

УПРАВЛЕНИЕ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫМИ ТРАНСПОРТНЫМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ

Романчева Н.И.

Московский государственный технический университет гражданской авиации
(МГТУ ГА), Москва, Россия
n.Romancheva@mstuca.aero

Аннотация. Рассматривается задача формирования подходов к управлению мультимодальными транспортными системами с применением технологии анализа больших данных. Анализируются ключевые аспекты и проблемы, связанные с интеграцией различных видов транспорта, предлагаются методы оптимизации транспортных потоков на основе данных о спросе и предложении.

Ключевые слова: транспортные системы, мультимодальные, экономика данных, сервис МaaS.

Введение

Задачи управления развитием крупномасштабных систем, как отмечалось в [1], состоят в «выборе состава, взаимосвязей и вариантов развития элементов различных типов, согласованных между собой во времени, с учетом технологии производственных и управленческих задач, ограничений на ресурсы, потребляемые в процессе развития, внешних требований к структурным характеристикам системы, обеспечивающим наиболее эффективное удовлетворение потребностей в "продукте", производимом системой ...». Данные задачи решались и ранее, например, в работах [2] сформирована методология управления со структурой марковского процесса коллективных решений, в [3] описаны методы и инструментальные средства управления, в [4] комплекс моделей стратегического управления.

Типичным примером крупномасштабной системы является транспортная система. Общее содержание функций управления является единым для всех экономических объектов, однако при разработке и анализе организационных структур и систем управления транспортными системами необходимо учитывать ряд специфических особенностей транспорта: дискретность, цикличность, ограниченная пропускная и провозная способность, взаимосвязь рынков транспортных услуг с обслуживаемыми товарными рынками, повышенные риски [5].

В соответствии с целями Транспортной стратегии Российской Федерации [6] для дальнейшего эффективного развития транспорта, важно обеспечить расширение предоставляемых транспортных услуг соответствии с принципами мультимодальности, интеграции видов транспорта. Эффективность мультимодальных перевозок зависит от правильных расчетов стыковок маршрута: объем перевозок и возможности транспортной инфраструктуры.

С развитием технологий сбора и анализа больших данных и усовершенствованием методов искусственного интеллекта возможности для оптимизации и управления сложными транспортными системами значительно расширились. Мультимодальные транспортные системы, включающие различные виды транспорта и создающие «бесшовную» зону перевозок, требуют комплексного подхода к управлению, чтобы обеспечить эффективность, безопасность и устойчивость. В [7] анализируется использование новой парадигмы развития мобильности транспортных систем – концепция МaaS (Mobility as a Service), предоставляющая сервис через совместный цифровой канал. Задачей МaaS является интеграция данных от различных видов транспорта.

В контексте глобализации и увеличения объемов перевозок, а также в условиях постоянно меняющейся экономической ситуации и различных вызовов, управление мультимодальными транспортными системами на основе данных становится ключевым элементом для достижения устойчивого развития транспортной инфраструктуры.

1. Мультимодальные транспортные системы

1.1. Принципы управления мультимодальными системами

Мультимодальная система транспорта как объект управления обладает рядом особенностей:

- Комплексность - различные виды транспорта имеют свои требования к управлению, что усложняет координацию;
- Динамичность - транспортные потоки постоянно меняются, что требует от системы управления способности быстро адаптироваться к новым условиям и изменениям в спросе и предложении;

- Неопределенность - непредсказуемые события, такие как погодные условия или технические неисправности, могут влиять на работу системы, требуя внедрения вероятностных моделей и планов на случай чрезвычайных ситуаций;
- Интермодальные переходы - перевозка разными видами транспорта требует слаженной работы терминалов и логистических центров, а также точного планирования и графиков и расписания;
- Зависимость от инфраструктуры - эффективность мультимодальных перевозок напрямую зависит от качества и доступности транспортной инфраструктуры;
- Информационные потоки: управление мультимодальными системами требует обмена большим объемом данных между участниками логистических цепочек;
- Ориентация на клиента - система должна быть гибкой и ориентированной на удовлетворение потребностей клиентов, в том числе с учетом MaaS, предоставляя им информацию о статусе их грузов в реальном времени.

Принцип управления мультимодальной транспортной системой с помощью данных основывается на сборе, анализе и использовании информации для оптимизации работы системы. Ключевые аспекты этого процесса состоят в сборе, интеграции и анализе данных, принятии решений и реагировании на изменение. Важны такие элементы как обратная связь и оптимизация с обеспечением устойчивости и безопасности данных. Следует отметить и такой аспект, влияющий на управление, как соответствие законодательству.

В Стратегии [6] определены термины "мультимодальная перевозка" и "мультимодальный транспортный маршрут". Под мультимодальной перевозкой понимается «перевозка пассажиров или грузов несколькими видами транспорта, в том числе по единому перевозочному документу, которая организуется одним или несколькими операторами», под вторым термином – «комплексная система перемещения товаров и пассажиров различными видами транспорта на базе элементов транспортной инфраструктуры Единой опорной сети».

Мультимодальная система должна собирать данные со всех видов транспорта, включая автомобили, поезда, самолеты и корабли, а также данные о пассажиропотоках, грузоперевозках, погодных условиях и состоянии инфраструктуры. Для решения этой задачи могут быть использованы различные методы анализа данных, включая машинное обучение, искусственный интеллект и предиктивную аналитику. Это требует сбора и обработки больших объемов данных из разнообразных источников, таких как датчики на транспортных средствах, системы регистрации и оправоки пассажиров и багажа, метеостанции и т.д.

Различные данные должны быть интегрированы в единую информационную систему для обеспечения целостности и доступности информации. С помощью методов анализа данных, таких как статистический анализ, машинное обучение и оптимизационные модели, система может выявлять закономерности, прогнозировать спрос и предложение и определять оптимальные маршруты и расписания.

На основе анализа данных система может автоматически принимать решения о перераспределении ресурсов, изменении маршрутов и расписаний, чтобы повысить эффективность и удовлетворить спрос. Кроме того, система должна быть гибкой и способной быстро реагировать на непредвиденные события, такие как аварии, погодные катаклизмы или изменения в пассажиропотоке.

Мультимодальная транспортная система должна постоянно иметь обратную связь от пользователей и анализировать эффективность принятых решений для дальнейшей оптимизации. Данные должны быть защищены от несанкционированного доступа и атак, а система должна быть устойчива к сбоям и ошибкам. Помимо технических аспектов управление данными должно соответствовать местным и международным законодательным требованиям, включая защиту персональных данных.

1.2. Постановка задачи

Использование искусственного интеллекта [8] в управлении мультимодальной транспортной системой позволит повысить ее эффективность, надежность и удобство для пользователей, а также способствовать развитию более устойчивого и экологичного транспорта.

Определим ключевые переменные и параметры, которые будем использовать в модели. Переменные спроса: цена, время, погода, особые события, социально-экономические факторы. Переменные предложения: количество транспортных средств, расписание, маршруты, пропускная способность.

Ограничения системы: физические ограничения инфраструктуры, законодательные ограничения, экологические стандарты и рекомендации.

Цели устойчивости: сокращение выбросов, энергоэффективность, социальная ответственность. Определим математические функции для каждого из этих элементов.

Модель управления мультимодальной транспортной системой с помощью искусственного интеллекта может включать следующие элементы:

- Функцию спроса $D(t, p, w, e, s)$:

$$D(t, p, w, s) = a + b * t + c * p + d * w + e * q + f * s \quad (1)$$

где t — время, p - цена, w — погодные условия, q - особые события, s — социально-экономические факторы, a, b, c, d, e, f — коэффициенты, определяемые через анализ данных;

- Функцию предложения $S(t, r, m, i)$, выраженную через доступные ресурсы и ограничения:

$$S(t, r, m, i) = f + q * r + h * m + j * i - u * L(t) \quad (2)$$

где t — время, r - количество доступных транспортных средств, m – маршруты (расписание, например, частота отправления), i –инфраструктура (пропускная способность, например, количество пассажиров, которое может быть перевезено), $L(t)$ - потери из-за ограничений системы на основе исторических данных, например, задержки, отмены маршрутов); f, q, h, j, u - коэффициенты, определяемые через анализ данных с помощью регрессионного анализа. Эта функция отражает факт того, как системные ограничения могут уменьшать это предложение;

- Функцию оптимизации $O(D, S)$, которая минимизирует затраты или максимизирует эффективность соответственно:

$$O(D, S) = \min r, m(c) \quad (3)$$

или

$$O(D, S) = \max r, m(E) \quad (4)$$

где C — затраты, E — эффективность;

- Модель принятия решения $R(D, S, \Delta)$, с учетом изменения во внешних условиях Δ запишем следующим образом:

$$R(D, S, \Delta) = \frac{\text{перераспределить ресурсы, если } \Delta > \text{порог}}{\text{сохранить текущее состояние, если } \Delta \leq \text{порог}} \quad (5)$$

Здесь Δ обозначает изменения во внешних условиях, таких как погода, трафик или спрос. Порог – это заранее определенное значение, при котором система должна реагировать изменением своего состояния. Если значение Δ превышает этот порог, то система должна перераспределить ресурсы (например, изменить маршруты или расписание). Если значение Δ меньше или равно порогу, то система сохраняет текущее состояние;

- Функцию обучения и предложения $L(D_{new}, S_{new})$, которая обновляет модель на основе новых данных;
- Функцию стоимости $C(D, S)$, отражающую экономические и экологические издержки системы.

Тогда математическую модель можно записать следующим образом: минимизировать $C(D, S)$ при условиях

$$D(t, p, w, s) = S(t, r, m, i) \quad (6)$$

$$D_{new} = R(D, p, w, e, s) \quad (7)$$

$$S_{opt} = O(D, S) \quad (8)$$

Для учета возможных ошибок или неточностей данных при работе с прогнозами и оценки рисков в модель были включены коэффициенты неопределенности. Для количественной оценки неопределенности введем вероятностное распределение или диапазон возможных значений коэффициентов. Для минимизации влияния неопределенности на систему необходимо разработать стратегию управления рисками, например, через создание резервов транспорта или гибкого расписания.

Если имеются данные с коэффициентом неопределенности, можно модифицировать функцию предложения (2):

$$S(t, r, m, i, u) = q * r + h * m + j * i - u * L(t) * (1 - u) \quad (9)$$

где u - коэффициент неопределенности данных, выраженный как доля от 0 до 1. Значение u 0,1 означает, что данные на 10% менее надежны, и это уменьшит общее предложение на 10 %.

Для оценки и управления рисками необходимо провести анализ чувствительности - как изменения в неопределенных параметрах влияют на результаты модели.

Мультимодальность в задаче оптимизации управления перевозками учитывается путем включения переменных, которые представляют различные виды транспорта и их взаимодействие. Управление на основе данных обеспечивается использованием реальных данных для параметризации модели и динамической адаптации к изменениям.

В качестве целевой функции рассматриваем минимизацию общих затрат на перевозку. Переменные мультимодальности – для каждого вида транспорта введем переменную x_{imode} , где $mode$ - тип транспорта. Параметры модели, такие как стоимость, время в пути и пропускная способность, определяются на основе исторических и текущих данных. Это позволяет модели быть адаптивной и отражать реальные условия. Для учета пересадок между различными видами транспорта, введем ограничения, которые обеспечивают согласованность перевозок. Для динамического изменения маршрутов и расписания в ответ на текущие данные о состоянии транспортной сети, введем динамическое управление в виде переменных решения. Тогда целевую функцию можно записать в виде:

$$F(x_{1auto}, x_{2raul}, \dots, x_{nship}) \rightarrow \min \text{ или } \max \quad (10)$$

при следующих ограничениях:

- Ограничения мультимодальности: $x_{imode} \leq c_{imode}$, где c_{imode} – пропускная способность для i -го маршрута и вида транспорта;
- Ограничения пересадок: $x_{imode1} + x_{imode2} \leq t_{transfer}$, где $t_{transfer}$ – время, необходимое для пересадки между видами транспорта;
- Динамические ограничения: $f_{dinamic}(x_{1auto}, x_{2raul}, \dots, x_{nship}, data) \leq d_{dinamic}$, где $f_{dinamic}$ – функция, отражающая динамические изменения параметров в зависимости от текущих данных, а $d_{dinamic}$ – допустимое значение этих параметров.

В качестве дополнительных условий примем:

- Неотрицательность: $x_{imode} \geq 0$ для всех i и всех видов транспорта;
- Целочисленность или бинарность: в зависимости от требований к переменным.

Рассмотрим пример решения задачи оптимизации для мультимодальных перевозок. Предположим, компания ставит задачу оптимизации доставки грузов из пункта А в пункт В, используя различные виды транспорта. Целевой функцией будет минимизация общих затрат на перевозку. Переменные - количество товаров, перевозимых i -ым видом транспорта: x_{auto} - количество товаров, перевозимых автомобильным транспортом, x_{raul} - количество товаров, перевозимых железнодорожным транспортом, x_{ship} - количество товаров, перевозимых морским транспортом и т.д. Ограничениями в данной задаче будет пропускная способность, время доставки и стоимость перевозки. Задача оптимизации - минимизировать стоимость перевозки: $\min C(x_{auto}, x_{raul}, \dots, x_{ship}, \dots)$, при ограничениях, указанных выше. Результатом будем оптимальное распределение груза (пассажиров) между видами транспорта с минимальными затратами, например, получили значения переменных $x_{auto} = 30$, $x_{raul} = 40$, $x_{avia} = 100$. Это означает, что для минимизации затрат компании следует перевезти 30 единиц товара автомобильным транспортом, 40 – железнодорожным и 100 – авиацией.

Учет таких свойств мультимодальной системы как расписание и надежность, добавит в модель управления мультимодальных перевозок дополнительные слои:

- Расписание: для каждого вида транспорта и маршрута введем переменные времени отправления $t_{start, mode}$ и времени прибытия $t_{end, mode}$, которые должны соответствовать расписанию. Это можно отразить в ограничениях модели, гарантирующих, что перевозки начинаются и заканчиваются в установленные временные окна.
- Надежность: введем коэффициенты надежности r_{mode} для каждого вида транспорта, которые отражают вероятность задержек или отмены рейсов. Эти коэффициенты могут быть использованы для корректировки стоимости или времени в пути, чтобы учитывать риски, связанные с каждым видом транспорта;
- Интеграция расписания и надежности: добавим штрафы за отклонение от расписания или низкую надежность, чтобы стимулировать выбор более надежных и точных вариантов перевозки.

Тогда целевую функцию можно записать в виде:

$$F(x_{1auto}, x_{2raul}, \dots, x_{n, ship}, \dots, t_{start, mode}, t_{end, mode}, r_{mode}) \rightarrow \min \quad (11)$$

Для оптимизации мультимодальных перевозок и интеграции данных из различных видов транспорта можно использовать Интернет вещей (IoT).

Датчики IoT могут собирать данные с каждого из этих видов транспорта, предоставляя целостное представление о состоянии всей транспортной сети. Использование IoT позволяет синхронизировать расписания и операции различных видов транспорта, что позволяет минимизировать время ожидания при пересадках и улучшить общую эффективность перевозок.

Датчики и трекеры IoT могут отслеживать местоположение грузов в реальном времени, что обеспечивает надежность и прозрачность в логистических операциях. Информация о местоположении и состоянии грузов может быть интегрирована с клиентскими интерфейсами, предоставляя заказчикам возможность отслеживать свой груз в реальном времени. Кроме того, IoT позволяет проводить дистанционный мониторинг состояния транспортных средств, что помогает предотвратить задержки из-за технических неисправностей. Для контроля загруженности портов и оптимизации работы светофоров могут быть использованы данные с датчиков на дорогах, мостах и в портах управления транспортной инфраструктурой. Также анализ данных с датчиков позволяет предсказывать необходимость в обслуживании транспортных средств, что снижает риск внезапных поломок и задержек.

Соответствие мультимодальных перевозок экологическим требованиям обеспечивают: датчики и сенсоры IoT, собирая данные о выбросах и потреблении энергии. Это также оптимизирует маршруты и выбирается более экологичный вариант перевозок.

2. Заключение

В условиях перехода к экономике данных открываются новые направления для мультимодальных транспортных систем, предлагая беспрецедентные возможности для оптимизации и устойчивости. Использование данных для управления позволяет радикально трансформировать городскую мобильность. Однако вместе с возможностями появляются и серьезные вызовы: интеграция разнородных данных, необходимость разработки надежных протоколов для их обработки, защита личных данных и приватность в контексте увеличения объема собираемых и обрабатываемых данных. Технологические инновации и международное сотрудничество будут ключевыми в решении текущих и будущих задач, стоящих перед мультимодальными транспортными системами.

Литература

1. *Цвиркун А.Д.* Проблемы управления развитием крупномасштабных систем в современных условиях // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023): труды Шестнадцатой международной конференции, 26–28 сентября 2023 г., Москва / под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна – М.: ИПУ РАН, 2023. – С. 26-35.
2. *Цвиркун А.Д., Баранов В.В.* Управление развитием: структурный анализ, задачи, устойчивость // Автоматика и телемеханика – 2018. – Выпуск 10 С. 55-75.
3. *Акинфиев В.К. Цвиркун А.Д.* Методы и инструментальные средства управления развитием компаний со сложной структурой активов: монография; Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова, Минобрнауки РФ. М.: ИПУ РАН, 2020 - 306 с.
4. *Варнавский В.Г.* Комплекс моделей стратегического управления крупномасштабной транспортной инфраструктурой // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2021): труды Четырнадцатой междунар. конф: в 2 т. – М.: ИПУ РАН, 2021.– С. 43–49.
5. *Герامي В.Д.* Управление транспортными системами. Транспортное обеспечение логистики: учебник и практикум для вузов/ В.Д.Герامي, А.В.Колик.— 3-е изд., перераб. и доп.— М.: Издательство Юрайт, 2024.— 536 с.
6. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 год с прогнозом на период до 2035 года [Эл.ресурс] <https://docs.cntd.ru/document/727294161>.
7. *Менн А.А.* Новые задачи управления транспортной мобильностью // Автоматизация в промышленности. 2024. №6. – С.46-51.
8. ГОСТ Р 56829-2015 Национальный стандарт Российской Федерации «Интеллектуальные транспортные системы» // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: сайт. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200128315> (дата обращения: 20.05.2024).