциях.
- (2) Фиксируется поезд, для которого разыскивается маршрут, и задаются начальная и конечная станции.
- (3) Задаётся конечный набор возможных маршрутов для этого поезда.
- (4) Задаётся критерий эффективности маршрутов.
- (5) Для каждого из вышеуказанных маршрутов выполняется на компьютере программа, воспроизводящая согласно Q-алгоритму и G-алгоритму дви-

жение всех поездов на сети из заданной начальной поездной обстановки, и подсчитывается значение критерия эффективности. Определяется маршрут, для которого этот критерий достигает экстремум.

- (6) Регистрируются моменты времени, когда поезд, движущийся по оптимальному маршруту, отправляется со станций этого маршрута. Последовательность этих моментов времени является графиком движения, который требовалось разработать.
- (7) Этот поезд переводится в разряд штатных поездов, т.е. движущихся по определённому временному графику.

4. Вычислительный эксперимент

Описанная выше процедура иллюстрируется следующим вычислительным экспериментом. Рассмотрим модельную железнодорожную сеть с тремя регионами, которая изображена на рис. 2.

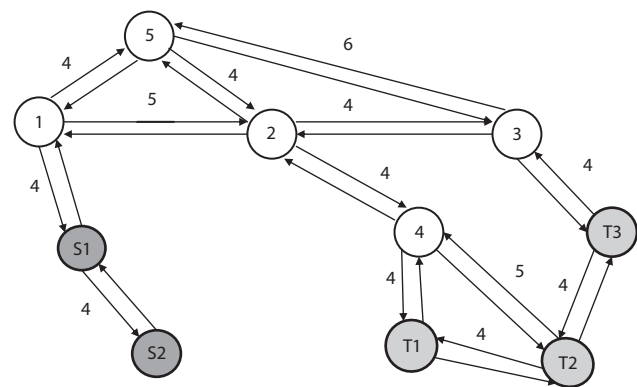


Рис.2. Сеть с тремя железнодорожными регионами

В этой сети матрицы соответствий следующие:

$$Nv(1,r,n) = \begin{bmatrix} 61 & 74 & 84 & 93 \\ 20 & 30 & 30 & 30 \\ 13 & 14 & 24 & 35 \end{bmatrix},$$

$$Nv(2,r,n) = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 4 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 6 & 4 & 6 \end{bmatrix},$$

$$Nv(3,r,n) = \begin{bmatrix} 41 & 42 & 53 \\ 10 & 10 & 10 \\ 47 & 48 & 39 \end{bmatrix}.$$

В глобальной нумерации станций, изображенных на Рис.2, круги, которые обозначены только цифрами – это станции региона R^1 , станции S1 и S2 принадлежат региону R^2 и станции T1, T2 и T3 принадлежат региону R^3 . Например, в локальной нумерации региона R^1

виртуальная станция S1 имеет номер 6, виртуальная станция T1 – номер 7, T2 – номер 8 и T3 – номер 9. В локальной нумерации региона R³ виртуальная станция 4 имеет номер 4, виртуальная станция 3 имеет номер 5. Цифры над стрелками указывают число блок-участков на соответствующей ветке.

На этой сети движутся 5 штатных и 26 внештатных поездов. Их маршруты заданы как последовательности номеров станций, которые они должны проходить. Пусть требуется провести грузовой поезд, которому присвоены номер 20 и показатель приоритета 2, из станции S2 региона R² до станции T3 региона R³.

Возможные маршруты приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Маршруты	В глобальной кодировке	В локальной кодировке	Количество блок-участков	Время прибытия
A	S2-S1-1-5-3-T3	2-1-3-5-3-9	22	34
B	S2-S1-1-2-3-T3	2-1-3-2-3-9	21	54
C	S2-S1-1-2-4-T2-T3	2-1-3-2-4-8-3	29	44

Задана начальная поездная обстановка. Пусть критерием эффективности является время прибытия поезда на станцию назначения T3. Воспроизведение на компьютере динамики всей системы, где управления формируются согласно Q-алгоритму и G-алгоритму, даёт результат, который приведён в последнем столбце Таблицы 1. Как можно видеть, оптимальным является маршрут A. Также можно видеть, что хотя маршрут B является самым коротким по числу блок-участков, время, которое затрачивается на его прохождение, оказывается самым большим, что является результатом взаимодействия с движением других поездов.

Далее найдём временной график движения этого поезда. Время отправления поезда со станции – это номер цикла, в котором он оказывается на первом блок-участке ветки, исходящей с этой станции. Для поезда nM=20 и варианта A получаем следующую Таблицу 2 состояний блок-участков исходящих веток.

Таблица 2

k = 2, [S2,S1]	k = 7, [S1, 1]	k = 13, [1,5]	k = 23, [5, 3]	k = 30, [3,T3]
-1 0 0 0	-1 0 0 -1	-1 0 -1 0	-1 0 -1 0 -1 0	-1 0 0 0
20 0 0 0	20 0 0 19	20 0 21 0	20 0 24 0 23 0	20 0 0 0
2 0 0 0	2 0 0 4	2 0 1 0	2 0 4 0 3 0	2 0 0 0

Таким образом, временной график движения этого поезда следующий:

Таблица 3

Станции	S2	S1	1	5	3
Время отправления	2	7	13	23	30

Логико-динамическая модель позволяет решать (1) задачу прогнозирования поездной обстановки на железнодорожных ветках и на станциях (прогноз необходим, в частности, для предотвращения заторов посредством задержания отправления поездов с низким приоритетом и обеспечения прохождения станций поездов с более высоким приоритетом, как это продемонстрировано на вычислительном эксперименте в [2]), (2) задачу разработки рациональных маршрутов грузовых поездов, например, удовлетворяющих критерию ресурсосбережения, и разработки временных графиков их движения, (3) задачу выявления возможных нарушений графиков движения поездов в случае, когда на каких-то станциях отправляются новые поезда, (4) задачу обоснования строительства новых станций и железнодорожных веток, (5) задачу разработки графиков движения всех поездов. Состав и трудность решаемых с использованием логико-динамической модели задач позволяет рассматривать её как методическую основу при разработке интеллектуальной системы управления железнодорожным транспортом.

Литература

1. Шаров В.А. Интеллектуальные системы управления в производственной деятельности ОАО «РЖД». Труды Второй научно-технической конференции “Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте ИСУЖТ-2013”, 21-22 октября 2013 г., Москва: НИИАС. <http://www.vniias.ru/>
2. Мороз А.И. Динамика на железнодорожной сети с различающимися по приоритетам внештатными поездами // ТРАНСПОРТ: наука, техника, управление. 2013, № 9.
3. Мороз А.И. Логико-динамическая модель как методическая основа разработки интеллектуальной системы управления железнодорожным транспортом // ТРАНСПОРТ: наука, техника, управление. 2014, № 9.
4. Доенин В.В. Логико-разностные модели транспортных процессов. М: Спутник, 2008.

Захарчук О.Т., ООО «АСис Софт», г. Москва

Фундаментальная модель описания организационно-технических систем

Введение

В настоящее время корпоративные информационные системы создаются путем интеграции нескольких информационных систем. Данное состояние КИС в среде ИТ-специалистов даже получило название «зоопарк информационных систем» [1].

Проблема связана с тем, что практически все такие информационные системы построены на своих уникальных моделях, которые хорошо отражают только те виды деятельности, для автоматизации которых они предназначены.

Проблема усугубляется еще и тем, что задача создания некоторой универсальной модели для описания деятельности в профессиональных сообществах менеджеров даже не ставится.

Тем не менее, уже были публикации [2-4], в которых говорится о существовании единой модели для управления разными видами деятельности и описываются успешно работающие ИТ-решения, построенные на основе этой модели.

В настоящей статье дается описание фундаментальной модели, которая упоминается в данных публикациях.

Два подхода построения моделей деятельности

В современном менеджменте отсутствует понятие «фундаментальная» в отношении к модели, как для определенного вида деятельности, так и для деятельности в целом.

Поэтому, под фундаментальной моделью здесь мы будем понимать минимальную совокупность информационных объектов, из которых можно строить модели деятельности в организационно-технических системах для их использованием в ИТ-решениях.

Когда разрабатывается новое ИТ-решение для управления определенным видом деятельности (проект, процесс, творчество и т.п.), то, как правило, фундаментальная модель этого вида деятельности создается каждый раз заново.

При этом, фундаментальная модель строится по принципу сверху вниз и содержит информационные объекты, которые напрямую соответствуют реальным бизнес-объектам.

Больше всего это похоже на получение изображения реальности путем проекции этой реальности на экран.

В результате мы получаем фундаментальную информационную модель, с помощью которой можно хо-

рошо описывать только поведение тех типов объектов, которые были в нее включены.

Вполне понятно, что если мы захотим использовать нашу фундаментальную модель для создания моделей других объектов, то мы будем вынуждены в нее включить модель этого объекта.

Опыт показывает, что со временем фундаментальная информационная модель разрастается до таких больших размеров, что может содержать тысячи или даже десятки тысяч типов объектов [5].

Совершенно другой эффект можно получить, если мы будем описывать действительность не сверху вниз, а снизу вверх.

В этом случае это уже похоже на создание картины реальности с помощью цифровой фотографии или цифрового телевидения.

Здесь фундаментальная модель действительно содержит минимум объектов. В идеале – это всего лишь один объект. Но из этого объекта (пиксела), мы можем получить модели (изображения) разных объектов действительности.

Фундаментальная модель описания деятельности

Потребуем от фундаментальной модели деятельности объединения следующих видов деятельности: Стратегического, Проектного, Процессного, Операционного.

Практически на каждом выше указанном виде деятельности мы имеем дело непосредственно с деятельностью, результатом деятельности и коммуникациями между участниками деятельности, см. таблица 1.

Сама деятельность может быть разделена на два основных вида: творческая и типовая. На практике мы, как правило, имеем смешение этих видов деятельности.

Описание результата деятельности – это, по существу, описание жизненного цикла результата деятельности, где результат деятельности описывается своими представлениями, состояниями и поведением в зависимости от деятельности, которая над ним производится.

Результатом деятельности может быть и человек, который, например, проходит обучение. Люди и механизмы объединяются в организационно-технические системы.

В этом случае на первый план выходят коммуникации между людьми, которые также являются элементами деятельности.

Таблица 1.

Связь объектов деятельности с фундаментальной моделью деятельности

Предприятие	Творческая деятельность	Деятельность		Взаимодействие
Подразделение				
Проект				
Задача				
Действие				
Процесс	Типовая деятельность			
Дорожка				
Функция				
Свойство	Цель	Организационно-техническая система	Результат	
Состояние				
Поведение				
Этап	Жизненный цикл			
Фаза				
Сообщение					Коммуникация
Совещание				
Встреча				
Отгрузка				

Для деятельности нам удалось найти такую фундаментальную модель. Лучше всего ее назвать фундаментальной частицей, с помощью которой можно построить приемлемые для практики модели любых видов деятельности.

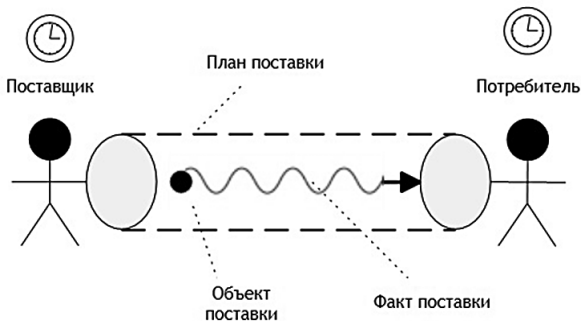


Рис. 1 Определение кванта взаимодействия

Мы назвали эту фундаментальную частицу взаимодействием или квантом взаимодействия, см. рис.1.

Любая деятельность в организационной системе состоит из взаимодействий поставщика и потребителя. Это касается как взаимодействий внутри организаций, так и взаимодействий с внешними заказчиками, поставщиками.

Квант взаимодействия может переносить не только информацию, но и материальные объекты: изделия, документы, деньги.

Сотрудник предприятия в системе также является результатом и он также может быть отправлен по определенному маршруту к месту выполнения работы.

Кроме этого, сотрудник может только временно находиться в определенном месте деятельности. Но тогда Поставщик и Потребитель в модели на рис. 1 это уже не сотрудники, а только некоторые ожидаемые места нахождения сотрудников или ожидаемые места осуществления деятельности.

Таким образом, приходим к выводу, что и движение сотрудников организации можно описать с помощью тоннелей и квантов взаимодействия. Совокупность квантов взаимодействия вокруг кванта взаимодействия-исполнителя деятельности образуют элементарный процесс или элементарное действие, см. рис. 2.

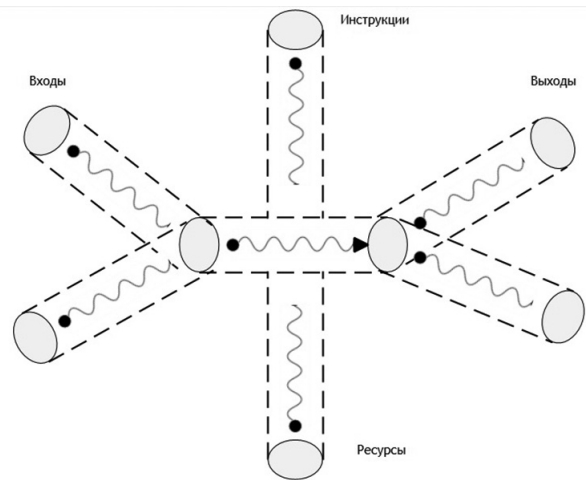


Рис. 2 Элементарный процесс, сформированный из квантов взаимодействия

Отсюда следует, что вся деятельность предприятия может быть описана с помощью квантов взаимодействия.

Литература

1. Коптелов А.к. *От описания бизнес-процессов к построению ИТ-архитектуры*// Рациональное управление предприятием. – 2009. – №5. – С.20-23.
2. Захарчук О.т. *Новый подход для автоматизации управления многоагентными организационными системами*. Высокие технологии, экономика, промышленность. Т.2, Часть 1: Сборник статей Тринадцатой международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике». 24-26 мая 2012 г. Санкт-Петербург, Россия/под ред. А.П. Кудинова. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. ISBN 978-5-7422-3440-1 - С. 47-50
3. Макухин В.М., Захарчук О.Т., Устич П.А., Иванов А.А. *Разработка новых методов моделирования, мониторинга, управления и оптимизации*

- жизненных циклов перевозок, технического обслуживания и ремонта подвижного состава железнодорожного транспорта на основе единой модели. Труды и пленарные доклады участников конференции УКИ'12 /Научное издание. Электрон. текстовые дан. - М.:ИПУ РАН, 2012 - 1 электрон. опт. Диск (CD-ROM) - ISBN 978-5-91450-100-3 - С. 789-799
4. Захарчук О.т., Пятецкий В.е., Емелин А.а. *Новый подход для автоматизации управления организационно-техническими системами.* Труды Международной научно-технической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование», Центр информационных технологий и проектирования РАН, Москва, 2012 С. 62-65.
 5. Андерсон Дж., Ларокка Д. *SAP за 24 часа.*
 6. Днепропетровск: Баланс Бизнес Букс, 2007. – 432 с
 7. Steven Weinberg. *A Unified Physics by 2050?!* Scientific American Magazine. December 1999.

Шапкин И.Н., Обухов А.Д., МГУПС (МИИТ), г. Москва

Вопросы интеллектуализации перевозочного процесса на железнодорожном транспорте

Железнодорожный транспорт по праву считается основой транспортной системы России. От стабильной работы железных дорог зависит благосостояние страны и укрепление международных связей [1]. При этом сама отрасль представляет собой сложно структурированный комплекс технических и технологических объектов, управление которыми в настоящее время является важной задачей для обеспечения непрерывной транспортировки грузов и пассажиров.

Примерами систем управления сложными объектами, для которых разрабатываются различные интеллектуальные модели управления, являются системы оперативно-диспетчерского управления энергосистемами, воздушным движением, речными портами [2], а также системы управления и организации железнодорожных перевозок.

Рассматриваемый объект управления представляет собой совокупность источников и пунктов погашения грузопотоков, объединенных единой сетью железных дорог, паромных переправ (Крымский федеральный округ), систем массовой переработки вагонопотоков – технических (сортировочных/участковых) станций. Источниками грузовых потоков служат: пункты погрузки на путях общего/необщего пользования, пункты перевалки с одного вида транспорта на другой, пограничные пункты, морские и речные порты. К основным элементами железнодорожной сети относятся: блок-участки, перегоны, линии и направления, включая железнодорожные станции, а также системы сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), линии электроснабжения, системы обеспечения тяговыми ресурсами – основные и оборотные депо.

Особая роль в системе управления железнодорожными перевозками отводится техническим станциям, на которых происходит расформирование/формирование элементов транспортного потока – составов поездов. Для управления таким сложным технико-технологическим объектом диспетчерскому аппарату в режиме реального времени необходимо производить целый ряд сложнейших аналитических расчетов и трудоемких логических операций [3] с целью отыскания единственно рационального варианта продвижения поездопотока.

Возрастающая ответственность, увеличение психоэмоциональной нагрузки поездного диспетчера при принятии им оперативных и стратегических решений требуют проведения глубоких исследований в направлении развития новых управленческих способов и приемов, обеспечивающих организацию перевозок и безопасность движения на современном уровне. Для повышения эффективности оперативного диспетчерского управления требуется создание систем экспертного уровня, позволяющих передать вычислительной технике функции по обработке больших массивов входной информации от различных линейных источников (дежурных по станции, машинистов, с напольного обслуживания) и выдаче рекомендаций в режиме on-line.

Для достижения поставленных целей предлагается решить ряд задач:

1. Автоматизировать процесс принятия решений по пропуску грузовых и пассажирских поездов по отдельных элементам участка (станциям, разъездам) → участкам → направлениям в нормальном и предаварийном (отставание поезда от графика, задержка производства работ в «окно») режимах.

2. Разработать и повсеместно внедрять интеллектуальные программные комплексы, в которых реализована возможность совершенствования отдельных элементов комплекса в процессе создания и непосредственной эксплуатации на полигонах железных дорог.

При этом обязательным условием является создание современных методов и средств формирования соответствующих моделей среды управления, объектов управления, текущих ситуаций и событий, а также их детальной классификации, порождения решений по управлению, обучению способам принятия решений с учетом всей сложности структуры реальных объектов транспортной системы.

Используемые в настоящее время модели работы сортировочных станций можно объединить в следующие группы: графические, табличные, аналитические и имитационные.

Графическая модель (примитивный вариант – точный план-график) является наглядным методом, но значительным недостатком данного метода является большая трудоемкость подготовки исходной информации и особенно составление графической модели (связано с необходимостью моделирования работы станции минимум на 10-15 суток).

Аналитические методы расчетов не могут учесть всей сложности технологических линий, значительное число фаз обслуживания, не могут с достаточной точностью учесть влияние подсистем друг на друга.

Имитационные модели – современный и актуальный метод. Однако остается не полностью решенным вопрос формализации знаний.

Особый интерес представляет метод решения данной задачи с помощью нейросетевых технологий или искусственных нейронных сетей (ИНС). ИНС представляют собой вычислительные структуры, которые моделируют биологические процессы, обычно ассоциируемые с процессами человеческого мозга. Они способны решать широкий круг задач прогнозирования, оптимизации, управления сложными организационно-техническими системами. ИНС позволяют решать не формализуемые или трудно формализуемые задачи. Очень важно, что ИНС способны к адаптивному обучению по экспериментальным данным (опыту специалистов) без построения моделей, поэтому их использование особенно эффективно для сложных систем, когда математическая модель или отсутствует, или неоправданно сложна [4-6]. Разработка ИНС является одним из подходов к созданию искусственного интеллекта на транспорте.

Основные преимущества нейросетевых технологий:

1. Возможность учесть неформализуемые зависимости (за счет обучения на примерах).

2. С помощью нейросетей можно выявлять скрытые зависимости через весовые коэффициенты. Выявлять наиболее значимые зависимости.

3. Возможность решения задачи многофакторной оптимизации (решение обратной задачи при известном min на выходе).

Таким образом, применение ИНС позволит, с одной стороны, отказаться от построения сложных и приближенных математических моделей, необходимых при традиционном использовании ЭВМ, тем более что данная проблема не всегда поддается формализации. С другой стороны, благодаря специальным методикам обучения, позволит использовать знания специалистов в данной области (обучение с учителем). После чего комплекс будет способен принимать решения в пределах этой области на уровне эксперта-профессионала.

По мере усложнения зависимости решений от ситуации использование стандартного набора алгоритмов принятия решений становится невозможным из-за проблемы размерности. В этом случае априорное решение задачи оперативного регулирования перевозочного процесса состоит главным образом в разработке модели объекта управления (промежуточной станции, станции и прилегающих к ней перегонов, участка в целом) и определяющей стратегии поиска управляющих решений на разработанной модели. В данном случае моделью является система факторов, аксиом, нормативов и правил для данного объекта управления, на основе которой формируется процесс выработки управляющей команды (воздействия), а именно то, что диспетчер знает о работе своего объекта вне зависимости от ситуационного поля.

В качестве наглядного примера аксиомы может служить утверждение о том, что после перекрытия входного сигнала на станцию грузовой поезд затратит дополнительный временной ресурс после возобновления движения и приема его на свободный станционный путь.

Остается архиважной задача стабилизации режима управления при выходе параметров системы из установленных границ: опоздание пассажирского поезда на предыдущем диспетчерском участке с последующим вводом его в пределы нормативного графика движения; скопление грузовых поездов на станции, предшествующей сортировочной и т.п. Таким образом, задача оперативного планирования заключается в планировании действий – определении последовательности операций, которые необходимо выполнить за определенный временной интервал.

Выводы

На основе приведенных данных необходимо сформулировать вывод о том, что повсеместное внедрение инновационных методов организации перевозочного

процесса на основе нейросетевых технологий позволит увеличить производительность сортировочных систем, повысить уровень безопасности и безаварийности станционных процессов, а в конечном итоге повысить конкурентоспособность железнодорожного транспорта.

Литература

1. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р].
2. Основы искусственного интеллекта: учеб. пособие / Г.Б. Бронфельд; Нижегород. гос. техн. ун-т. им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2014. – 253 с.
3. Левин Д.Ю., Толмачёв С.Н. Автоматизация работы дежурного по станции / Железнодорожный транспорт, 2013. №3. - С.56-59.
4. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001, 382 с.
5. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003, 288 с.
6. Ежов А.А., Шумский С.А. Нейрокомпьютеринг и его применение в экономике и бизнесе. – М., 1998.

Устич П.А., Иванов А.А., Чернышова Л.М., Устич Д.П., МГУПС (МИИТ), г. Москва

Математическая модель железнодорожного транспорта как важный инструмент построения эффективной системы интеллектуального управления этой отраслью

I. Актуальность вопроса. Эффективность управления любой достаточно большой системой во многом может быть обеспечена, если имеется возможность на этапе планирования того или иного управляющего решения, направленного на изменение ее состояния, предсказать реакцию рассматриваемой системы. Особенно это необходимо при планировании реформ такой большой и сложной отрасли как железнодорожный транспорт (ЖДТ) Российской Федерации, необходимость в которых обусловлена поступательным развитием науки, техники и технологий.

Никакому обществу и никогда не избежать время от времени возникающей необходимости в проведении реформ в той или иной отрасли, если, конечно, существует осознанное стремление и воля правящей элиты этого общества к достойному выживанию и даже процветанию в современном мире.

Таким образом, можно считать, что происходящие в настоящее время реформирования ЖДТ не являются последними в его истории. Поэтому никогда не поздно осмысление этого феномена экспертным сообществом. Особенно это касается такой отрасли, как ЖДТ, которая заслуженно считается кровеносной системой экономики нашей страны. При неэффективной же работе ЖДТ под угрозой исполнение ряда других функций государства.

Реформирование такой большой, сложной технико-технологической и социально-экономической системы – это, прежде всего, принятие цепи управляющих решений, направленных на изменение не только параметров системы, но и связей в ней. При этом предсказать реакцию рассматриваемой системы на это вмешательство извне, полагаясь лишь на опыт и интуицию, невозможно, о чем свидетельствует печальный опыт реформирования других отраслей в нашей и других странах.

Следовательно, необходимо средство, позволяющее вырабатывать управляющие решения, опираясь, в основном, не на так называемый метод проб и ошибок, а на системное мышление, формализованное в виде математической модели отрасли, в данном случае – ЖДТ.

Математическая модель ЖДТ позволяет не только предсказывать его реакцию на то или иное мероприятие в рамках проведения реформы, но и подойти, что называется, вплотную к решению, пожалуй, главной проблемы транспортной науки – решению двух связанных между собой задач:

Оптимизация относительно принятого критерия параметров состояния ЖДТ, количественно характеризующих его эталонное состояние, которое, конечно же, будет соответствовать действительности только на

каком-то конечном промежутке времени, так как цены на услуги и товары не постоянны.

Разработка наиболее экономически целесообразных путей максимального приближения состояния отрасли к эталонному посредством соответствующих мероприятий в рамках реформирования ЖДТ.

Методику решения этих задач, реализуемых с помощью соответствующего программного комплекса на ЭВМ, уместно рассматривать в качестве своеобразного навигатора, позволяющего в огромном социально-экономическом и технико-технологическом пространстве с хаотически изменяющейся конъюнктурой цен на товары и услуги выстраивать подходящий «маршрут» приближения состояния ЖДТ к эталонному. Реформатор должен заранее знать значения параметров эталонного состояния отрасли, ради достижения которого, собственно, и затевается ее реформа.

II. Основные положения методики построения математической модели ЖДТ

Интересующие исследователей явления, происходящие в недрах такой огромной и сложной системы, как ЖДТ, с помощью одной единственной модели учесть и изучить невозможно. Только учет взаимодействия совокупности основных хозяйств ЖДТ позволит учитывать многообразие происходящих в нем явлений.

В связи с этим возникает необходимость в определении так называемого хозяйства-носителя, на основании модели которого целесообразно построение математической модели ЖДТ в целом. Поэтому требуется определиться: каким свойством должно обладать то или иное хозяйство ЖДТ, чтобы исполнять указанную выше роль хозяйства-носителя?

Поскольку посредством вагона выполняется финишная операция в технологии производства продукции ЖДТ, то результаты работы персонала других хозяйств транспорта отражаются на показателях использования вагонов по назначению, их надежности и безопасности. Неслучайно, что с помощью такого показателя, как оборот вагона, нередко оценивается эффективность функционирования ЖДТ в целом. Так, например, в качестве комплексного показателя эффективности реформирования ЖДТ нашей страны в предвоенные годы, начиная с 1933 года, использовался тот факт, что к 1940 году оборот вагона ЖДТ СССР оказался в два раза меньше, чем на ЖДТ США при сопоставимых территории и объемах перевозочной работы.

Итак, математическую модель вагоно-линейного хозяйства (ВЛХ), ведомого в настоящее время вагонным хозяйством (ВХ) нового образца и тремя вагоноремонтными компаниями (ВРК), целесообразно использовать в качестве упомянутого выше носителя

математической модели ЖДТ в целом. В [1] сформулированы принципы и алгоритм взаимодействия модели ВЛХ с моделями других хозяйств ЖДТ. Обосновано положение, согласно которому модель ВЛХ может служить в качестве усеченной модели ЖДТ в целом [2].

Таким образом, решение поставленной задачи следует начинать с разработки математической модели ВЛХ, для чего определимся сначала с таким понятием как «модель объекта». Под моделью объекта в общем случае следует понимать некий другой объект, который ведет себя аналогичным образом относительно цели исследования. Поэтому требуется, прежде всего, сформулировать цель исследования рассматриваемого объекта, а затем эту цель представить в виде математического выражения, которое, как известно, принято называть целевой функцией (ЦФ) рассматриваемого объекта, то есть ВЛХ.

Предъявим два следующих требования к ЦФ объекта. Она должна:

1. Отражать качество функционирования объекта на ранг выше рассматриваемого. Этим объектом в данном случае является ЖДТ.
2. Соответствовать возможностям информационной базы отрасли, то есть ЖДТ.

С помощью первого требования к ЦФ учитывается то обстоятельство, что система управления ЖДТ является многоуровневой и иерархической по своей структуре и характеру. Это позволяет планировать и осуществлять руководство ею, опираясь на дедуктивную логику, что означает следующее.

Исходя из глобальной цели ЖДТ, формируются цели для руководителей в соответствии с их положением в упомянутой многоуровневой иерархической структуре системы управления отраслью, то есть ЖДТ в целом. Аналогичное правило справедливо между ЖДТ и экономикой страны и так далее.

Относительно второго требования к целевой функции заметим, что наилучшим количественным показателем качества функционирования транспорта в целом является себестоимость единицы тонно-километровой работы. Однако существующая информационная база отрасли пока не готова к использованию указанного количественного показателя работы ЖДТ. Поэтому в качестве ЦФ допустимо на первых порах использовать себестоимость единицы пробега (СЕП) вагона, чему, впрочем, способствуют то обстоятельство, что можно при желании выйти на тонно-километровое измерение работы ЖДТ с помощью такого показателя его работы, как коэффициент порожнего (а значит, и груженого) пробега вагона.

Формула себестоимости единицы пробега вагона имеет следующий вид:

$$f(l_{ij}) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \psi_i^{(4)} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \psi_{ij}^{(3)} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i+1} (a_{ij} l_{ij} + b_{ij} l_{ij}^2)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i+1} l_{ij}} + \frac{\psi^{(1)} - \psi^{(2)} + \sum_k \psi_k^{(15)}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i+1} l_{ij}}, \quad (1)$$

где m_i – структура i -го ремонтного цикла вагона рассматриваемого типа [3]; n – количество ремонтных циклов за срок службы вагона; $\psi^{(1)}$, $\psi^{(2)}$ – покупная и ликвидная цены вагона, соответственно; $\psi_{ij}^{(3)}$ – затраты на j -й деповской ремонт (ДР) вагона в пределах i -го ремонтного цикла; $\psi_i^{(4)}$ – затраты на i -й капитальный ремонт (КР) вагона; a_{ij} , b_{ij} – параметры роста затрат на текущий ремонт (ТР), техническое обслуживание (ТО) и контроль технического состояния вагона на ПТО по мере его старения [3]; $\psi_k^{(15)}$ – годовые издержки k -го хозяйства ЖДТ (кроме ВЛХ), приведенные к одному вагону рассматриваемого типа; (l_{ij}) – матрица межремонтных пробегов, каждый элемент которой l_{ij} есть j -й межремонтный пробег вагона в пределах i -го ремонтного цикла.

Целевая функция (1) непосредственно или косвенно определена на параметрах, представленных в таблице 1. В соответствии с вышеупомянутым первым требованием к ЦФ, параметры, представленные в этой таблице, являются параметрами состояния, строго говоря, ВЛХ как усеченной модели ЖДТ в целом. Заметим, что ЦФ, как видно из формулы (1), определена, правда, косвенно, также на параметрах состояния других хозяйств ЖДТ через параметр $\psi_k^{(15)}$. Как отмечено в [4], величина этого параметра должна соответствовать оптимальным параметрам состояния k -го хозяйства ЖДТ кроме ВЛХ. Доказано, что функция многих переменных (1), которую можно представить в виде:

$$\Phi(l_{ij}, \psi^{(1)}, \psi^{(2)}, \dots, \psi^{(22)}), \quad (2)$$

имеет глобальный минимум (пояснения к доказательству приведены в [3]).

Наложив на параметры состояния ЖДТ (таблица 1) соответствующие ограничения и присоединив их к формуле (2), получена математическую модель ЖДТ. Требуется найти такие значения параметра состояния ЖДТ, при которых функция (2) принимает минимальное значение. При этом, как отмечено в [5], из списка оптимизируемых параметров следует исключить параметр безопасности вагона ($\psi^{(11)}$), протяженность гарантийного участка ПТО ($\psi^{(14)}$), риск схода вагона с рельсов ($\psi^{(19)}$), (а, стало быть, и крушения поезда), и тариф на транспортировку груза ($\psi^{(21)}$). Первые три параметра напрямую связаны с безопасностью движения, и их, следовательно, некорректно оптимизировать относи-

тельно критериев, непосредственно влияющих на глобальный экономический показатель работы отрасли.

Таблица 1.

Параметры состояния ЖДТ		
№ п/п	Параметр	Обозначение
1	Покупная цена вагона рассматриваемого типа	$\psi^{(1)}$
2	Ликвидная цена вагона рассматриваемого типа	$\psi^{(2)}$
3	Норматив затрат на деповской ремонт вагона рассматриваемого типа	$\psi^{(3)}$
4	Норматив затрат на капитальный ремонт вагона рассматриваемого типа	$\psi^{(4)}$
5	Норматив затрат на текущий отцепочный ремонт (ТР) вагона	$\psi^{(5)}$
6	Удельные затраты на безотцепочный ТР, техническое обслуживание (ТО) и контроль технического состояния вагона на ПТО	$\psi^{(6)}$
7	Удельные затраты на подготовку вагона к погрузке	$\psi^{(7)}$
8	Возрастной состав парка вагонов рассматриваемого типа	$s\psi^{(8)}$
9	Мощность ремонтного хозяйства вагонов рассматриваемого типа	$\psi^{(9)}$
10	Коэффициент технологического запаса мощности ремонтного хозяйства вагонов рассматриваемого типа	$\psi^{(10)}$
11	Параметр безопасности вагона рассматриваемого типа	$\psi^{(11)}$
12	Оборот вагона рассматриваемого типа	$\psi^{(12)}$
13	Нижняя и верхняя границы доверительного интервала для параметра качества ДР вагона	$\psi_H^{(13)}, \psi_B^{(13)}$
14	Протяженность гарантийного участка ПТО вагонов	$\psi^{(14)}$
15	Годовые издержки k -го хозяйства ЖДТ (кроме ВЛХ), приведенные к одному вагону	$\psi^{(15)}$
16	Планируемый годовой объем перевозок грузов для парка вагонов рассматриваемого типа	$\psi^{(16)}$
17	Среднесуточный пробег вагона рассматриваемого типа	$\psi^{(17)}$
18	Осевая нагрузка вагона рассматриваемого типа	$\psi^{(18)}$
19	Риск схода вагона с рельсов	$\psi^{(19)}$
20	Коэффициент точности решения задачи	$\psi^{(20)}$
21	Тариф на транспортировку груза в вагоне рассматриваемого типа	$\psi^{(21)}$
22	Риск того, что интервал $[\psi_H^{(13)}, \psi_B^{(13)}]$ не покрывает фактическое значение показателя качества ДР вагона рассматриваемого типа	$\psi^{(22)}$

Параметр $\psi^{(22)}$ следует оптимизировать в рамках объекта более высокого уровня, в данном случае – в рамках экономической модели РФ.

В МИИТе на кафедре «Вагоны и вагонное хозяйство» разработаны методы оптимизации параметров $\psi^{(11)}$, $\psi^{(14)}$, а также получена формула для определения параметра $\psi^{(19)}$ [6].

Полученные значения этих параметров, а также $\psi^{(21)}$, следует использовать при решении оптимизационной задачи

$$\Phi(l_{ij}, \psi^{(1)}, \psi^{(2)}, \dots, \psi^{(22)}) \rightarrow \min \quad (3)$$

на правах констант. Тем самым будет обеспечено нормирование этих четырех параметров состояния ЖДТ [7].

По причинам, указанным в [1], наиболее приемлемым методом решения задачи (3) является метод динамического программирования. Однако для этого необходимо, чтобы формула (1) была аддитивной, которой она не является. Для превращения ее в таковую достаточно предварительно определить оптимальную матрицу межремонтных пробегов $[l_{ij}]$ вагона с помощью решения разработанной в МИИТе оптимизационной задачи [5]:

$$\left\{ \begin{array}{l} f(l_{ij}) \rightarrow \min; \\ l_{ij} \leq \psi^{(11)}; \\ \left| \frac{\psi^{(9)}}{I(l_{ij})} - \psi^{(10)} \right| \leq \psi^{(20)}; \\ \left. \begin{array}{l} \psi_i^{(13)} \leq \frac{l_{ij}}{l_{11}} \leq \psi_A^{(13)} \quad i \neq j, \quad j = \overline{2, m_1}; \\ \psi_i^{(13)} \leq \frac{l_{ij}}{l_{11}} \leq \psi_A^{(13)} \quad i \neq j, \quad i = \overline{2, n}, j = \overline{2, m_i}, \end{array} \right\} \quad (7)$$

которая может быть использована при решении задачи (3) методом динамического программирования в качестве вспомогательной по отношению к оптимизационной задаче (3). Здесь $P(l_{ij})$ потребность в ДР вагонов рассматриваемого типа в течение интересующего нас календарного года, методика определения которой приведена в [3].

Приведем некоторые пояснения к трем типам используемых в задаче (4)–(7) ограничений на объект оптимизации, то есть на матрицу межремонтных пробегов (l_{ij}) . Ограничение (5): любой пробег вагона между плановыми ремонтами не должен превышать значения параметра безопасности вагона (обозначенного $l_{БД}$), под которым понимается максимально допустимый пробег вагона между его глубокими диагностиками. Под глубокой диагностикой вагона понимается тот объем диагностических работ, который выполняется в рамках ДР или КР. В рассматриваемой оптимизационной задаче требуется использовать оптимальное значение параметра безопасности вагона. В качестве целевой функции в оптимизационной задаче используется формула коэффициента оперативной готовности вагона (один из комплексных показателей надежности изделия) [3]:

$$K_{ог}(l_{БД}) = \frac{\int_0^{l_{БД}} \bar{F}(y+z) dy}{\int_0^{l_{БД}} \bar{Q}(y) dy + y_1 + (y_2 - y_1) \cdot F(l_{БД}) + (y_3 - y_2) \cdot Q(l_{БД})}, \quad (8)$$

Где $F(y)$ – функция распределения (ФР) наработки вагона до появления в его конструкции опасного повреждения; $\bar{F}(y) = 1 - F(y)$; $Q(y)$ – функция рас-

пределения наработки вагона до обнаружения в нем опасного повреждения; $\bar{Q}(y) = 1 - Q(y)$; y_1 – средняя продолжительность ДР вагона планово-предупредительного характера (ДР₁); y_2 – средняя продолжительность ДР вагона планово-аварийного характера (ДР₂); y_3 – средняя продолжительность текущего ремонта вагона непланово-аварийного характера; z – продолжительность технологически необходимого времени использования вагона по назначению (оборот вагона).

Требуется найти то значение $l_{БД}$, при котором ЦФ (8) примет максимальное значение.

Однако, чтобы воспользоваться ЦФ (8), необходимо располагать технологией производства эксплуатационных данных, пригодных для идентификации ФР $F(y)$, то есть данных о наработках вагонов до появления (не обнаружения!) опасных повреждений.

Для этого следует развернуть на сети железных дорог автоматизированную систему контроля (АСК) своевременного обнаружения опасных повреждений вагонов в процессе их использования по назначению. Для развертывания на сети АСК созрела следующая необходимая совокупность условий:

- функционирует система ЦПУВ, ведомая ГВЦ ОАО «РЖД»;
- функционирует отечественная космическая навигационная система «ГЛОНАСС»;
- действует налаженная за многие десятилетия технология протоколирования так называемых узловых событий относительно технического состояния вагонов;
- субъект управления системой АСК – ревизорский аппарат на каждой дороге ЖДТ РФ.

Система АСК является системой двойного назначения:

- а) для получения эксплуатационных данных о наработках вагонов до появления в них опасных повреждений;
- б) для мониторинга качества работы буквально каждого осмотрика вагонов.

Технология мониторинга

1. Построить древовидную модель аварийности вагона, для чего следует:

- предварительно задаться завершающим событием, (обозначенным T)

$$T = \left\{ \begin{array}{l} \text{За рассматриваемый период времени } t \\ \text{вагон сойдет с рельсов} \end{array} \right\}$$

- и, полагаясь на ответы экспертов на соответствующие вопросы, построить упомянутую модель [6].

На рис. 1 показана древовидная модель аварийности вагона (кружками обозначены неразлагаемые события, а квадратами – разлагаемые). Связи между событиями отображаются с помощью логических операторов: «И»

(обозначено \square) и «ИЛИ» (обозначено \oplus).

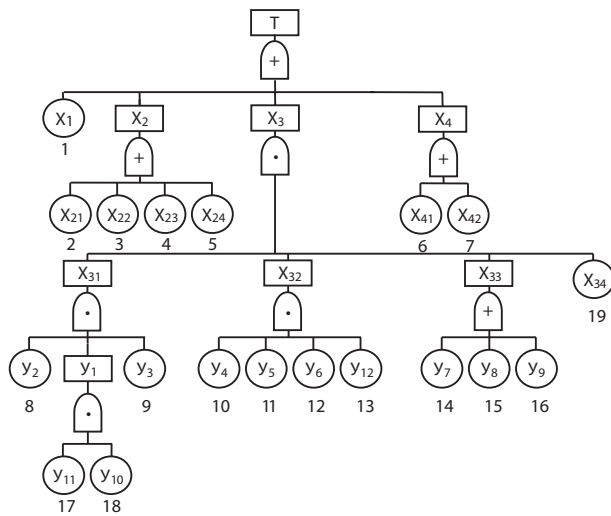


Рис.1. Древовидная модель аварийности вагона

На рисунке: x_1 – разрушение колеса; x_2 – обрыв и падение на путь деталей; x_3 – вкатывание гребня колеса на головку рельса; x_4 – разрушение шейки оси; x_{21} – боковина тележки; x_{22} – надрессорная балка; x_{23} – детали ударно-тягового механизма; x_{24} – детали автотормозного оборудования; x_{31} – угол набегания колеса на рельс превышает допуск; x_{32} – угол наклона образующей гребня колеса к горизонтали вне пределов допуска; x_{33} – горизонтальная составляющая нагрузки на колесо намного превышает вертикальную; x_{34} – неблагоприятное сочетание параметров пути и ходовых частей вагона; x_{41} – разрушение сепаратора подшипника буксы; x_{42} – разрушение кольца подшипника; y_1 – перекоз колесных пар в тележке; y_2 – неотрегулированность зазоров скользунaх; y_3 – завышение фрикционных клиньев; y_4 – отклонение технических характеристик рессорного подвешивания от номинала превышает допуск; y_5 – разность диаметров колес в колесной паре превышает допуск; y_6 – «забегание» боковых рам тележки; y_7 – нарушение режима движения поезда в кривых малого радиуса; y_8 – поперечное смещение центра масс груза вне пределов допуска; y_9 – выжимание порожнего вагона; y_{10} – превышение нормы зазоров в продольных и поперечных направлениях между корпусом буксы и боковиной тележки; y_{11} – износ опорных поверхностей боковины тележки превышает допуск.

Так как древовидное представление модели аварийности вагона не приспособлено к количественному определению вероятности завершающего события (в данном случае события T), то от древовидного представления рассматриваемой модели перейдем к двухполюсному.

Для этого воспользуемся методом нахождения подмножеств минимальных сечений дерева событий (ДС)

[10]. При этом воспользуемся тем обстоятельством, что список основных событий (элементов ДС), принадлежащих к множеству минимальных сечений, имеет матричную структуру. Строится искомая матрица согласно следующему мнемоническому правилу:

- если промежуточным (или вершинным) событием управляет оператор «ИЛИ», то заменяем это событие на входные (в оператор) элементы отдельным столбцом;
- если же промежуточным (или вершинным) событием управляет оператор «И», то заменяем это промежуточное событие на входные (в этот оператор) элементы в виде отдельной строки.

Заметим, сечение есть характеристика системы, это та совокупность элементов, отказ которых гарантирует отказ системы [10, с. 183].

В результате получена матрица минимальных сечений ДС [6]:

$$\begin{pmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 8 & 17 & 18 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 19 \\
 8 & 17 & 18 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 15 & 19 \\
 8 & 17 & 18 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 16 & 19 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 & 0 & 0 & 0 & 0
 \end{pmatrix}$$

Каждая строка этой матрицы есть минимальное сечение. В итоге получаем последовательно-параллельную структуру системы (сход вагона с рельсов).

Воспользовавшись методом нахождения подмножеств минимальных сечений дерева событий (рис. 1), получим двухполюсную модель аварийности вагона [6] (рис.2).

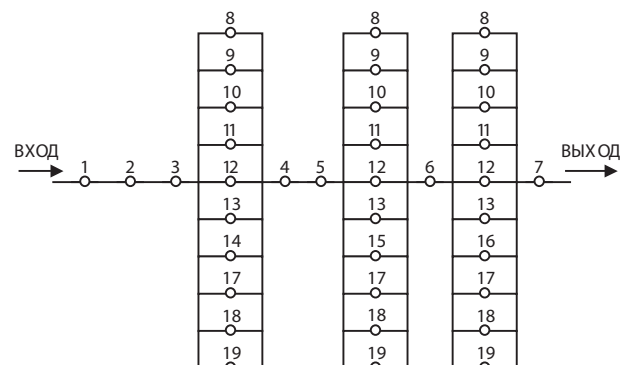


Рисунок 2. Двухполюсная модель аварийности вагона

Из данного рисунка видна огромная разница между двумя группами опасных повреждений вагона в смыс-

ле влияния на сход его с рельсов, что должно учитываться при проектировании вагона:

- а) группа опасных повреждений, появление каждого из которых чревато крушением поезда (их номера с 1 по 7);
- б) каждое опасное повреждение второй группы десятикратно зарезервировано относительно появления завершающего события T .

Наличие двухполюсного представления модели аварийности позволяет получить формулу риска крушения поезда, которому предшествует, как правило, сход вагона с рельсов.

$$G(t) = 1 - \prod_{i=1}^7 \bar{F}_i(t) \cdot \prod_{j=14}^{16} [1 - B \cdot F_j(t)], \quad (9)$$

где

$$B = \prod_{k=8}^{13} F_k(t) \cdot \prod_{j=17}^{19} F_j(t); \quad \bar{F}_i(t) = 1 - F_i(t); \quad \bar{F}_i(t) = 1 - F_i(t).$$

2. Благодаря древовидной модели аварийности (рис. 1) получаем список элементов конструкции вагона и типы их повреждений, которые могут привести к сходу вагона с рельсов.
3. С помощью специальных средств производится муляжирование упомянутых составных частей под их опасные повреждения (их номера с 1 по 7, см. рис. 1) определенной совокупности из номеров вагонов определенного типа и одного года изготовления, находящихся в ДР. Работа выполняется сотрудниками ревизорского аппарата дороги (или РКЦУ).
4. О номерах вагонов, оборудованных муляжированными элементами их конструкций, датах начала их нормального использования по назначению конфиденциально сообщается в ГВЦ ОАО «РЖД».
5. ГВЦ ОАО «РЖД» с помощью космической системы «ГЛОНАСС» отслеживает траекторию перемещения по сети железных дорог во времени каждого из номеров подконтрольных вагонов. При этом фиксируются ПТО станций, где не были замечены нанесенные признаки опасных повреждений вагонов.
6. Работники ПТО тех станций, где были замечены муляжи повреждений, мотивированы к подаче сведений в ГВЦ ОАО «РЖД» в установленной форме, так как, с одной стороны, перед началом функционирования системы мониторинга они под расписку были оповещены о начале работы указанной системы. С другой стороны, неподача сведений об обнаружении муляжей повреждений означает брак в работе конкретного осмотрщика вагонов.

Таким образом, получаем выборку наработок в скрытом аварийном состоянии (САС) каждого элемента конструкции вагонов рассматриваемой совокупности (из N единиц) муляжированного под опасное повреждение (ОП).

Основные этапы получения функций $F(y)$ и $Q(y)$, входящих в формулу ЦФ (8)

1. С помощью системы ЦПУВ в соответствии со стандартным планом испытаний на надежность [NRT] накапливаются данные о наработках вагонов указанной совокупности до обнаружения опасных повреждений, типы которых выявлены в процессе построения древовидной модели аварийности вагона.

2. Формируются массивы указанных данных относительно каждого из девятнадцати типов опасных повреждений. Введём обозначение: y_{ij} – наработка j -го вагона до обнаружения в нем опасного повреждения i -го типа.

3. С помощью известных методов определяем функцию распределения $Q_i(y)$ случайной величины, обозначенной η_i , где $i=1-19$, которая порождает выборку

$$y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in}, \dots \quad (1.1)$$

Заметим: под наблюдением ЦПУВ в данном случае находятся только муляжированные вагоны.

4. Используя АСК своевременного обнаружения опасных повреждений вагонов рассматриваемой совокупности в период их использования по назначению (за время T), формируется выборка наработок

$$z_{i1}, z_{i2}, z_{i3}, \dots \quad (1.2)$$

где z_{ij} – наработка вагона j -го вагона в САС из-за наличия в нем опасного повреждения i -го типа.

5. Формируется массив данных

$$x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots \quad (1.3)$$

где x_{ij} – наработка j -го вагона до появления в нем опасного повреждения i -го типа согласно выражению:

$$x_{ij} = y_{jp} - z_{ij} \quad (1.4)$$

6. Имея выборку (1.3), находим функцию распределения $F_i(y)$ случайной величины ξ_i – наработка вагона до появления опасного повреждения i -го типа.

7. Располагая законами распределения наработки вагона до появления опасного повреждения i -го типа $F_i(y)$ и его обнаружения $Q_i(y)$ (где $i=1-19$), требуется найти выражение для $F(y)$ и $Q(y)$, входящих в целевую функцию (8). Для этого воспользуемся по сути дела структурной функцией рассматриваемой системы, т.е. формулой риска крушения поезда (9) [6]:

$$G(t) = 1 - \prod_{i=1}^7 \bar{G}_i(t) \cdot \prod_{k=14}^{16} [1 - B \cdot G_k(t)], \quad (10)$$

$$\text{где } B = \prod_{i=8}^{13} G_i(t) \cdot \prod_{j=17}^{19} G_j(t);$$

$G_n(t)$ – функция распределения интересующий нас случайной величины:

$$G_n(t) = \begin{cases} P\{\xi_n \leq t\}, & \text{если речь идет о наработке вагона до появления ОП;} \\ P\{\eta_n \leq t\}, & \text{если речь идет о наработке вагона до обнаружения ОП.} \end{cases}$$

Воспользуемся формулой (6) следующим образом. Сначала, подставляя в формулу (10) вместо $G_n(t)$ функцию $Q_i(t)$, получим формулу функции распределения $Q(y)$, то есть функции распределения наработки вагона до обнаружения одного из девятнадцати опасных повреждений.

Затем, подставляя в ту же формулу (6) вместо $G_n(t)$ функцию $F_n(t)$, получим формулу функции распределения наработки вагона до появления опасного повреждения, то есть $F(y)$.

8. Находим то значение $l_{БД}$, при котором целевая функция (8) принимает максимальное значение.

К сожалению, на этом не заканчиваются трудности, связанные с решением оптимизационной задачи (4)–(7). Как выше было отмечено, с целью устранения ограничения на использование метода динамического программирования при решении оптимизационной задачи (3) достаточно предварительно определить матрицу межремонтных пробегов $[l_{ij}]$ с помощью решения задачи (4)–(7). Для этого следует располагать значениями ряда параметров состояния ЖДТ, которые фигурируют в задаче (4)–(7). Однако эти параметры можно определить, только решив задачу (3).

Для разрешения данной коллизии в [4] приведена методика определения матрицы $[l_{ij}]$ с помощью метода итераций. Тем самым полностью снимается ограничение на решение задачи (3) с помощью метода динамического программирования с целью получения количественной оценки эталонного состояния отрасли (то есть определение оптимальных параметров состояния ЖДТ, представленных в таблице 1).

Остается только позаботиться о том, чтобы было обеспечено эффективное использование результатов решения задачи (3). Это может быть достигнуто на практике, если вагон на этапе его проектирования будет вписан в эксплуатационную среду, (как это принято говорить, например, при вписывании его в габарит). Таким образом, сам процесс проектирования вагона должен представлять собой процесс вписывания его в эксплуатационную среду вагона, имеющую следующие составляющие:

- процесс использования вагона по значению, интенсивность которого количественно определяется величиной его оборота ($\psi^{(12)}$) и среднесуточного пробега ($\psi^{(17)}$);
- динамическая, статическая, климатическая и иная нагруженность вагона, интенсивность которой определяется темпом накопления повреждений в материале его конструкции и которая реализуется в виде отказов вагона в случайные моменты времени;
- технический уровень предприятия линейного вагонного хозяйства, который количественно характеризуется мощностью ремонтного хозяйства ваго-

нов рассматриваемого типа ($\psi^{(9)}$), себестоимостью и качеством технического содержания вагонов ($\psi^{(13)}$, $\psi^{(10)}$), а также косвенно – параметрами $\psi^{(3)}$, $\psi^{(4)}$, $\psi^{(5)}$, $\psi^{(6)}$ и $\psi^{(7)}$ (см. табл. 1).

Парирование последствий существующей практики проектирования вагонов в дореформенный период в определенной мере осуществлялось вагонным хозяйством благодаря отработанной за многие годы системе управления техническим состоянием вагонов (УТЦВ), в основе которой лежат пять связанных между собой функций:

- 1) своевременное обнаружение повреждений и отказов вагонов в процессе использования их по назначению;
- 2) техническое обслуживание и текущий ремонт вагонов в пути следования;
- 3) подготовка вагонов к погрузке;
- 4) техническая ревизия определенных агрегатов и ремонт вагонов крупного объема;
- 5) разработка технических требований и заказ новых вагонов, модернизация и исключение устаревших вагонов из эксплуатации.

Достигнутый в результате реализации этих функций некий баланс в соотношении «уровень безопасности движения (БД) – затраты на техническое содержание вагонов» оказался сегодня под угрозой в результате проводимой реформы. Так, вместо одного единственного субъекта в системе УТЦВ (ВХ старого образца) появились три независимых и не конкурирующих между собой субъекта, имеющих несовпадающие интересы. Это: вагонное хозяйство нового образца, которое исполняет первые три из указанных функций системы УТЦВ, три конкурирующих между собой вагоноремонтных компании (ВРК), исполняющие четвертую функцию, а также исполнитель пятой функции системы УТЦВ – многочисленное, но не сплоченное организационно сообщество собственников вагонов. Причем упомянутый дефицит сплоченности негативно отражается на качестве научного сопровождения исполнения весьма ответственной и наукоемкой функции системы УТЦВ применительно дважды, так сказать, бесхозному подвижному составу. Во-первых, грузовой вагон не приписан к конкретному ремонтному предприятию и к тому же используется по назначению по так называемой регулировке. Во-вторых, собственники вагонов исполняют и операторские функции, вследствие чего, в первую очередь, возникает вопрос о совместимости второй функции собственников вагонов со стратегией использования вагонов по так называемый регулировке, которая в купе с отсутствием приписки к конкретному ремонтному предприятию является следствием господствующего с 1869 года принципа бесперегрузочного передвижения

Краткий анализ основных функций системы УТЦВ

Функция	Проблема	Причины	Пути решения	Эталон, к которому следует стремиться
Своевременное обнаружение повреждений и отказов вагонов в пути их следования	Обусловлена противоречиями между требованиями ПТЭ и возможностями работников ПТО обеспечить 100-процентное безаварийное проследование вагонов по гарантийному участку ПТО	<ul style="list-style-type: none"> - Ограниченная или нулевая контролепригодность некоторых ответственных элементов конструкции вагона; - Осмотрщики вагонов не вооружены техническими средствами обнаружения повреждений; - Дефицит времени на осмотр вагона и тяжёлые условия работы осмотрщиков. 	<ul style="list-style-type: none"> - Разработка эффективных технологий контроля технического состояния поездов; - Повышение квалификации и технологической дисциплины осмотрщиков; - Внедрение стационарных и переносных технических средств обнаружения повреждений; - Повышение контролепригодности вагонных конструкций в эксплуатации. 	<p>Полная автоматизация рассматриваемой функции за счёт:</p> <ul style="list-style-type: none"> - использования встроенных в материал ответственных элементов конструкции вагонов датчиков, способных фиксировать их предельное состояние; - устройств автоматической передачи показаний датчиков в отраслевую компьютерную сеть.
Техническое обслуживание и текущий ремонт вагонов в пути следования	Для повышения крайне низкой производительности труда ремонтников ПТО (даже по меркам ДР) необходимо основные объёмы работ по ТР производить на пунктах отцепочного текущего ремонта. Однако это противоречит интересам работников других служб (движения и пути).	<p>Низкая производительность труда из-за:</p> <ul style="list-style-type: none"> - разбросанности рабочих позиций в пределах парков технической станции, что мешает обеспечить требуемый уровень механизации труда; - больших затрат времени и энергии на переходы от одного неисправного вагона к другому; - интервальности прибытия поездов, из-за чего 40% рабочего времени работники простаивают; - плохих и вредных условий труда. 	<ul style="list-style-type: none"> - Требуется разработать такие показатели работы движенцев и путейцев, при которых они были бы заинтересованы в производительном и качественном ТР вагонов на ПТО; - Расширить список повреждений и отказов, по которым вагоны следует подавать в текущий отцепочный ремонт. 	<ul style="list-style-type: none"> - Вагоны даже с незначительными повреждениями отцепляются от состава и подаются в специализированные отапливаемые помещения, которые оборудованы средствами диагностики, подъёмно-транспортным оборудованием и другими средствами механизации труда; - Агрегатный метод ремонта; - Технологии безразборной диагностики; - Доступ к отраслевой компьютерной базе данных о каждом вагоне.
Техническая ревизия соответствующих агрегатов вагонов, а также их ремонт крупного объема	Руководство вагонных депо в силу известных причин имеет возможность особо не опасаясь наказаний отбирать вагоны, в первую очередь, с наименьшими объемами восстановительных работ.	<ul style="list-style-type: none"> - Различный уровень изношенности и повреждаемости вагонов даже одного года выпуска на момент постановки ДР; - Дефицит материалов и запасных частей; - Сумма компенсации за ДР, получаемая вагонным депо, является фиксированной и не зависит от действительных затрат предприятия. 	<ul style="list-style-type: none"> - Использовать и совершенствовать разработанную на базе ДИСПАРК технологию автоматизированной постановки вагонов по пробегу в ДР; - При этом следует помнить, что посредством этой технологии реализуется затратный механизм организации ДР; - Установить порядок контролепригодного протоколирования фактических затрат депо на ДР каждого вагона и передачу этих данных в отраслевую компьютерную сеть (согласно указанию МПС №А-308А от 07.04.2000 г.) 	<p>ДР по техническому состоянию вместо действующей стратегии ДР по наработке.</p> <p>Для чего:</p> <ul style="list-style-type: none"> - установить периодичности глубоких диагностик вагонов различного типа; - организовать на МПРВ отделения глубокой диагностики; - разработать и внедрить экспертный метод глубокой диагностики; - желательно перейти на новую технологию ТР.

грузовых вагонов по сети железных дорог России. Понятно, что этот принцип обусловлен известным всем географическим фактором (огромная территория страны), который вряд ли целесообразно нарушать (и не только в экономическом смысле).

Во избежание ситуации, описанной в известной басне Крылова «Лебедь, рак и щука», требуется разработка научно обоснованных рекомендаций и мероприятий, направленных на консолидацию интересов и действий указанных выше субъектов системы УТЦВ. В этой связи, во-первых, чтобы обеспечить исполнение упомянутого принципа бесперегрузочного передвижения грузовых вагонов на сети железных дорог

страны, целесообразно разработать вариант взаимоотношений между ОАО «РЖД» и собственником вагонов, согласно которому ОАО «РЖД» получает от собственника вагоны в аренду на определенный срок для их эксплуатации по технологии, оправдавшей себя в течение многих десятилетий. При этом под термином «эксплуатация изделия» понимается процесс его существования, при котором оно используется по назначению, технически обслуживается и ремонтируется. Во-вторых, характер и степень взаимодействия субъектов системы УТЦВ должны быть адекватны тем связям, которые существуют между параметрами системы ТОР вагонов. В-третьих, указанные мероприятия должны

быть, в основном, нацелены на эффективную реализацию рекомендаций, полученных в результате анализа основных функций системы УТСВ, представленной в виде таблицы 2 [4].

В результате этого анализа относительно каждой из трех наиболее важных функций системы УТСВ сформулирована проблема, причина ее появления, возможные пути решения проблемы и эталонная технология исполнения функции, к которой следует стремиться.

Однако указанные в данной таблице пути решения проблемы исполнения функций системы УТСВ и продвижение к эталонным технологиям их исполнения должны быть согласованы таким образом, чтобы ВЛХ и ЖДТ в целом функционировали в оптимальном относительно заранее выбранного критерия режиме.

Для практической реализации этой рекомендации целесообразно на этапе проектирования вагона использовать в оптимизационной задаче (4)–(7) новый для транспортной науки объект исследования: система «вагон – эксплуатационная среда». Именно этой оптимизационной задаче отведена роль инструмента для разработки мероприятий, направленных на консолидацию интересов упомянутых выше трех субъектов системы УТСВ.

В связи с этим, на этапе проектирования вагонов рекомендуется как минимум предусмотреть:

- а) на основе тщательного анализа конструкции вагона-аналога как объекта контроля технического состояния (ТС), технического обслуживания (ТО) и текущего ремонта (ТР) согласно алгоритму, представленному на рис. 3, разработать конкретные конструкторские рекомендации в части повышения уровня ремонтпригодности проектируемого вагона [3, с. 222-224];
- б) на аргументы целевой функции (1) или, что то же самое, на объект оптимизации следует наложить следующие ограничения (или требования).
 1. Объект оптимизации должен исполнять роль связующего звена между объектами различной природы - конструкцией вагона и его эксплуатационной средой, описание которой приведено выше.
 2. Должен быть удобным для наложения на него следующих ограничений:
 - 2.1. обеспечивающих безопасность движения;
 - 2.2. позволяющего учитывать существующие мощности ремонтной базы вагонов рассматриваемого типа;
 - 2.3. обеспечивающего требуемый уровень качества ДР.
 3. Позволяющие учитывать следующие обстоятельства:

3.1. По мере старения вагона возникает необходимость в более частой его постановке в глубокую диагностику. Чтобы учесть это обстоятельство, будем полагать, что по мере старения вагона должна увеличиваться структура каждого последующего его ремонтного цикла.

3.2. Максимальное количество капитальных ремонтов за срок службы вагона не должно противоречить здравому смыслу экспертов, о чем следует помнить при формировании исходных данных в виде множества матриц типа (11), которое является областью определения целевой функции (1).

Указанным требованиям удовлетворяет матрица межремонтных пробегов вагонов трапециевидальной конфигурации:

$$[l_{ij}] = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1m_1} & & & \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2m_2} & \dots & l_{11} & \\ \vdots & & & & & & \\ l_{n1} & l_{n2} & \dots & l_{nm_1} & \dots & l_{nm_2} & \dots & l_{nm_n} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где l_{ij} – j -й межремонтный пробег вагона в пределах i -го ремонтного цикла.

Свойства матрицы (8):

1. Число строк на единицу больше числа капитальных ремонтов за нормативный срок службы (НСС) вагона;
2. Количество элементов в i -й строке матрицы на единицу больше числа деповских ремонтов в пределах i -го ремонтного цикла.
3. Сумма элементов матрицы (11) есть нормативный срок службы вагона.

Итак, если из заданного множества матриц типа (11) выделена та, которая удовлетворяет задаче (4)–(7), то получаем оптимальные значения:

- НСС вагона;
- количества КР вагона за НСС вагона;
- числа ДР вагона в пределах каждого ремонтного цикла;
- межремонтных пробегов вагона.

В заключение отметим, что благодаря предлагаемой методике представляется возможным практически освоить решение указанной выше важной задачи транспортной науки, а именно: количественная идентификация эталонного состояния отрасли. Это позволит разрабатывать научно обоснованные рекомендации в части реформирования рассматриваемой отрасли не только в настоящее время, но, что особенно важно, и в будущем.

Используемая в рамках рассматриваемой методики многоуровневая модель управления отраслью позволяет анализировать ту или иную проблему на различных уровнях управления транспортом от линейного до государственного и даже мирового.

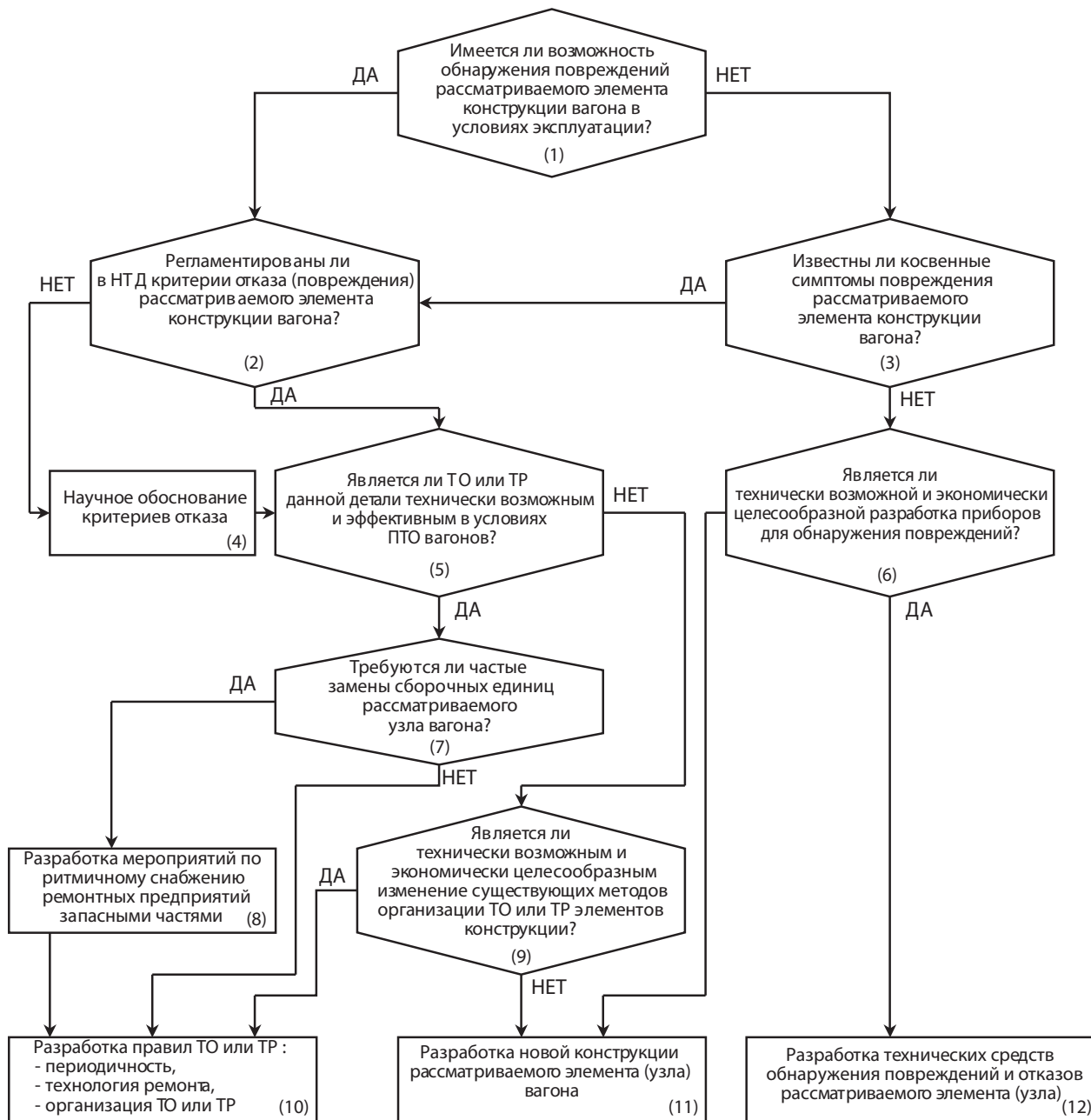


Рис.3. Блок схема алгоритма анализа конструкции вагона-аналога как объекта контроля ТС, ТО и ТР

В связи с последним замечанием отметим следующее. Разработка данной модели и решение на ее основе указанной выше главной проблемы транспортной науки - особенно актуальная задача в части реализации возможностей, вытекающих из т.н. географического фактора в России - ее транзитных ресурсов. Это позволяет приступить к созданию сети железных дорог планетарного (мирового) уровня, обеспечивающей высокоскоростное, бесперегрузочное и всепогодное сухопутное перемещение пассажиров и грузов между пунктами, находящимися на различных континентах. Для этого достаточно построения на территории РФ так называемой полярной магистрали, (строительство которой было за-

брошено в начале 50-х годов прошлого века) и тоннеля под Беринговым проливом. Тем самым будет дан достойный ответ современной цивилизацией той, при которой был освоен так называемый Великий шелковый путь.

В результате реализации этого проекта выявятся особенно рельефно конкурентные преимущества ЖДТ над другими видами транспорта. В самом деле, в перспективе при разработке и реализации крупных проектов, в том числе транспортных, в качестве основного критерия все чаще будет использоваться минимум вредного влияния на среду обитания человека, нанесение экологического ущерба, который однажды станет непоправимым.

Так, по данным зарубежных специалистов, вредных выбросов в расчете на один пассажиро-километр у электрических поездов меньше в 300-400 раз по сравнению с авиационным и в 8-12 раз – по сравнению с автомобильным транспортом. Примерно такая же картина и относительно грузовых перевозок, и, в том числе, морским транспортом.

Именно поэтому наблюдается тренд в части внедрения так называемых зеленых логистик. Так на территории Европы, согласно Белой книге, принятой Еврокомиссией в 2011 г. все пассажирские и грузовые перевозки дальностью более 300 км должны осуществляться по железной дороге [8].

Реализация этого проекта позволит потеснить на рынке перевозок не только автомобильный, но также и авиационный и морской транспорт. Налицо ведущая роль России в деле сохранения экологического баланса на нашей планете. Причем в этом случае улучшение экологической ситуации на планете, скорее всего, будет сопровождаться и понижением себестоимости перевозок на ней.

Реализации рассматриваемого проекта также положительно скажется на социально-экономическом положении нашей страны, о чем подробно говорится в [9].

В немалой степени решение указанной выше проблемы транспортной науки будет способствовать дальнейшему совершенствованию информационной базы отрасли. Так, требуется освоение методики производства данных для грамотного обоснования ограничений на параметры состояния ЖДТ (см. табл. 1) при решении оптимизационной задачи (3).

Важно также освоение технологии производства эксплуатационных данных с тем, чтобы:

- а) в качестве целевой функции (1) использовать себестоимость единицы т-км работы транспорта;
- б) по данным системы ЦПУВ о наработках вагона до обнаружения опасных повреждений получать данные о наработках вагонов до их появления.

Ранее были предложены и другие направления совершенствования информационной базы ЖДТ [2].

Литература

1. Устич П.А., Иванов А.А., Мышков В.Г. Дедуктивно-аксиоматический подход к созданию системы интеллектуального управления ЖДТ // Мир транспорта. - 2010, №1.
2. Устич П.А., Иванов А.А., Митюхин В.Б. Концепция интеллектуального управления // Мир транспорта. - 2008, №3.
3. Вагонное хозяйство: учебник для вузов ЖДТ / Под ред. Устича П.А. - М.: Маршрут, 2003. - 523 с.
4. Устич П.А., Иванов А.А., Чернышова Л.М. Модель решения оптимизационных задач // Мир транспорта. - 2014, №1.
5. Устич П.А., Иванов А.А., Садчиков П.И., Устич Д.П., Шикина Д.И. Методология гармонизации основных положений императива рынка транспортных услуг // Железнодорожный транспорт. - 2010, №8.
6. Устич П.А., Иванов А.А., Садчиков П.И. Формула риска и показатель безопасности // Мир транспорта. - 2006, №2.
7. Устич П.А., Иванов А.А., Аверин Г.В., Кузнецов М.А., Петров С.В. Некоторые аспекты проблемы нормирования уровня безопасности движения на примере железнодорожного транспорта // Надежность. - 2011, №1.
8. Александрова К. Зеленые технологии в логистике: экологичность против рентабельности // РЖД, Партнер. - 2013, №5.
9. Пашкова Т.Л. Полярная магистраль. - М.: Вече, 2007. - 448 с.
10. Устич П.А., Карпычев В.А., Овечников М.Н.: Надежность рельсового нетягового подвижного состава. - М.: Маршрут, 2004. - 411 с.

Сотников Е.А., ОАО «ВНИИЖТ», г. Москва

Интеллектуализация оперативного управления перевозочным процессом на уровне региональной дирекции управления движением

В региональной дирекции управления движением (Д) имеется множество автоматизированных рабочих мест (АРМ), на каждом из которых диспетчерский аппарат в течение дежурной смены принимает по своему кругу ведения множество оперативных управляющих решений (ОУР) с целью обеспечения устойчивой эксплуатационной работы.

За короткое время, которое реально имеется для принятия ОУР, человеку-диспетчеру невозможно просчитать эффективность различных решений, учесть большое число влияющих на перевозочный процесс параметров. Поэтому опыт и интуиция диспетчеров сегодня играют решающую роль в принятии ОУР.

Переход к интеллектуальным АРМ состоит в том, что выработка ОУР осуществляется по специальным алгоритмам интеллектуализированным АРМом (назовем его АРМИ) на основе разработанной имитационной модели работы управляемого полигона с использованием необходимого для работы модели комплекса данных информационно-управляющих систем. При этом должно учитываться максимальное число влияющих параметров и опыт лучших оперативных работников. В АРМИ также должна обязательно реализовываться функция самообучения системы.

Попытка построить единую для полигона Д имитационную модель, с использованием которой решаются все оперативные задачи на всех звеньях управления, неизбежно наткнется на трудности, связанные с выявлением многочисленных параметров, их увязкой, программированием. Оперативное слежение за такой имитационной моделью также потребует значительных усилий.

В сложных системах используют их декомпозицию с выделением отдельных подсистем. При этом в каждой подсистеме используют свой набор параметров. Этот принцип целесообразно применить и при разработке АРМИ для диспетчеров различных звеньев оперативного управления на региональном уровне. Для каждого звена учитываются объемы и параметры, существенно влияющие на поведение подсистемы. Выбор таких параметров осуществляется совместно с практическими работниками.

Ниже рассмотрены принципы построения интеллектуальной подсистемы для верхнего звена – ДГПС (ДГПплан), реализуемой в АРМИ ДГПС.

Прежде всего необходимо сформировать пространственно-технологическую модель полигона Д, для чего

весь полигон делится на технические объекты (ТО) полигона, количество которых для упрощения модели следует минимизировать. Так, для звена ДГПС, как правило, нет необходимости учитывать время хода поездов по перегонам между промежуточными станциями. В различных расчетах может использоваться такой параметр, как время хода поезда по участку или группе участков. Поэтому в качестве ТО может использоваться не перегон, а участок. В качестве ТО также выступают сортировочные и участковые станции, крупные грузовые станции и крупные подъездные пути. В модели должны присутствовать стыковые станции полигона и смежные полигоны других дирекций управления движением, с которых поступают поезда.

Для каждого ТО полигона Д формируется его техническая характеристика в виде показателей, определяющих качество работы ТО в зависимости от объема выполняемых перевозок (работы).

Для определения объемов работы ТО в плановый период необходимо структурировать поездо- и вагонопотоки по условиям возможности составления указанных прогнозов:

1. Внешний подход поездо- и вагонопотока
 - 1.1 организованные поезда в адрес Д на других полигонах;
 - 1.2 вагоны, находящиеся вне организованных поездов на путях станций других полигонов на момент;
 - 1.3 вагоны, находящиеся на путях грузовых фронтов станций других полигонов под погрузкой или выгрузкой, которые в дальнейшем будут следовать в качестве транзитных или местных вагонов в адрес Д (потенциал транзитных и местных вагонов).
2. Внутренний поездо- и вагонопоток
 - 2.1 организованные поезда на полигоне Д на момент;
 - 2.2 вагоны, находящиеся вне организованных поездов на путях станций полигона Д;
 - 2.3 вагоны, находящиеся на путях грузовых фронтов станций полигона Д (потенциал транзитных и местных вагонов).

Для каждой группы поездов и вагонов данной Структуры должна учитываться своя специфика прогнозирования их подхода.

Если оперативные процессы проходят в рамках существующей технологии, то диспетчерский персонал

выполняет лишь функцию контроля хода перевозочного процесса. Например, если все поезда следуют строго по графику, то каких-либо оперативных управляющих решений принимать не требуется. Если же ход перевозочного процесса начинает не совпадать с действующей технологией, то необходимо принятие ОУР. Для интеллектуализации выработки ОУР на уровне ДГПС необходимо определить их перечень, условия принятия таких решений и разработать алгоритмы принятия ОУР для их реализации в программном обеспечении АРМ ИДГПС. Перечень ОУР включает в себя:

- а) изменение направления следования поездопотока (вагонопотока) в пределах Д;
- б) изменение направления следования поездопотока (вагонопотока) со сменой стыка передачи поездов на смежные Д₁ или со сменой пограничного перехода;
- в) корректировка плана формирования поездов в пределах Д (дорожный план формирования);
- г) корректировка плана формирования поездов на полигонах других дирекций управления движением в адрес полигона Д;

- д) вождение соединенных поездов;
- е) вождение поездов повышенной массы и длины (по сравнению с установленной в графике движения);
- ж) изменение очередности следования поездов различных назначений плана формирования;
- з) временная отстановка составов (без локомотивов) на станционных путях и другие оперативные управляющие решения.

Основными ОУР по местной работе являются следующие:

- введение дополнительных маневровых и вывозных диспетчерских локомотивов при увеличении объема местной работы в целях обеспечения своевременного развоза местного груза;
- формирование заданий по подводу груженых и порожних вагонов к грузовым фронтам с целью обеспечения их ритмичной загрузки;
- углубленное взаимодействие с работниками подъездных путей с целью повышения эффективности работы грузовых фронтов.

Разработка АРМ ИДГПС должна выполняться при тесном взаимодействии научных и практических работников.

Ивутин А.Н., Ларкин Е.В., ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», г. Тула
 Усов С.В., ООО «ТСЗП», г. Москва

Моделирование систем с активным резервированием при нестационарных потоках отказов

Одним из способов обеспечения отказоустойчивости сложных кибернетических систем является резервирование узлов и блоков [1, 2, 3, 4, 5]. Активное резервирование предполагает, что за состоянием резервируемого элемента ведется постоянное наблюдение некоторым внешним, по отношению к элементу устройством [6]. Параметры резервируемого элемента сравниваются с эталонными значениями, а при отклонении их от заданного уровня происходит переключение на резервный элемент.

Схема с переключениями приведена на рис. 1.

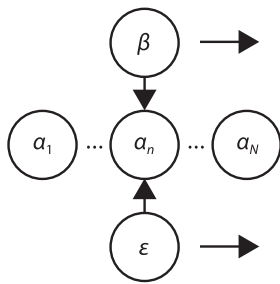


Рис. 1. Схема активного резервирования

Структура системы с активным резервированием элемента может быть представлена в виде многосвязного графа [6]. В текущий момент времени в вершину α_n направлены дуги, ведущие из вершин β и ϵ , что моделирует связи активного элемента. Вершины с α_1 по α_{n-1} , моделирующие неработоспособные элементы, заштрихованы. Вершины с α_{n+1} по α_N моделируют элементы, которые ждут своей очереди на подключение. Стрелками на рисунке показана последовательность подключения резервных элементов. При активном резервировании с переключением к источнику входного сигнала β и нагрузке ϵ подключается только один резервируемый элемент α_n , который на текущий момент времени является работоспособным и после подключения становится активным. При отказе подключенного элемента он отключается как от нагрузки, так и от источника входного сигнала (становится пассивным), и в схему включается (становится активным) следующий элемент. Без нарушения общности можно считать, что при подобной схеме резервирования последовательно подключаются элементы с первого по N -й. При этом, если в процессе эксплуатации включенным в структуру оказывается n -й элемент, то элементы с первого по $(n-1)$ -й считаются неработоспособными.

Реализация логики работы системы с активным резервированием требует существования дополнительных аппаратных средств, которые осуществляют текущий контроль за состоянием включенного элемента, а также подключают к системе резервные элементы и отключают от нее отказавшие элементы. Указанное устройство само может являться источником отказа, как при выполнении функции контроля состояния резервируемого элемента, так и при выполнении функций подключения/отключения.

В простейшем случае резервирования переключением при отказах контролирующего блока система становится полностью неработоспособной. Для моделирования подобных ситуаций по методике, приведенной в [5], может быть построена сеть Петри-Маркова (СПМ), приведенная на рис. 2.

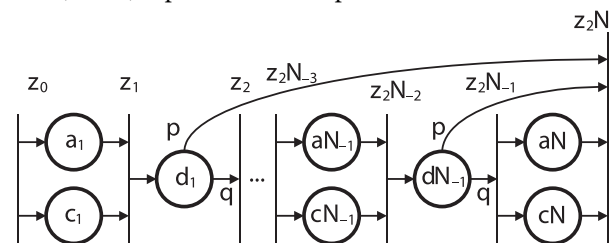


Рис. 2. СПМ, моделирующая переключения при активном резервировании

В СПМ позиции $\{a_1, \dots, a_n, \dots, a_N\}$ моделируют отказы элементов, позиции $\{c_1, \dots, c_n, \dots, c_N\}$ моделируют отказ контролирующего устройства; позиции $\{d_1, \dots, d_n, \dots, d_{N-1}\}$ являются позициями с плотностью распределения времени выполнения, описываемой δ -функцией Дирака. Переход z_0 является стартовым и моделирует начало эксплуатации системы. Переход z_{2N} является поглощающим и моделирует переход системы в неработоспособное состояние.

Логические условия выполнения полушагов из переходов z_{2n-1} , $n = 1, 2, \dots, N-1$ имеют следующий вид:

$$\Lambda(z_{2n-1}, d_n) = [(a_n, z_{2n-1}) \wedge (c_n, z_{2n-1})] \vee [(a_n, z_{2n-1}) \wedge (c_n, z_{2n-1})],$$

$$n = 1, 2, \dots, N-1, \quad (1)$$

где $\Lambda(z_{2n-1}, d_n)$ – логическое условие выполнения полушага из перехода z_{2n-1} в позицию d_n ; (a_n, z_{2n-1}) – событие выполнения полушага из позиции a_n в переход z_{2n-1} ; (c_n, z_{2n-1}) – событие невыполнения полушага из позиции c_n в переход z_{2n-1} .

Математическим подобием перехода системы в неработоспособное состояние является переключение

сети в состояние z_{2N} , которое происходит, если выполнены следующие логические условия:

$$\Lambda_{i_{n}} = (d_1, z_{2N}) \vee \dots \vee (d_n, z_{2N}) \vee \dots \vee (d_{N-1}, z_{2N}) \vee (a_N, z_{2N}) \vee (c_N, z_{2N}), \quad (2)$$

где полушаги $(d_1, z_{2N}), \dots, (d_n, z_{2N}), \dots, (d_{N-1}, z_{2N})$ моделируют отказ контролирующего устройства.

Вероятности выполнения полушагов $(d_1, z_{2N}), \dots, (d_n, z_{2N}), \dots, (d_{N-1}, z_{2N})$ определяются путем анализа «современования» отказами элементов $\alpha_1, \dots, \alpha_n$ и отказом контролирующего устройства.

Указанные вероятности определяются по следующей зависимости:

$$p(t) = \frac{\lambda_c(t)}{\lambda_c(t) + \lambda_a(t)}, \quad (3)$$

где $\lambda_a(t)$ – интенсивность отказов контролируемого элемента; $\lambda_c(t)$ – интенсивность отказов контролирующего устройства.

Вследствие того, что отказы контролирующего устройства и очередного элемента составляют полную группу несовместных событий, вероятности выполнения полушагов $(d_1, z_2), \dots, (d_n, z_{2n}), \dots, (d_{N-1}, z_{2N-2})$ определяются по зависимости

$$q(t) = 1 - p(t) = \frac{\lambda_a(t)}{\lambda_a(t) + \lambda_c(t)}. \quad (4)$$

Плотности распределения времени выполнения хотя бы одного полушага в переходы $z_1, \dots, z_{2n-1}, \dots, z_{2N-1}$ определяются по зависимости (3.23), которая в данном случае принимает вид:

$$f(t) = [\lambda_c(t) + \lambda_a(t)] \exp \left\{ - \int_0^t [\lambda_c(\tau) + \lambda_a(\tau)] d\tau \right\}. \quad (5)$$

Плотность распределения суммарного времени достижения поглощающего перехода из стартового определяется по зависимости:

$$\phi(t) = \sum_{k=1}^N q(t)^{k-1} p(t) [f(t)]^{*k} + q(t)^N [f(t)]^{*N}, \quad (6)$$

где $[f(t)]^{*k}$ – k -кратная свертка плотности распределения $f(t)$.

Для случая стационарных параметров потока отказов элементов зависимости (3), (4) принимают вид:

$$p = \frac{\lambda_c}{\lambda_c + \lambda_a}, \quad (7)$$

$$q = 1 - p = \frac{\lambda_a}{\lambda_a + \lambda_c}. \quad (8)$$

Плотности распределения времени выполнения хотя бы одного полушага в переходы $z_1, \dots, z_{2n-1}, \dots, z_{2N-1}$ принимают вид:

$$f(t) = (\lambda_c + \lambda_a) \exp[-(\lambda_c + \lambda_a)t]. \quad (9)$$

Выражение для k -кратной свертки плотностей, входящих в (6), принимает вид закона Эрланга $(k-1)$ го порядка:

$$[f(t)]^{*k} = \frac{(\lambda_c + \lambda_a)^k (\lambda_c + \lambda_a) t^{k-1} \exp[-(\lambda_c + \lambda_a)t]}{(k-1)!}. \quad (10)$$

Математическое ожидание закона (10) определяется выражением:

$$T = \frac{k}{\lambda_c + \lambda_a}. \quad (11)$$

Плотность распределения суммарного времени достижения поглощающего перехода из стартового определяется по зависимости:

$$\phi(t) = (\lambda_c + \lambda_a) \sum_{k=1}^N q^{k-1} p \frac{[(\lambda_c + \lambda_a)t]^{k-1} \exp[-(\lambda_c + \lambda_a)t]}{(k-1)!} + (\lambda_c + \lambda_a) q^N \frac{[(\lambda_c + \lambda_a)t]^{N-1} \exp[-(\lambda_c + \lambda_a)t]}{(N-1)!}. \quad (12)$$

Подставляя в (12) значения вероятностей, получим:

$$\phi(t) = \exp[-(\lambda_c + \lambda_a)t] \left[\sum_{k=1}^{N-1} \frac{\lambda_a^{k-1} \lambda_c t^{k-1}}{(k-1)!} + \frac{\lambda_a^{N-1} (\lambda_c + \lambda_a) t^{N-1}}{(N-1)!} \right]. \quad (13)$$

Математическое ожидание T_p времени достижения поглощающего перехода из стартового, равное математическому ожиданию времени нахождения системы в работоспособном состоянии при активном резервировании, определяется по зависимости:

$$T_p = \frac{1}{\lambda_c + \lambda_a} \left[\sum_{k=1}^{N-1} k q^{k-1} p + N q^{N-1} \right]. \quad (14)$$

Оценка эффективности пассивного резервирования может быть произведена по математическому ожиданию времени наработки до отказа предпоследнего из резервированных элементов системы [4].

Литература

1. Ларкин Е.В., Сабю Ю.И. Применение сетей Петри-Маркова при моделировании структурных отказов в системе // Известия ТулГУ. Сер. Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. Вып.4. Т.3: Системы управления. – Тула: ТулГУ, 2003. – С. 95–103.
2. Ларкин Е.В., Сабю Ю.И. Структурный анализ систем при построении отказоустойчивой авионики // Авиакосмическое приборостроение. – 2004. № 5. – С. 23–26.
3. Ларкин Е.В. Структурный анализ отказоустойчивости измерительно-информационных комплексов // Известия ТулГУ. Сер. Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. Т.1. Вып. 3. Вычислительная техника. – Тула: ТулГУ, 2004. – С. 14–20.
4. Ларкин Е.В. Имитационное моделирование отказов-восстановлений с применением сетей Петри-Маркова // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2005. № 12. – С. 35–38.
5. Ларкин Е.В. Формирование сетей Петри-Маркова для моделирования параллельных систем / Математическое и программное обеспечение вычислительных систем. – М. Горячая линия-Телеком, 2006. – С. 4–8.
6. Ларкин Е.В., Сабю Ю.И. Отказоустойчивость измерительно-информационных систем с активным резервированием // Известия ТулГУ. Сер. Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. Т.1. Вып. 2. Информационные технологии. Тула: ТулГУ, 2004. – С. 159–164.

Григорьянц А.Г., Ставертий А.Я., МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
Третьяков Р.С., «Московский центр лазерных технологий», г. Москва
Усов С.В., МГТУ МАМИ, г. Москва

Компьютерное моделирование формы насадок для коаксиальной подачи материалов с целью управления ресурсом деталей железнодорожной техники

В современном железнодорожном транспорте являются востребованными технологии, предназначенные для повышения ресурса деталей машин и снижения вероятности их поломки. Ресурс в процессе эксплуатации механизмов наибольшим образом зависит от степени износа локальных участков рабочих поверхностей деталей. В связи с этим, важной является проблема восстановления изношенных поверхностей при сохранении всех остальных параметров и характеристик детали. Поэтому поиск и разработку высокопроизводительных методов и технологических процессов упрочнения новых и восстановления изношенных деталей, а также исследования их ресурса необходимо проводить для каждого конкретного случая применений. Одним из технологических методов, применимых для восстановления деталей машин, является лазерная наплавка с соосной подачей присадочного металлического порошка в зону обработки [1].

В данной технологии, как правило, порошок подается через полость между двумя или тремя коническими насадками оснастки. Такая конструкция имеет стабильные характеристики газопорошкового потока и позволяет с высоким коэффициентом использования порошкового материала наносить покрытия высокой плотности и стабильности на поверхности деталей машиностроения как плоской, так и сложной формы. Такие покрытия позволяют существенно повысить ресурс детали.

Одним из главных факторов, определяющих эффективность применения технологии лазерной наплавки, является правильный выбор и проектирование оснастки, в частности, сопловых насадок для подачи порошка, которые должны давать возможность наплавлять валики в широком диапазоне размеров, а также наносить различные материалы с получением оптимальных свойств металла покрытия, обеспечивающих определенную ресурс работы детали.

Сопловые насадки для коаксиальной подачи материалов – это технологические приспособления, которые позволяют формировать стабильную газопорошковую струю с необходимыми параметрами. При различных требованиях к технологии используются сопла различной формы: с острым углом при вершине, с тупым углом при вершине, с малым и с большим диаметрами луча в плоскости обработки [2, 3, 4, 5, 6, 7].

В связи с этим, для определения оптимальной формы настраиваемого сопла для коаксиальной подачи порошкового материала было спроектировано для моделирования два варианта сопловых насадок в виде пар (внешняя/внутренняя) с целью поиска оптимального их сочетания (рис.1). Первый вариант с углом конуса при вершине 50 градусов, а второй – с углом 65 градусов. Такие размеры позволяют перенести плоскость наплавки от линзы как минимум на 10 мм и увеличить диаметр пятна в этой зоне.

Для выбора оптимальных размеров конуса сопла было проведено математическое моделирование движения частиц присадочного порошка в каналах оснастки до поверхности наплавки. Основной целью математического моделирования является проверка работоспособности различных конструкций сопла в процессе наплавки в условиях реально действующих факторов процесса и исследование влияния размеров сопла на параметры газопорошкового потока: расстояние от среза сопла до минимального диаметра потока, степень разброса частиц порошка.

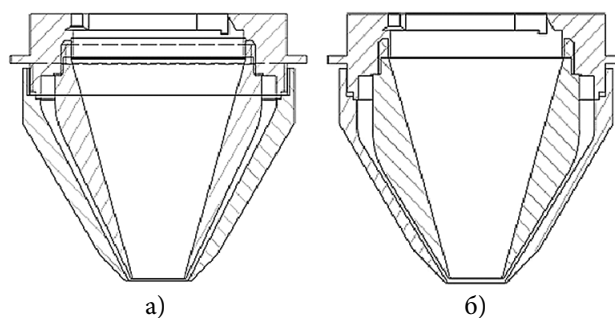


Рис.1. Формы сопел для исследования:
а) длинное сопло; б) короткое сопло.

Технологический процесс модифицирования лазерным излучением – сложный комплексный процесс, включающий совместное перемещение частиц в среде газа и металлической подложки по требуемой траектории при воздействии на них лазерного луча. Наиболее важным и сложным для описания в данном процессе является именно перемещение частиц в среде газа. Скорость частиц, траектория их движения, стабильность подачи, влияют на устойчивость процесса и качество наплавленного слоя наравне с параметрами лазерного излучения [8].

Для решения поставленной задачи проводилось моделирование процесса прохождения потока газа через сопло. Поскольку процессы подачи порошка и подачи газа являются установившимися, в расчете принимали, что поток является ламинарным, сжимаемым, однородным по составу и распространяется внутри сопла.

Для решения уравнений газовой фазы была использована кинетическая модель движения газа, а для расчета движения частиц – модель на основе потока газопорошковой взвеси [9]. Для осесимметричного, устойчивого, ламинарного, неразрывного потока газопорошковой струи с однородным химическим составом и при отсутствии внешних сил, было получено следующее выражение:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}(r \rho u_r) = 0 \quad (1)$$

где x и r – соответственно осевые и радиальные координаты;

u_x – осевая скорость;

u_r – радиальная скорость;

ρ – плотность сплошного газа.

Расчет сопла проводился численным методом с использованием вычислительной машины, оптимизированной для расчета массива ячеек. Программа разбивает расчетный объем на параллельно рассчитываемые участки для нескольких процессоров. Транспортирующим газом является аргон, подаваемое количество которого регулируется массовым расходом. В связи с этим использовались следующие граничные условия для сжимаемого потока: входной расход газа, выходное давление в дальней зоне. Значение входного расхода являлось варьируемым параметром, выходное давление является следствием неразрывности потока газа.

Модель основана на механизмах, которые влияют на турбулентную составляющую кинетической энергии на единицу массы k [10].

$$K = \frac{1}{2(U^2 + V^2 + W^2)} \quad (2)$$

$$\frac{1}{2(u^2 + v^2 + w^2)} \quad (3)$$

$$k(t) = K + k \quad (4)$$

где K – основная кинетическая энергия;

k – турбулентная кинетическая энергия;

u, v, w – скорости по осям x, y, z соответственно.

Моделирование многофазных потоков производилось в несколько этапов. На первом этапе рассчитывали движения газовой среды. В результате расчета получали установившееся распределение газового потока в оснастке и на выходе из нее. На втором этапе производился расчет движения частиц в газовой среде. Третий этап является проверочным для выполнения законов сохранения и неразрывности среды.

Траектории частиц рассчитывались с использованием функции Лагранжа. Обмен теплотой, массой и моментом в рамках уравнений Эйлера для газовой среды. Доля дискретной фазы должна составлять не более 10% по объему. Массовая доля может быть значительно больше (до 100%). В расчете считается, что нет взаимодействия между частицами и не происходит их разрушения.

Траектория рассчитывается интегрированием баланса сил, действующих на частицу. Скорость частицы могут изменить различные силы: сила тяжести, сила сопротивления, как функция изменения относительной скорости, сторонние силы (трения, соударения), силы вращения, Броуновского движения, силы Саффмана и др.

Наиболее удобно для конструкторских расчетов газопорошкового потока и оснастки использовать пакет программ FLUENT. Данный комплекс позволяет получить не только качественную, но и количественную картину распределения порошковых частиц в полете.

Путем численного расчета и математического моделирования процесса истечения газопорошкового потока из сопел с разными углами конуса при вершине были получены конечные геометрические размеры конструкций, которые обеспечивают диаметр перетяжки потока от 1 до 5 мм на расстоянии от среза не менее 10 мм. Такие параметры позволяют, изменяя диаметр пятна, формировать качественные валики различной ширины при наплавке.

Установлено, что при угле конуса насадки при вершине в 52 градуса достигается минимальный диаметр сфокусированного газопорошкового потока, обеспечивающий минимальную ширину единичного валика (около 1 мм), а при угле схождения в 64 градуса получен валик максимальной ширины, при наплавке такой оснасткой достигается максимальная производительность процесса лазерной модификации поверхностей, при этом ширина валика больше диаметра расплавленной лазерным лучом ванны металла.

В результате расчета получен типичный газопорошковый поток, в котором частицы, вылетая из сопла, сходятся по инерции в общую точку с минимальным диаметром потока, а затем расходятся конусом (рис.2).

Характер истечения показывает, что все частицы порошка вылетают по подобным дугообразным траекториям в ламинарном потоке. Таким образом, газопорошковый поток остается ламинарным даже в более широких интервалах скоростей и расходов газа, чем однофазный газовый, поскольку массивные инертные частицы стабилизируют его и значительно снижают вероятность образования завихрений. Аналогичные результаты были получены в работах [12], что подтверждает результаты проведенного в данной работе моделирования.

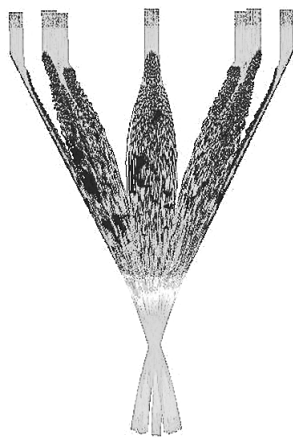


Рис. 2. Модель газопорошкового потока в двумерном сопле.

При той же скорости частиц, но меньшем размере по гранулометрическому составу, более мелкие частицы отклоняются защитным газом. Даже при постоянном расходе газа поток частиц, переносимых газом, перестает быть сходящимся: на ось обработки частицы не попадают (рис. 3, 4).

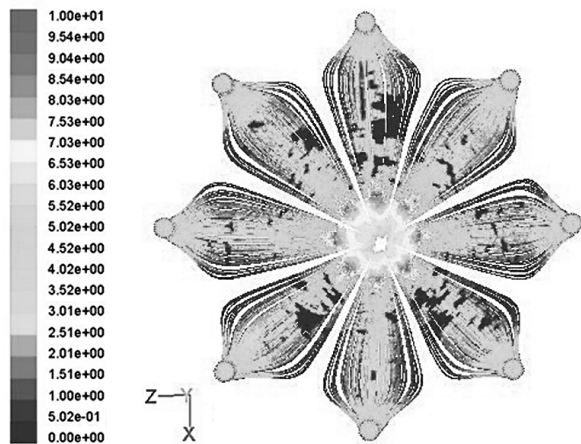


Рис. 3. Расчетный газопорошковый поток при размере частиц 20 мкм.

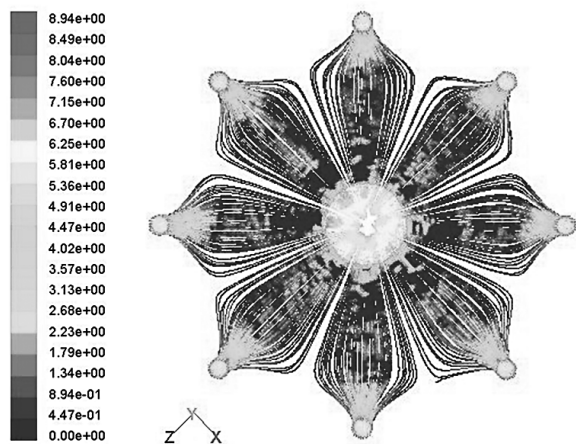


Рис. 4. Расчетный газопорошковый поток при размере частиц 10 мкм.

С учетом экспериментальных и литературных данных создана матрица планирования расчетов сопел с различными расходами газов. Поскольку в расчетной схеме присутствуют два потока: ускоряющий частицы и коаксиальный, корректирующий поток, то задание газов в комбинации позволяет изменять форму газопорошкового потока в широких пределах.

Для 8 комбинаций расходов транспортирующего и коаксиального газов был проведен расчет газодинамики и моделирование газопорошкового потока через спроектированные сопла. В качестве присадочного материала впрыскивались никелевые порошки сферической формы с размерами 10, 20, 40, 60, 80, 100 и 120 мкм. Основной целью моделирования являлось исследование влияния параметров расхода газа и размера порошковых частиц на параметры газопорошковой струи для разработки в дальнейшем технологических процессов наплавки.

Расчётным путём определяли:

1. Скорости частиц в зоне лазерного воздействия при различных параметрах струи и частиц (рис. 5).
2. Диаметр перетяжки газопорошкового потока (рис. 6).
3. Зазор между срезом сопла и центром перетяжки газопорошкового потока (рис. 7).

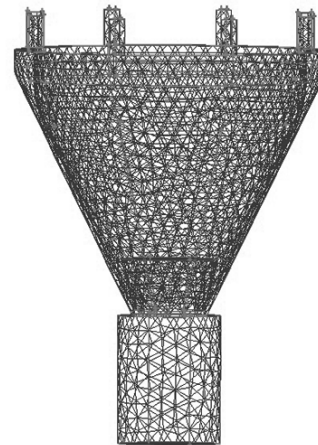


Рис. 5. Скорость частиц в области перетяжки в зависимости от их размера при различных расходах газа

На рис.5 показано, что с ростом расхода транспортирующего газа скорость частиц растет пропорционально расходу и слабо зависит от диаметра частиц в исследованном диапазоне, то есть скорость частиц в районе зоны обработки практически не изменяется при изменении размера частиц. Расчетная скорость частиц составляет от 3 до 6 м/мин для различных расходов газа и практически не зависит от скорости частиц при входе в сопло.

На рисунках 6 и 7 представлены зависимости параметров газопорошкового потока (диаметр перетяжки и зазор от среза сопла до перетяжки) от размеров частиц при различных расходах газов.

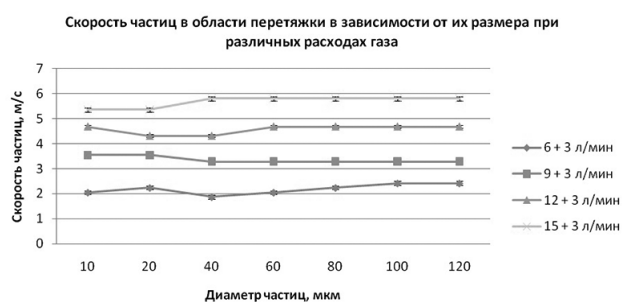


Рис. 6. Диаметр перетяжки газопорошкового потока при различных расходах газа

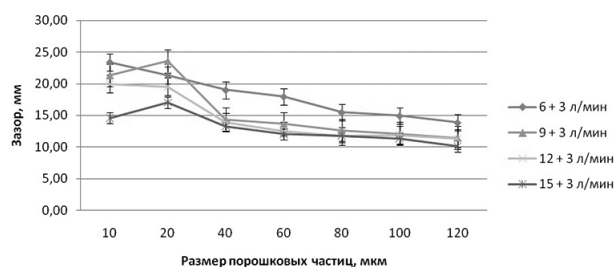


Рис. 7. Зазор от среза сопла до перетяжки газопорошкового потока при различных расходах газа

Из графиков рисунка 6 видно, что для диапазона размеров частиц от 20 до 60 мкм газопорошковый поток, состоящий из набора частиц с различными размерами, будет иметь минимальный диаметр перетяжки, равный от 2 до 3 мм в широком диапазоне расходов транспортирующего газа: от 6 до 15 л/мин.

На графиках рисунка 7 показано, что с ростом размера частиц и увеличением расхода газа зазор от среза сопла до перетяжки газопорошкового потока снижается.

Установлено, что для «длинного» сопла фракционный состав порошковых материалов от 20 до 60 мкм позволяет получить минимальный диаметр порошковой струи на обрабатываемой поверхности. Этот диаметр может составлять не более 1 мм. Выявлено, что с ростом размера частиц формирование перетяжки газопорошкового потока происходит на меньшем расстоянии от среза сопла, а конус выражен более размыто.

Для «короткого» сопла зазор изменяется более стабильно, чем для «длинного». Однако диаметр потока меняется гораздо сильнее и имеет ярко выраженный минимум диаметра порошковой струи для разных расходов газа только для частиц диаметром от 20 до 40 мкм. Это означает, что для короткого сопла применимыми являются порошки с узким диапазоном фракционного состава порошковых частиц, что накладывает серьезные ограничения на возможность нанесения композиционных покрытий.

Технологии восстановления крупногабаритных деталей подвижного состава имеют большую перспективу восстановления, поскольку позволяют экономить материал и снизить трудоемкость, необходимые для изготовления новой детали. Многочисленные работы западных машиностроителей показывают эффективность управления ресурсом деталей железнодорожной техники с помощью лазерных технологий

Разработанная оснастка позволяет получать оптимальные режимы нанесения покрытий на детали типа крестовин электровоза ЧС4. Себестоимость обработки такой детали – около 10-20% от создания новой детали, ресурс детали повышен за счет триботехнической совместимости пары трения. Кроме повышения ресурса, лазерная технология позволяет минимизировать влияние предыдущих стадий обработки детали.

Выводы

Расчетным путем установлено, что оптимальным фракционным составом частиц для газопорошкового потока являются частицы размерами от 20 до 120 мкм. Нижний предел обусловлен рассеиванием направленного потока частиц и нарушением стабильного формирования единичного валика. Верхний предел связан с нестабильностью расплавления частиц большой массы.

Расчетным путем установлено, что при угле схождения газопорошкового потока 52 градуса достигается минимальный диаметр сфокусированного газопорошкового потока, обеспечивающий минимальную ширину единичного валика, а при угле схождения в 64 градуса достигается максимальная производительность процесса лазерной модификации поверхностей, при этом ширина валика больше диаметра расплавленной лазерным лучом ванны. Наплавка порошковых материалов при оптимальных геометрических параметрах технологических насадок обеспечивает повышение ресурса деталей по сравнению с традиционными методами восстановления.

Литература

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. – 2-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 664 с.
2. Compact coaxial nozzle for laser cladding: US patent US2006/0065650 A1 / Wen Guo; опубли. 30.03.2006
3. Laser/powdered metal cladding nozzle: US Patent WO199520458 A1 / Buongiorno Angelo, Chromalloy Gas turbine corporation; опубли. 03.08.1995
4. Laser spray nozzle and method: US Patent US4724299 A / Albert W. Hammeke, Pennsauken N.J.; опубли. 09.02.1988.
5. Powder metal cladding nozzle: US patent US2006/0266740 A1 / Akio Sato, Yoshinori Ishikawa; опубли. 30.11.2006

6. Coaxial nozzle design for laser cladding/welding process: US patent WO2005/028151 A1 / Hu Yiping, Honeywell Int Inc ; опубли. 31.03.2005
7. Powder delivery nozzle: US patent US20080308538 A1 / James Gordon Harris, Milan Brandt; опубли. 18.12.2008
8. S.Y. Wen [и др.] Modeling of coaxial powder flow for the laser direct deposition process. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009. № 25-26. P. 5867-5877
9. N. Yang. Concentration model based on movement model of powder flow in coaxial laser cladding. Opt. Laser Technol, 2009. №41 (1), P. 94–98
10. J. Lin. Numerical simulation of the focused powder streams in coaxial laser cladding. J. Mater. Process. Technol, 2000. № 105 (1). P. 17–23
11. A.J. Pinkerton, L. Li. Modelling powder concentration distribution from a coaxial deposition nozzle for laser-based rapid tooling. Trans. ASME J. Manuf. Sci. Eng, 2004. № 126 (1). P. 33–41
12. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А. И. Сидоров. М.: Машиностроение, 1988. 189 с.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-08-13126 офи_м_РЖД.

Петров И.Б., Хохлов Н.И., Миряха В.А., Санников А.В., Фаворская А.В., МФТИ, г. Москва

Численное моделирование волновых и деформационных процессов в элементах железнодорожного пути

Проблема дефектоскопии железнодорожного пути является одной из важнейших при эксплуатации железных дорог. Изучение динамических процессов, происходящих в этих конструкциях, может производиться как экспериментальными, так и расчётно-теоретическими путями. Однако наилучший путь решения задачи безопасности железнодорожных конструкций – это численный расчёт волновых и деформационных процессов, а также прогноз появления повреждений в них и сопоставление с экспериментальными результатами датчиков для дальнейшего решения обратной задачи.

В работе представлен ряд численных экспериментов, среди которых:

1. Распространение ультразвуковых волн в профиле рельсов с горизонтальным расслоением головки [1] (Рис. 1). Исследовалось влияние размера области расслоения на амплитуду принимаемого датчиком сигнала.
2. Расчёт волновой картины напряжений в железнодорожной насыпи при наличии каверны [2] (Рис. 2).
3. Определение прочности рельсов с внутренней поперечной трещиной в головке (Рис. 3). Проведено качественно сравнение результатов эксперимента.

Натурные эксперименты по определению прочности рельсов [3] при переходе усталостного разрушения в хрупкий долом проводятся в ОАО «ВНИИЖТ», и в данной работе эксперимент был повторен численно в двумерной постановке.

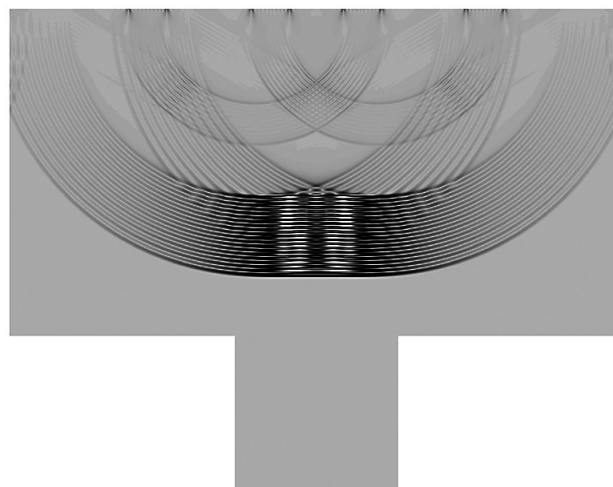


Рис. 1. Волновая картина в неповрежденном рельсе

Все расчёты были произведены с использованием разрабатываемого программного комплекса, в основе

которого лежат сеточно-характеристический метод [4] и разрывный метод Галеркина [5]. Решалась полная замкнутая система уравнений механики сплошных сред (система уравнений состояния бесконечно малого объема сплошной линейно-упругой среды). Для разрушения используются критерий максимального главного напряжения и критерий Мизеса. Модель разрушения описана в [6].

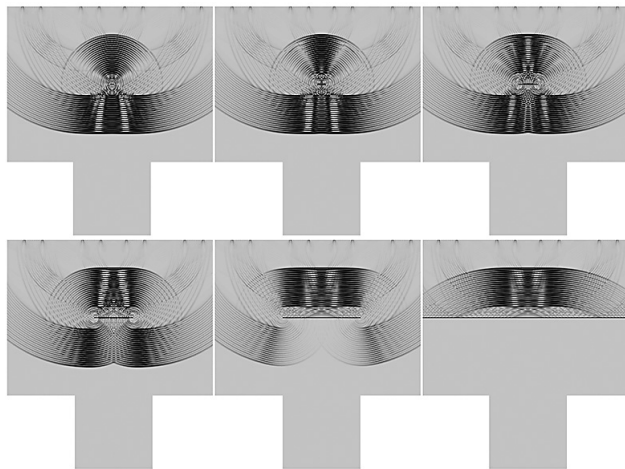


Рис. 2. Формирование отклика от горизонтального расслоения головки рельса при различных длинах трещин.



Рис. 3. Зависимости показаний приёмника от времени для всех исследуемых длин трещин, в мм.

1. Распространение ультразвуковых волн в профиле рельсов с горизонтальным расслоением головки

Пьезоэлемент, возбуждающий сигнал, моделировался с помощью приложения к площадке размером 15 мм на горизонтальной поверхности головки рельса внешней силы, изменяющейся по синусоидальному закону (длина волны излучателя составляет 1 мм, частота излучателя равняется 6.25 МГц). Амплитуда внешней силы – 1 Н. Начальная фаза – 0. Материал рельса –

сталь, с параметрами $\lambda=146,1 \cdot 10^9$ Па, $\mu=79,3 \cdot 10^9$ Па, $\rho=7,8 \cdot 10^3$ кг/м³, $c_p=6250$ м/с. Гармонический сигнал модулировался прямоугольным меандром, длительностью, равной 10 периодам.

Приемник сигнала предполагался точечным и расположенным на поверхности головки рельса на оси симметрии. Приемник сигнала измерял компоненты скорости. Расчет выполнялся в двумерной постановке. Использовалась структурированная сетка с $3,1 \cdot 10^6$ квадратных ячеек. Использовался сеточно-характеристический метод.

На Рис.1-2 приведены результаты численного моделирования распространения ультразвуковых волн в профиле железнодорожного рельса. Предполагалось наличие растущего дефекта с кодом 30Г [1] (горизонтальное расслоение металла головки рельса) ровно посередине головки рельса. Расслоение располагалось на расстоянии 20 мм от поверхности головки и моделировалось с помощью свободной границы. Исследовалась различная длина трещин: 1 мм, 2 мм, 5 мм, 7 мм, 10 мм, 12 мм, 15 мм, 20 мм, 25 мм, 40 мм и 74 мм. На Рис. 1 представлена волновая картина в неповрежденном рельсе, на Рис.2 (слева направо, сверху вниз) – отраженная от дефекта волна при длине трещины 1 мм, 2 мм, 5 мм, 10 мм, 20 мм, 74 мм.

На Рис. 3 приведены зависимости синтетических данных приёмника (вертикальная компонента скорости) от времени для всех исследуемых длин трещин. Можно обратить внимание, что начиная от длины трещины 5 мм амплитуда отраженного сигнала существенно не меняется, только незначительно увеличивается для 7 мм и 10 мм, что связано с размером и положением пьезоэлемента.

2. Расчёт волновой картины напряжений в железнодорожной насыпи при наличии каверны

В данном расчёте был произведён численный анализ волновых деформационных процессов, происходящих в железнодорожной насыпи с включением каверны. Воздействие колёсной базы железнодорожного состава моделировалось с помощью внешней силы, приложенной на расстоянии 1 м на контактные пятна колёс и рельсов. Получены волновые картины напряжений. На Рис.4 изображён фрагмент двумерной расчётной сетки, который включает в себя рельс, шпалы, подстилающее покрытие (насыпь) и карстовую полость в нём. Сетка строилась в вертикальном сечении, проходящем через один из рельсов. Цветом показано давление. Полученные в данном расчёте численные параметры могут быть далее проанализированы с целью прогнозирования рисков, связанных с развитием подобных дефектов в насыпи и их выявления.

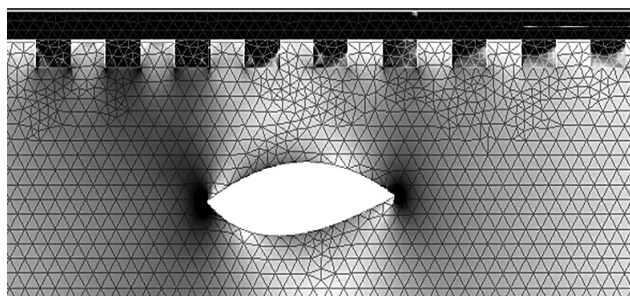


Рис. 4. Фрагмент расчётной сетки и волновая картина напряжений в железнодорожной насыпи с каверной.

3. Определение прочности рельсов с внутренней поперечной трещиной в головке

На Рис. 5 представлена схема проводимого эксперимента: на двух неподвижных опорах, расстояние между которыми 1 м, расположен кусок рельса со сформировавшимся усталостным дефектом. К рельсу сверху посередине через индентор прикладывается нагрузка, величина которой линейно возрастает. Целью эксперимента было определить зависимость минимального напряжения, при котором наступает разрушение, от размера и положения начального дефекта. Т.к. задача относится к классу долгосчетовых, т.е. общее время интегрирования много больше характерного волнового времени, то для ускорения моделирование было проведено на достаточно грубой расчётной сетке, что может гарантировать только качественное совпадение результатов.

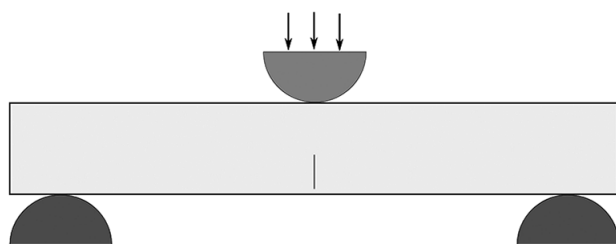


Рис. 5. Определение прочности рельсов с внутренней поперечной трещиной в головке. Схема численного эксперимента.

На Рис. 6 показана картина напряжений в рельсе, инденторе и опорах, причём цветом показана только положительная составляющая компоненты σ_{xx} , что соответствует напряжению растяжения (предел прочности на сжатие на порядки больше предела на растяжение). Концы трещины представляют собой концентраторы напряжения, поэтому и разрушение наблюдается начи-

ная с этих мест. По границе трещины наблюдается область разрежения. Особенности в этой области связаны с грубостью расчётной сетки.

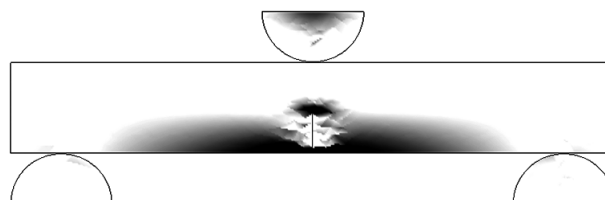


Рис. 6. Картина положительных напряжений σ_{xx} при определении прочности рельса с усталостным дефектом.

В дальнейшем планируется решить задачу в квазистатической постановке, что значительно уменьшит время счёта и позволит использовать более мелкую расчётную сетку.

Литература

1. Петров И. Б., Фаворская А. В., Миряха В. А., Хохлов Н. И., Голубев В. И., Санников А. В. Мониторинг состояния подвижного состава с помощью высокопроизводительных вычислительных систем и высокоточных вычислительных методов. // Математическое моделирование. - 2014 - Т. 26 - № 7. - С. 19 - 32.
2. Фаворская А. В., Голубев В. И., Миряха В. А., Хохлов Н. И., Санников А. В., Петров И. Б., Беклемышева К. А. Динамическая диагностика элементов пути. // Журнал «Техника железных дорог». - № 4 (24) - С. 82 - 95.
3. Шур, Е.А. Повреждения рельсов.- М.: Интекст, 2012.- 192 с.
4. Петров И.Б., Холодов А.С. Численное исследование некоторых динамических задач механики деформируемого твердого тела сеточно-характеристическим методом // Журн. выч. мат. и мат. физ. – 1984. – Т. 24. № 5. – С. 722-739.
5. В.А. Миряха, А.В. Санников, И.Б. Петров Применение разрывного метода Галеркина в задачах механики деформируемого упругого тела на неструктурированных сетках с использованием высокопроизводительных вычислительных систем // Математическое моделирование. – 2014. (в печати)
6. И. Б. Петров, Ф. Б. Челноков Численное исследование волновых процессов и процессов разрушения в многослойных преградах // Ж. вычисл. матем. и матем. физ., т. 43, № 10, с. 1562–1579 .

Давыдов Б. И., ДВГУПС, г. Хабаровск

Концепция двухэтапности процесса адаптивного управления движением грузовых поездов

1. Введение

Реформирование Российских железных дорог актуализировало задачи повышения экономической эффективности перевозочного процесса. В первую очередь, это касается грузовых перевозок по магистральным железнодорожным линиям. Концепция разрабатываемой интеллектуальной транспортной системы предполагает использование адапционных механизмов в качестве одного из главных принципов построения системы управления.

Адаптивное диспетчерское управление движением поездов предполагает корректировку графика движения в реальном времени, что обеспечивает профилактику его нарушений или ликвидацию последствий уже возникших сбоев. Оперативное регулирование движения потока грузовых поездов отличается от управления пассажирскими поездами отсутствием жестких требований пунктуальности прохождения контрольных точек их маршрутов. На первый план выходят показатели экономической эффективности пропуска потока.

Методология процесса выработки и реализации оперативных регулировок в диалоге диспетчера и интеллектуальной системы поддержки (СППР) разработана недостаточно. Это касается, в первую очередь, регулирования движения грузовых поездов. Причинами являются отсутствие адекватного целеполагания при определении оптимальных решений, а также разобщенность детерминированного и стохастического подходов при моделировании процесса движения поездов по участку железной дороги. Настоящая работа восполняет указанные пробелы в теории адаптивного управления движением.

2. Состояние проблемы адаптивного управления движением поездов

Большинство опубликованных работ по проблеме оперативного перепланирования движения поездов при возникновении нарушений графика основано на детерминированных моделях функционирования участка железной дороги. Основными видами задач, которые решаются в процессе поиска оптимальных регулировок, являются задачи обнаружения, разрешения конфликтов (CDR) и согласования скорости движения поездов (TSC) [1-3].

Поскольку большинство работ исследует алгоритмы корректировки пассажирского движения на загруженных линиях, в качестве критерия при реше-

нии оптимизационных задач используются показатели пунктуальности – задержки поездов относительно графиковых точек прихода их на станции или платформы. Как правило, рассматривается суммарная величина опоздания по всем поездам в заданный период времени. Работы, в которых пытаются использовать экономические показатели качества функционирования железнодорожной сети при пропуске пассажирского поездопотока [4, 5], так или иначе, интерпретируют опоздания поездов. Поиск перепланировочных графиковых решений, минимизирующих опоздания поездов, производится путем построения дискретных моделей движения и использования методов целочисленного или частично-целочисленного линейного программирования (например, [6, 7]).

Исследований, которые используют при решении локальной оптимизационной железнодорожной задачи в явном виде экономический критерий – величину прибыли или расходов, – автору не известно. В некоторых работах лишь высказывается идея оценивания результата каждого из регулировочных мероприятий на основе анализа эксплуатационных затрат.

К основным работам, в которых используется статистический подход к анализу движения поездов с задержками можно отнести [8-10]. В указанных статьях используют различные модели, описывающие частоту возникновения и продолжительность неграфиковых задержек. Аналитический расчет распределения вторичных задержек как композиции индивидуальных распределений в указанных работах не производится.

Основным недостатком детерминированных моделей, используемых при поиске рациональных диспетчерских решений, является отсутствие учета риска возникновения случайных возмущений. Это приводит к исключению ряда регулировок, которые позволяют наилучшим образом осуществлять профилактику возможных отклонений от графика и избежать экономических потерь. Указанный недостаток в значительной степени компенсируется, если использовать стохастические модели в дополнение к детерминированным.

3. Критерий поиска оптимальных регулировочных решений

В качестве оценки результата деятельности участка дороги предложено [11] использовать разность доходов и расходов по пропуску потока грузовых поездов, исчисляемую в границах участка. Эту величину – эко-

номический результат функционирования участка - условно называют локальной прибылью Π , понимая ее как часть полной прибыли компании-оператора (владельца инфраструктуры), которая соотносится с вкладом рассматриваемого конкретного участка железной дороги в пропуск потока грузовых поездов [12]:

$$\Pi = D - P,$$

где D – доля дохода компании, приходящаяся на данный участок;

P – расходы по пропуску поездов по участку.

Размеры доходной и расходной частей, в общем случае, нелинейно зависят от интенсивности n потока грузовых поездов. Определено, что функция зависимости прибыли от интенсивности потока, в которую входят соответствующие коэффициенты нелинейности A и B :

$$\Pi(n) = [d_0 - p_0(A - B)n] - P^{пост}$$

имеет максимум при определенном значении n^M (рис.1). На конечном участке зависимости $\Pi(n)$ прибыль превращается в убыток.

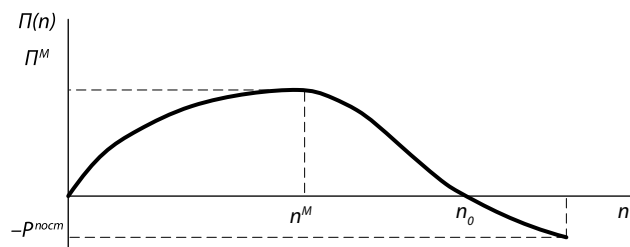


Рис.1. Зависимость показателя локальной прибыли от интенсивности потока поездов

На основе описанной модели сформулирован критерий экономической оценки действий, направленных на рациональные пропуск и обслуживание каждого грузового поезда (и потока поездов) в границах участка дороги. Возникающие затруднения в формировании и пропуске поездов приводят к изменению экономического результата. Доходная часть может уменьшиться на величины ΔD в случае применения штрафных санкций за задержку доставки груза. Расходная часть увеличивается на ΔP вследствие дополнительных потерь, возникающих при преодолении сбоев в процессе перевозки.

Очевидно, диспетчерская система в состоянии влиять лишь на динамическую часть перевозочного процесса. Поэтому оценку экономического выигрыша $\Delta \Pi$ от регулировочного мероприятия можно проводить в соответствии с выражением, из которого исключены условно-постоянные компоненты:

$$\Delta \Pi = (\Delta D_2 - \Delta D_1) - (\Delta P_2 - \Delta P_1),$$

где $\Delta D_1, \Delta P_1$ – зависящие части доходов и расходов при использовании варианта регулировки №1;

$\Delta D_2, \Delta P_2$ – то же по варианту регулировки №2.

4. Двухэтапный процесс адаптивного управления движением грузовых поездов

Существующие методики диспетчерского управления движением на участке дороги решают указанную задачу адаптивования к складывающимся условиям следующим образом. В процессе предварительного (*off-line*) планирования строится оперативный график движения на ближайшие сутки с учетом «окон», ограничений скорости, ожидаемого подхода грузовых поездов и др. На протяжении диспетчерской смены график корректируется с целью устранения влияния текущих отклонений, обусловленных спорадическими задержками (отменами) поездов, затруднениями в работе станций и др. Процесс корректировки в режиме реального времени (*on-line*) является одноэтапным, опирается на детерминированную модель и один из методов поиска оптимальных решений. В известных методиках решения графической задачи (в том числе, в реальном времени) используются критерии пунктуальности, что вполне оправдано на дорогах с исключительно пассажирским движением.

Новая концепция управления, предложенная в настоящей работе, предполагает наличие двух этапов адаптивования процесса движения. Первый этап предполагает назначение режима движения потока грузовых поездов на ближайшие один – три часа. В качестве этих режимов используются интенсивный или экономичный пропуск поездов по участку дороги [11]. График движения грузовых поездов разделяется на зоны (рис.2), в которых используются специфические виды диспетчерских регулировок. Задачей адаптивного диспетчерского управления является выбор такого режима движения в каждый период времени, который обеспечивал бы наиболее эффективную работу участка. При определении временных границ между режимами решается стохастическая графическая задача. Признаком возможности введения экономичного режима является превышение межпоездным интервалом некоторого граничного значения $T_{опт}^{zp}$.

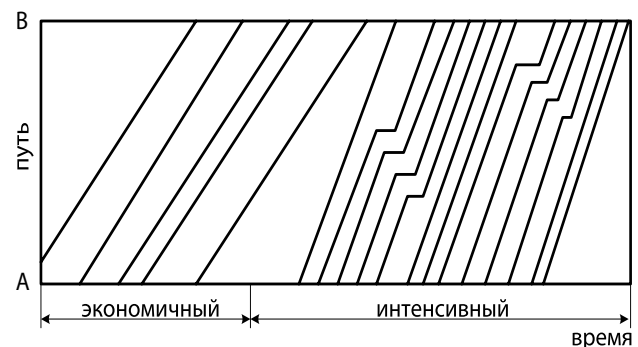


Рис.2. Пример выделения зон экономичного и интенсивного режимов управления в адаптивном графике движения грузовых поездов

Второй этап, целью которого служит корректировка траекторий движения отдельных поездов, использует детерминированную модель процесса на участке управления. В отличие от пассажирского движения, оптимизационные задачи, решаемые в процессе определения наилучших регулировочных решений по грузовым поездам, опираются на критерий экономической эффективности.

5. Механизм режимной адаптации движения грузовых поездов, 1 этап

Известно, что насыщение участка поездами, т. е. увеличение плотности поездопотока до значений, близких предельно достижимым, приводит к снижению скорости их движения. Это обусловлено как взаимовлиянием поездов в процессе их следования, так и фактором эпизодического неприяма их сортировочными и участковыми станциями. Степень сгущения подвода грузовых поездов определяется соотношением интервалов отправления поездов на участок $T_{отт}$ и прибытия на станцию $T_{пр}$. В работе [13] на основе анализа динамики вагонопотока определено условие возникновения задержек поездов (в частности, транзитных) по неприему станциями:

$$\frac{E'_{mp} - E_{non} - E'_{non}}{E'_{mp} - 1} \geq \frac{T_{отт}}{T_{пр}}$$

где E'_{mp} – фактически используемая емкость участка (число пропускаемых поездов);

E_{non} и E'_{non} – наличная и фактическая емкость путей приемо-отправочного парка.

Описанная закономерность служит предпосылкой для разработки такой технологии работы участка дороги, которая позволяет наилучшим образом использовать резервы времени в периоды спада интенсивности потока поездов.

Фрагментация потока грузовых поездов производится на этапе предварительного оперативного планирования, когда известны лишь интенсивность подхода и темп собственного формирования грузовых поездов в каждом часовом интервале. В указанном интервале назначается один из двух режимов пропуска поездов по данному участку: интенсивный или экономичный (энергоэффективный). Экономичный режим движения вводится при появлении возможности отправления грузовых поездов на участок с увеличенным межпоездным интервалом.

6. Условие введения экономичного режима движения поездов, этап 1

Значение граничного интервала $T_{отт}^{sp}$ при котором вводится экономичный режим, определяется на основе стохастической модели размножения задержек по цепи поездов [15]. Требуется найти минимальный интервал отправления поездов со станции А, при со-

блюдении которого вероятность $P(M^{stop} \geq k)$ того, что число вторичных остановок M^{stop} будет не менее k , не превышает заданного уровня α . При формулировании задачи полагается, что все поезда обладают идентичными динамическими характеристиками. Также принимается, что характеристика рассеяния продолжительности неграфиковой остановки не зависит от места ее возникновения (в пределах данного перегона или станции). В расчете учитывается, что минимальный интервал времени попутного следования поездов (по условию безопасности) равен T_0 .

Распространение задержек по цепи поездов при возникновении первичной остановки длительностью τ_1 иллюстрируется фрагментом графика, приведенным на рис.3. При построении модели полагается, что задний поезд останавливается по красному сигналу светофора тогда, когда расстояние до впереди стоящего становится равным величине S_0 минимального безопасного расстояния, и трогается немедленно после того, как передний поезд возобновляет движение.

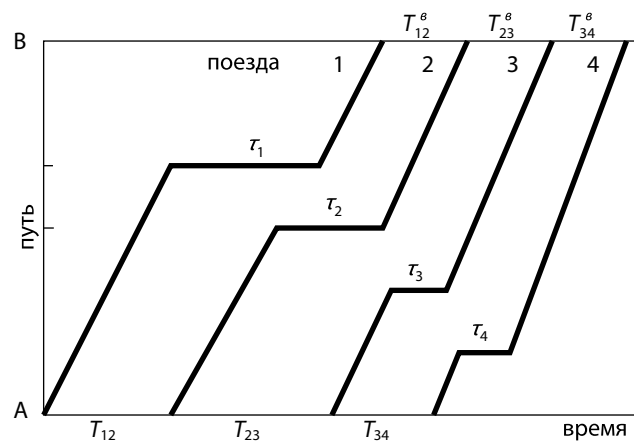


Рис.3. Механизм возникновения вторичных задержек

Очевидно, число вторичных задержек M^{stop} по группе поездов зависит от распределения вероятностей размера первичных неграфиковых остановок и средней величины межпоездного интервала. Характеристика рассеяния первичных остановок $g(\tau_{nep})$ определяется на основе статистики отказов, полученной в предшествующие периоды эксплуатации данного участка дороги.

Показано, что вероятность превышения числом вторичных задержек некоторого уровня k связана с распределением вероятности первичной остановки зависимостью:

$$P(M^{stop} \geq k) = \int_{kT}^{\infty} g(\tau_{nep}) dt, \quad 1 \leq k \leq n-1$$

Используя полученное соотношение, получаем искомое значение граничного межпоездного интервала:

$$T_{отт}^{sp} = T_0 + \frac{x_{1-\alpha}}{k}$$

Где $x_{1-\alpha}$ – квантиль распределения случайной величины $\tau_{\text{пер}}$ – является решением уравнения $\alpha = \int_x^{\infty} g(\tau_{\text{пер}}) dt$ относительно величины x . Значение $T_{\text{отп}}^{\text{zp}}$ рассматривается как граница, которая разделяет периоды экономичного и интенсивного пропуска грузовых поездов по участку.

С целью определения вида распределения неграфиковых остановок проанализирована реальная ситуация, которая наблюдалась в определенном суточном периоде на участке Х–Б восточной части Транссибирской железнодорожной магистрали протяженностью 210 км. На этом участке возникла зона напряжений (перегоны 9–10 общей длиной 19 км). В период, когда проводились наблюдения, на этой зоне регулярно возникали кратковременные неграфиковые остановки. Определено, что распределение $g(\tau_{\text{пер}})$ является показательным с параметром $\lambda=0,26 \cdot 1/\text{мин}$.

В качестве примера рассмотрим ситуацию, когда на участке железной дороги в период сгущения потока грузовых поездов допускается возникновение не более 4 вторичных задержек с вероятностью, не меньшей 0,9. Учитывая, что безопасный межпоездный интервал для тяжеловесных грузовых поездов составляет 4 мин., получаем, что введение экономичного режима целесообразно, если можно обеспечить их отправление с исходной станции участка с интервалом не менее 5,8 мин. Увеличение интервала до 10 мин. ведет к снижению вероятного числа вторичных остановок до единицы.

7. Детерминированная задача оптимального пропуска поездов, 2 этап

Задача поиска оптимального графического решения формулируется в общем виде как динамическая задача размещения ресурсов, в которой присутствуют ограничения по мощности [15]. В качестве критерия оптимизации используется объем финансовых затрат. Предположим, необходимо выполнить заданное число работ – пропустить n поездов – в течение определенного периода. Плановый период продолжительностью L (диспетчерская смена) разделен на интервалы равной длины, составляющие счетное множество $T=\{1, \dots, l\}$. Множество технических средств обозначим через $I=\{1, \dots, m\}$, множество работ (поездов), подлежащих выполнению за плановый период, – через $J=\{1, \dots, n\}$. Предположим, что множество I разбито на непересекающиеся подмножества $I_t, t \in T$. Долю работы поезда j , приходящуюся на i -й элемент (блок-участок), обозначим как x_{ij} .

Считаем, что заданы следующие величины:

C_{jt}^0 – накопленный начальный объем эксплуатационных затрат по j -му поезду, который отправляется на участок в интервале t ;

c_{ij} – удельный объем расхода ресурса (энергетиче-

ского или денежного) на единицу работы при следовании j -го поезда по i -му блок-участку;

$C_{ij}^{\text{осм}}$ – затраты на выполненную остановку j -го поезда при нахождении на i -м блок-участке;

v_{it}^0 – число технических средств (участков) i -го типа на начальный момент t -го часового интервала времени.

Дополнительный расход ресурса $C_{ij}^{\text{осм}}$ при выполнении остановки примем для каждого из типов поездов фиксированным.

Переменные задачи имеют следующий смысл:

$z_{jt} = \begin{cases} 1, & \text{если в } t\text{-м интервале на участок вступает } j\text{-й поезд,} \\ 0 & \text{– в противном случае} \end{cases}$

$x'_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если имеется остановка } j\text{-го поезда на } i\text{-м участке,} \\ 0 & \text{– в противном случае} \end{cases}$

$x_{ij} \geq 0$ – доля работы поезда j , приходящаяся на i -й блок-участок.

Динамическая задача выбора сценария пропуска потока поездов формулируется следующим образом:

Найти:

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \left(C_{jt}^0 z_{jt} + \sum_{i \in I_t} c_{ij} x_{ij} + \sum_{i \in I_t} C_{ij}^{\text{осм}} x'_{ij} \right)$$

при условиях:

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \sum_{j \in J} p_{ij} x_{ij} \leq v_{it}^0, x_{ij} \in \{0, 1\}, i \in I, j \in J, t \in T.$$

Целевая функция задачи выражает суммарные затраты на пропуск всех поездов в течение планового периода. Первое условие гарантирует полное выполнение всех работ. Второе условие ограничивает возможности выполнения работ имеющимися в наличии техническими средствами. Если в t -м интервале времени выходит из строя определенная доля s_{it} участков i -го типа, второе ограничение приобретает вид:

$$\sum_{j \in J} p_{ij} x_{ij} \leq v_{it}^0 - \sum_{\tau=1}^{t-1} s_{i\tau} \sum_{j \in J} p_{ij} x_{ij}, i \in I, t \in T.$$

Сформулированная задача динамического выбора оптимального сценария относится к числу NP-трудных задач дискретной оптимизации. Разработан ряд методов рационального поиска решений по корректировке графика движения поездов, сокращающих компьютерное время [3].

8. Потенциал улучшения экономики грузовых перевозок при использовании адаптивного управления движением поездов

Экспериментальные исследования, проведенные на ряде железных дорог, показывают, что потери электроэнергии при неграфиковой остановке тяжеловесного поезда массой 6-8 тысяч тонн достигают 300-400 кВтч. Согласно статистике, на двухпутной загруженной магистральной линии неграфиковая остановка каждого грузового поезда возникает (в среднем) каждые 3 часа его следования (на плече обслуживания 200 км). Непроизводительный расход энергии, обусловленный этим

фактором, составляет около 6% от общих затрат. Уменьшение числа остановок, по крайней мере, на половину, использование энергосберегающих режимов вождения поездов дает при существующем размере движения (к примеру, при 70 парах поездов на Транссибирской магистрали) годовую экономию энергии на каждом диспетчерском участке, превышающую 8 млн. кВтч.. Эксплуатационные затраты при этом снижаются на 25 млн. руб.

Заключение

Задачей диспетчерского персонала при изменении интенсивности грузового потока или условий пропуска по участку дороги является принятие решения о том, в каком периоде должен быть реализован режим интенсивного, в каком – экономичного пропуска потока. Признаком возможности введения экономичного режима является увеличение межпоездного интервала сверх расчетного граничного значения. При этом будут созданы условия для обеспечения минимального числа неграфиковых задержек поездов. На втором этапе адаптивного управления – этапе непосредственного регулирования движения – решение оптимизационной задачи заключается в назначении каждому поезду экономичного сегмента такого расписания, реализация которого даст минимальный расход энергетического ресурса. Добавочный резерв времени, целенаправленно вводимый в этот период, при движении поезда по диспетчерскому участку протяженностью порядка 200 километров не превышает 5 процентов от полного времени хода (10-15 мин.). Рассмотренная регулировка практически не снижает пропускную способность участка, не приводит к вынужденному оставлению части поездов на исходной станции.

Литература

1. D'Ariano, A., Pacciarelli, D., and Pranzo, M. (2007) A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network / *European Journal of Operational Research*, 183 (2). - pp. 643 – 657.
2. Quan Lu, Dessouky, M., and Leachman, R. C. (2004) Modeling Train Movements through Complex Rail Networks / *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation* v.14. - pp. 32-76.
3. Törnquist, J. (2005) Computer-based decision support for railway traffic scheduling and dispatching: A review of models and algorithms / *Proceedings of ATMOS 2005*, - Palma de Mallorca, Spain, October 2005.
4. Fan, B., Roberts, C., and Weston, P. (2011) A hybrid algorithm for optimal junction traffic control / *Proceedings of the 4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*. - Rome, February 16–18. – p. 65
5. Semet, Y., and Schoenauer, M. (2006). On the benefits of inoculation, an example in train scheduling / *Proceedings of the 8th annual conference on genetic and evolutionary computation (GECCO '06)*. – pp. 1761–1768.
6. Cordeau, J.-F., Toth, P., and Vigo, D. (1998) A survey of optimization models for train routing and scheduling / *Transportation Science*, 32(4). – pp. 380–404.
7. Huisman, D., Kroon, L., Lentink, R., and Vromans, M. (2005) Operations research in passenger railway transportation / *Erasmus Research Institute of Management (ERIM)*. Research paper № ERS-2005-023-LIS.
8. Vansteenwegen, P., and Van Oudheusden, D. (2007) Decreasing the passenger waiting time for an intercity rail network / *Transportation Research, Part B: Methodological*, Vol. 41, Issue 4, May. – pp. 478-492.
9. Ho, T. K., and He, Y. Q. (2008) Evaluation on service quality of railway timetable / *Proceedings of the 6-th International Conference on Traffic and Transportation Studies*, 5-7 August 2008. - Nanning.
10. Carey, M., and Kwiecinski, A. (1994) Stochastic approximation to the effects of headways on knock-on delays of trains / *Transportation Research, Part B*, 28 (4). – pp. 251-267.
11. Давыдов, Б. И. Экономически эффективное управление движением поездов / Б. И. Давыдов // *Экономика железных дорог*, 2012, №3. - С.28-37
12. Гапаненко В. И. Экономика графика / В. И. Гапаненко, С. С. Жабров, Ю. В. Попов // *Железнодорожный транспорт*, 2006. № 5. - С. 24–28.
13. Климанов, В. С. Вопросы оперативного регулирования поездопотоков на направлении / В. С. Климанов // *Дисс. к.т.н.* - Москва, 1982. – 213 с.
14. Davydov, B. (2014) Optimal rescheduling for the mixed passenger and freight line / *Proceedings of the 14th International conference on Railway Engineering Design and Optimization. COMPRAIL 2014*. Rome, 24-26 June 2014.
15. Кочетов, Ю. А. Методы локального поиска для дискретных задач размещения / Ю. А. Кочетов // *Дисс. д-ра физ. мат. наук.* – Новосибирск, 2009. - 267 с.