

УДК: 517.977.1, 656.02

СИТУАЦИОННАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ В ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

**Охотников А.Л.**

Заместитель начальника Департамента – начальник Отдела стратегического развития, АО «НИИАС», E-mail: a.ohotnikov@vniias.ru, Москва, Россия

Аннотация

В статье исследуется новая технология ситуационной маршрутизации с обоснованием введения такого понятия. Современное состояние транспортных сетей характеризуется ростом числа подвижных объектов и сложности управления, а также наличием вариабельности, и в этих условиях традиционные методы маршрутизации становятся неэффективными. Приведены примеры использования ряда методов для решения задач оптимизации маршрутов транспортной сети, и в качестве альтернативы предлагается ситуационная маршрутизация. Вводятся четыре типа информационных ситуаций, применяемых в транспортной сети, использование которых является основой для ситуационной маршрутизации. Показано, что редукция сети на информационные ситуации уменьшает размерность матрицы оптимизации и снижает время вычислений для проведения анализа. Введены две структуры сети: физическая структура и структура потоков. В сложных транспортных сетях необходимо различать две топологические модели или топологии: структурную и пропускную. При возникновении внешних воздействий на сеть возможно рассогласование между ними. Ситуационная маршрутизация устраняет такое рассогласование и позволяет решать задачу оптимизации для новых условий. Отмечена возможность использования метамоделирования для оптимизации маршрутизации в транспортной сети.

Ключевые слова:

Управление перевозками, транспортная сеть, оптимальная маршрутизация, информационная ситуация, сетевая ситуация, нечеткая ситуация.

SITUATIONAL ROUTING IN A TRANSPORT NETWORK

Okhotnikov A.L. Deputy Head of Department, Head of Strategic Development, JSC «NIIAS», E-mail: a.ohotnikov@vniias.ru, Moscow, Russia

Abstract

The article studies a new technology of situational routing with the substantiation of the introduction of such a concept. The current state of transport networks is characterized by an increase in the number of moving objects and the complexity of control, as well as the presence of variability, and in these conditions, traditional routing methods become ineffective. Examples of using a number of methods to solve problems of optimizing transport network routes are given, and situational routing is proposed as an alternative. Four types of information situations used in the transport network are introduced, the use of which is the basis for situational routing. It is shown that reducing the network to information situations reduces the dimension of the optimization matrix and reduces the computation time for analyzing. Two network structures are introduced: physical structure and flow structure. In complex transport networks, it is necessary to distinguish between two topological models or topologies: structural and throughput. When external influences occur on the network, a mismatch between them is possible. Situational routing eliminates such a mismatch and allows solving the optimization problem for new conditions. The possibility of using metamodeling to optimize routing in the transport network is noted.

Keywords:

Transportation management, transport network, optimal routing, information situation, network situation, fuzzy situation.

Введение

Современная транспортная система характеризуется ростом скоростей и интенсификацией транспортных потоков, ростом сложности управления движением, воздействием внешней среды на движение. Эти факторы требуют оптимизации маршрутов в транспортной сети (ТС), которая включает [1]: динамическую маршрутизацию транспортных объектов (средств); формирование моделей для всех возможных маршрутов [2]; оптимизацию всех маршрутов, исходя из параметров движения и потоков на текущий момент времени; моделирование потоков транспортной сети [3]; оптимизацию потоков по текущим условиям движения; ситуационный анализ транспортной сети [4] с целью выявления аномалий движения; применение информационного и метамоделирования при анализе транспортных потоков [5]; применение распределенного управления на транспорте.

Все указанные элементы необходимо применять комплексно в рамках единой транспортной политики (ЕТП) при управлении транспортом [6]. Без совершенствования методов анализа и управления транспортными сетями развитие ЕТП невозможно. Доминирующей технологией в управлении маршрутами является информационное моделирование.

Современное информационное моделирование глобальных систем использует интегральную модель информационного поля [7,8]. Информационное поле содержит большие объемы полезной информации, включая явную и неявную информацию. Вместе с тем оно содержит информационную неопределенность и нечеткость [9,10]. Для устранения информационной неопределенности необходимо применять специальные методы ее устранения. Исходным материалом для управления транспортом служат фактофиксирующие пространственные и динамические модели [11].

Можно констатировать, что в современных транспортных сетях растет сложность и масштаб сети. При этом вследствие возрастания скоростей появляется требование более оперативного принятия решений. Чем сложнее и масштабнее сеть, тем больше вариантов маршрутов содержатся в ней и их необходимо смоделировать. Большое число вариантов маршрутов определяет более длительный процесс их анализа и оптимизации. Как инструмент поиска маршрутов в условиях сложных сетей для их оптимизации применяют мультиагентные системы (MAS) [12]. Ярким примером применения такой системы на железной дороге является единая интеллектуальная система управления железнодорожным транспортом (ИСУЖТ) – управляющая система на основе адаптивного планирования с помощью преимущественно мультиагентных технологий.

Модели в транспортной сети

Современные транспортные сети характеризуются наличием различных внешних воздействий и динамикой внутреннего состояния в сети. Несмотря на наличие бессветофорного регулирования движения поездов и технологии цифровой железной дороги (ЦЖД) физические узлы на железной дороге (как сети) сохранились [13]. Если раньше узлы определялись по сигнальным блокам, то теперь узлы сохранились как некие отрезки дистанции и точки остановки, погрузки и выгрузки.

Обеспечение быстрого и безопасного движения между узлами транспортной сети в условиях жестких требований к задержкам – одна из важнейших транспортных проблем. Для повышения качества транспортных операций необходимо применение новых моделей, технологий, алгоритмов и методов для маршрутизации транспортных потоков. Все эти нововведения должны адаптивно модифицировать маршруты в соответствии с изменением внешних условий транспортных потоков в сети. Широкое применение информационных технологий [5] в управлении транспортом привело к созданию и применению специальных информационных моделей. В первую очередь это модель информационной конструкции [14], которая является обобщенной параметрической топологической моделью. Она моделирует структуру сети и имеет вид либо простой топологической модели, либо модели, в которой топология дополнена качественными параметрами.

Другой важной моделью является модель информационной ситуации [15], которая служит основой ситуационного анализа [4]. Модель информационной ситуации редуцирует информацию и фактически является кластером. Следующей важной моделью является модель взаимосвязей информационных понятий [16], которая обеспечивает баланс между информационными моделями и ресурсами.

Эффективность сходимости сети зависит от фактического набора маршрутов и поиска наилучшего маршрута при внесении изменений (перенаправления потоков). Это заключается в отправке трафика на резервный путь, если транспортная сеть перегружена. В этом случае стандартная транспортная задача не может быть использована для маршрутизации, поскольку она дает только единственное решение с фиксированными параметрами. Поэтому в современных условиях для решения этой задачи используется набор маршрутов (сценариев) на случай возможных изменений. Реальная информация о сети содержит информационную неопределенность и характеризуется вариативностью условий внешней среды.

Решения задачи маршрутизации в нечеткой ситуации

Использование ситуационного подхода в задачах оптимизации маршрутов транспортной сети

предполагает принятие управляющего решения только на основе анализа возникшей ситуации на маршруте [17]. Данная задача усложняется в условиях нечеткой ситуации. Существует ряд методов для решения данной задачи.

Основанный на определении связанного маршрута графа, который определяет начальное состояние транспортной сети, широко применяется метод нечеткой ситуационной сети [18]. В данном случае используется имитационная модель маршрута с целью анализа различных сценариев маршрута и принятия оперативных решений при возникновении нештатных ситуаций на определенных узлах в текущее время, чтобы своевременно скорректировать опорный план и выбрать новый маршрут (см. рис.1).



Рисунок 3. Задачи соотнесения геоописаний

В основе метода анализа иерархий заложена математическая обработка оценок экспертов. Экспертные оценки далее используются для матричных вычислений и дальнейшей свертки критериев [19]. В данном методе иерархия является одним из способов представления структуры принятия решений и служит для структурирования сложных задач с количественной оценкой вариантов маршрутизации. Одним из этапов решения задачи маршрутизации является декомпозиция задачи путем определения ее компонентов и связей между ними для формирования иерархической структуры решения задачи.

Одним из наиболее перспективных направлений для задач маршрутизации в слабоструктурированных системах является применение теории нечетких множеств. Одним из методов для анализа альтернатив в условиях неопределенности можно признать математическую модель *FuzzyTECH* с использованием набора правил [20]. Если ввести степень, которая будет соответствовать термам, то полученные значения будут обработаны в соответствии с правилом, основанным на таких переменных, как расстояние и время прохождения участка, пропускная способность. Сформированные значения будут выводиться с указанием достоверности правила в виде значений 1 (истина) или 0 (ложь) для каждого маршрута.

Существуют также методы формализации экспертной информации при выборе ситуационной модели при принятии решения. К таким методам относят:

- Модель максиминной свертки (ММС);
- Модель абсолютного решения (МАР);

- Модель основного параметра (МОП);
- Модель компромиссного параметра (МКП);
- Модель эталонного сравнения (МЭС).

Анализируя применение вышеперечисленных методов, можно сделать промежуточный вывод:

1. Нечеткие модели, на которых основаны методы решений, позволяют объективно оценить набор альтернатив с учетом различных критериев. Оценка альтернатив использует ранее ранжированный порядок набора переменных.

2. Все нечеткие методы принятия решений зависят от различных факторов и критериев, используемых в математической модели, что позволяет повысить надежность принимаемого решения за счет смягчения или устранения несоответствий и ошибок в исходных данных.

3. Различные методы, использующие разные подходы, показывают разные результаты; каждый подход имеет свои особенности и ограничения. Для их применения необходимо понимать все условия их использования.

Ситуационный анализ транспортной сети

Построение и оптимизация маршрутов транспортных объектов происходит в пространственной структуре, которую обозначают как «транспортная сеть». Транспортной сетью принято называть топологическую схему, имеющую один узел входа и один узел выхода. Такую модель применяют не только в транспортных сетях, но и в информационно-вычислительных сетях. Транспортные сети часто бывают гетерогенны. Международные транспортные коридоры служат иллюстрацией гетерогенных ТС. Задачу снижения гетерогенности решают за счет применения модели информационной ситуации.

Для формирования маршрутов и их модификации целесообразно применение ситуационного анализа [21, 22]. Такой анализ использует понятие информационной ситуации в пространстве [23] и может использовать модель параметрической информационной ситуации [24]. Информационная ситуация в простейшем варианте устраняет гетерогенность.

Для ситуационного анализа ТС целесообразно введение типов информационной ситуации. Первый тип информационной ситуации – это окружение объекта до начала движения. Это статическая информационная ситуация. Второй тип информационной ситуации – это скользящее окружение при движении объекта. Это динамическая информационная ситуация [25].

Третий тип ситуации – это пространственная ситуация, в которой транспортный объект перемещается на протяжении всего маршрута. Эта ситуация еще может называться маршрутной. Четвертый тип ситуации – это пространственная ситуация, в которой перемещается транспортная киберфизическая система или объект ЦЖД [26]. Это динамическая вариативная информационная ситуация, которая представляет собой часть транспортного графа. Управлением такой

ситуацией и движением транспортного объекта в такой ситуации занимается вычислитель с использованием искусственного интеллекта. В этом случае движение транспортного объекта контролирует диспетчер из ситуационного центра с помощью интеллектуальной транспортной системы или автоматизированной (автоматической) системы.

Декомпозицию информационных ситуаций можно продолжать. Но остановимся на указанных основных четырех типах. Промежуточный вывод: функционирование реальных ТС характеризуется динамикой ситуаций в сети и информационными ситуациями.

Анализ динамики транспортной сети

Главными причинами динамики ТС служат ситуация типа 2 и изменения на участках сети. Эти изменения влекут изменение пропускной способности участков сети. Высокая пропускная способность между транспортными узлами при обеспечении высокоскоростных режимов [27, 28] и нормативных ограничений движения является важной проблемой для высокоскоростного транспорта, особенно для полностью автоматических режимов управления. С целью обеспечения прогнозного режима движения на маршруте необходимо разрабатывать и применять специальные алгоритмы и модели, которые могут изменять маршрут движения в зависимости от оперативной информационной ситуации ТС.

Анализ сетевой динамики включает в себя пространственный анализ и анализ ситуационной информации. Методы геоинформатики позволяют осуществлять пространственный анализ. Методами построения маршрутов определяют эффективность работы сети. Классическая задача движения не включает условия, которые могут быть использованы на практике в динамической сети. Ситуация ТС типа 4 содержит неопределенности, устранение или уменьшение которых представляет собой дополнительную проблему. Мы используем ситуационный пространственный подход для анализа маршрутов ТС. Это предполагает применение пространственной информационной ситуации (SIS), параметры которой приведены в (1):

$$SIS = F[P1(t), Str, VP(t), M(t), L(t)] \quad (1)$$

Формула (1) включает следующие параметры: тип 2 информационной пространственной ситуации SIS ; $P1(t)$ – статическая информационная ситуация типа 1; Str – информационная конструкция сети; $VP(t)$ – динамическая информационная ситуация тип 2, $M(t)$ – маршрут; $L(t)$ – длина маршрута, которая в общем случае зависит от ситуации и условий движения.

Оперативной информационной ситуацией (ISN) является окружение объекта по мере его движения. В начале движения ISN определяется

начальными условиями движения:

$$ISN = SIS(t_0) \quad (2)$$

В сложных транспортных сетях необходимо различать две топологические модели или топологии: структурную и пропускную. Структурная топология (TIC) описывает структуру сети. Она моделируется топологической информационной конструкцией или неориентированным графом $TIC = G(V, A)$. TIC показывает физическую структуру сети. Пропускная топология (BW) – это топология потоков. Она моделирует динамическую перевозку грузов (пассажира) в текущее время осуществления перевозки. Этот граф, в отличие от TIC является ориентированным, т.е. указывает на направление перевозки. Ориентированность графа первое отличие BW от TIC .

$$TIC = G(V, A) \quad (3)$$

$$BW = (V, A, IF, s, t), \quad (4)$$

Второе отличие в том, что BW (4) есть взвешенный граф с весом IF , который характеризует интенсивность потока на участке или звене сети. Остальные параметры общие для BW и TIC . Общими параметрами являются вершины V и дуги A . В графе BW (4) для описания динамики используют пространственные метки s и временные метки t . Метки являются дополнительным параметрическим описанием маршрутов. Маршрутизация перевозки грузов решает задачи динамики звеньев и отказов узлов сети. Таким отказам соответствуют аварии на железной дороге и пробки на автомобильной дороге. В связи с отказами узлов возникает задача по модификации маршрутов или замене маршрутов.

Архитектура ТС [29] для своего анализа требует значительных вычислительных и временных ресурсов. Эти ресурсы возрастают при росте узлов сети. Информационные ситуации преобразуют совокупность точек сети в совокупность кластеров сети. Исходная сеть точек преобразуется в редуцированную сеть кластеров. Это преобразование уменьшает затраты на анализ и на ресурсы. Редуцированную часть сети следует считать информационным кластером или SIS . В информационно-вычислительных сетях применяют методы программной конфигурации (ПКС) или реконфигурации сетей [30]. ПКС применимы в транспортных сетях типа BW (4). ПКС создает адаптивность сети, т.е. возможность адаптивной маршрутизации.

Основная идея построения маршрутов в транспортной сети состоит в том, чтобы модифицировать BW , не изменяя TIC . Это означает модификацию динамики перевозки путем переключения маршрута и в редких случаях – изменение пропускной способности звеньев. Реализация этой идеи возможна за счет двух альтернатив.

Первая альтернатива состоит в использо-

вании методов управления за счет ПКС [30]. Вторая альтернатива состоит в использовании имитационного информационного моделирования [31] и метамоделирования [32]. Первая альтернатива включает создание ПО для адаптации к информационной ситуации типа 2 при наличии динамики сети. В этом случае управление потоком осуществляется с помощью метода ПКС с последующей оптимизацией. Метод конфигурации помогает модернизировать маршрут в зависимости от изменяющихся условий сети, а метод оптимизации позволяет строить оптимальные маршруты [33,34]. Последующая оптимизация с ПКС открывает возможность компьютерного моделирования или интеллектуального управления маршрутами и транспортом. По сути это одна из реализаций адаптивной маршрутизации.

Для *BW* в случае адаптивной маршрутизации обеспечиваются оптимальные условия для маршрута при изменении параметров сети. Недостатком метода является необходимость в режиме онлайн информировать о ситуации типа 2.

Применение фиксированной маршрутизации при динамике условий функционирования сети является невозможным. Это обосновывает разработку заранее резервных маршрутов, а также возможные их комбинации (сценарии). Другим видом резервирования является модификация за счет включения в нее резервных узлов или исключения неэффективных узлов. Этот подход позволяет повысить гибкость ТС и ее адаптивность. В комплексе это расширяет возможные допустимые условия перевозки. Адаптивная маршрутизация ТС позволяет осуществлять поиск новых оптимальных маршрутов при изменяющихся условиях перевозки.

Это реализуется за счет информационного подхода и использования информации о *BW*. Если обозначить текущий маршрут как M_0 , то модификация опишется как

$$\Delta BW \Delta Con \rightarrow (M_0 + \Delta M) \oplus M_1 \quad (5)$$

В выражении (5) ΔBW – изменение пропускной способности сети; ΔCon – изменение условий перевозки; ΔM – модификация старого маршрута; M_1 – создание нового маршрута.

Модификация старого маршрута требует пересчета условий оптимальности при использовании информации для ситуации типа 2. В зависимости от определения оптимального маршрута существует связь с величиной транспортного потока в ТС.

Для реальных условий одновременного городского использования и внегородского сложно определять оптимальный маршрут движения потока в связи с основным ограничением – расчетом времени.

Классические методы маршрутизации потоков используют для оптимизации критерий минимальной задержки (КМЗ). Следует отметить, что при оптимизации маршрута и решении оптимальной задачи можно использовать разные кри-

терии оптимизации: по длине маршрута, по минимальной стоимости перевозки или перевозок (при групповом движении); по минимальной задержке (при множестве маршрутов); по минимальному риску (при перевозке опасных грузов); по максимальной интенсивности загрузки ТС и другие. В сложных условиях всегда возникает задача адаптивной маршрутизации. Дополнительно возникает задача многокритериальной оптимизации и задача оптимизации при нечетких условиях. В сложной транспортной сети нечеткость возникает всегда.

Все перечисленные задачи используют модели информационной ситуации. За счет этого уменьшается объем информации, необходимой для нахождения оптимальных маршрутов и, соответственно, уменьшается время вычислений. По существу метод ситуационного анализа ТС реализует идею когнитивных карт, которая успешно зарекомендовала себя в управлении сложными маршрутами. Применение модели информационной ситуации при оптимизации транспортных маршрутов дает основание ввести новое понятие «ситуационная оптимизация». Ситуационная оптимизация сокращает время вычислений и время поиска новых маршрутов при вариативности сети.

Заключение

Использование одного варианта маршрута перевозок в современных условиях – недопустимое ограничение для вариативных ситуаций в ТС. Кроме того, в процессе перевозки формальная топология сети *TIC* становится несогласованной с изменением топологии *BW*. Так как топология *BW* динамична, то всегда зависит от параметра времени. Размерность оптимизационной матрицы пропорциональна количеству узлов. В случае редукции сети к информационной ситуации размерность оптимизационной матрицы уменьшается вдвое, а скорость вычислений возрастает до четырех раз, что приводит к резкому сокращению времени анализа. Это обусловлено переходом от точечной модели к кластерной. Такой переход означает редукцию частных параметров, при этом ключевые параметры не меняются.

Использование метода ситуационной маршрутизации для оперативного анализа означает кластеризацию сети и применения информационного морфизма [35] для преобразования структурной топологии ТС в пропускную топологию ТС. Исходная модель может быть представлена как стационарная топология *TIC*, которая согласована с *BW*. Динамика внешней среды приводит к тому, что периодически то или иное звено сети меняет пропускную способность. В силу этого реальная ТС не соответствует теоретической. В этих условиях происходит рассогласование между *TIC* и *BW*, что обосновывает перемаршрутизацию.

Предложенный метод маршрутизации трансформирует традиционную многоточечную струк-

туру в более простую кластерную сетевую структуру. Такая сеть обеспечивает надежность работы на коротких временных интервалах, а долгосрочная надежность обеспечивается сетеподобной структурой. *TIC* обеспечивают долгосрочную надежность, а *SIS* – локальную.

Список литературы

1. Лёвин Б.А., Цветков В.Я. Оптимизация движения в транспортной сети // Наука и технологии железных дорог. – 2022. – Т. 6. №3 (23). – С.10-19.
2. Дышленко С.Г. Модели построения маршрутов в транспортной сети // Наука и технологии железных дорог. – 2018. – Т.2. – 4(8). – С.48 -56.
3. Рогов И. Е. Моделирование транспортных потоков // Наука и технологии железных дорог. – 2019. – Т.3. – 3(11). – С.26-38.
4. Дышленко С. Г. Ситуационный анализ в транспортной сети // Наука и технологии железных дорог. – 2018. – Т.2. – 1(5). – С.26-33.
5. Лёвин Б.А. Информационное моделирование при управлении транспортом // Перспективы науки и образования. – 2017. – № 3 (27). – С.50-54.
6. Розенберг И.Н. О единой транспортной политике // Наука и технологии железных дорог. – 2017. – № 1 (1). – С.22-26.
7. Кудж С.А. Информационное поле: Монография. – М.: МАКС Пресс, 2017. – 97 с.
8. Цветков В.Я. Информационное поле и информационное пространство // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – №1-3. – С.455-456.
9. Матчин В.Т. Неопределенность в информационном поле // Перспективы науки и образования. – 2017. – №3 (27). – С.7-12.
10. Охотников, А. Л. Управление автоматическими транспортными объектами в стохастической ситуации / А. Л. Охотников, В. Я. Цветков // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 2. – С. 37-41. – DOI 10.34649/AT.2021.2.2.002.
11. Цветков В.Я. Фактофиксирующие и интерпретирующие модели // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 9-3. – С.487.
12. Рогов И. Е. Применение мультиагентных систем в управлении транспортом мегаполиса // Наука и технологии железных дорог. – 2020. – Т.4. – № 1(13). – С.26-36.
13. Егунов М. М., Шувалов В. П. Анализ структурной надёжности транспортной сети // Вестник СибГУТИ. – 2012. – №. 1. – С.54-60.
14. Лотоцкий В.Л. Информационная ситуация и информационная конструкция // Славянский форум. – 2017. – № 2 (16). – С.39-44.
15. Цветков В.Я. Информационные модели объектов, процессов и ситуаций // Дистанционное и виртуальное обучение. – 2014. – № 5. – С.4- 11.
16. Соловьев И.В., Цветков В.Я. О содержании и взаимосвязях категорий «информация», «информационные ресурсы», «знания» // Дистанционное и виртуальное обучение. – 2011. – №6 (48). – С.11-21.
17. Фараонов, А. В. Разработка ситуационной модели задачи маршрутизации при необходимости изменения опорного плана на основе нечеткой ситуационной сети / А. В. Фараонов // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, Москва, 16–19 июля 2014 года / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – Москва: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 5101-5113.
18. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990.
19. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике. М.: Финансы и статистика, 2000.
20. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTech. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 739 с.
21. Титов Е. К. Ситуационный анализ транспортных кибер-физических систем // Наука и технологии железных дорог. – 2022. – Т. 6. – №. 2 (22). – С. 23.
22. Рябенко Д. О. Ситуационный анализ в государственном и муниципальном управлении региона // Эффективное государственное и муниципальное управление как фактор социально-экономического развития территорий. – 2021. – С. 148-150.
23. Павлов А.И. Пространственная информационная ситуация // Славянский форум, –2016. –№4 (14). – С.198-203.

24. Плотников С.Б. Параметрическая и пространственная информационная ситуация // ИТ – Стандарт. 2021. 3(28). С.40-45.
 25. Охотников, А. Л. Транспортный объект как элемент системы автоматического управления / А. Л. Охотников // Наука и технологии железных дорог. – 2022. – Т. 6, № 3(23). – С. 45-52.
 26. Лёвин Б.А., Цветков В.Я. Цифровая железная дорога: принципы и технологии // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16. – № 3 (76). – С. 50-61.
 27. Ходосевич А. М. Увеличение скоростного режима подвижного состава на железнодорожном транспорте // Молодежная наука. – 2023. – С. 239-242.
 28. Цветков В.Я. Интегральное управление высокоскоростной магистралью // Мир транспорта. – 2013. – № 5 (49). – С.6-9.
 29. Егунов М. М., Шувалов В. П. Анализ структурной надёжности транспортной сети // Вестник СибГУТИ. – 2012. – №. 1. – С. 54-60.
 30. Корячко В.П., Перепелкин Д.А. Анализ и проектирование маршрутов передачи данных в корпоративных сетях. – М.: Горячая линия –Телеком, 2012 – 236с.
 31. Elnabawi M. H. Building information modeling-based building energy modeling: investigation of interoperability and simulation results //Frontiers in Built Environment. – 2020. – Т. 6. – С. 573971.
 32. Цветков В.Я., Булгаков С.В., Титов Е.К., Рогов И.Е. Метамоделирование в геоинформатике // Информация и космос. –2020. – №1. – С.112-119.
 33. Андреев К. П., Терентьев В. В. Информационное моделирование в проектировании транспортных сетей городов //Новая наука: Теоретический и практический взгляд. – 2016. – №. 117-2. – С. 108-110.
 34. Бабищева Т. С. и др. Двухстадийная модель равновесного распределения транспортных потоков //Труды МФТИ. – 2015. – Т. 7. – №. 3. – С. 31-41.
- Охотников, А. Л. Информационный морфизм в информационном поле / А. Л. Охотников // Перспективы науки и образования. – 2017. – № 4(28). – С. 7-11.