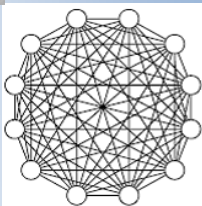


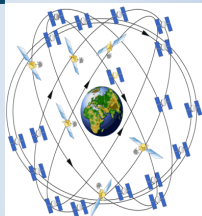
Скалозуб В. В.
Ильман В. М.

ПРИКЛАДНОЙ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ТРАНСПОРТА

$$\cos [(p-j)\theta - \alpha_j] + \rho^j$$
$$\mu > \sum_{j=1}^n \Delta_j \arg$$
$$\prod_{k=1}^n (u + u_k) G_0(\rho(x) = -G(\rho^2 > \sum_{j=0}^n \rho^j$$



$$(y + G)^2 + (3y + G + 4H)$$
$$(y + A)^{1/3} + \frac{2}{3} \rho^2 A^{1/3} (y + A)^{1/3}$$
$$AR (x +$$



Днепропетровск
2013

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА



Tempus



Прикладной системный анализ интеллектуальных систем транспорта

ПОСОБИЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ДНЕПРОПЕТРОВСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА
2013

ПОСОБИЕ СОЗДАНО В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНОГО ПРОЕКТА:

COMMUNICATION AND INFORMATION TECHNOLOGY FOR IMPROVEMENT
SAFETY AND EFFICIENCY OF TRAFFIC FLOWS: EU-RU-UA MASTER AND PHD
PROGRAMS IN INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS ПО ПРОГРАММЕ TEMPUS

517374-TEMPUS-1-2011-RUTEMPUS-JPCR

КОММУНИКАЦИОННЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ
ПОТОКОВ: ЕВРОПЕЙСКАЯ-РОССИЙСКАЯ-УКРАИНСКАЯ МАГИСТЕРСКАЯ И
ДОКТОРСКАЯ ПРОГРАММА В ОБЛАСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ
ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Проект CITISET финансируется при поддержке Европейской Комиссии.
Содержание данного материала является предметом ответственности
авторов и не отражает точку зрения Европейской Комиссии



УДК 004: 681: 629.4
С 42

Авторы:

В. В. Скалозуб, В. М. Ильман

Рецензенты: д-р физ.-мат. наук, проф. *В. Е. Белозеров*,
д-р техн. наук, проф. *А. И. Михалев*

Печатается по решению ученого совета
Днепропетровского национального университета железнодорожного
транспорта имени академика В. Лазаряна
(*протокол № 5 от 30.12.2013*).

Скалозуб, В. В.

Прикладной системный анализ интеллектуальных систем транспорта
[Текст]: пособие / В. В. Скалозуб, В. М. Ильман. – Д. : Изд-во Днепропетр.
нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2013. – 221 с.

Изложены основные проблемы современных транспортных систем, задачи по совершенствованию интеллектуальных систем транспорта и возможности их решения на основе методологии прикладного системного анализа. Рассмотрена методология использования процедур системного анализа в решении проблем слабой структурированности, неопределенности, управляемости интеллектуальных транспортных систем.

Для студентов транспортных специальностей, преподавателей, специалистов интеллектуальных транспортных систем

Ил. 55. Табл. 9. Библиогр.: 43 наим.

© В. В. Скалозуб, В. М. Ильман, 2013

© Изд-во Днепропетр. нац. ун-та ж.-д.

трансп. им. акад. В. Лазаряна, оригинал-макет,
2013

Содержание

Введение	7
1. Проблемы современного транспорта и задачи системного анализа при их решении на основе интеллектуальных систем транспорта	10
1.1. Проблемы транспорта в мире и развития Интеллектуальных Транспортных Систем.....	10
1.2. Глобальные спутниковые радионавигационные системы.....	19
1.3. Методы и средства телематики при обеспечении интеллектуальных технологий и процедур транспорта	26
1.4. Сервисы, стандарты, архитектура и организация ИТС.....	30
1.5. Основные задачи по совершенствованию интеллектуальных систем транспорта и возможности их решения на основе методологии системного анализа	37
2. Системный подход и системный анализ как инструменты совершенствования процессов перевозок в ИТС	43
2.1 Сущность, источники системного подхода и системного анализа. Логическая и вычислительная форма реализации системного анализа ..	43
2.1.1. <i>Что такое системный анализ и зачем он нужен?</i>	43
2.1.2. <i>Основные направления системных исследований</i>	46
2.1.3. <i>Система и общесистемный подход</i>	48
2.1.4. <i>Предмет и задачи системного анализа</i>	52
2.1.5. <i>Методология исследований системного анализа</i>	53
2.2 Управление, оптимальное программное управление.....	58
2.2.1. <i>Понятия и суть управления в ИСТ системах железнодорожного транспорта</i>	58
2.2.2. <i>Технология моделирования управления в системном анализе</i>	62
2.2.3. <i>Некоторые задачи управления и их модели</i>	64
3. Интеллектуальные процедуры, системы и технологии транспорта как основное содержание ИТС	66
3.1 Процедуры Системного Анализа и Исследования Операций в решении слабоструктурированных проблем принятия решений.....	66
3.1.1. <i>Алгоритм, представление и реализация</i>	77
3.1.2. <i>Модели в системном анализе, структуры и их типы</i>	80
3.1.3. <i>Информация – системная категория передачи и обработки сообщений</i>	84

3.1.4.	<i>Исследование операций и слабоструктурированные проблемы принятия решений</i>	<i>94</i>
3.1.4.1.	<i>Агрегат как системный объект исследования операций.....</i>	<i>94</i>
3.1.4.2.	<i>Метод исследования операций.....</i>	<i>97</i>
3.1.4.3.	<i>Задачи математического программирования в исследовании операций</i>	<i>100</i>
3.1.4.4.	<i>Игры в исследовании операций.....</i>	<i>102</i>
3.1.4.5.	<i>Метод логистики в системном анализе</i>	<i>104</i>
3.2	<i>Системный анализ условий неопределенности</i>	<i>115</i>
3.2.1.	<i>Понятие нечеткости и его моделирование</i>	<i>116</i>
3.2.1.1.	<i>Элементы интервального анализа</i>	<i>117</i>
3.2.1.2.	<i>Нечеткости первого типа.....</i>	<i>118</i>
3.2.2.	<i>Применение нечеткостей в задачах принятия решений.....</i>	<i>126</i>
3.2.3.	<i>Случайность в ИТС и мера неопределенности.....</i>	<i>129</i>
4.	Математическое и компьютерное моделирование интеллектуальных систем транспорта.....	133
4.1.	<i>Теоретико-игровые модели управления в транспортных системах в условиях неопределенности.....</i>	<i>133</i>
4.1.1.	<i>Теоретико-игровая модель принятия решений.....</i>	<i>134</i>
4.1.2.	<i>Классификация информационных ситуаций модели игры</i>	<i>136</i>
4.1.3.	<i>Формализация функций риска игровых моделей.....</i>	<i>138</i>
4.1.4.	<i>Процедуры формирования игровых моделей принятия решений</i>	<i>139</i>
4.2.	<i>Модели принятия многокритериальных решений с учетом неоднородной неопределенности данных</i>	<i>144</i>
4.2.1.	<i>Нечетко-статистические модели и процедуры управления</i>	<i>144</i>
4.2.2.	<i>Постановка задач нечетко-статистического моделирования.....</i>	<i>147</i>
4.2.3.	<i>Модуль нечетко-статистического управления</i>	<i>149</i>
4.3.	<i>Метод управления типа Такаги-Сугено в условиях многократной неопределенности данных</i>	<i>150</i>
4.3.1.	<i>Проблема управления техническими системами при многократной неопределенности данных.....</i>	<i>151</i>
4.3.2.	<i>Источники и формализация условий многократной (многокомпонентной) неопределенности данных.....</i>	<i>152</i>
4.3.3.	<i>Модифицированное управления Такаги-Сугено</i>	<i>154</i>
4.3.4.	<i>Модуль Такаги-Сугено с аксиоматическим нелинейным многокомпонентным управлением.....</i>	<i>157</i>
4.3.5.	<i>Сравнительный анализ аддитивной и мультипликативной моделей управления Такаги-Сугено.....</i>	<i>159</i>

4.4. Нейронные сети в задачах формирования интеллектуальных систем транспорта, сети Хопфилда и Хэмминга	161
4.5. Моделирование и анализ систем транспорта на основе сетей Петри. Реализация управлений по отклонениям	168
4.5.1. Основные элементы моделей Петри	168
4.5.2. Сети Петри с временными задержками	173
4.5.3. Примеры формализации фрагментов телематических систем транспорта	180
5. Прикладные процедуры Системного Анализа интеллектуальных систем, технологий транспорта и ИТС	185
5.1 Системный анализ городской интеллектуальной транспортной системы.....	185
5.2 Системный анализ потоков в сетях с неоднородными носителями	191
5.2.1. Модели задач о потоках сетях, однородные и неоднородные потоки	191
5.3.2. Многопродуктовые и многокритериальные модели задач о потоках в сетях	194
5.2.3. О реализации многокритериальных потоковых задач с использованием клеточных автоматов.....	197
5.3 Логистические модели планирования поездок в транспортных системах с пересадками с учетом специализации требований пассажиров	200
5.3.1. Модель планирования железнодорожных поездок с пересадками	201
5.3.2. Планирование перевозок при учете неоднородности требований пассажиров к транспортной сети.....	203
5.3.3. Реализация модели поездок с пересадками с учетом неоднородности требований пассажиров.....	205
5.4 Задача интеллектуального управления расформированием-формированием поездов	207
5.5 Инновационные технологии процессов перевозки. Системный анализ проблемы организации высокоскоростного движения поездов на направлении Москва – Санкт-Петербург.....	214
Список использованной литературы.....	220

Введение

В настоящее время государственная политика многих развитых стран мира базируется на разработке интеллектуальных транспортных систем (ИТС), которые рассматриваются как общее средство для решения наиболее актуальных проблем транспорта, проблем мобильности. Интеллектуальные системы транспорта как составляющие ИТС, предназначены для эффективной реализации ряда глобальных технологий перевозки грузов и пассажиров. В целях повышения безопасности и эффективности транспортных процессов в ИТС предполагается выполнение системной интеграции современных информационных и коммуникационных технологий, а также и средств автоматизации, в транспортную инфраструктуру и мобильные объекты. На законодательном уровне ИТС определяется как неотъемлемая часть инфраструктуры транспортного комплекса, реализующая функции автоматизированного управления, информирования, учета и контроля для обеспечения юридических, финансовых, технологических и информационных потребностей участников транспортного процесса, а также удовлетворения требованиям транспортной, информационной и экономической безопасности общества.

Примерами интеллектуальных технологий являются «интеллектуальный груз», который при перевозках автоматически сообщает о своих свойствах, технологии «отслеживания грузов», обеспечение автоматического управления движущимися объектами и другие. Интеллектуальные технологии процессов перевозок содержат ряд характерных компонентов, выполняющих автоматический сбор данных об условиях перевозок, моделирование процессов, сравнение данных с установленными нормативами, распознавание нештатных ситуаций, прогнозирование состояний транспортных систем, планирование перевозок и др.

Интеллектуальные свойства являются ключевыми для функционирования телематических систем, ИТС. Функционирование интеллектуальных систем происходит в условиях неполноты, неточности и неопределенности данных, а также многокритериальности принимаемых решений. В интеллектуальных

системах производится формирование информационных и математических моделей среды и объектов функционирования, автоматическая идентификация параметров и адаптация соответствующих математических моделей управления.

Одними из первоочередных задач при подготовке современных специалистов в области ИТС являются изучение общесистемных особенностей интеллектуальных систем транспорта, а также анализ и формальное описание процессов создания таких автоматизированных систем, которые «способны обучаться» (генерировать новые знания в виде математических моделей, шаблонов управления), «классифицировать» (автоматически группировать объекты, воздействия, управляющие сигналы), приспосабливаться к меняющимся условиям и параметрам среды функционирования – «адаптироваться». Решение этих задач не возможно без формирования у будущих специалистов сферы ИТС системного мышления, знаний и навыков по применению системного подхода и системного анализа для решения сложных организационно-технических и технологических задач, а также баз знаний определённых способов и примеров реализации сложных проектов транспортного комплекса на основе глобальных интегрированных информационно-коммуникационных технологий.

По сути, все решения сферы современного транспорта носят общесистемный характер, они получены в русле методологии системного подхода. Само понятие, основные принципы и архитектура ИТС являются результатом выработки и реализации концепции организации транспорта таким образом, чтобы обеспечить в максимальной степени возможности решения их современных проблем (безопасность, эффективность, экологичность). Введение сервисов и стандартов в области телематики ИТС – это еще одни важнейшие примеры результатов системного анализа потребительских и технических требований к перевозкам. Интеллектуальные технологии перевозок, указанные выше и другие, также являются результатом системного анализа транспортных потребностей и способов их реализации с использованием глобальных информационных технологий. Без комплексного исследования проблемы нельзя эффективно реализовать ни один проект в сфере современного транспорта. Таким образом, знание

предмета и инструментария системного анализа, исследования операций, теории управления будет способствовать подготовке современных специалистов по ИТС.

Книга написана в рамках выполнения программ TEMPUS, проект CITISET, нацеленного на создание для Российской Федерации (РФ) и Украины магистерских и докторских программ в области подготовки высококвалифицированных специалистов по ИТС. В ней по возможности учтены особенности современного этапа формирования интеллектуальных систем железнодорожного транспорта Укрзализныци, других транспортных ведомств, а также учтено ограниченное общее представление о технологиях ИТС и интеллектуальных системах транспорта у многих специалистов.

Знания об основных задачах, принципах, стандартах, технологиях и средствах ИТС, реализованных с использованием методов и средств системного анализа, а также разрабатываемых в настоящее время железнодорожных и других проектах, которые представлены в книге, должны способствовать выработке рациональных профессиональных подходов к практике создания и эффективного использования современных информационных и коммуникационных технологий ИТС. Решению этих задач посвящен проект CITISET, ориентированный на ускоренное развитие интеллектуальных систем всех видов транспорта.

1. Проблемы современного транспорта и задачи системного анализа при их решении на основе интеллектуальных систем транспорта

Современное развитие общества, глобализация внутренних и внешних отношений государств не мыслимы без систем транспорта, его развитой инфраструктуры. Инфраструктура транспортных систем и управление ними настолько сложны, что без помощи автоматизированных систем невозможно отследить состояние транспортных систем (ТС), планировать перевозки и оперативно управлять ними. Формирование, всесторонний анализ состояний и поведения транспортных систем, принятия решений на основе этих общесистемных исследований является основной задачей системного анализа применительно к ТС системам. Методология системного анализа определяет важную составную часть инструментария современных интеллектуальных систем транспорта.

1.1. Проблемы транспорта в мире и развития Интеллектуальных Транспортных Систем

Расширение процесса глобализации являются одной из основных общих тенденций современного общества. В наш век *мобильность* является одновременно основным средством для поиска ресурсов и одним из важных векторов общения, выражения свободы личности. Уже с 60-х годов интенсивность воздействия движения на общество и окружающую среду вызывает такие реакции, как переосмысление стратегии обеспечения мобильности. Эта необходимость исходит из последних исследований, прогнозирующих неуклонное повышение мобильности, несмотря на весьма значительное развитие новых средств телекоммуникации и информации. Поэтому в большинстве стран мира ведутся разработки автоматизированных интеллектуальных транспортных систем. *Интеллектуальные*

системы транспорта (Intelligent Transport Systems, ИСТ) выполняют сбор информации с помощью составляющих подсистем радионавигации и телематики, обрабатывают данные, проводят их анализ, вырабатывают альтернативные решения для принятия обоснованных решений.

Укажем некоторые факты в области тенденций развития систем транспорта [1, 2]. Несмотря на то, что в Европе за последние 40 лет общий поток грузовых перевозок увеличился более чем на 250%, объем грузов, перевозимых железнодорожным транспортом, увеличился незначительно. В результате, доля железных дорог в грузовых перевозках сократилась в общей сложности более чем на 60% и теперь составляет лишь 15%, в то время как автомобильная грузоперевозка за тот же период выросла более чем на 115 %, достигнув сегодня более 70% от всех грузоперевозок. Характер движения также существенно изменился, постепенно переводя транспорт с перевозки тяжелых материалов на большие расстояния (область применения железнодорожного транспорта) на интенсивную транспортировку ограниченных грузов с многих заводов многим клиентам. В этом контексте должен быть рассмотрен вопрос о потенциальном вкладе телематики в перевозку грузов по железным дорогам, чтобы железная дорога в будущем могла принимать участие в развитии рынка транспортных услуг, как один из наиболее экономически и экологически выгодных видов транспорта.

Анализ современного состояния и проблем транспортных систем в России и Украине, показал, что многие причины этих проблем связаны не только с объективными факторами (недостатком мощностей транспортной инфраструктуры и др.), но в значительной степени с недостаточным уровнем организации движения и управления транспортными потоками. Так средняя скорость движения транспорта по автомобильным дорогам России, составляет 40–60 км/час против 80–100 км/час за рубежом – грузы перемещаются за сутки на расстояние 250–300 километров, против 700–1300 км за границей. Такое снижение скорости движения, в свою очередь, ведет к увеличению на 20–30% себестоимости перевозок, росту транспортной составляющей в конечной цене продукции и услуг, которая доходит до 15–20% (в США и Европе этот показатель не превышает 7–10%) [1].

По данным Департамента транспортных исследований и управления инновационными технологиями США пассажиры и грузы простаивают в пробках 4,2 миллиарда часов в год. Это полная рабочая неделя каждого жителя с суммарными потерями 87,2 млрд. долларов. Напрасно ежегодно сжигается 8,1 миллионов тонн топлива, вызывая около 22% всех выбросов CO₂ в атмосферу.

Мировая практика показывает, что внедрение ИТС позволяет снизить количество дорожно-транспортных происшествий до 50%, увеличить пропускную способность дорог на 25–30%, снизить расход горючего на 20%, затраты времени в пути на 30%, повысить занятость населения на 5%.

Например, в Америке, которая сейчас значительно отстала в этом плане от Японии и Южной Кореи, системы управления автострадами увеличивают скорости от 13 до 48% против ранее существовавшего режима перегрузки. В Южной Корее общая экономия от реализации ИТС-технологий оценивается в \$ 1,5 млрд. в год. В течение следующих 20 лет ожидается создание промышленных мощностей на 20 миллиардов долларов и уменьшение экономических потерь из-за заторов на дорогах на 26 млрд. долларов [1, 7].

Всевозрастающие потребности в перевозках различными видами транспорта, развитие мобильности населения в условиях глобализации, связанные с этим современные проблемы транспорта, решаются за счет создания соответствующих *глобальных интегрированных технологий*, которые сформировались в последние десятилетия и интенсивно развиваются.

Отметим некоторые проблемы интеллектуальных транспортных систем (ИТС) железнодорожного транспорта, в первую очередь Российской Федерации (РФ) и Украины. Они связаны с достаточно высоким уровнем автоматизации железнодорожных перевозок, с одной стороны, и недостаточным развитием концептуальной, законодательной базы, уровня стандартизации, необходимых для функционирования ИТС. Так закон «Интеллектуальная транспортная система Российской Федерации», отражает всесторонние требования транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 г. Применительно к железнодорожному транспорту развитие ИТС определено такими директивными документами, как Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации на

период до 2030 г., Стратегические направления научно-технического развития ОАО «РЖД» до 2015 г. (Белая книга ОАО «РЖД») [2, 6, 10].

Общегосударственная транспортная политика многих развитых стран в настоящее время базируется на разработке и продвижении интеллектуальных транспортных систем. ИТС рассматриваются в качестве мощного средства решения наиболее актуальных проблем транспортной отрасли. При этом в первую очередь отмечают следующие проблемы:

- неприемлемый уровень людских потерь в результате транспортных происшествий;
- задержки оборота пассажиров и грузов;
- недостаточно высокая производительность транспортной системы;
- рост потребления энергоресурсов, негативное влияние на окружающую среду и других.

Разработка и применение ИТС служит стимулом для развития инновационных технологий ряда отраслей промышленности. Среди них выделяются, например, такие отрасли и инновационные технологии ИТС:

- снижение риска и уменьшение последствий природных и техногенных катастроф;
- технологии создания интеллектуальных систем мониторинга и управления;
- создание новых транспортных систем и технологий управления;
- создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления энергоносителей в сфере железнодорожного транспорта;
- создание инновационных технологий и систем обработки, хранения, передачи и защиты информации;
- создание инновационных технологий и систем производства программного обеспечения и др. [2, 10].

В проекте закона РФ по ИТС интеллектуальная транспортная система определена как неотъемлемая часть инфраструктуры сложного транспортного комплекса, реализующая функции автоматизированного управления, информирования, учета и контроля для обеспечения юридических, финансовых, технологических и информационных потребностей участников транспортного процесса,

а также удовлетворения требованиям транспортной, информационной и экономической безопасности общества. Таким образом, в целях повышения безопасности и эффективности транспортных процессов в ИТС предполагается выполнение системной интеграции современных информационных и коммуникационных технологий, а также и средств автоматизации, в транспортную инфраструктуру и мобильные транспортные средства. Указанное выше определение ИТС является *общесистемным* [6], всесторонне на законодательном уровне раскрывает сущность проблемы, главных целей создания и базовых функций, основных составляющих ИТС. Фактически это определение демонстрирует всеобъемлющую практику методологии системного анализа (СА).

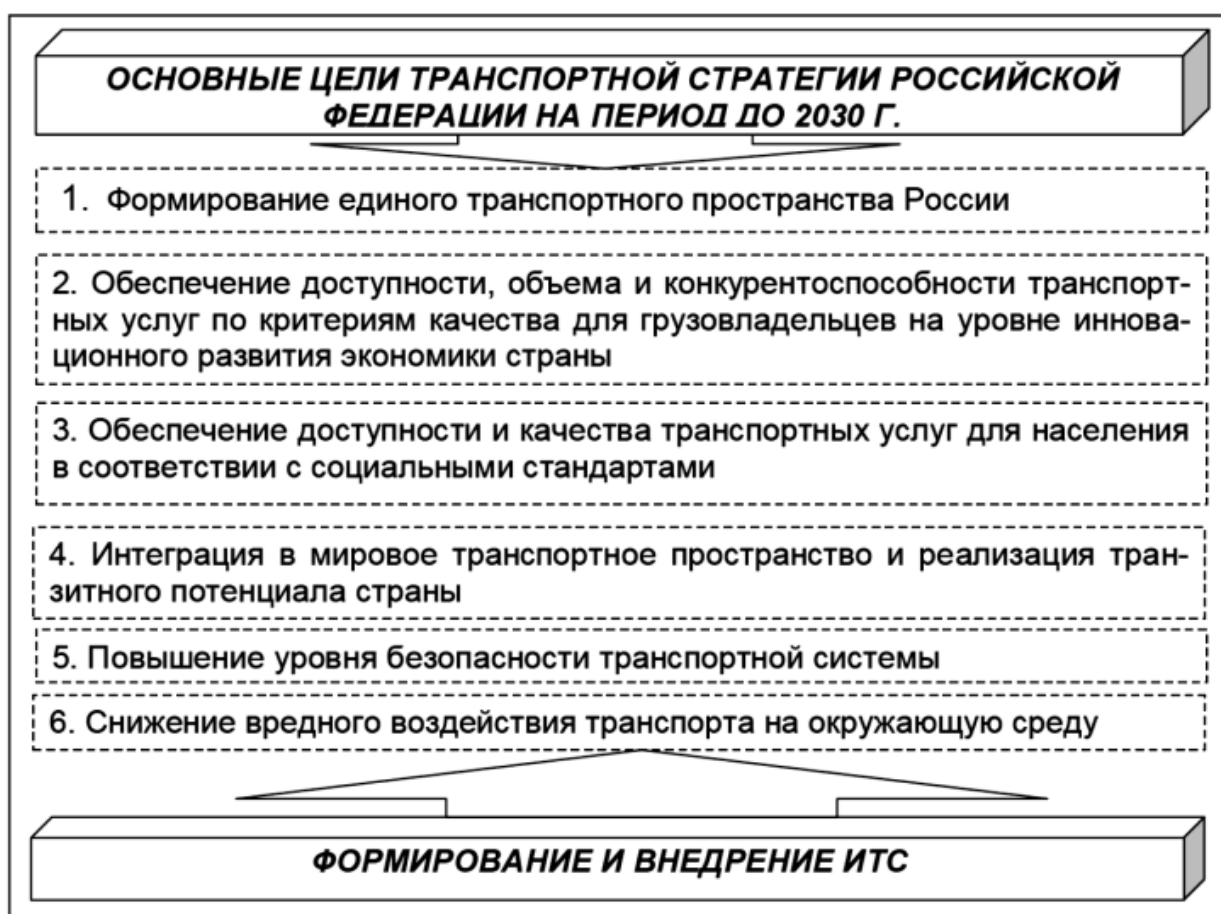


Рис. 1.1. Основные цели формирования и внедрения ИТС в Российской Федерации.

Для решения проблем, связанных с развитием транспорта, в РФ формируется государственная Концепция создания ИТС, подготавливается закон «Интеллектуальная транспортная система Российской Федерации». Концепция соответствует основным целям Транспортной стратегии РФ на период до 2030 г. [2, 3], рассматривая ИТС (см. рис. 1.1) как основу для их достижения.

Отметим системное представление целей транспортной стратегии РФ, а также необходимость применения методологии СА для разработки программ реализации ИТС.

Понятие ИТС в странах Европы родственно телематическим системам. Ними на основе применения методов и средств телематики, путем организации «машина – машинного» взаимодействия, решается большое число всевозможных задач мониторинга, прогнозирования, управления транспортными потоками, которые требуют получения, анализа, обобщения, и переработки колоссальных объемов информации о времени событий, месте положения и параметрах транспортных средств и грузов. В то же время следует указать, что для организации «машина – машинного» взаимодействия следует сформулировать цели и выполнить целый комплекс исследований и разработок, носящий системный характер. Причем общая структура процедур разработки таких интеллектуальных «в малом» подсистем является унифицированной. Она начинается с выделения «локальной управляемой системы», формирования модели ее целей функционирования, представления внешней среды и ее неопределенностей, построения и программно-технической реализации оптимального или на практике рационального управления.

Транспортная телематика, как системное направление исследований, стандартов, унифицированных программно-технических средств по обеспечению процессов перевозок (см. рис. 1.1), интенсивно развивается для всех видов транспорта: наземного, авиационного, железнодорожного, водного. Особенно велика роль ИТС в решении задач *интермодальности*. Однако наиболее комплексные и масштабные исследования в области транспортной телематики проводятся для наземного транспорта.

Важной категорией для транспортных систем является логистика. Транспорт (латинское слова «*trans*» означает через и «*portare*» -

нести) относится к понятиям движения, вождения и передачи. Термин «логистика» происходит от греческого «logistikos», что означает «расчет» и «искусство рассуждения, вычисления». Оно вытекает также из французского слова «logis» - что означает воинское подразделение, функция которого заключается в размещении и управлении движением и снабжением войск. Транспорт и логистика стали развиваться в промышленном отношении в конце девятнадцатого века, благодаря развитию дорог и железнодорожной инфраструктуры и технологической эволюции видов транспорта, таких, как поезд, затем автомобиль и, после первой мировой войны, грузовой автомобиль. В настоящее время транспорт и логистика стали неотделимы друг от друга и называются «supply chain» - цепь элементов, которая включает в себя хранение, обработку, упаковку и расфасовку, а также транспортировку товара. Именно в этом контексте телематика может и должна предоставить все возможности для оптимизации «supply chain». Перевозчики должны разработать средства связи, чтобы в полной мере включить вагон, контейнер и водителя в интеллектуальную транспортную систему. В конечном счете, это позволит избежать перегрузки на самых оживленных железнодорожных узлах и обеспечить своевременную поставку груза.

Укажем примеры задач железнодорожных грузовых перевозок, требующих телематических технологий для их эффективной реализации:

- разработка систем управления мультимодальными цепочками, содержащими несколько звеньев, за счет технологий непрерывного отслеживания продвижения грузов;
- организация адаптированных к логистике других видов транспорта грузопотоков, которые учитывают нужды грузоотправителей и получателей;
- обеспечение менеджеров данными для эффективного технического обслуживания инфраструктуры, а также подвижных объектов;
- обеспечение автоматического документального контроля транспортных расходов в ходе реализации директив и правил перевозки (перевозка опасных материалов, обеспечение безопасности перевозок, таможенный контроль транзита и др.).

Приведем несколько примеров современных телематических технологий транспорта, которые носят общесистемный характер и требуют применения методов системного анализа для их формирования и осуществления на практике [3, 9].

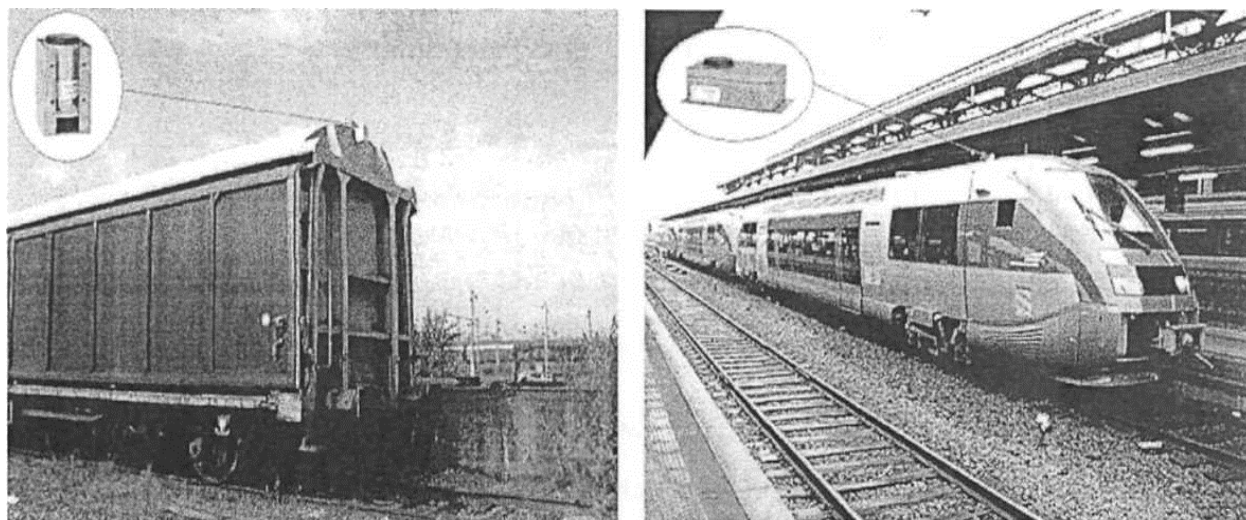


Рис. 1.2 Примеры оборудования и снаряжения по локализации местоположения вагонов и локомотивов поездов

Отслеживание транспортируемых объектов (материалов) осуществляется с помощью технических устройств-меток. Метки RFID (Radio Frequency Identification Data) позволяют автоматически отслеживать UCI (контейнеры, съемные кузова, поддоны, посылки или одиночный товар) в то время, когда они проходят над «точками съема информации». Эти метки в настоящее время стандартизируются. Технология отслеживания должна со временем заменить бумажные документы, которые до сих пор заполняются вручную, а также и этикетки штрих-кода.

Географическое позиционирование транспортируемых объектов (материалов): обычно это спутниковое позиционирование. Сегодня наиболее часто используемой системой является американская GPS [3, 7, 9].

Телекоммуникации: передачи информации о позиционировании на платформу электронной связи (передача данных транспортного средства, груза о своем местоположении и пр.).

Слежение за движением грузов: отслеживание товаров предполагает в любое время режим «реального времени», как возможность получения информации о положении транспортных средств, перевозящих товары и/или о положении самих товаров или их контейнеров др.

Важно различать слежение за товарами в реальном времени и отслеживание товаров. Слежение за движением грузов («tracking»), можно рассматривать как часть отслеживания, которая позволяет восстановить путь следования груза и условия перевозки. *Отслеживание* определяет обязанности различных заинтересованных сторон, когда обнаружен разрыв в обеспечении целостности транспортной цепи. Это гарантия непрерывности поставки и целостности товара, если заинтересованные стороны соблюдают соответствующие процедуры по безопасности.

В целом, мониторинг товаров является одним из условий эффективности и развития интермодальных перевозок грузов. Он является гораздо более трудноосуществимой технологией, чем перевозка на грузовых автомобилях «от двери до двери».

В Италии проведены исследования в сфере формирования «интеллектуальных товаров» (проект EURIDCE). Системный смысл «интеллектуальных товаров» в том, чтобы обеспечить возможность «самоидентификации» товара, независимо от контекста, чтобы следить за его состоянием, восстановить его маршрут и, в конечном счете, сформировать его поведение. Следует обратить внимание на то, что пока мало заинтересованности в разработке «умных товаров». Основной интерес вызывают процессы отслеживания. Вместе с тем можно указать на не системность проекта. В нем, несмотря на развитие информационно-телекоммуникационных технологий, 62% информации обрабатывается вручную, 50% обрабатывается по телефону или по почте.

В настоящее время системного исследования требуют два подхода:

- развитие интеллектуальной логистики систем в рамках централизованной иерархической структуры;
- переход на интеллектуальные товары, с автономной структурой контроля.

Для нашего изложения важными являются вопросы исследования системных свойств указанных выше глобальных интеллектуальных технологий, формирующих общую структуру современных систем и технологий транспорта.

1.2. Глобальные спутниковые радионавигационные системы

В настоящее время существенно увеличилось количество оборудования с использованием GPS, и эти тенденции получают все большее развитие. На рынке появилась дешевая и доступная аппаратура спутниковых навигационных систем GPS (США), GLONASS (Россия) и европейской системы Galileo. Транспортная телематика интенсивно развивается для всех видов транспорта: наземного, авиационного, железнодорожного, водного. Учитывая широкое распространение GPS на автотранспортных средствах, на подвижных железнодорожных составах (GSM-R), на компьютерной технике и в мобильной связи, можно утверждать о существенных возможностях использования этой технологии для получения детальной информации в плане пассажирских перевозок и перевозок грузов для государственных нужд, научных исследований и для операторов транспортных инфраструктур [3].

Для решения задач обеспечения безопасности движения, мониторинга состояния инфраструктуры, управления перевозками и логистическими операциями на железнодорожном транспорте ОАО «РЖД» проводит целенаправленную и системно выстроенную работу по внедрению спутниковых технологий. Они выполняются в соответствии с основополагающими документами «Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г.», «Стратегические направления научно-технического развития ОАО «РЖД» на период до 2015 г., «Концепция и Программа внедрения спутниковых технологий в основную деятельность ОАО «РЖД». В них всесторонне сформулированы цели, задачи и определяются ресурсы реализации инноваций развития железных дорог РФ с использованием спутниковых и геоинформационных технологий.

Внедрение спутниковых технологий в ОАО «РЖД» [7–9] ведется системно согласно стратегической концепции – от отдельных технических решений и технологий к созданию комплексных информационно-управляющих систем. Особое внимание уделено созданию *единого координатного пространства и единой системы* ведения баз *геопространственных данных* (электронных карт) на базе ГИС РЖД. Это позволит создать надёжный *механизм интеграции и синхронизации прикладных информационно-управляющих систем*. С помощью спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS, а также основанных на их информационных сервисах, предприятиям и службам ОАО «РЖД» предоставлена гарантированная возможность с высокой точностью определения *дислокации и параметров движения*, пассажирских и грузовых поездов, включая специальные и опасные грузы, специальные самоходные подвижные средства, путевые бригады, контролировать их движение, а также оценивать параметры состояния бортовых систем (см. рис. 1.3).

Наличие высокоточного навигационного поля, формируемого с помощью систем дифференциальной коррекции ГЛОНАСС/GPS, будет напрямую содействовать сокращению затрат на инженерные изыскания, проектирование, строительство и эксплуатацию железнодорожного пути и иных объектов инфраструктуры, обеспечит безопасность движения, и принятие своевременных мер по предупреждению и устранению негативных процессов.

Особое внимание уделено созданию интеллектуальных систем управления поездной и станционной работой, новых поколений информационных систем моделирования и анализа перевозочного процесса, формированию ситуационных центров, комплексное внедрение которых обеспечивает достижение синергетического эффекта от внедрения инноваций в данной области.

Украина также принимает участие во внедрении спутниковых и радионавигационных систем на железнодорожном транспорте. На рис. 1.4 представлен фрагмент использования спутниковой системы в промышленном регионе Укрзалізниц.

Как следует из приведённого выше, все разработки спутниковых и радионавигационных технологий носят системный характер, в явной или же фактической форме используют современную методологию и инструментарий системного анализа.

ВНЕДРЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОАО «РЖД»

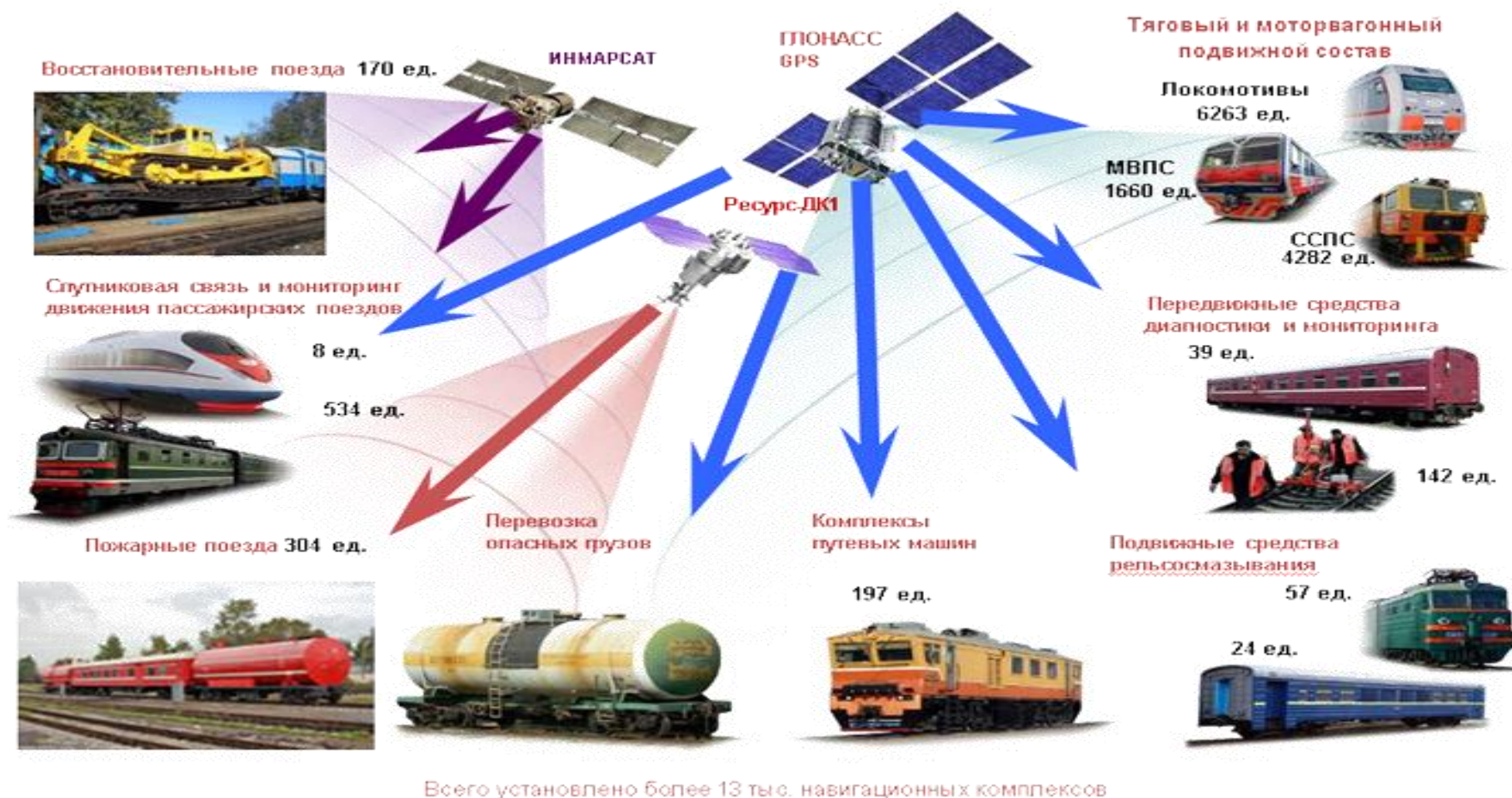


Рис. 1.3. Основные направления внедрения спутниковых технологий на железнодорожном транспорте РФ

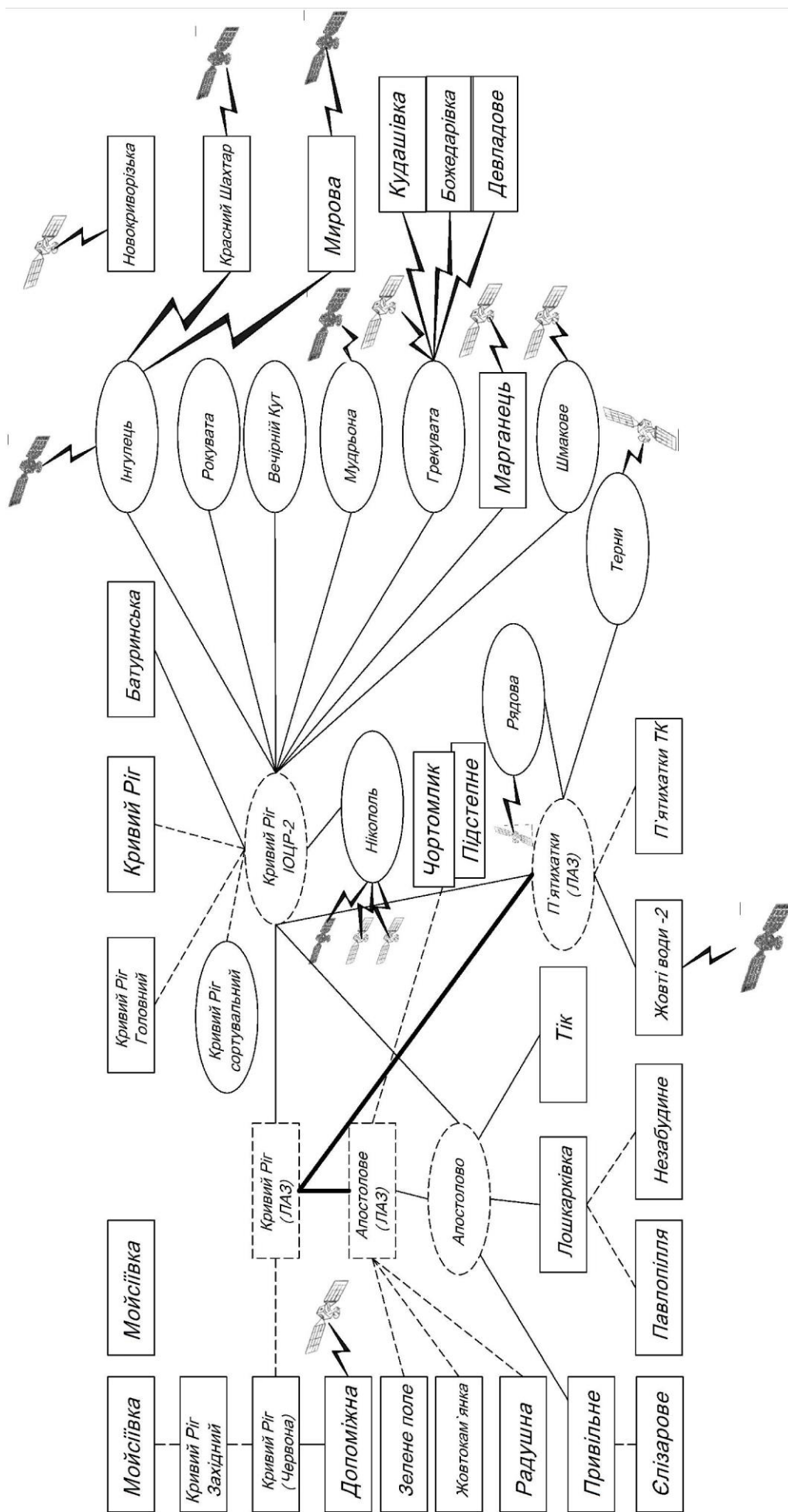


Рис. 1.4. Фрагмент інфраструктури супутникової і телеметричних зв'язей Придніпровської дороги України

Пример проекта спутниковой глобальной системы приведен на рис 1.5. Структура и состояние ГЛОНАСС (GLONASS) России (рис. 1.5.), имеет статус созвездия – 30 спутников, декабрь 2011, операционный состав – 23 сп., ввод в эксплуатацию – 3 сп., временно не исп. 2 сп., летные испытания – 1 сп., запасной – 1 сп. [4, 8].

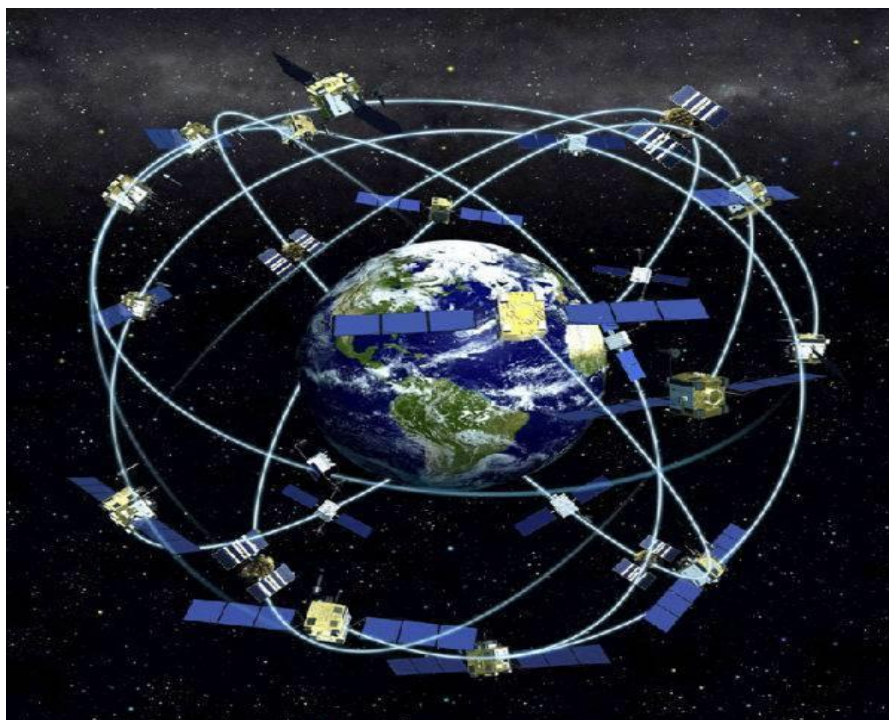


Рис. 1.5. Глобальные системы позиционирования и управления.

Со спутниковыми технологиями позиционирования в реальном времени связаны ряд понятий, ставших общепринятыми.

GIS – Geographisches Informations-System. Данные карт, полученных в электронном виде. Не применяется само по себе, но дает значительную базу данных для многочисленных применений.

GPS – Global Positioning System. – Глобальная система спутникового позиционирования (навигации). GPS используется специально Американским Министерством Обороны NAVSTAR для всемирного определения положения объектов в пространстве.

GLONASS (ГЛОНАСС). – Глобальная навигационная система слежения России.

Galileo – Европейская система спутникового позиционирования местонахождения транспортных средств, лиц и посылок, а также

услуг связи. Планировалась к вводу в действие с 30-ю спутниками в 2013, фактически – менее 10. По соглашению о сотрудничестве между Европой и Соединенными Штатами, «Галилео» и GPS будут совместимы, как и созвездие GLONASS (рис. 1.5).



Стандартные приложения

Saphymo платформы через Интернет

системы настроены и интегрированы в сайт клиента

Рис. 1.6. Телематика как компонент ИТС. Общая архитектура транспортной телематики (Стандарт для рабочих станций; платформы Интернет; информация для клиентов)

GSM – Global Standard for Mobile Communication. – Глобальный стандарт мобильной связи для всех цифровых мобильных радиостанций, в первую очередь для телефонии, а также для

передачи данных по линии или по пакетам, а также коротких сообщений (Short Messages). Несмотря на его низкую ширину пропускания частот, самый популярный в мире стандарт мобильных радиосетей.

GSM-R – Global Standard for Mobile Communication Rail. – Железнодорожный радио-стандарт для 30 европейских железнодорожных компаний. GSM-R должен заменить различные железнодорожные радиосистемы единой цифровой системой. Он также является основой для унифицированной электронной системы защиты поездов ETCS и ERTMS.

Обобщенная структура систем транспортной телематики как компонент ИТС, использующая системы спутниковой навигации, представлена на рис. 1.6.

В настоящее время в ОАО «РЖД» системно разрабатываются многочисленные применения спутниковых технологий для [2, 8]:

- комплексных многоуровневых систем безопасности движения с использованием нового поколения локомотивных устройств безопасности, спутниковых технологий и цифрового радиоканала;
- систем интервального регулирования движения поездов с применением спутниковой навигации и цифрового радиоканала для повышения плотности поездопотоков и пропускной способности железных дорог, а также применение этих технологий на малодеятельных участках железных дорог, в труднодоступной местности со сложными природно-климатическими условиями;
- спутниковых технологий для контроля и управления подвижным составом в целях ресурсосбережения (экономия энергопотребления, топлива и снижение износа в системе «колесо – рельс») и др.

Применение глобальных навигационных спутниковых систем GPS / ГЛОНАСС для создания автоматизированной системы слежения и контроля за движением поездов при организации перевозочного процесса, являются одними из центральных вопросов.

В Укрзализныце планируется системное применение глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в организации перевозочного процесса для решения следующих задач:

- мониторинг местонахождения тягового подвижного состава в реальном режиме времени;

- обеспечение автоматического формирования информационных сообщений о прибытии, отправлении и проезде станции подвижным составом без остановки;

- для автоматизированного заполнения разделов электронного маршрута машиниста.

Заметим, что постановки, разработки структур и программно-технические реализации указанных проектов не возможны без применения методологий системного анализа.

1.3. Методы и средства телематики при обеспечении интеллектуальных технологий и процедур транспорта

Телематика – это набор технологий, которые сочетают информационные технологии и телекоммуникацию с целью связывания мобильных и стационарных объектов.

Телематика на транспорте является относительно новой темой, которая затрагивает многие дисциплины. Транспортная телематика (ТТ) – это использование телематики в транспортном секторе. Она описывает все, что связано с автоматизацией производства, передачи и приема, обработки и представления данных, связанных с транспортом. Транспортная телематика используется для управления автомобильным, железнодорожным и воздушным транспортом [3].

В целом, в транспортную телематику входят:

- отслеживание транспортируемых материалов,
- географическое позиционирование транспортируемых объектов и материалов (спутниковое),
- телекоммуникации (передача информации о позиционировании на платформу электронной связи),
- слежение за движением грузов, отслеживание товаров и грузов.

Отслеживание – один из приоритетов транспортной политики, поскольку оно позволяет разгрузить некоторые автомобильные или железнодорожные транспортные коридоры, сводит к минимуму выбросы загрязняющих веществ, снижает потребление энергии (особенно ископаемое топливо), оптимизирует экономическую эффективность перевозок, включая смешанные перевозки и, наконец,

способствует безопасности перевозок. Поэтому многие современные исследования и разработки особенно заинтересованы в путях улучшения слежения за товарами в реальном времени. Улучшение контроля над перемещаемыми товарами является необходимым условием успеха для железнодорожных или комбинированных перевозок (железная дорога /автодорога). Грузоотправитель для перевозки товаров в дополнение к автотранспорту будет использовать железнодорожный транспорт только тогда, когда будет знать, где в любой момент (и у кого) находится его товар. Эта информация должна обеспечить своевременную доставку груза и оптимизировать логистику использования транспорта приятиями.

Мониторинг в реальном времени необходим для того, чтобы железнодорожный перевозчик имел возможность очень быстро определить изменение сроков поставки (в случае ее нарушения), установить и быстро сообщить получателю новые условия для доставки, чтобы получатель имел возможность откорректировать свою дальнейшую логистическую цепочку.

Отслеживание должно обеспечить начало перевозки и сам ход перемещения товара, его состояние (имеет особенно важное значение для перевозки скоропортящихся грузов, таких как свежая плодоовощная продукция и продукты питания, опасных продуктов и живых животных). Дополняемое слежением в реальном времени, отслеживание показывает все операции с грузом во время перевозки и дает об этом информацию клиентам или пользователям, или властям для использования в государственной политике. Таким образом, можно просчитать цену километра транспортировки и определить «транспортные коридоры» - движение определенных транспортных средств только по определенным инфраструктурам (corridoring). Представленное выше описание системного понятия «отслеживание» в свою очередь может потребовать проведения системного анализа конкретных информационно-технических и технологических решений относительно реализации процессов отслеживания, с учетом условий, требуемых ресурсов, эффективности и др.

В вышеописанных процессах важную роль играют время и пространство. Доступность информации будет зависеть от средств,

используемых для ее распространения. Чаще всего классификация информационной доступности выглядит следующим образом [9, 11]:

Pre-trip - Перед поездкой. Этот термин используется при подготовке информации поездки и имеет важное значение для выбора режима (режимов) организации поездки.

On-trip - Во время поездки. Информация во время путешествия, предусматривает использование телефонной инфраструктуры. Это объясняется тем, что телематика не должна быть ограничена только транспортным средством.

Post-trip - После поездки. Этот режим в основном предназначен для обработки статистической информации.

Во всех случаях использования режимов доступа необходима количественная оценка возможных выгод телематики для контроля и управления будущими событиями, которая связана с использованием различных видов информации. Оценка эффективности в технических системах должна быть связана с иерархией в транспортной телематике. Успех транспортной телематики происходит из определения общих целей среди различных субъектов, путем выбора совместимых систем (открытых систем) и приемлемой стоимости (пользователи, государственные органы, деловые круги). В целом получение экономических, социальных и экологических оценок применения телематики требует применения всестороннего, системного анализа.

Важно подчеркнуть, что преимущества телематики выявляются только при определенных условиях. На участках с высокой скоростью и перегруженных участках еще слишком рано говорить об улучшении работы транспорта от применения телематики. Это отнюдь не мешает оценить ее потенциал и разработать лучший способ ее использования.

По данным европейских исследований (Infrabel, SNCF) в настоящее время часть европейской железнодорожной сети используется на 80% (уровень, близкий к предельно возможному). В краткосрочной и среднесрочной перспективе это вызовет ряд проблем. В долгосрочной перспективе европейские железнодорожные сети уже не могут выдерживать дополнительную нагрузку на перевозки, связанную с перемещением грузов с автомобильного транспорта на железнодорожный транспорт. Нужны

новые инвестиции и новые проекты по развитию и техническому обслуживанию. В решении этих проблем важную роль может выполнить телематика.

Начиная с 2005 года, Европейской Комиссией поддерживается концепция пассажирских перевозок «Комодальность», идея которой заключается в предоставлении пассажиру при каждой поездке услуг, оптимальных по стоимости, времени, по комфорту и безопасности. Также обеспечивается сведение к минимуму сбоев в расписании и ожиданиях при пересадке между двумя видами транспорта, при снижении рисков, а также при снижении ущерба окружающей среде. Так кампания Kajsa Rosen (Swedish Rail Administration - Suède)/ Кайса Розен (Шведская железнодорожная администрация) предоставляет услуги для перевозки людей: обеспечение клиентов надежной информацией в режиме реального времени по услуге, которую они приобрели. Это услуги и до поездки, и во время поездки тоже, если инцидент ставит под угрозу доставку клиента в конечный пункт назначения. Каждый оператор обеспечивает данные на национальном уровне в режиме реального времени. Эти данные поступают напрямую пользователю, они также могут быть использованы машинистом, контролером и диспетчером.

Перечень задач телематики в области повышения безопасности движения поездов, в которых эффективно системное применение спутниковых технологий, например, включает:

- определение местоположения железнодорожных транспортных средств (ЖТС), используемых для пассажирских и грузовых перевозок, включая перевозки специальных и опасных грузов;
- определение местоположение ЖТС для ввода координат в бортовые локомотивные устройства безопасности в режиме реального времени;
- формирование и актуализация данных электронных карт железнодорожного пути и объектов инфраструктуры на основе спутниковых определений координат для использования в бортовых локомотивных устройствах безопасности.

Высокоточное координатно-временное позиционирование со спутников со средствами надежной доставки информации с использованием цифровых систем связи и актуализированных

данных навигационных цифровых карт железнодорожных путей и станционного развития, позволяет приступить к созданию:

- систем координатного управления и интервального регулирования движения поездов на основе координатно-временной информации, математических моделей поездной ситуации на полигонах, безопасных методов обеспечения попутного сближения поездов без путевых светофоров;

- систем управления поездной и маневровой работой на станциях на основе спутникового определения координат подвижных единиц и использования широкополосного цифрового радиоканала с сокращением напольного оборудования.

1.4. Сервисы, стандарты, архитектура и организация ИТС

Создание для некоторой прикладной области деятельности типовых сервисов, стандартов, технических спецификаций, архитектурных и организационных решений во многих случаях является практическим результатом системного анализа. Необходимость стандартизации – очевидна. Наглядным примером этому можно считать Государственный стандарт. Интеллектуальные транспортные системы. Российская Федерация, от 01 августа 2011 года № ГОСТ Р ИСО 14813-1-2011 «Схема построения архитектуры интеллектуальных транспортных систем. Часть 1. Сервисные домены в области интеллектуальных транспортных систем, сервисные группы и сервисы» [10].

В общем случае некоторый сервис, в том числе сервис ИТС, представляет собой продукт деятельности, предназначенный для конкретного пользователя. Сервисы интеллектуальных транспортных систем имеют свои особенности. Сервис ИТС может рассматриваться как простейший «строительный блок» любой архитектуры или схемы интеллектуальной транспортной системы.

Приведем несколько примеров о необходимости стандартизации. Предприятия, обменивающиеся компьютерными файлами, заменившими бумажный документооборот, столкнулись с проблемой необходимости общаться на одном языке – отсюда появление

стандартов EDI – своего рода «электронное эсперанто». Все национальные и отраслевые стандарты в управлении, торговле и на транспорте исходят из интернациональной нормы EDIFACT – EDI, опубликованной в сентябре 1987 года под эгидой CEFACT (Организация Объединенных Наций (ООН), Центр по упрощению процедур торговли и электронных деловых операций). ООН опубликовала на сегодняшний день более 250 сообщений EDIFACT, в том числе более 50 применяются ко всем видам транспорта и логистики: бронирование, заказ и договор на перевозку, отчеты по доставке, декларации, счета-фактуры, план погрузки, слежение за движением контейнеров, перевозка опасных грузов, таможенное оформление др.

Комитетами по стандартам ISO – Международная организация по стандартизации (и ее отделением CEN – Европейский комитет по стандартизации) проводится большая работа по так называемым «интеллектуальным грузам». Термин «интеллектуальные грузы» вышел из проекта ITS «Intelligent Transport Systems and services», концепция которого – использование информационно-коммуникационных технологий для управления грузоперевозками.

Слово «интеллектуальный» – «тот, кто может собирать, обрабатывать и распространять информацию», напоминает и о том, что транспортные системы имеют большие социальные последствия и могут участвовать в политике безопасности движения, экономии энергии, охраны окружающей среды и устойчивого развития в целом.

В нормах стандартов рассматриваются различные аспекты организации и выполнения перевозок, например, в некоторые из них описывается следующее:

- ISO TC204: данные и сообщения о безопасности интермодальных транспортных перевозок воздух-дорога, контроль над перевозкой опасных грузов, контроль товаров посредством RFID, компьютерная и мобильная связь;

- ISO TC104: идентификация и электронное пломбирование контейнеров;

- ISO TK8: безопасность цепи поставок и «Electronic Port Clearance» дематериализация портовых формальностей.

В сфере технического регулирования ИТС выделим такие системы стандартизации:

– ISO: международная организация по стандартизации (ISO – International Organization of Standardization), сфера ИТС регулируется техническим комитетом 204;

Таблица 1.1

Основные сервисы пользователей ИТС

Группа ИТС	Сервисы пользователей ИТС
Управление дорожным движением	1. Поддержка транспортного планирования
	2. Управление дорожным движением
	3. Управление в чрезвычайных транспортных ситуациях
	4. Управление требованиями по транспортированию
	5. Политика в области регуляции дорожного движения
	6. Управление технической эксплуатацией инфраструктуры
Информация для путешественников	7. Информация перед поездкой
	8. Информация во время движения для водителей
	9. Информация во время движения для общественного транспорта
	10. Индивидуальные информационные услуги
	11. Дорожные руководства и навигация
Системы транспортных средств	12. Улучшение распознавания
	13. Автоматизированное управление транспортным средством
	14. Предупреждение лобовых столкновений
	15. Предупреждение боковых столкновений
	16. Системы безопасности
	17. Системы предотвращения аварий
Коммерческие транспортные средства	18. Предтаможенные операции на коммерческом транспорте
	19. Административные процессы на коммерческом транспорте
	20. Автоматизированная инспекция безопасности на дорогах
	21. Мониторинг безопасности в коммерческих автомобилях
	22. Управление парком коммерческих транспортных средств
Общественный транспорт	23. Управление общественным транспортом
	24. Управление транспортом по требованию
	25. Управление комбинированным транспортом
Управление в чрезвычайных ситуациях	26. Сигнализация опасной ситуации и личная безопасность
	27. Управление аварийно-спасательным транспортом
	28. Опасные грузы и предупреждение инцидентов
Электронные платежи	29. Электронные финансовые перечисления
Безопасность	30. Безопасность в общественном транспорте
	31. Безопасность инвалидов
	32. Интеллектуальные перекрестки

– CEN – европейского комитета по стандартизации (CEN – European Committee for Standardization), сфера ИТС регулируется техническим комитетом 278 [2, 10].

На основе опыта и тенденций развития систем транспортной телематики Всемирная дорожная ассоциация (PIARC) предложила классификацию сервиса пользователей ИТС, табл. 1.1.

В табл. 1.2 представлены рабочие группы стандартизации комитета CEN/TC 278, состав которых указывает основные сферы стандартизации.

Указанная в табл. 1.1 классификация не ограничивается независимым развитием указанных сервисов, предполагается их комплексное использование для достижения синергетического положительного эффекта интеграции на основе применения инфокоммуникационных технологий в ИТС.

Таблица 2

Рабочие группы стандартизации комитета CEN/TC 278

Рабочие группы	Наименование рабочей группы
WG1	Автоматическое управление доступом и взимание платежей
WG2	Системы управления грузовым транспортом и парком транспортных средств
WG3	Общественный транспорт
WG4	Транспортная и дорожная информация
WG5	Управление дорожным движением
WG6	Управление стоянками и парковками
WG7	Географические дорожные базы данных
WG8	Данные о дорожном движении: создание, хранение, распределение
WG9	Связь на короткие расстояния
WG10	Человеко-машинные интерфейсы
WG12	Автоматическая идентификация транспортных средств
WG13	Архитектура и терминология
WG14	Системы возврата угнанных транспортных средств

Процесс стандартизации охватывает весь комплекс обеспечения сервисов и процедур, как грузовых, так и пассажирских перевозок. В 2010 году Европейским железнодорожным агентством был разработан документ в области телематики для пассажирских

перевозок, устанавливающий для транс-европейской системы состав сервисов и технические характеристики интероперабельности (документ IU-TAP-260510-TSI 2.0, от 26.05.2010 года). В нем регламентируют необходимые сервисы для подсистемы пассажирских перевозок, предоставляемую пассажиру информацию до поездки и во время путешествия, бронирование билетов и платежные системы, управление багажом, связью между поездами и с другими видами транспорта др.

Стандартизация базовых технологий процессов перевозки, систем контроля и телематических устройств, в значительной мере необходима и для стандартизации в области ИТС железнодорожного и других видов транспорта, с учетом специфики их технических средств и систем. Основные задачи стандартизации в сфере ИТС представлены на рис. 1.7.

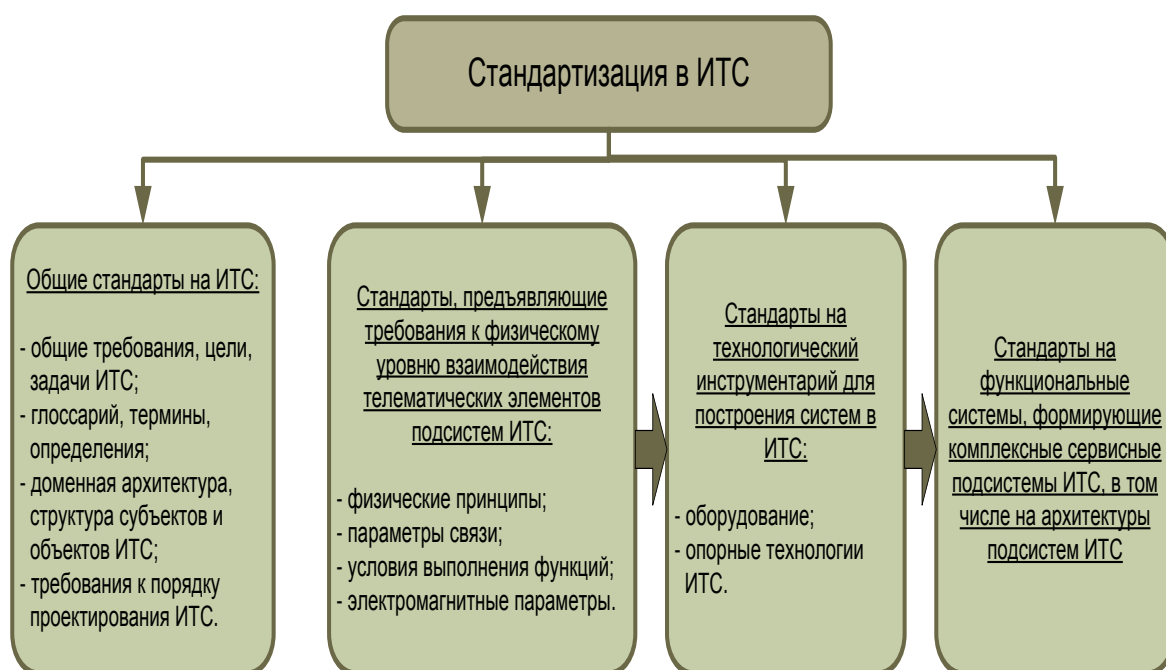


Рис. 1.7. Сферы стандартизации в ИТС

Американская национальная архитектура ИТС. В Соединенных Штатах Америки (США) национальная архитектура ИТС была разработана с 1993 по 1996 г. Она обеспечивает общую модель для планирования, определения и интеграции ИТС, рис. 1.8. Практическое применение архитектуры ИТС поддерживается специальной программой обучения для государственных и коммерческих структур.

Предложенная транспортным департаментом США инициатива носит *системных характер* и направлена на создание единого информационного пространства, объединяющего автомобили,



Рис. 1.8. Физическая архитектура ИТС США

дорожное оборудование, диспетчерские залы и центры обработки данных (ЦОД) по всей стране.

Все технологическое, техническое и правовое регулирование ИТС в РФ должно осуществляться в соответствии с действующим законодательством, Доктриной информационной безопасности, Транспортной стратегией и Концепцией создания ИТС.

Архитектура систем транспортной телематики определяет основные принципы организации ИТС и взаимосвязи компонентов

ИТС между собой и с внешней средой, а также принципы и руководство по их разработке, внедрению и оценке эффективности использования. Архитектура ИТС представляет собой некую рамочную структуру, в границах которой могут быть предложены мультикритериальные подходы к проектированию с учетом индивидуальных потребностей заказчика и необходимых пользовательских сервисов. В настоящее время широко используются два основных подхода к созданию архитектуры ИТС, разработанные в США (The US National ITS Architecture) и Европе (The European ITS Framework Architecture) [3, 4].

С позиций логики и системного анализа формирование единой архитектуры ИТС позволяет контролировать три основных целевых направления: безопасность (снижение аварийности на дорогах), мобильность (сбор информации о пробках от движущихся в потоке автомобилей и информирование участников движения), защита окружающей среды (снижение ущерба окружающей среде от транспорта посредством мониторинга ситуации в реальном времени и своевременного принятия решений). Архитектура ИТС содержит три уровня: два технических (транспортный и коммуникационный) и организационный. Технические уровни включают соответствующие компоненты системы, а организационный – обеспечивает их поддержку и взаимодействие.

На основе Европейской архитектуры ИТС, имеющей рамочный характер, рис. 1.9 [3], разрабатываются как национальные архитектуры, так и архитектуры сервисов ИТС, архитектуры коммерческих систем, в соответствии с которыми ведется формирование и функционирование конкретных приложений ИТС. При этом для облегчения создания конкретных архитектур ИТС разработчики обеспечиваются специальным набором инструментальных средств, которые вместе с необходимыми базами данных образуют унифицированную среду разработки.

Системность подходов, заложенных в основу европейской архитектуры ИТС, предполагает создание индивидуальной физической и коммуникационной среды ИТС в каждом конкретном случае. При этом обязательно выполняется учет всех особенностей и потребностей в сервисах, на основе общих принципов и в соответствии с общей моделью разработки телематических систем.

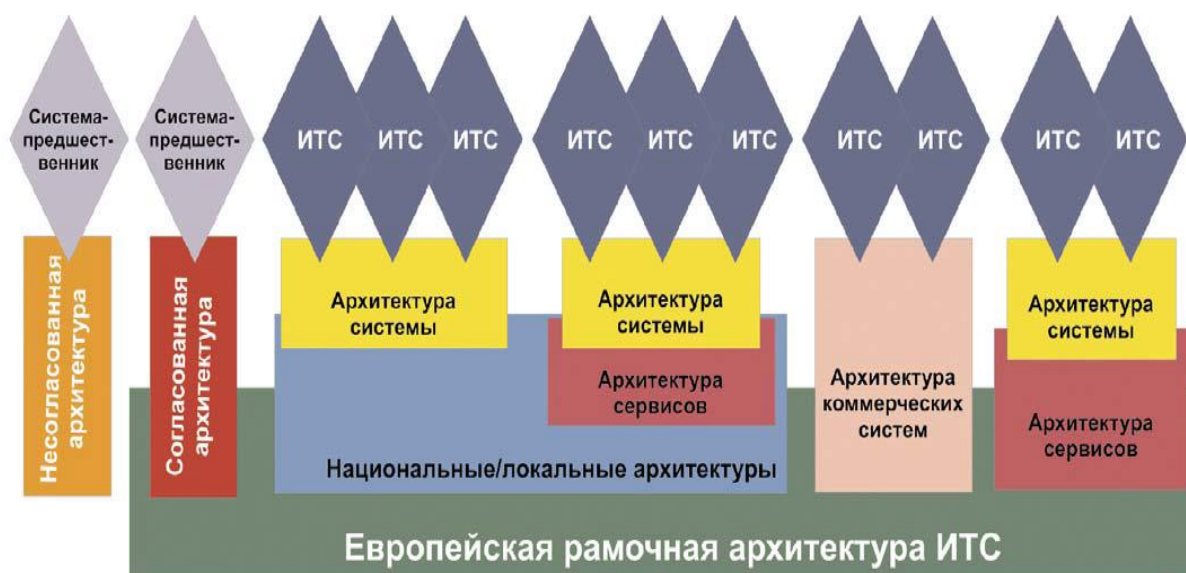


Рис. 1.9. Архитектуры ИТС - Европейская модель

1.5. Основные задачи по совершенствованию интеллектуальных систем транспорта и возможности их решения на основе методологии системного анализа

Рассмотрим несколько «локальных» постановок технических задач и автоматических систем из сферы контроля и управления процессами транспорта, эффективное решение которых реализовано или реализуется интеллектуальными телематическими системами. При этом главное внимание будем уделять необходимости и роли использования в них процедур системного анализа.

Система EBAS – последовательной передачи данных между локомотивом и всеми вагонами поезда. Она позволяет: делать проверку автоматического торможения и электронный контроль торможения, улучшить диагностику торможения, получать обновленную информацию о транспортном средстве, передавать данные на дополнительное оборудование безопасности. Сегодня система EBAS используется в транспортных системах «CargoSprinter», есть возможность ее использования с другими компонентами телематики. EBAS обеспечивает улучшение контроля тормозной системы (давление в цилиндрах). Благодаря использованию электропневматического тормоза в составе системы

торможения, стало возможно сформировать более длинные составы и повысить мощность железнодорожных линий.

Разработка телематических систем с детекторами схода элементов поезда с рельсов. Важность выявления схода состоит в том, что сама авария поезда (разрыв состава, опрокидывание вагона и др.) произойдет только при проходе сошедшей с рельса тележки вагона над стрелкой. Раннее выявление отклонений от нормальной эксплуатации и автоматическая информация служб (о месте нахождения, материалах и т.д.) позволяет снизить возможные потери. Детектор схода с рельсов должен быть установлен на каждом товарном вагоне. В случае вертикальных колебаний более 5 g, как во время схода с рельсов, активизируется тормозной клапан и происходит экстренное торможение. Затраты на установку детекторов слишком высоки, около 2500 € (2008) из расчета на один вагон и не соответствуют выгоде с точки зрения безопасности. К тому же, машинист больше не влияет на автоматически включившуюся тормозную систему, поезд может остановиться в месте (в туннеле), не доступном для спасательных команд. Лучший системный результат можно получить с помощью электронных датчиков схода с рельсов с комбинированным применением телематики и BUS. Помимо автоматического торможения, которое происходит в случае отсутствия реакции со стороны машиниста локомотива, система автоматически сообщает о сходе с рельсов на центральный диспетчерский пункт перевозчика, с указанием идентификационного номера вагона, его местонахождения и назначения груза. При этом данные о грузе определяются по идентификационному номеру вагона и по электронной накладной (эти технологии вводятся в эксплуатацию).

Системное управление транспортировкой негабаритных грузов реализовано в рамках проекта VEMAGS в связи с тем, что органами власти в Германии ежегодно рассматривается более 100000 заявлений на разрешение движения крупногабаритных грузов. В процедурах выдачи лицензий задействовано более 1000 различных административных структур. Система управления была разработана и внедрена на интернет-платформе, что упрощает административные процессы, ускоряет процесс авторизации и отслеживание крупногабаритных грузов в сети. Аналогичная система существует и во Франции.

Из предыдущего видно, что для повышения уровня безопасности или же эффективности перевозок на транспорте могут быть использованы интеллектуальные телематические системы, разработанные методами СА. Понятие «системный» используется потому, что исследование такого рода проблем строится на использовании категории системы. Для больших систем, к числу которых могут быть отнесены ИТС, непосредственное применение математики неэффективно, что обусловлено множеством существующих здесь неопределенностей, которые характерны для исследования и разработки техники как единого целого. В одном из широко развивающихся в настоящее время подходов к СА, на первый план выдвигаются не математические методы, а логика системного анализа, упорядочение процедуры принятия решений. Самым существенным является то, что систематически на всех этапах жизненного цикла любой технической системы осуществляется сопоставление альтернатив, по возможности в количественной форме, на основе логической последовательности шагов, которые могут быть воспроизведены и проверены другими. СА позволяет глубже и лучше осмыслить сущность технической системы, их структуру, организацию, задачи, закономерности развития, оптимальные пути и методы управления. Отличия СА от других формализованных подходов при обосновании управленческих решений сводятся к следующему:

- рассматриваются все теоретические возможные альтернативные методы и средства достижения целей по жизненному циклу ТС (исследовательские, конструктивные, технологические, эксплуатационные и пр.), правильная комбинация и сочетание этих различных методов и средств;

- альтернативы технической системы оцениваются с позиции длительной перспективы (особенно для систем, имеющих стратегическое назначение);

- отсутствуют стандартные решения;

- применяются к проблемам, для которых не полностью определены требования стоимости или времени;

- признается принципиальное значение организационных и субъективных факторов в процессе принятия решений, разрабатываются процедуры использования качественных суждений в анализе и согласовании различных точек зрения;

– особое внимание уделяется факторам риска и неопределенности, их учету и оценке при выборе наиболее рациональных решений среди возможных вариантов.

Тенденция применения системного подхода к решению крупных проблем появляется тогда, когда решения становятся сложными, трудоемкими и дорогостоящими. При обосновании таких решений, которые становятся предметом системного анализа, все большее значение приобретают факторы, рассчитанные вперед на 10-15-летний период. К факторам такого рода относятся рост капиталовложений на осуществление крупных программ, охватывающих длительный период, и большая зависимость этих программ от результатов научных исследований и технических разработок. В физической и соответствующей ей абстрактной системах должно быть установлено взаимно-однозначное соотношение между элементами и их связями. В этом случае оказывается возможным, не прибегая к экспериментам на реальных физических системах, оценить различного рода рабочие гипотезы относительно целесообразности тех или иных действий, пользуясь соответствующей абстрактной системой, и выработать наиболее предпочтительное решение.

В отличие от применения методов исследования операций (ИО), при использовании СА не обязательна первоначальная четкая и исчерпывающая постановка проблемы. Окончательная ее постановка должна достигаться в процессе самого анализа, что рассматривается как одна из главных целей. Задачи методов ИО могут быть поставлены в количественной форме и решены на ЭВМ. Однако, стратегические проблемы, состоящие в выработке долгосрочной политики, в области производства, как правило, не могут быть сформулированы как задачи ИО. Проблемы такого рода являются предметом системного анализа. Стратегические задачи не являются легко квалифицируемыми (сложность количественного выражения эффектов) из-за отсутствия однозначного критерия оптимальности, а также наличия многочисленных факторов неопределенности, причем различных категорий, что требует при выработке решений привлечения субъективных суждений опытных руководителей и экспертов.

Подведем итоги относительно возможности применения системного анализа для совершенствования интеллектуальных систем транспорта.

1. Системный анализ направлен на решение проблем принятия оптимального решения на основе выбора из многих возможных альтернатив.

2. Каждая альтернатива оценивается с позиции длительной перспективы, как правило, характеризуется набором противоречивых показателей.

3. СА рассматривается как методология, обеспечивающая углубленное понимание и структуризацию проблемы.

4. СА направлен на разработку новых принципов научного анализа, учитывающих взаимосвязь систем как целого и противоречивые тенденции и требования к их эффективности. В нем систематически на всех этапах жизненного цикла любой технической системы осуществляется сопоставление альтернатив, по возможности в количественной форме, на основе установленной логической последовательности шагов, этапов процедур анализа.

5. Методология применяется в первую очередь для решения стратегических проблем, требующих выработки комплексной цели и многокритериальной оптимизации в условиях неопределенности.

В качестве основного и наиболее ценного результата системного анализа выступает не обязательно определенное количественное решение проблемы, а ее структурирование, увеличение степени понимания и формирование возможных путей решения. Это особенно важно для ответственных лиц, которым предоставляется набор хорошо проработанных и оцененных альтернатив.

Полезность новых методов анализа и управления, в первую очередь системного анализа, состоит в следующем:

- в большем понимании существа исследуемой проблемы: практические усилия для выявления взаимосвязи компонентов систем, выработка количественных ценностей, помогают обнаружить новые свойства решений;

- в большей корректности формулирования целей, задач, условий предпочтения для неизбежно неясных многоплановых целей;

- в большей точности принятых оценок сравнимости альтернатив, возможности выявления общих черт для них и конкурирующих элементов;

- в большей полезности, эффективности разработки в целом: новые модели и методы описания и анализа должны привести к распределению денежных и других видов ресурсов более упорядоченным образом, что помогает верно оценить первоначальные, а также интуитивные суждения.

Системный анализ, в целом, позволяет более обоснованно с единообразных методологических позиций, эффективно ставить и решать многочисленные задачи в сфере формирования, создания и совершенствования интеллектуальных систем транспорта [12, 15, 38].

2. Системный подход и системный анализ как инструменты совершенствования процессов перевозок в ИТС

Аппарат научных и прикладных исследований систем является их интеллектуальным ядром. Для интеллектуальных транспортных систем ядро образуют: системный подход к разрешению сложных многозначных транспортных вопросов и системный анализ, позволяющий всесторонне анализировать транспортные системы для принятия приемлемых решений.

В разделе изложены основы методологии теории систем, системного анализа и системного подхода, рассмотрены их составные части и примеры исследования различных аспектов управляемости интеллектуальных систем транспорта.

2.1 Сущность, источники системного подхода и системного анализа. Логическая и вычислительная форма реализации системного анализа

2.1.1. Что такое системный анализ и зачем он нужен?

На современном уровне развития знаний термин «система» ассоциируется с понятием «много». Когда много зависимых уравнений, то говорят система уравнений, много связанных правил движения транспортных средств – система правил движения транспорта. Но различные буквы алфавита некоторого языка не задают систему, а определяют множество, элементы которого никак несвязанные. Поэтому словосочетание «транспортная система» ассоциируется с совокупностями транспортных средств передвижения, связанных расписанием, маршрутами движения, типами транспорта и прочее. Следовательно, на понятийном уровне систему образует «совокупность взаимно связанных объектов».

Всякая система может «жить» во времени развиваясь или прекращать свое существование. Поэтому любая система имеет свой

жизненный цикл. Например, жизненный цикл систем транспорта на паровой тяге закончился. Отдельная система живет во взаимодействии с другими системами, и все их множество образует мировую систему (Мир). В мировую систему входят системы живой и неживой природы и искусственные системы, создаваемые человеком. Каждая система уникальна, но в каждой есть нечто общее присущее всем. Законы жизни, развития, свойства и другие категории систем с общих позиций рассматриваются в научном направлении «Общая теория систем». Очевидно общее как целое с общих позиций не богаче, чем его часть, которая может обладать новыми категориями. Однако отдельная система как часть Мира должна иметь категории общности с категориями Мира, такими как иерархия, сохранения, причинности др. Для исследований отдельных конкретных систем используется как *общесистемный* подход, так и подход *системного анализа*.

Выясним, что определяет системный анализ. Для этого установим смысл его составных частей «система» и «анализ».

Система (systema) в переводе с греческого языка есть целое, составленное из частей, соединение.

Анализ (analysis – греческ.) – разложение, расчленение, разбор. Имеет толкование, как метод научного исследования путем расчленения предмета на составные части.

Следовательно, под системным анализом следует понимать метод научного исследования целого путем расчленения целого на его составные части. Такое понятийное толкование системного анализа обусловлено тем, что система состоит из связанных частей, образующих целое. И исследовать части при анализе необходимо во взаимосвязи с другими частями целого.

Например, человек, рождаясь самым «беспопощным» из представителей всего живого мира, но благодаря участию в социальной среде, системе обучения, приобретает знания, которыми не владеют другие живые существа.

Система обучения как целое, по возрастному показателю, условно может быть разделена на части: домашнее, дошкольное, школьное, специальное. В свою очередь части образования – дошкольное, школьное и специальное также разделяются на части по специализации обучения, по возрастному и количественному и

прочим показателям до тех пор пока не получится элементарная неделимая часть – объект обучения (*элемент* системы).

Простой анализ процесса обучения в целом и в каждой части системы показывает, что качество знаний, полученные объектом обучения зависят от знаний, приобретенных на предыдущей стадии обучения (*иерархия* системы). Полный анализ системы обучения позволяет выявить другие особенности или недостатки процесса получения знаний.

Другой пример – система пассажирских перевозок железнодорожным транспортом, которая включает подвижной состав, вокзалы, станции, сферы обслуживания и пр. Элементы пассажирского подвижного состава по назначению это купейные, плацкартные и иные вагоны; по эксплуатационным характеристикам пригородного и дальнего следования и др., требуют анализа организации движения, эксплуатации. Подсистемы «Вокзал» предполагают, в частности, анализ качества обслуживания пассажиропотоков по различным показателям, в том числе во взаимосвязи с ожиданиями поездов в процессах перевозок.

Процессы исследования в системном анализе, выполненные во взаимосвязи с его составными частями, имеют существенные отличия от других видов анализа, например, математического. Можно считать, что системный анализ – основной инструментальный исследования сложных систем и их частей, предназначенный для принятия комплексных обоснованных решений.

В системном анализе (СА) проводятся всесторонние целостные исследования, как всей системы, так и ее составляющих элементов и связей под разными «углами зрения». Эти исследования позволяют выявить свойства, количественные характеристики, состояния системы, ее возможности функционирования и др. Управляя параметрами характеристик, показателями состояний, ее составляющими, связями системы и прочим можно получить систему с лучшими показателями, свойствами. На этом пути СА использует все научные достижения человечества из разных отраслей: биологии, экологии, медицины, экономики, кибернетики, математики и др. Инструментарий исследований охватывает методологию различных областей человеческих знаний. В частности, состоит из классических и неклассических приемов моделирования традиционной и конструктивной математик и их приложений, схематологию и

алгоритмы, инженериию программирования и иное. Поэтому системный анализ имеет междисциплинарный предмет исследований, всесторонне охватывающий факторы, влияющие на объект исследований – систему и ее составные части.

В практике деятельности людей при оценке явлений, изменений качества объектов и пр. используется термин «системный подход». Системный подход к предметному объекту, явлению и др. предполагает системную оценку явления, объекта и иного на основе системного анализа. При этом системная оценка предполагает разноплановый взгляд на явление, объект как систему в целом, так и на ее составляющие.

Очевидно, методологии исследований природных и искусственных систем – неодинаковы, хотя бы потому что последние реструктуризируются, оптимизируются в период жизненного цикла. СА использует и свои приемы проведения исследований, такие как декомпозиция, иерархия, агрегирование и др.

Результаты системного анализа позволяют улучшить состояние и функционирование предметной системы, повысить ее структурированность (состав, взаимосвязь объектов системы), эффективность (соответствие предназначению системы), надежность (бесперебойность функционирования системы), рациональность выбора стратегий принятия решений, управляемость (организация действий для улучшения функционирования системы) и другие показатели.

2.1.2. Основные направления системных исследований

Основатели теории систем выделяют научное, технологическое и философское направления системных исследований.

Научное направление СА связано с исследованиями общих системных концепций, характерных для отдельных классов систем, таких как: физические, биологические, общественные и др. системы (смотри далее, например, отношение в модели (2.1)). Для этого направления характерным является методология и концептуальность, что связано с большим разнообразием систем, разнообразием их сложности по составу и количеству связей и др. До настоящего времени не существует критерия оценки сложности системы, кроме интуитивного показателя.

Например, транспортная система с $n = 10$ станциями не большая, но если между каждой из них имеется однопутная связь, то

количеству связей $n(n-1)=90$, имеем большую систему. В случае двухпутных разнонаправленных путей (бинарные связи) получим сложную систему с количеством связей $2^{90} \approx 10^{27}$ большим, чем время остывания поверхности Земли 10^{17} сек.

Причины, влияющие на сложность систем:

- число элементов системы или ее частей (подсистем),
- большое разнообразие внешних факторов, воздействующих на системы,
- число связей между элементами (подсистемами),
- большое разнообразие структур подсистем,
- большое разнообразие типов подсистем, задающих сущность систем.

В научном направлении теории систем также развиваются вопросы моделирования, концепции исследований, оценки и измерения показателей систем и др.

Технологическое направление системных исследований связано с вопросами развития систем промышленности, транспорта, иных конечных систем, затрагивающих деятельность человека. Характерными для этого направления являются предварительные конструктивные этапы, предшествующие исследованиям, такие как структуризация, факторизация, функциональность, управляемость.

В зависимости от целей и задач исследований определяется признак или цель исследований, которые в процессе исследований могут уточняться или меняться.

Под *структуризацией* понимается процесс выделения элементов из Мировой системы, согласно принятым признакам или цели, а также связей между элементами. Структуризация в системе может быть проведена различным образом в зависимости от типа (смысла) элемента. Например, вагон в зависимости от типа является элементом грузового или пассажирского поезда и, соответственно, между вагонами поездов будут различные виды связей. Выбор элемента системы не всегда следует из известного признака или цели. Так, элемент «точка контакта» в системе колесо-рельс требует экспериментального уточнения или исследования решения контактной задачи.

В процессе структуризации используются элементы, которые по соглашению считаются неделимыми. Из этого допущения никак не следует, что такой элемент при изменении задачи (цели)

исследования не будет разложен на части или объединен с другими в один новый элемент.

Совокупность элементов системы вместе со связями между ними образуют некоторую исследуемую систему. Система S может быть структурированной, слабоструктурированной или неструктурированной. Система неструктурирована, если связи между ее элементами не определены количественными категориями, а выражены только качественными отношениями, или же количественные связи неоднозначны. Слабоструктурированная (частично структурированная) система – это система со структурными количественными и неструктурированными связями.

Третье направление исследований связано с интеграцией теорий научной деятельности в одну философскую концепцию систем. Отметим, что прорыв в этом направлении состоялся благодаря созданию новой прикладной теории – системотехники. Системотехника в комплексе изучает концепции системного подхода, общей теории систем, теорию иерархий и пр. технических систем.

2.1.3. Система и общесистемный подход

Понятийное определение, данное выше, не позволяет корректно задавать систему, а, следовательно, проводить ее аккуратный анализ. Попытаемся определиться с этим вопросом.

Существует много определений системы, однако они обладают рядом недостатков, в первую очередь лишены общности. Попытки ученых из США и Канады дать общесистемное определение «Система» все еще не дали положительного результата. Единого мнения о возможности в будущем дать аксиоматическое определение этому ключевому понятию – нет.

Хотя не удастся определиться с системой, в общем, остаются многообразные возможности определить конечную систему. Например, Такахага представляет систему S конечной последовательностью некоторых характеристик X_i с отношением τ на них. Тогда формально конечную систему можно представить так

$$S = (X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n, \tau), \quad (2.1)$$

где символ « $\times$ » обозначает операцию декартового произведения над множествами X_i и X_{i+1} .

Отношение τ есть часть декартового произведения, и устанавливает связь между характеристиками X_i системы S , в представлении (2.1) это отношение абстрактно и обобщенно. Поэтому такой подход является хорошим для научных исследований и неприемлемым для прикладных технологических систем.

Другая модель подхода к заданию системы S предполагает определенную предметную конкретизацию, погруженную в окружающий ее Мир (внешнюю среду). Здесь допускается, что система может представляться *черным* и *белым* ящиками.

Система как белый ящик имеет признак P , определяющий объект исследований, множество объектов s_i или элементов (простых, неделимых, атомарных), которые по признаку P выбираются из мировой системы, множество межобъектных или межэлементных связей ζ_{ij}^k и множество моделей M , описывающих взаимодействие объектов\элементов на связях. В этом случае, система может быть формально представлена упорядоченной четверкой [35, 36]

$$S = \langle P, \{s_i\}, \{\zeta_{ij}^k\}, M \rangle, \quad (2.2)$$

где в связи ζ_{ij}^k нижние индексы указывают на объекты-элементы s_i и s_j , между которыми действует эта связь, а верхний индекс k определяет кратность связи (количество связей); скобки $\{\}$ есть эквивалент слова «множество».

Например, для транспортной системы: признак P – «транспортная система», объекты-элементы системы s_i – станции, депо, транспортные парки, вагоны, локомотивы, вокзалы и пр.; связи ζ_{ij}^k – отражают зависимости между пунктами приписки и вагонами (локомотивами), расписания отправления и прибытия поездов и иное, модели связей M – правила, инструкции, отношения и др.

Признак P , в зависимости от цели исследований принимается в системном анализе в качестве цели. Задание цели системы упрощает или усложняет ее количественно и содержательно, уточняя s_i как элементы или объекты (подсистемы), так и связи ζ_{ij}^k .

Исследование системы с позиций черного ящика предусматривает, оценку влияния внешней среды на состояния системы и самой системы на окружающую среду. Влияние внешней

среды на систему S определяется функцией системы $F(X, Z)$, заданной на наборах входных факторов X и состояний системы Z , а воздействие системы на окружающую среду определяется выходным набором факторов $Y = F(X, Z)$.

С позиций подхода черного ящика можно сузить общесистемные понятия наблюдаемости, прогнозируемости, управляемости системы.

Если функция системы известна, то многофакторная зависимость $F: X \rightarrow Y$ является характерной для наблюдаемой системы, т.е. позволяет оценить влияние входных факторов, таких как законодательство, инвестиции и пр., на процессы эксплуатации подвижного состава, доставки грузов и др.

При известной функции F может быть рассмотрен вопрос управления системой S для достижения необходимых выходных факторов $Y^* \subset Y$ так, что

$$\| F(X', Z) - Y^* \| \rightarrow \min_{x \in X'},$$

где $X' \subset X$.

При известных факторах X и Y , но неизвестной функции F прогнозируемость системы можно исследовать по параметрической модели, $\hat{Y} = F(X, A)$. Здесь A – множество параметров модели.

Для определения параметров функции системы F используется соотношение минимизации разности выходных факторов:

$$\| Y - \hat{Y} \| \rightarrow \min_{a \in A}.$$

Отметим, что задание цели исследований может частично сужать предметную систему.

Предложенную модель системы (2.2) иногда называют структурированной моделью, она может быть использована для описания и анализа структурированной технологической транспортной системы. Опираясь на представление (2.2) и взгляды на систему с позиций черного и белого ящиков можно утверждать, что системный подход к объекту исследований есть комплексный подход, который определяется формулой:

системный подход к объекту исследований = система + черный ящик + белый ящик.

Например, системный подход можно применить к вопросу обновления пассажирского подвижного состава «Укрзализныци».

Так как любая система существует во времени, то возможен подход к системе и с позиций временного фактора. Если для системы S на определенном временном промежутке T ее состояние Z не изменяется или слабо меняется, то принято считать систему *стационарной* на T . Если же состояние $Z = Z(t), t \in T$, тогда говорят, что система S – *динамическая*. В стационарных системах исследуется структура, иерархия, связи, постоянные характеристики и др. Вопросы функционирования, принятия решений, управления рассматриваются, как правило, при динамическом подходе к исследуемым системам.

Существует множество других подходов к технологическим системам, например, на основе случайных событий, размытых данных и пр.

Входные факторы или их значения, состояния или их значения и др. могут поступать в систему или наступать в системе случайным образом, тогда такую систему называют *недетерминированной* в противоположность от определенной (неслучайной) *детерминированной* системы

Структурное определение системы (2.2) предполагает явное существование межэлементных связей. Но какими они могут быть? Системные связи определяются человеком, который воспринимает окружающий Мир нечетко (размыто). Это хорошо подтверждается определением цвета, качества и пр. Как правило, человек оценивает многие показатели размытой шкалой: «отлично», «хорошо», «так себе» или другим образом. Следовательно, связи между элементами системы и их человеческая оценка, вообще говоря, размытая. Системы с размытыми параметрами, связями или иными показателями принято называть *нечеткими*. Иногда нечеткость конкретизируют, указывая размытый параметр системы. Например, фраза «нечеткий график движения поездов», указывает на то, что показатели: прибытие или отправление поездов или и то и другое не совпадают с расписанием.

Приведенные понятия, определения системы и некоторая классификация систем изложены в классическом стиле теории систем и не являются прагматическими. В следующем разделе будет предложен прикладной подход к понятию система, рассмотрен

системный анализ с технических, транспортных позиций, расширена классификация систем. В последующем также будут рассмотрены вопросы возможного применения прикладного системного анализа в задачах формирования интеллектуальных систем транспорта.

2.1.4. Предмет и задачи системного анализа

Системный анализ допускает рассмотрение широкого спектра разнообразных задач для всесторонних исследований и анализа систем с четких и нечетких позиций, при статическом и динамическом подходах, при детерминированных и недетерминированных случаях, различных аспектах взаимодействия ее элементов и пр. Так различные типы особенностей постановок задач для технологичных систем обусловлены:

- размытостью значений энергетических, экономических и др. параметров;
- размытостью выходных значений систем;
- случайностью событий в технологических процессах;
- сложностью систем;
- неоднозначностью целей исследований;
- многими вариантами выбора управляющих параметров;
- слабой структурированностью систем и пр.

Для технологических систем основной целью системного анализа является модернизация производства, технологических процессов, надежности оборудования, повышения конкурентных возможностей, разработка оптимальных управленческих решений и иного. Инструментарием решения этих задач служат составные части системного анализа: исследование операций, стратегий иерархий принятия решений на основе логики, игр выбора с различными интересами и др.

Транспортные системы, искусственно созданные человеком, должны удовлетворять системным требованиям природных систем, таким как оптимальность, самоорганизация, устойчивость, иерархичность, информативность и пр. Поэтому такие и другие категории также являются объектами исследований системного анализа.

Методология исследований системного анализа позволяет установить эффективность самой системы.

Под категорией *эффективности* системы понимается степень ее соответствия предназначению по целевым признакам. Так, если станция – это система, предназначенная для организации железнодорожных перевозок (признак системы), то срывы графиков движения поездов, формирование подвижного состава неисправными вагонами свидетельствует о неэффективности системы «станция». Сказав, что система неэффективна, делается обобщенное неопределенное заключение. Неопределенность эффективности устраняется заданием ее *показателя*, т.е. можно считать, что эффективность $\mathcal{G}$ системы задается показателями η_i : $\mathcal{G} = \{\eta_i\}$. Тогда определено – система S эффективна, если она эффективна по указанным показателям. Таким образом, можно говорить об эффективности работы станции по показателю η_k – сервисного обслуживания пассажиров и пр. Показатели эффективности определяются четким или нечетким значениями $|\eta_k|$. Если значение показателя эффективности удовлетворяет критерию $\kappa(|\eta_k|) = \text{истинно}$, то говорят об *оптимальности* системы по показателю η_k .

Решение большого разнообразия исследовательских задач требует освоения различных современных математических методов системного анализа, методов структуризации, моделирования, приобретение навыков применения логических и вычислительных методов для решения задач анализа и формирования сервисов ИТС.

2.1.5. Методология исследований системного анализа

Разнообразие задач системного анализа требует развитой методологии проведения исследований. Методология исследований включает:

- методы измерений;
- методы исследований:
 - структурный;
 - агрегативный (композиционный);
 - случайный;
 - исследования операций и др.
- методы принятия решений:
 - генерирование альтернативных решений;
 - анализ альтернатив;

– выбор среди альтернатив приемлемого решения.

Основой системных исследований являются методы натурального, математического, информационного, алгоритмического и других видов моделирования. Под *моделированием* понимается система адекватного представления объекта-оригинала исследований, процесса-оригинала и пр. некоторой *моделью*. Результатом моделирования является модель, которая может представляться:

– *аналитически* в виде математических выражений, отношений, формул и пр.;

– *графически* в виде схем, разновидностей графов и др.;

– *алгоритмически* – на языках представления алгоритмов;

– *информационно* – наборами последовательностей символов и слов, таблиц, а также средствами некоторого иного представления.

Метод моделирования определяется как метод опосредованного познания, при котором изучаемый объект-оригинал находится в некотором соответствии с объектом-моделью. При этом исследователь проводит «эксперимент-анализ» не с объектом-оригиналом, а с моделью. Построение моделей подсистем являются системными задачами, при решении которых используется большое количество исходных данных. В этих случаях невозможно обойтись без системного подхода, который позволяет «приблизить» модели к реальным объектам, выделить среди множества факторов управляющие, оценить эффективности функционирования систем.

Процесс моделирования и исследования в системном анализе предполагает следующие этапы:

1) постановка задачи с учетом, по возможности всех факторов влияющих на состояние системы (системный подход);

2) выбор подхода моделирования и инструментария для решения задачи;

3) формализация и построение модели системной задачи;

4) проверка *корректности* (непротиворечивости) и *адекватности* (соответствие реальности) модели, в случае необходимости вносятся поправки в модель;

5) решение задачи на основе построенной модели;

6) анализ результатов решения задачи;

7) придание содержательной формы результатам анализа решения.

В зависимости от целей исследований в системном анализе на пятом этапе рассмотренного процесса могут применяться логическая и вычислительная формы реализаций.

Логическая форма реализации предполагает получение аналитического результата исследований в виде формулы решения, логического или другого отношения, по которому при необходимости можно получить количественную оценку.

Например, необходимо провести исследование структуры некоторой подсистемы. Для этого воспользуемся структурным подходом представления систем (2.2) и построим модель системы в виде структурного графа G_s . Примем элементы s_i представления (2.2) в качестве вершин графа G_s , а связям ζ_{ij}^k поставим в соответствие ребра или дуги этого графа. Анализ на графе можно выполнить по показателям: степень вершины $st(s_i)$, длина пути h_{ij} между вершинами s_i и s_j , расстояние ρ_{ij} между вершинами, s_i и s_j , диаметр графа d_G и другим. Указанные показатели задаются формулами:

$$st(s_i) = \sum_j |\zeta_{ij}^k|,$$

здесь сумма количества связей вершины s_i со всеми смежными вершинами с учетом кратности связей;

$$h_{ij} = |s_i = s_{i_1}, s_{i_2}, \dots, s_{i_k} = s_j| = k - 1,$$

здесь символами s_i обозначены промежуточные вершины на пути между вершинами s_i и s_j . Заметим, что не следует путать h_{ij} с физической длиной пути, которая измеряется мерой длины;

$\rho_{ij} = \min\{h_{ij}\}$ – метрическое расстояние между вершинами;

$d_G = \max\{\rho_{ij}\}$ – метрический диаметр графа.

Покажем пример использования этих показателей для некоторой технологической системы. Рассмотрим участок железнодорожной транспортной системы (рис.2.1.), состоящий из семи станций $s_1, s_2, \dots, s_7$, которые имеют однопутные и двухпутные межстанционные направленные и ненаправленные связи ζ_{ij} .

Ненаправленные связи $\zeta_{5,6}$ и $\zeta_{5,3}$ моделируют возможность движения поездов между станциями s_5, s_6 и s_5, s_3 в обоих направлениях.

Система, изображенная графической структурой на рис. 2.1, при ее элементах-станциях не сложная, и характеризуется объемом участка – семь станций, количеством железнодорожных путей – восемнадцать, наибольшей сложностью на железнодорожном участке достижения станции есть – $d_G = 3$ (при этом, например, если прямых поездов со станции S_6 до станции S_2 нет, то пассажиру необходимо совершить, как минимум, две пересадки на этом маршруте). Дальнейший анализ участка дороги по ее структуре показывает, что рассматриваемая система состоит из шести узловых станций, для которых $st(s_i) > 2$. Лишь одна станция S_2 по этому показателю не является узловой.

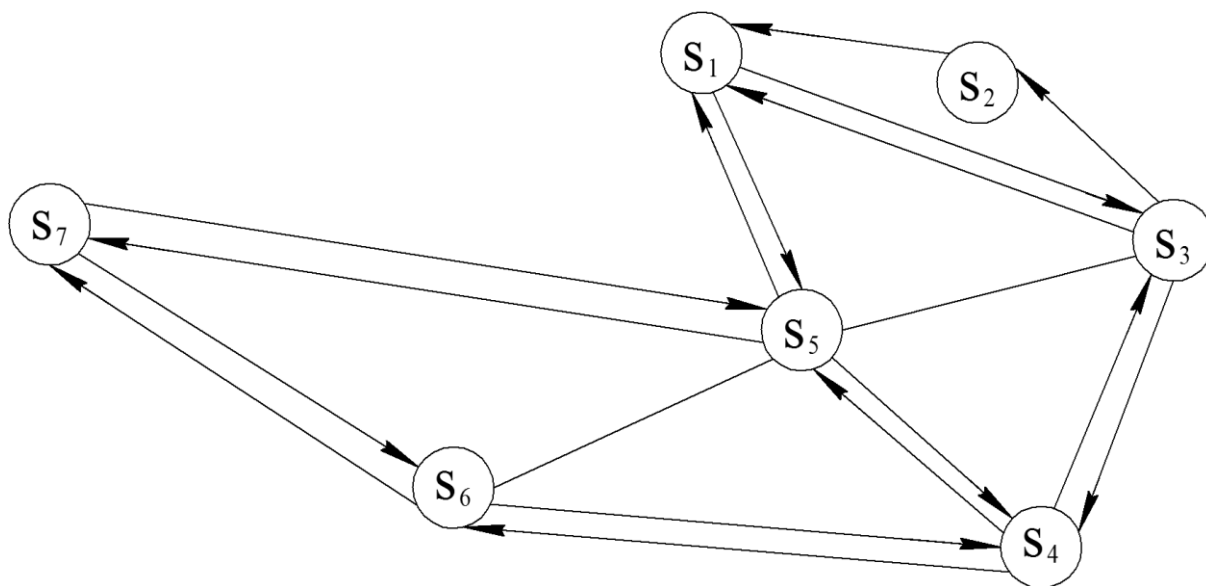


Рис.2.1. Графическая модель железнодорожной транспортной подсистемы

Если в модели транспортной системы, изображенной на рис. 2.1., соответствующие станциям вершины графа рассматривать как подсистемы, которые обрабатывают поезда, определяют маршруты движения и пр., то система становится сложной как в представлении, так в моделировании и анализе.

Другой пример. Логические формы реализации применяются при анализе систем и их подсистем, таких как базы знаний. В базах

знаний используются *логические высказывания (предположения)*, которые представляются *индуктивной формулой (схемой) силлогизма*.

Силлогизм (гр. syllogismos) – дедуктивное логическое умозаключение.

Пусть A некоторое сформулированное предположение, а B следствие из этого предположения и нам неизвестно, истинны ли A или B , тогда силлогизмы представляются схемными моделями:

$$\begin{array}{ccc} A \Rightarrow B & A \Rightarrow B & A \approx B \\ \frac{B \text{ ложно}}{A \text{ ложно}}, & \frac{B \text{ истинно}}{A \text{ более правдоподобно}}, & \frac{B \text{ истинно}}{A \text{ более правдоподобно}} \end{array} \quad (2.3)$$

где представление $A \Rightarrow B$ читается «из A следует B », под записью $A \approx B$ понимается « A аналогично B », а горизонтальная линия соответствует слову «следовательно».

Например, если предположение A – грузовой или пассажирский поезд, а B пассажирский вагон, то по второй формуле (2.3) заключаем, что более правдоподобное высказывание «поезд пассажирский».

В системном анализе при решении вопросов принятия решения на основе многофакторных представлений схемы силлогизмов могут быть намного сложнее. Например,

$$\begin{array}{c} A \Rightarrow Q_{i,j} \\ Q_{i,j} : y_{i_1}, y_{i_2}, \dots, y_{i_n} \text{ истинны,} \\ Q_{i,j} : y_{j_1}, y_{j_2}, \dots, y_{j_m} \text{ истинны.} \\ \hline A \text{ более правдоподобно} \end{array}$$

здесь Q множество простых силлогизмов Y_k .

Переход от решения задачи в соответствии с построенной моделью к интерпретации результатов решения сопряжен с экспериментальными сложностями. Как правило, анализ возникающих вычислительных сложностей перекладывается на ЭВМ, что позволяет существенно увеличить количество анализируемых факторов системы, сокращает время получения

результата и, следовательно, повысить эффективность работы экспериментатора.

Вычислительная форма реализации задач системного анализа во многих случаях предполагает разработки искусственных интеллектуальных систем, помогающих пользователю в поиске и принятии быстрого и эффективного количественного решения.

2.2 Управление, оптимальное программное управление

Неуправляемые системы развиваются и функционируют по своим внутренним законам, что может приводить к нежелательным последствиям – катастрофам, кризисам, дезорганизациям и пр. Поэтому стремятся привести управление в интересующие его системы. Составной частью технологических ИСТ являются подсистемы АСУ, АСУЖТ и ряд других, предназначенных для оперативного сбора, обработки информации, для организации оперативного управления и др. Проектирование современных интеллектуальных систем не возможно без знания основ и принципов организации управления в технологических системах.

2.2.1. Понятия и суть управления в ИСТ системах железнодорожного транспорта

На интуитивном уровне управление – понятный термин, связанный с управлением поведения человека, управлением движения транспортного средства и пр. Управление может быть простым (управление отправлением поезда) и сложным (управление процессом перевозок на железнодорожном транспорте). С позиций управляемости технологические системы могут быть управляемыми и неуправляемыми. Например, технологический процесс реализуется по строгому предписанию, его алгоритм действий не предусматривает управления. Определимся с терминологией и основными понятиями, используемыми в управляемых системах.

Управление в технологической системе – организующая функция, обеспечивающая сохранение структуры, поддержание режима функционирования, реализацию программ и целей системы.

В определении управления термин организующая функция требует уточнения.

Организирующая функция – совокупность отражающих отношений системы.

В нашем случае отражающие отношения – управленческие связи.



Рис. 2.2. Функционально-территориальная схема организующей функции управления Укрзализныци

Организирующая функция всегда имеет организационное начало (кто или что организует управление). На приведенной схеме (рис. 2.2) в качестве организующего начала выступает «Аппарат управления Укрзализныци», а отражающие отношения представлены дугами - связями между блоками схемы. Таким образом, организующая функция управления Укрзализныци представлена схемой на рис. 2.2.

Представление организующей функции зависит от выбранного признака, цели управления, предметной подсистемы и пр.

Например, организующие функции, изображенные на рис. 2.2 и рис 2.3 имеют одинаковое организующее начало, но разные признаки «функционально-территориальный» и «вертикально-интегрированный», поэтому организующие функции различны.

Рассмотренные понятия и примеры указывают на то, что организационная функция может быть принята в качестве

прикладного системного объекта, имеющего вою структуру, элементы и связи. Потому ее можно задавать моделями черного или белого ящика, агрегативными, аналитическими, алгоритмическими и другими моделями. Во многих литературных источниках представление организующей функции называют моделью управления.

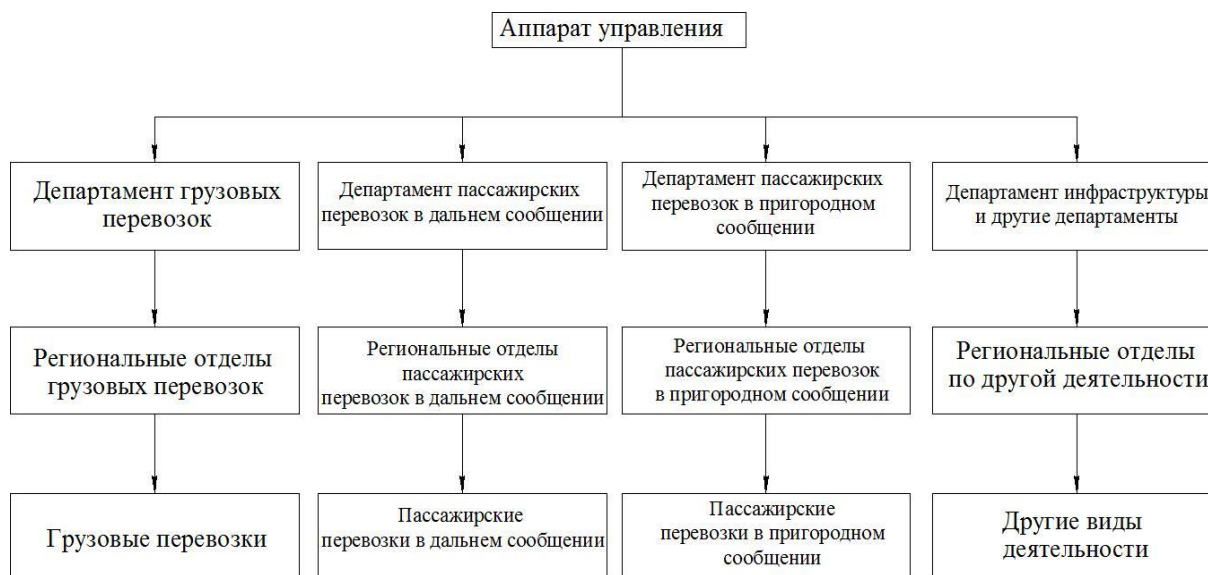


Рис. 2.3. Вертикально-интегрированная схема организующей функции управления Укрзализныци

Модель управления в системном анализе также подвергается исследованиям на предмет состава структуры, сложности связей, количества управляющих факторов и параметров, их взаимосвязи.

Рассмотрим некоторые классы управления и их особенности в организации управления системами и подсистемами.

Система управления, в структуре которой соблюдается отношение подчинения на связях по заданному признаку, называется *иерархической*.

Примерами иерархических систем управления являются функционально-территориальная и вертикально-интегрированная системы, представленные на рис. 2.2 и рис. 2.3.

Особенностью процесса управление в иерархических системах является то, что сама иерархия может быть объектом управления.

Иерархическая система управления, в которой управление ведется только из одного центра (организующего начала), называется *централизованной* системой (рис. 2.5). При наличии нескольких,

возможно, подчиненных центров – *децентрализованной* системой (рис. 2.4).

Структура централизованной системы управления проще, и потому организация управления проводится так, чтобы избавиться от

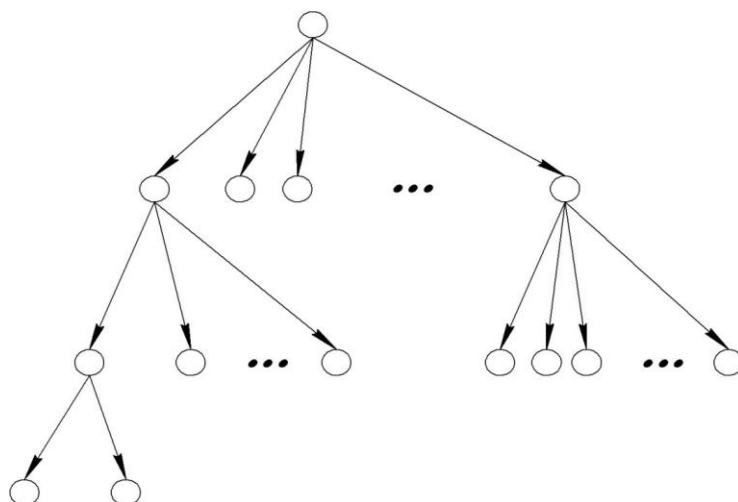


Рис. 2.4. Структура децентрализованной системы управления

промежуточных управленческих центров. Вместе с тем децентрализованная система управления имеет большую степень гибкости. Под *гибкостью* понимают способность системы к адаптации (приспособляемости) состояний, поведения и др. при изменении ее параметров. Например, устраняя связь или несколько связей в установившейся иерархии управления ИТС системы при ее централизации, снижается первоначальная гибкость управления, что может привести к нарушению оперативности сбора и обработки информации и пр.

Для управляемых систем характерно наличие обратных связей, через которые производится управление.

Данные, передаваемые по каналам обратными связями, являются признаками следующих классов управления:

- однофакторное управление, когда по каналу обратной связи передается значение одного управляющего фактора u на вход подсистемы, т.е. $u \in X$;
- многофакторное управление на множестве факторов $U \subset X$;
- однопараметрическое управление по внутреннему параметру θ системы S ;

– многопараметрическое управление на множестве внутренних параметров Ξ системы S .

Существует множество других классов управления, например, технологических – связанных с диспетчерским управлением и др.

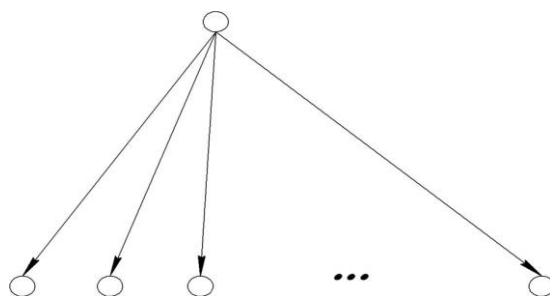


Рис. 2.5. Структура централизованной системы управления

Процесс управления технологической системой может быть последовательный, синхронный, параллельный и иной, при этом управленческие действия может выполнять человек или механизм по программе управления. Разработка программы управления поведением системы – одна из сущностей управления.

2.2.2. Технология моделирования управления в системном анализе

Известно, что решение исследовательских и технологических задач требует знания предмета, методики проведения технологических исследований и др. Ниже приведены этапы моделирования управленческих исследований.

1. Изучение и исследование предметной области системы.

- Определяются элементы системы и межэлементные связи системы с позиций белого ящика.
- Определяются внутренние параметры системы. Используется системный подход.
- На основе системного подхода определяются внешние входные и выходные факторы и параметры, влияющие на систему и на внешнюю среду.
- Исследуются свойства системы и ее составляющих.
- Исследуются состояния системы, ее функционирование, влияние параметров на качество функционирования и пр.
- Исследуются неопределенности системы.
- Исследуется существующее управление системы и необходимость организации нового управления.

2. Выбор цели управления.

- На данных предыдущего пункта предлагается несколько целей управления.
- Проводятся системные исследования предложенных целей.
- По результатам исследований принимается решение о «лучшей» цели управления.

3. Построение модели управления.

- Определяются переменные величины и параметры управления.
- Согласно выбранной цели, существующих в системе неопределенностей и пр. принимается решение о типе модели (алгоритмическая, аналитическая и пр.), о классе модели и иное.
- Строится целевая функция.
- По результатам п.1 определяются технологические, экономические и др. ограничения на переменные параметры управления.

4. Проведение численного эксперимента и интерпретация альтернативных управленческих решений.

- Разрабатывается алгоритм и алгоритмическая программа проведения численного эксперимента.
- Задаются допустимые области изменения параметров модели и области значений допустимого управления.
- Проводятся численные эксперименты на ЭВМ.
- Представление результатов расчетов в удобной для анализа свойств управления форме.

5. Анализ альтернативных решений, принятие управленческого решения.

Рассмотрим этап аналитического моделирования управления в технологической системе.

Пусть Z это множество переменных состояний, Ξ множество параметров системы S , а X – множество входов системы. Функция системы F описывает поведение системы и порождает некоторое множество выходов Y , т.е. $F(Z, X, \Xi) = Y$.

Выделим из множества состояний Z подмножество управляемых состояний U , из множества Ξ – множество управляемых параметров θ . Теперь функция при некоторых значениях из множеств Z , U , X , Ξ , θ имеет значение

$$F(Z, U, X, \Xi, \theta) = Y^*$$

Допустим, что Y^* результат допустимого управления. Теперь целевую функцию управления можно представить в виде

$$F^* = F(Z, U, X, \Xi, \theta) - Y^*.$$

Рассмотрим применение функции цели F^* в системных задачах управления.

2.2.3. Некоторые задачи управления и их модели

Пусть функция F отражает некоторую эффективность транспортного процесса, функция g задает технологические ограничения, а функция f моделирует транспортный технологический процесс. Необходимо найти такое управление состояниями системы, чтобы значение целевой функции F^* было наименьшим. Аналитически, поставленная задача, представляется выражением:

$$\begin{cases} \|F^*\| = \|F(Z, U, X, \Xi, \theta) - Y^*\| \rightarrow \min_{z \in U}, \\ f(Z, U, X, \Xi, \theta) = 0, \\ g(Z, U, X, \Xi, \theta) \leq 0. \end{cases}$$

Если в предыдущей задаче требуется найти управление по параметрам системы, то модель задачи несколько изменится

$$\begin{cases} \|F^*\| = \|F(Z, U, X, \Xi, \theta) - Y^*\| \rightarrow \min_{\theta \in \Theta}, \\ f(Z, U, X, \Xi, \theta) = 0, \\ g(Z, U, X, \Xi, \theta) \leq 0. \end{cases}$$

В случае необходимости управление может быть организовано по состояниям и параметрам системы, тогда задача становится многоэкстремальной.

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\substack{Z \in U \\ \vartheta \in \theta}} \| F(Z, U, X, \Xi, \theta) - Y^* \|, \\ f(Z, U, X, \Xi, \theta) = 0, \\ g(Z, U, X, \Xi, \theta) \leq 0. \end{array} \right.$$

Рассмотренные задачи относятся к классу задач оптимального управления и допускают обобщение на случай неопределенных систем.

Поиск численного решения задачи оптимального управления требует, как правило, разработки нестандартного алгоритма или трансформации задачи к типовой, для которой существуют стандартные процедуры вычислений. Поэтому в интеллектуальные транспортные системы следует включить алгоритмы решения типичных задач оптимального управления.

В заключение отметим, что применение методологии системного анализа, в частности систем управления, принятия решений в условиях неопределенности позволяет создать новые подсистемы ИТС, зачит тем самым улучшить эксплуатационные возможности интеллектуальных систем железнодорожного транспорта.

3. Интеллектуальные процедуры, системы и технологии транспорта как основное содержание ИТС

В разделе приведены некоторые основные математические модели и методы, которые во многих случаях используются при исследовании и формализации многообразных условий неполноты информации о процессах функционирования систем, или же при представлении исходных данных, необходимых для создания достоверных математических моделей сложных систем и технологических процессов транспорта, в том числе при нестандартных ситуациях, связанных со слабой структуризацией условий функционирования, при неопределенности параметров и состояний объектов и пр.

3.1 Процедуры Системного Анализа и Исследования Операций в решении слабоструктурированных проблем принятия решений

Остановимся на характеристике основных типов проблем принятия решений, которые исследуются средствами системного анализа. В зависимости от глубины их познания все проблемы можно разделить на три класса:

а) хорошо структурированные или количественно сформулированные проблемы, в которых существенные зависимости могут быть выражены в числовой и символьной форме, что обеспечивает получение конечных численных оценок значений характеристик;

б) неструктурированные или качественно выраженные проблемы, содержащие лишь описание важнейших ресурсов, признаков и характеристик, количественные зависимости между которыми совершенно неизвестны;

в) слабо структурированные или смешанные проблемы, которые содержат как качественные, так и количественные элементы, причем качественные малоизвестные и неопределенные стороны проблемы преобладают, доминируют.

Для решения хорошо структуризованных проблем используется методология исследования операций (ИО) [16]. Она состоит в применении математических моделей и методов {линейного, нелинейного, динамического программирования, теории массового обслуживания, теории игр и т.д.) для отыскания оптимальной стратегии управления целенаправленными действиями. Основная задача при применении методов исследования операций состоит в правильном подборе типовой или разработке новой математической модели, сборе необходимых исходных данных, установлении путем анализа исходных предпосылок и результатов математического расчета, которые свидетельствуют, что построенная модель отражает существо решаемой задачи.

В неструктурированных проблемах традиционным является эвристический метод, когда специалист собирает максимум различных сведений о решаемой проблеме, интерпретирует ее содержание и ограничения, на основе интуиции и суждений вырабатывает предложения о целесообразных мероприятиях.

При таком подходе нет упорядоченной логической процедуры отыскания решения, нет четко изложенного способа перехода от совокупности разрозненных исходных сведений к окончательным рекомендациям. При решении такой проблемы полагаются на имеющийся опыт, профессиональную подготовленность, на изучение аналогичных проблем, но не на четко сформулированную методику.

К слабо структурированным относится большинство наиболее важных проблем крупного масштаба, для решения которых предназначен СА (экономических, технических, политических и др.).

Типичными характеристиками слабоструктурированных проблем являются следующие:

- а) предназначение для выполнения решения в будущем;
- б) имеют широкий набор альтернатив;
- в) зависят от неполноты имеющихся технологических достижений;
- г) требуют больших вложений капитала, содержат элементы экономического риска;
- д) сложны вследствие комбинирования ресурсов, необходимых для их решения;
- е) содержат не полностью определенные требования стоимости или времени.

При осуществлении СА в процессе структуризации проблемы некоторые ее элементы-подзадачи получают количественное выражение, при этом отношения между ее элементами становятся все более определенными. Исходя из этого, в отличие от применения методов ИО, при использовании системного анализа совсем не обязательна первоначальная четкая и исчерпывающая постановка проблемы, эта четкость должна достигаться в процессе самого анализа и рассматривается как одна из его главных целей. Задачи методов ИО могут быть поставлены в количественной форме и решены на ЭВМ. Стратегические проблемы, состоящие в выработке долгосрочной политики, в области производства транспортной политики, как правило, не могут быть сформулированы как задачи ИО. Именно такими являются многочисленные проблемы сферы интеллектуальных систем транспортных, как предмета СА.

Как отмечено во втором разделе, разработка ИТС, решение транспортных проблем на основе системного подхода, системные исследования технологических процессов, требуют прагматического взгляда на систему. При формировании технологической (технической) системы объединяют материальные (экономические, биологические, технические) и идеальные абстрактные объекты (научные, математические и др.), руководствуясь некоторыми системообразующими признаками. Например, по признаку организационной подчиненности построена система министерства, по общности территорий или функций – транспортная или торговая системы, с учетом субстрата и процесса – система транспортных потоков или вагонопотоков и пр.

Произвольный реальный объект имеет бесчисленное количество свойств (характеристик), по каждой из них его можно отнести к той или иной системы как ее элемент. Чтобы выделить систему из внешней среды, нужно иметь:

- объект исследования, который состоит из множества элементов (люди, технические устройства, транспортные системы, знаки-символы т.д.), объединенных в некую совокупность;
- субъект исследования, так называемого «наблюдателя»;
- задачу, характеризующую отношение наблюдателя к объекту, что дает возможность разделения целой системы на ее составляющие (элементы и подсистемы) и выбора их существенных свойств.

В зависимости от цели исследования применяют различные

подходы к понятию «технологическая система», которые различаются по степени абстракции. Для нашего изложения остановимся на таком определении: под системой S будем понимать множество взаимосвязанных, взаимозависимых элементов любой природы, которые объединены по некоторым системообразующим признакам, образуют единое целое и подчинены определенной общей цели. При формировании системы устанавливают ряд понятий.

Внешняя среда E – все то, что не вошло в систему.

Входы, выходы системы S . С помощью своих «входов» и «выходов» система взаимодействует с внешней средой. Вход системы – это каналы, с помощью которых внешняя среда E влияет на систему S , через них из внешней среды в систему поступает вещество, энергия, информация. Выход системы – это каналы влияния системы S на внешнюю среду, через них результаты процессов преобразования входа (вещество, энергия, информация) поступают во внешнюю среду. Если обозначить множество входов символом $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, выходов – $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$, а отношение между ними – R , тогда можно записать: $XY = R(X, Y)$ (сравните с представлением $Y = F(X)$ в п. 2.1.3).

Элемент системы, подсистемы – неделимая (при определенном способе разбиения) часть системы, которая имеет некоторую самостоятельность для всей системы. Неделимость элементов относительна: понимается, как нецелесообразность в пределах рассматриваемой модели данной системы учитывать внутреннюю структуру отдельных составляющих последней. Любой объект, взятый первоначально, можно толковать как элемент (подсистему) некоторой системы высшего ранга. Подсистема как часть системы, выделенная по тем или иным системообразующим (например, функциональным) признакам. Любая система может быть подсистемой другой системы, которая по отношению к ней является надсистемой. Элементы системы характеризуются только внешними проявлениями в виде взаимодействия с другими элементами, что обусловлено наличием связей между ними.

Связь элемента с внешней по отношению к нему средой моделируется с помощью его входов и выходов. Количественной мерой взаимодействия входа (выхода) элемента с соответствующей средой является интенсивность этого входа (выхода). Графическую схему элемента показано на рис. 3.1. Элемент в общем случае

рассматривается как преобразователь «входов» в «выходы»: $Y = F(X, Z)$, где F – это символьное обозначение совокупности преобразований (отображение) множества входов на множество выходов [17, 19].

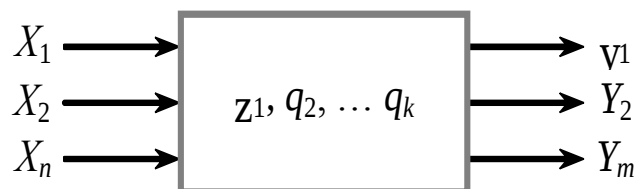


Рис. 3.1. Структурно-графическая схема элемента (системы)

Для того чтобы элементы системы могли воспринимать, запоминать и перерабатывать информацию, они должны быть изменчивыми, изменяя свои свойства, могут находиться в разных состояниях. Каждый элемент характеризуется своим набором показателей, характеристик, изменение значения хотя бы одного из них переводит элемент в другое состояние. Внутреннее состояние

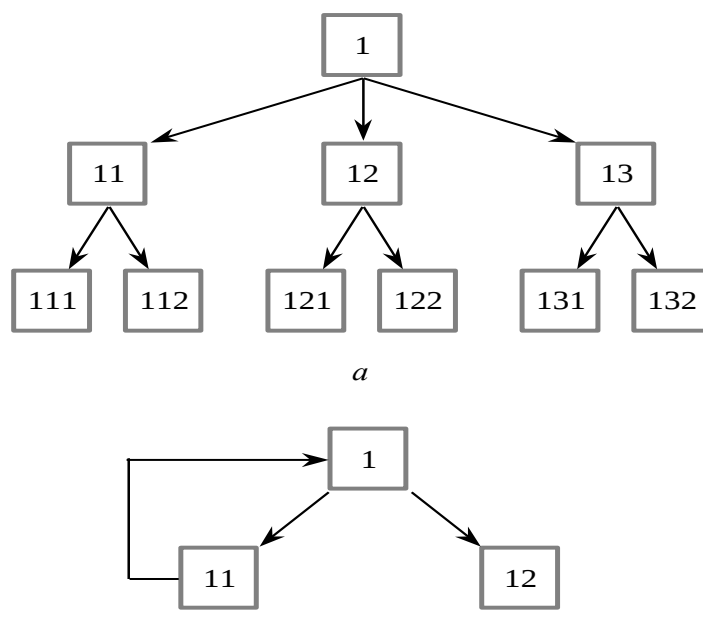


Рис. 3.2. Графическое изображение структуры системы:
а – дерево, без обратной связи; б – с обратной связью

элемента $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$ – это совокупность его существенных

свойств. В целом сама система также может рассматриваться как элемент надсистемы, поскольку она характеризуется своими показателями и может переходить из одного состояния в другое.

Элемент может влиять на другие элементы системы, изменяя их состояния, причем влияние может быть энергетическим или информационным. Состояние элемента может меняться само по себе или в результате сигналов и воздействий, поступающих извне в технологическую систему.

Функционирование системы как единого целого обеспечивается связями между ее элементами, выражающими структуру системы. Структура системы – это совокупность ее элементов и связей между ними, по которым могут проходить сигналы и их воздействия. Формально структуру чаще всего подают графически в виде схемы или графа (рис. 3.2). В целом понятие «технологическая система» является абстракцией не только относительно свойств реальных объектов, но и относительно связей между ними, которые устанавливаются исходя из целей формирования системы.

Рассмотрим вопросы классификации систем и их свойств. При формировании классов систем, применяют различные системообразующие, классификационные признаки, главными из которых считают природу и происхождение элементов, длительность существования, изменчивость свойств (поведения), степень сложности, отношения к среде и т.п. В табл. 3.1 приведены возможные классы систем, представляющие их основные типы [17]. Приведем характеристики некоторые из них.

Абстрактные системы – состоят из элементов, не имеющих физических аналогов в реальном мире, например: системы уравнений, идеи, планы, теории и т.п.

Искусственные системы – системы, которые создал человек.

Простые системы – допускают описание с достаточной для целей исследования точностью.

Большие сложные системы – состоят из многочисленных взаимосвязанных, взаимодействующих между собой в условиях неопределенности, разнородных элементов и подсистем. Сложные системы имеют принципиально новые свойства, которых не имеет ни один из составляющих элементов (свойство эмерджентности). Примеры сложных систем: живой организм, предприятие, отрасль экономики, система управления транспортом и телекоммуникациями.

Большие системы характеризуются высоким уровнем неопределенности целей и своего поведения.

Изолированные (замкнутые) системы – не обмениваются с внешней средой энергией, веществом, свойствами или информацией.

Организационные системы – социальные системы, группы, коллективы людей, общество в целом.

Кибернетические системы – сложные динамические системы с управлениями.

Таблица 3.1

Классификация систем с учетом системообразующих свойств

№ з/п	Классификационный признак	Классы систем
1	природа элементов	Реальные, физические, абстрактные
2	происхождение элементов	Природные, искусственные
3	длительность существования	Постоянные, временные
4	Изменчивость свойств и поведения	Статические, динамические, стохастические, детерминированные
5	степень сложности	Простые, сложные, большие
6	степень устойчивости	Устойчивые (равновесные), неравновесные
7	Реакция на возмущающие воздействия	Активные, пассивные
8	характер поведения	С управлением, без управления
9	Степень участия в реализации управленческих воздействий людей	Технические, человеко-машинные (эргатические), организационные
10	Степень связи с внешней средой	Открытые, закрытые и изолированные

Кибернетическая система – это множество взаимосвязанных объектов (ее элементов), способных воспринимать, запоминать и перерабатывать информацию, а также обмениваться ею. Примеры кибернетических систем: человеческий мозг, живой организм, автомашинист, регулятор температуры, компьютер, транспортное предприятие, наконец – ИТС системы.

Кибернетическим системам, в число которых могут быть отнесены интеллектуальные системы транспорта, присущ ряд новых свойств, которых могут не иметь системы других типов:

- 1) многовариантность поведения;
- 2) управляемость (информационным воздействием на систему можно изменить ее поведение);
- 3) наличие управляющего устройства;
- 4) способность взаимодействовать с окружающей средой как непосредственно, так и через управляющие устройства;
- 5) существование между системой, внешней средой и управляющим устройством каналов информации;
- 6) способность информации, циркулирующей по этим каналам, образовывать обратные связи, с помощью которых осуществляется управление поведением системы со стороны органов управления;
- 7) целенаправленность управления системой: оно направляет систему к выбору определенного поведения или состояния, компенсируя внешние возмущения;
- 8) свойство самоорганизации – способность восстанавливать или изменять свою структуру и способ функционирования, компенсируя возмущающие воздействия и др.

Системный подход к технологическим системам позволяет глубже понять причины многих явлений, которые в разрозненном виде кажутся случайными, но объединенные в систему способствуют выявлению закономерностей их протекания. В результате этого подхода появляется новый взгляд на эффективность функционирования транспортных, социально-экономических систем: взаимодействие между отдельными частями системы гораздо больше влияет на ее эффективность, чем результативная работа указанных частей. Методики, реализующих принципы системного анализа в конкретных условиях, направлены на формализацию процессов исследования системы, а также постановки и решения определенных проблем. Общим для всех методик системного анализа является

формирование вариантов представления системы (процесса решения задачи) и выбор лучшего из них. На разных стадиях исследования используются те или иные научные методы и приемы, которые состоят из нескольких этапов анализа, содержание которых зависит от сложности решаемой задачи. Общая схема этапов системного исследования приведена на рис. 3.1 [17].

Системный анализ имеет особенно важное значение в исследованиях сложных государственных, экономических, транспортных систем, таких как секторы экономики, экономика в целом, международные транспортные системы и управление ними. СА используется, прежде всего, для изучения целей развития экономического или транспортного объекта, из которых вытекать цели развития и совершенствования системы управления.

Процесс СА можно разделить на четыре этапа

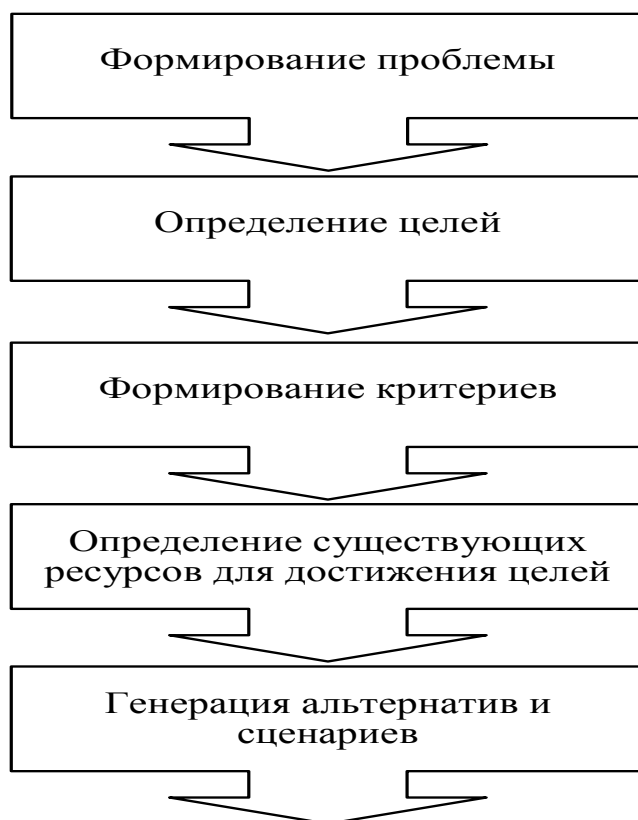


Рис. 3.1. Общая схема системных исследований

Рассмотрим основные идеи и концептуальные основы системного подхода на примере транспортной отрасли.

Для СА, как правило, используется комплекс специализированных информационно-технологических и экономико-математических моделей исследуемой системы. На отраслевом уровне метод математического моделирования имеет следующие особенности:

- модель развития данной отрасли представляет собой один из блоков общего комплекса моделей развития экономики, а для транспорта – например, отдельных видов транспорта;

- технология и экономика этой области описываются некоторой общей балансовой технолого-экономической моделью;

- весь комплекс моделей развития и текущего функционирования транспортной или же экономической отрасли должен быть связан единым комплексом критериев оптимальности (а также соответствующих плановых и учетных показателей), которые следуют из анализа роли отрасли в перспективном развитии экономики, транспорта и др.

На *первом* – выполняется определение системы, ее общей цели (вытекает из рассмотрения роли подсистемы в надсистеме) и критериев, обеспечивающих дальнейший выбор оптимального пути достижения в общем междисциплинарно устанавливаемой цели. Выражение общеотраслевого критерия в количественной форме обеспечивает возможность точного выражения частных целей подсистем, критериев оценки их функционирования, а также формирование критериев оптимальности для всего взаимосвязанного комплекса моделей планирования и регулирования отрасли, дает систему показателей для возможности осуществления регулирования. Для сложных систем критерии удастся сформулировать только на качественном уровне.

Второй этап СА заключается в построении и анализе дерева целей, которое должно доводиться до уровня задач, решение которых уже не вызывает принципиальных трудностей.

Третий этап СА начинается составлением по возможности исчерпывающего плана мероприятий (технологических, экономических, административно-правовых, по совершенствованию управления, в сфере научно-технического прогресса и др.), предназначенных для достижения целей отрасли. Эти меры размещаются на нижнем уровне дерева целей и подбираются с помощью системы моделей, обычно используемых для развития исследуемого объекта. Следует заметить, что наиболее важным и

результативным способом группирования планируемых мероприятий является их разделение по степени эффективности. Здесь эффективность рассматривается относительно возможности достижения целей, сформулированных в дереве целей, в частности, это получение определенной экономической эффективности.

Четвертым является этап диагностирования, состоящий в выявлении всего комплекса нерешенных проблем, диспропорций и их причин. Задача диагностирования – спецификация разрабатываемой системы, уточнения требований к ней, создание организационного плана последовательного построения системы, подбор средств и методов управления ею. Как правило, диагностический анализ проблем управления имеет следующие составляющие:

- выявление проблем управления на основе изучения признаков и установленных в ходе СА несоответствий некоторых функциональных комплексов и объекта анализа в целом;
- идентификация и описание проблем;
- построение дерева проблем;
- выявление первоочередных проблем и разработка рекомендаций по последовательности их решения;
- подбор методов и средств, для решения первоочередных задач и по оценке эффективности их реализации;
- уточнение структуры дерева целей, комплексов моделей и алгоритмов;
- разработка организационного проекта создания информационной системы.

Системный анализ и его раздел исследования операций включают множество различных способов-процедур проведения исследований. Эти исследования используют разнообразные *модели* для формализации и получения аналитического или численного результата. Так как в транспортных системах должен использоваться системный подход, то такие системы многопараметрические и для их исследований используются численные приемы, основанные на тех или иных *системах алгоритмов*. Составной частью ИТС является *информация*, которая добывается и обрабатывается ИС, поэтому информационные процедуры требуют рассмотрения. Функциональная сторона технологических систем связана с исследованиями и анализом *действий-операций* систем. Несмотря на

более чем полувековой период существования системного анализа, не существует его единой методики. В технологических системах для получения количественных оценок результатов исследований используются различные методики. К ним относятся методики принятия решений на основе теории исследования операций, теории управления; методики исследования систем в условиях неопределенности и размытости данных, методики синтеза систем в процессе их функционирования и др. Ниже приведен некоторый процедурный инструментарий (модели, алгоритмы, информация, действия), используемый в системных исследованиях транспортных систем.

3.1.1. Алгоритм, представление и реализация

Понятие алгоритма необходимо для проведения вычислительного анализа систем. Корректно алгоритм определяется для некоторого заданного объекта алгоритмизации, а также для заданного механизма реализации алгоритма.

Алгоритмизация – процесс разработки и конструктивного построения алгоритма. Методология алгоритмизации очень обширна и описана во многих литературных источниках.

Под *объектом алгоритмизации* понимается объект предметной области, требующий алгоритмизации. Примерами объектов алгоритмизации могут быть вычисления функций, решения уравнений в математике, обслуживание локомотивов или локомотивного парка, эксплуатация железнодорожного подвижного состава и др.

Алгоритм – процесс, состоящий из формирования его представления и выполнения действий по этому представлению. Для представления и выполнения действий алгоритму необходим исполнитель или механизм исполнения. Исполнителем является живой объект – человек, механизм – искусственный объект машина, робот и пр.

Пусть исполнитель (механизм) может выполнять операции-действия (команды) $d_1, d_2, \dots, d_n$ и пусть исполнитель\механизм вначале настроен на набор входных параметров X .

Представление алгоритма для реализации задается конечной совокупностью операций\команд, записанных в определенной последовательности, причем команды в последовательности могут

повторяться. Например, запись $(d_k, d_s, \dots, d_m), 1 \leq k, s, m \leq n$, задает представление некоторого алгоритма A^x для выбранного исполнителя\механизма и набора входных параметров x . Порядок параметров, их количество в наборе x существенно влияет на представление алгоритма. Представление алгоритма на ЭВМ-механизме имеет вид программы, которая записывается по правилам грамматики понятного для механизма алгоритмического языка (Паскаль, Фортран, Си и др.).

Выполнение (реализация) алгоритма предполагает реализацию последовательности операций $(d_k, d_s, \dots, d_m)$ за конечное число действий (шагов) так, что получается один результат-значение алгоритма $y \in Y$ или совокупность однозначных значений $Y_1 \subseteq Y$.

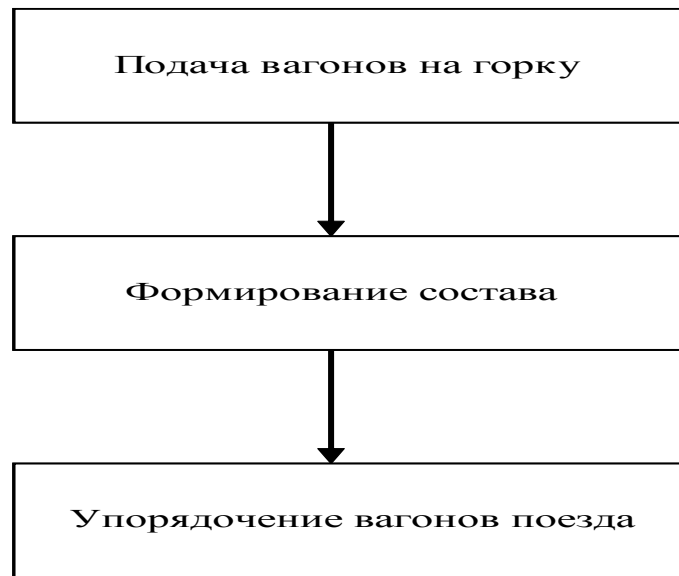
Отправляясь от двойственности задания алгоритма, его записывают так A_Y^x .

При разработке алгоритмов для исследования систем обычно используют абстрактный и предметный уровни представления. На абстрактном уровне представления не учитывается механизм алгоритма, а на предметном уровне наличие механизма обязательное.

Абстрактный уровень разработки позволяет отразить суть алгоритма без учета «конкретики», «учета типов данных» и пр. Для представления алгоритмов на абстрактном уровне используется метаязык понятный исполнителю, конструкции схем алгоритмов (схемы Насси-Шнейдермана, блок схемы, схемы Ляпунова) и другие конструкции. При этом процесс разработки алгоритма может состоять, в зависимости от его детализации, из нескольких уровней построения представления. Например, формирование поездов на сортировочной станции выполняется в два этапа: формирование состава вагонов в соответствии с маршрутом следования поезда и в соответствии со временем отцепки вагонов. Тогда алгоритм формирования поезда удобно представить обобщенным алгоритмом, состоящим из трех блоков (см. рис. 3.2. а) и детальными алгоритмами для каждого блока обобщенной схемы. Упрощенная блок-схема алгоритма сортировки вагонов по критерию поиска наибольшего значения (времени, длины пути и пр.) для трех вагонов со значениями их показателей a, b и c приведена на рис. 3.2. б.

Блок схема (рис. 3.2. б.) состоит из блоков следования 1, 2, 4, 6, 7 и блоков ветвления 3 и 5. Эта схема отражает существо

алгоритмического процесса поиска решения $\max\{a,b,c\}$, задачи окончательного формирования поезда.



а

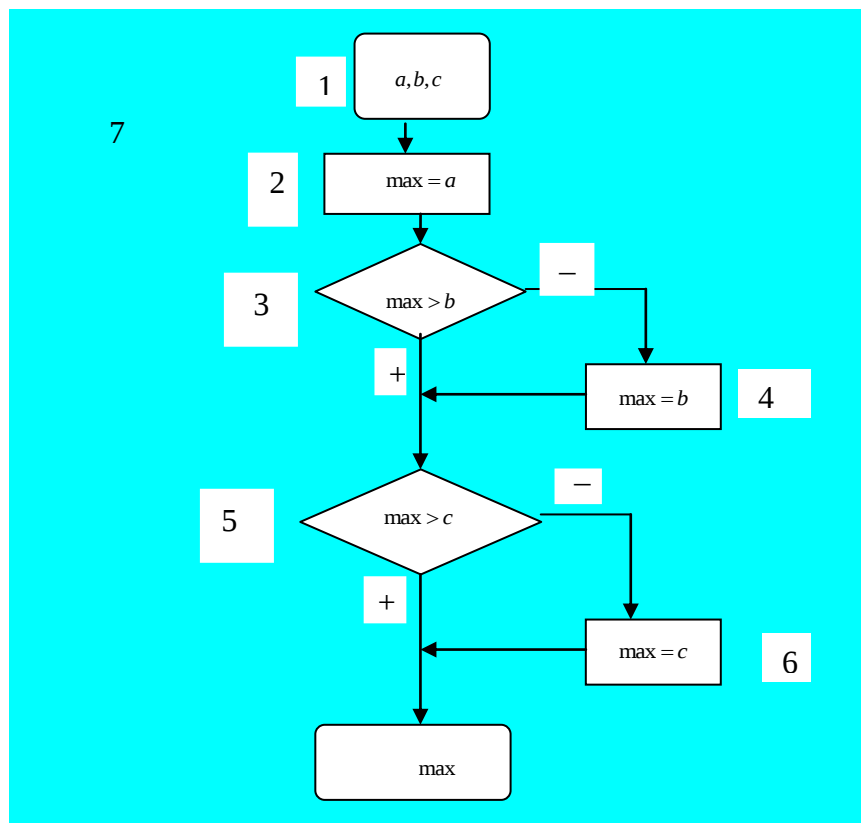


Рис. 3.2. Преставление алгоритма формирования поезда: а, – обобщенная схема алгоритма; б, – блок-схема алгоритма упорядочения вагонов поезда

Далее разработчик принимает решение о выборе языка программирования, разработки на нем алгоритмической программы и получения соответствующего результата (см. блоки 4, 6 и 7).

3.1.2. Модели в системном анализе, структуры и их типы

Исследование систем – сложный процесс, который существенно зависит от методик, приемов, подходов анализа к разнообразию систем и целей исследований. На этом пути исследователю невозможно обойтись без моделей, в которых пренебрегают несущественными для исследования факторами, составными частями систем и представляют упрощенный объект анализа.

Для технологических систем характерными являются физические и абстрактные модели. Физическая модель, как правило, строится на материальных объектах с учетом физических свойств и процессов компонент объектов. Абстрактная модель строится на понятиях, описываемых некоторым абстрактным языком (языком схем, таблиц, форм, математических отношений, алгоритмов и иного).

Модель – объект или система объектов, заменяющая в некотором отношении систему или ее части.

Цель исследований существенно влияет на модель, т.е. объекту исследований может соответствовать множество моделей, отражающих те или иные цели. Кроме того степень детализации в системе также влияет на *процесс моделирования* (процесс разработки и построения модели).

Обычно процесс абстрактного моделирования технологических систем проходит не более трех иерархических этапов.

- Этап имитационного (структурного) моделирования предполагает построение моделей на основе множественных объектов, графов, статистики и др. На этом этапе могут использоваться прикладные пакеты автоматизированного проектирования и моделирования такие, как SADT (Structure Analyse and Design Technic), CASE (Computer Aided System Engeneering), CBR (Case Based Reasoning). Модели этапа предназначены для статического анализа систем относительно элементного состава, связей-отношений в системе, иерархий, свойств подсистем и пр.

- Этап логического моделирования применяется при анализе функциональных систем, поэтому предполагает построение логических моделей на основе соотношений логики исчислений высказываний, предикатов, логических функциональных структур.

- Этап количественного моделирования систем на алгоритмической основе представления моделирующих объектов классической и конструктивной математики. Этап сопровождается разработкой методик дискретизации и представления данных, методов представления результатов.

Рассмотрим процесс абстрактного моделирования системы S на примере рассмотренного участка железной дороги из семи станций. Предполагается, что станции являются подструктурами системы S .

На структурном этапе моделирования системы S формируется таблица описаний (названия, свойства и пр.) станций $T(s_i)$, затем задается множество станций железнодорожного участка $\{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7\} = B$ и множество связей $\{\zeta_{ij}\} = \Omega$ между станциями s_i и s_j . Для связей также строится таблица описаний, в которой указываются номера путей, характеристики и пр. Теперь моделью системы на первом этапе служит структурный граф $G(S) = \langle D, \Omega \rangle$, который представлен на рис. 2.1.

Структурные отношения заданные графически графом G удобно представлять *матрицей смежности* $[B \times \Omega]$, в которой строки и столбцы соответствуют вершинам (станциям) множества B , а элементы матрицы определяются числом ребер связи ζ_{ij} , направленных от вершины s_i к вершине s_j . Матрица смежности соответствующая графу рис. 2.1, следующая

	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7
s_1			1		1		
s_2	1						
s_3	1	1					
s_4			1		1	1	
s_5	1		1	1		1	1
s_6				1	1		1
s_7					1	1	

Отметим, что матрица смежности читается по строкам и при наличии межстанционной связи в соответствующей клетке записывается символ 1. Матрица смежности удобна при машинном способе обработки данных. Например, для обработки матрицы смежности можно построить несложные алгоритмы подсчета показателей $st(s_i)$, h_{ij} , ρ_{ij} и др. по выше приведенным формулам.

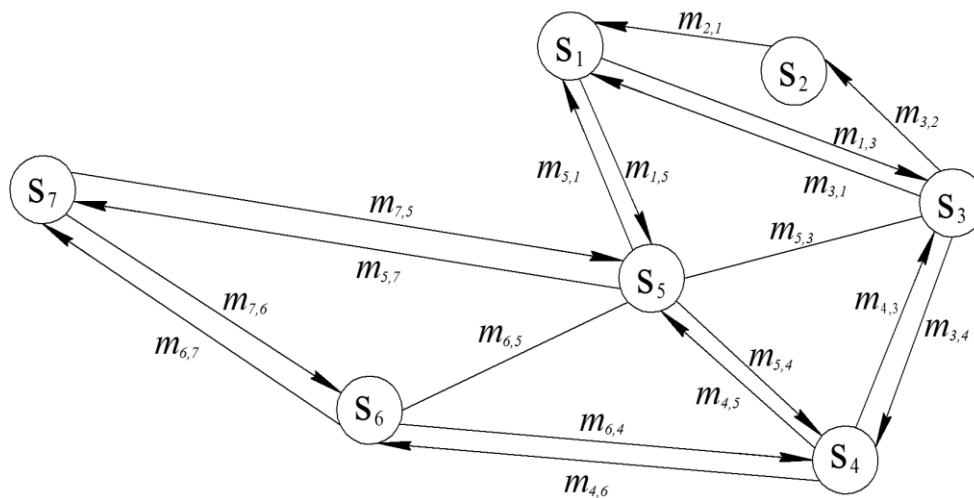


Рис. 3.3. Нагруженный граф $G_M(S)$ системы S

Отношения на связях в виде алгоритмов, порядка функционирования и др. образуют множество моделей $M = \{m_{ij}\}$ системы, с помощью которого можно построить модельный нагруженный граф $G_M(S) = \langle D, M \rangle$, рис. 3.3. Здесь принято, что на

маршрутах между станциями s_5, s_6 и s_5, s_3 имеет место равенства моделей, т.е. $m_{5,6} = m_{6,5}$ и $m_{5,3} = m_{3,5}$.

Графу $G_M(S)$ можно поставить во взаимно-однозначное соответствие матрицу инцидентности $[D \times M]$, в которой строки именуются вершинами множества D , а столбцы именуются моделями множества M . Элементы матрицы инцидентности w_{ij}

определяются правилом: $w_{ij} = \begin{cases} +1, & s_i \text{ начало дуги с весом } m_{ij}, \\ -1, & s_i \text{ конец дуги с весом } m_{ji}. \end{cases}$

На следующем этапе для каждого элемента матрицы M выписываются предметные переменные и логико-функциональные отношения, уравнения и пр., во взаимосвязи с другими элементами системы. После этого исследования системы проводятся на этих логических моделях аналитически или численными методами.

Матрица инцидентности изображенного на рис. 3.3 графа имеет вид:

	m_{13}	m_{15}	m_{21}	m_{31}	m_{32}	m_{34}	m_{35}	m_{43}	m_{45}	m_{46}	m_{51}	m_{53}	m_{54}	m_{56}	m_{57}	m_{64}	m_{65}	m_{67}	m_{75}	m_{76}
s_1	1	1	-1	-1							-1									
s_2			1		-1															
s_3	-1			1	1	1	1	-1				-1								
s_4						-1		1	1	1		-1			-1					
s_5		-1					-1		-1		1	1	1	1	1		-1		-1	
s_6										-1				-1		1	1	1		-1
s_7															-1			-1	1	1

Представленная методика моделирования для решения задач системного анализа основана на *декомпозиции* системы (расчленение на подсистемы). Непосредственный процесс моделирования для построения модели всей системы с использованием системного подхода практически не реален, поэтому применяется прием декомпозиции «от системы в целом – к ее составляющим».

В системном анализе для различных подсистем исследуемой системы, а также на различных стадиях моделирования, используются энергетические, биологические, информационные и другие природные аналоги. Рассмотрим один из аспектов моделирования – информационный.

3.1.3. Информация – системная категория передачи и обработки сообщений

Любой предмет живой и неживой природы «порождает» информацию. Искусственные системы – печать, телевидение и пр. передают информацию. Библиотеки, архивы – хранят информацию. Компьютеры перерабатывают информацию, телеметрические системы ИТС собирают, обрабатывают и передают информацию. Таким образом, информация существует везде, образуя Мировое информационное пространство.

Целые отрасли человеческой деятельности связаны со сбором, обработкой, хранением и передачей информации. Это различные информационные системы (пресса, радио, телевидение, Internet), автоматизированные системы обработки данных (АСУ, АСУТП, САПР и др.).

Системы обрабатывают как внутреннюю информацию об элементах, их состояниях, связях и пр., так и внешнюю – о правовых законах, безопасности поведения, экологии и др. При неполной внутренней или внешней информации система функционирует, как правило, неэффективно. При отсутствии внешней информации или внутренней информации управление и решение вопросов принятия решений для технологической системы невозможно, т.е. система перестает функционировать.

Отсутствие информации об исследуемых объектах системы затрудняет или делает невозможным проведение системного анализа. Методология анализа систем при неполной (ограниченной) информации рассматривается в специальных разделах системного анализа – теории исследования операций. Таким образом, понятие информации является важным для систем и их анализа.

Для решения задач системного анализа важно иметь формальное определение информации. Однако точно определить информацию невозможно, поскольку она первична. Человек имеет дело со многими первичными понятиями (энергия, информация, и др.), зная их свойства, значения и пр. Поэтому определим информацию описательно.

Информация – отражение материального Мира, обладающее следующими свойствами:

- 1) отражение не возникает ни на чем, оно проявляется при взаимодействии материальных объектов в виде образов, событий, действий и др.;

- 2) отображение нематериально;

- 3) с материальным Миром отображение связано сигналами, которые можно передавать, сохранять, перерабатывать;

- 4) со временем отражение может устаревать и исчезать.

Системный анализ использует не понятийное определение информации, а абстрактно-количественное статическое и динамическое представления. Абстрактное представление информации об объектах, заданное в удобном для обработки техническими устройствами виде, называют *данными*. Обычно данные в информационных системах представляются *кодами* (символами некоторого алфавита, например, если алфавит состоит из двух символов, коды называются *двоичными*).



Рис. 3.4. Схема обработки и передачи информации

Кодовые комбинации называют словами или цепочками. Последовательности слов-цепочек образуют сообщения. Следовательно, сообщение является носителем информации. В свою очередь, сообщение может быть наложено на физический (звуковой, электромагнитный, световой и пр.) сигнал, который передается по каналам связи. Схема обработки и передачи информации представлена на рис. 3.4.

Сообщения, представленные порциями по временным квантам, называют – *дискретными*, в противном случае непрерывными. В зависимости от передаваемых сообщений и их свойств сигналы моделируют временными рядами, интегралами или иным образом. Подробно с моделями сигналов, их свойствами и количественными показателями можно познакомиться в учебной литературе по теории информации.

Существует несколько подходов измерения количества информации в подпространствах информационного пространства.

1. Комбинаторный подход.
2. Вероятностный подход.
3. Алгоритмический подход.

Большинство исследователей технологических систем отдают предпочтение вероятностному подходу, и мы будем следовать ему.

Так как носителем информации является сообщение, то будем оценивать количество информации по носителю. Пусть сообщение X характеризуется количеством символов в сообщении, т.е. – длиной n .

Для оценки количества информации $I(X)$ в сообщении X , воспользуемся постулатом: «чем больше длина сообщения, тем большее количество информации» Поэтому имеем:

- 1)если $n=1$, то, очевидно, $I(X)=0$;
- 2)если $n \rightarrow \infty$, то $I(X) \rightarrow \infty$;
- 3)для любых сообщений X длины n и $n+1$, справедливо $I(X | n+1) > I(X | n)$;
- 4)всегда $I(X) \geq 0$.

Функция, удовлетворяющая условиям 1) – 4), является логарифмической и меру количества информации, введенную Хартли, задают моделью

$$I(X) = \log_a n. \quad (3.1)$$

В модели (3.1) основание логарифма a определяется размером кодирующего алфавита. Если $a=2$, то единицей измерения количества информации является *бит*, если $a=3$, то – *трит* и т.д. Для выравнивания размерности количества информации, иногда вводится в модель *масштабный множитель* C так, что $I(X) = c(\log_a n)$.

Заметим, что при решении логических задач об отказах в транспортных системах, поиска бракованных деталей и др. с использованием формулы (3.1), решающие алгоритмы также используют основание логарифма для организации схемы поиска решения.

Мера информации (3.1) предполагает, что элементы сообщения независимы, т.е. не связаны между собой, что противоречит структуре системы. Поэтому модель (3.1) требует уточнения.

Пусть элемент S_i системы S связан с k элементами $s_{j_1} \cdots s_{j_k}$ связями $\varsigma_{ij_1} \cdots \varsigma_{ij_k}$, которые неравноправны, т.е. зависимы. Учесть зависимость связей можно, приписав им значения вероятностей $p_{i1} \cdots p_{ik}$ таких, что $\sum_{r=1}^k p_{ir} = 1$. Таким образом связи системы S

характеризуются ансамблями $\left\{ \begin{matrix} \varsigma_{ij_1} \cdots \varsigma_{ij_k} \\ p_{i1} \cdots p_{ik} \end{matrix} \right., \quad i=1 \cdots n$. Предпочтение

перехода на связь можно задать различными способами, например по большему значению вероятности.

Системная категория – сообщение – может моделировать отношения на связях, поэтому ее представляют аналогичным ансамблем сообщений

$$\begin{cases} X = (x_1 \cdots x_n) \\ P = (p_1 \cdots p_n) \end{cases}, \quad \sum_{r=1}^n p_r = 1. \quad (3.2)$$

Здесь p_r вероятность появления символа (слова) в сообщении X , которая определяется экспериментально на некоторых выборках сообщений.

Уточнение количества информации в связанном сообщении X выполнено К.Э. Шенноном, что задается моделью:

$$I(X) = -c \sum_{r=1}^n p_r \log_a p_r. \quad (3.3)$$

Знак $(-)$ в формулу (3.3) введен для выполнения условия $I(X) \geq 0$.

Рассмотрим свойства меры Шеннона (3.3).

1. Количество информации конечного сообщения – конечно.

Это следует из того, что для достоверного события $p_r = 1$ и при значении $p_r = 0$, $p_r \log_a p_r = 0$.

2. При равновероятных событиях, модель (3.3) переходит в модель (3.1).

Так как для любого символа или слова вероятность одинакова

$p_r = 1/n$, то имеем

$$-\sum_{r=1}^n p_r \log_a p_r = -\sum_{r=1}^n 1/n \log_a 1/n = \log_a n.$$

$$3. I_{\max}(X) = \log_a n.$$

Из свойства 3 следует, что «бит» определяет количество информации равновероятных символов в двух символьном сообщении.

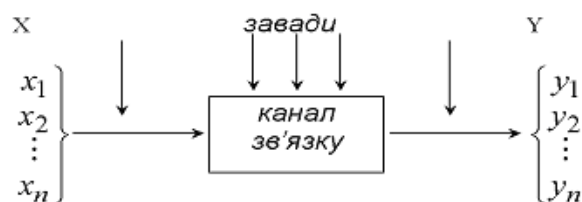


Рис. 3.5. Информационная схема сообщения и канала связи

Рассмотренные модели мер (3.1) и (3.3) количества информации являются по сути статическими и неприемлемы для оценок информации при ее передаче.

Рассмотрим фрагмент схемы, представленный на рис.3.5.

Информационная схема сообщения, изображенная на рис. 3.5, моделируется на входе в канал ансамблем (3.2) и на выходе из канала

ансамблем
$$\begin{cases} Y = (y_1 \cdots y_n) = \{y_j\} \\ P = (p'_1 \cdots p'_n) = \{p_j\}, \sum_{j=1}^n p_j = 1 \end{cases}$$

Отметим, что для входного ансамбля вероятности известны, а для выходного — неизвестны. Это объясняется тем, что канал связи подвержен шумам. Шумы искажают сигнал сообщения, проходящий через канал связи. Восприимчивость к шумам каналов связи зависит от физической природы каналов и от вида сигналов. Каналы связи могут иметь воздушную, водную, электрическую, электромагнитную и пр. природу. Сигналы по видам бывают: электромагнитные, световые и др. Устойчивыми к различным шумам являются *солитоны* (уединенные физические волны).

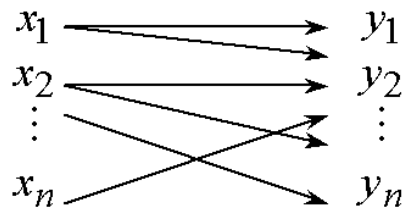


Рис.3.6. Модель канала связей при наличии помех

На рис. 3.6 представлена графовая модель канала под действием шумов. Помехи в канале приводят к тому, что сигнал от источника может раздваиваться, перенаправляться и пр.

Сигналы (на рис. 3.6 указаны стрелками) в модели канала задаются матрицей условных вероятностей $P(X/Y)$, для которой сумма по столбцам $\sum_r p(x_r/y_j)=1$. Если канал связи изотропный (направление не существенно), то $p(x_r/y_j)=p(y_j/x_r)$; если – анизотропный, тогда $p(x_r/y_j) \neq p(y_j/x_r)$. Например, для матрицы условных вероятностей

$$P(X/Y) = \begin{pmatrix} 0.1 & 0 & 0.5 \\ 0.2 & 1 & 0 \\ 0.4 & 0 & 0.2 \\ 0.3 & 0 & 0.3 \end{pmatrix},$$

модель канала связи изображена на рис. 3.7.

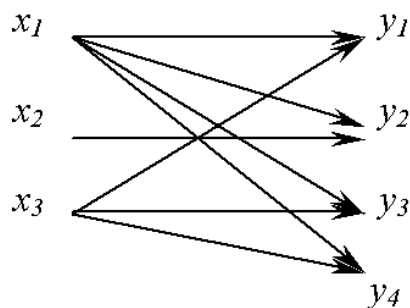


Рис. 3.7. Канал связи с расширением

Теперь для изотропного канала количество информации, переданное сообщением X и принятое сообщением Y , определяется выражением:

$$I(X, Y) = \sum_{r,j} p_{rj} \log_a \frac{p_{rj}}{p_r p_j}, \quad (3.4)$$

где p_{rj} – сложная вероятность, определяемая по формуле Байеса $p_{rj} = p_r p(y_j / x_r)$.

Вопросы измерения информации важны для систем ИТС, в частности и для телеметрических подсистем. Введем еще два важных показателя, с помощью которых оценивается качество информационных систем.

Скорость передачи данных в информационных каналах $\bar{I}(X, Y) = I(X, Y) / \tau_{cp}$. Где τ_{cp} – среднее время пропуска символа сообщения каналом связи. Единица измерения скорости передачи данных *бит/сек* или ее доли.

Пропускная способность канала связи C обычно определяется экспериментально по формуле $C = \max_{p_r} \{ \bar{I}(X, Y) \}$.

На данном этапе технического развития информационных каналов связи для передачи сообщений используются электромагнитные и световые сигналы. Такие каналы обладают большой пропускной способностью. Однако, каналы, предназначенные для передачи электромагнитных сигналов на большие расстояния, подвержены значительным помехам. Существенно более защищенными от помех являются оптоволоконные каналы, предназначенные для передачи световых сигналов.

На железных дорогах многих стран вводятся в эксплуатацию оптоволоконные сети, обеспечивающие надежную передачу информации и образующие СПД (сеть передачи данных). СПД являются фрагментами объединенной информационной подсистемы ИТС-ЖТ государства. Так сети СПД в системе ИТС-ЖТ Украины функционируют ежедневно и непрерывно. Они предназначены для организации:

- обмена информацией между подразделениями ЖТСУ, независимо от места расположения и организационного подчинения;

- обмена данными в автоматизированных системах АСУ ГП УЗ и АСУ ПП УЗ, систем управления предприятиями, систем корпоративного электронного документооборота, доступа к ресурсам Интернет-сети;

- оперативной связи администраторов с автоматизированными подсистемами;

- информационного обмена между внутренними и внешними по отношению к ЖТС системами;

- передачи сообщений голосовыми сигналами;

- организации дополнительных сервисов (видеоконференций, видео наблюдений и др.).

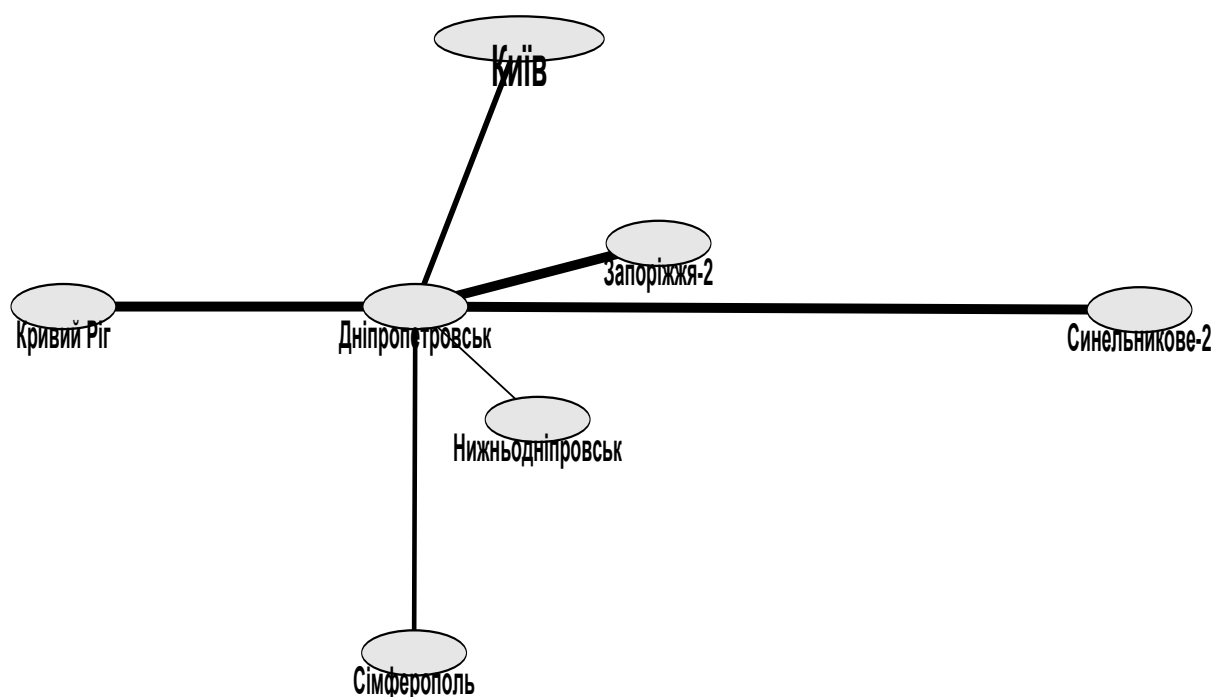


Рис. 3.8. Обобщенная схема СПД системы АСУ ГП УЗ на Приднепровской железной дороге

На рис. 3.8 и 3.9 схематично представлены фрагменты информационных СПД подсистем для организации АСУ грузовых (ГП) и пассажирских перевозок (ПП).

Толщина линий на рис. 3.8 соответствует интенсивностям информационных потоков между узловыми станциями при организации грузовых перевозок системой АСУ ГП в каналах сети

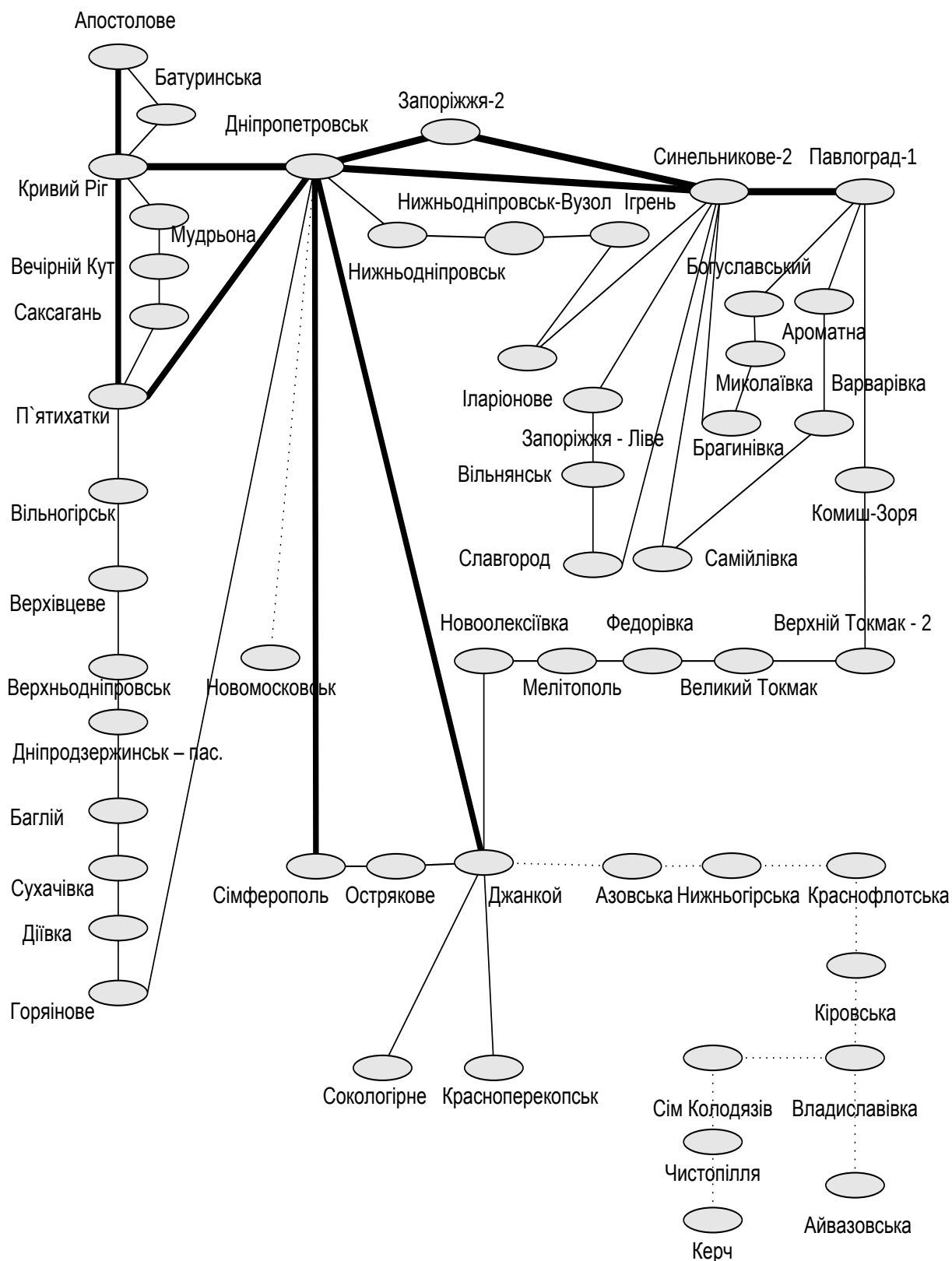


Рис.3.9 Схема сети СПД системы АСУ ПП УЗ на Приднепровской железной дороге по работе

СПД. На рис. 3.9, так же как и на рис. 3.8, толщина линий соответствует интенсивностям информационных потоков между станциями.

Приведенные схемы потоков отражают не только информационные интенсивности, но и интенсивности грузовых и пассажирских перевозок, которыми необходимо управлять. Сети СПД, системы АСУ являются составными подсистемами ИСЖТ, но сама ИС требует разработки в направлении совершенного управления и принятия решений на фундаментальной основе системных исследований, методах исследования операций и др.

3.1.4. Исследование операций и слабоструктурированные проблемы принятия решений

Исследование операций занимает особенное место среди составляющих системного анализа. Причиной тому являются важные вопросы исследования действий и состояний систем при их функционировании, поиск в определенном смысле лучших форм поведения подсистем, вопросы принятия оптимальных решений о состояниях систем и др. Действия и состояния системы зависят от цели ее поведения. Разрешение этих вопросов проводится в разделах исследования операций.

3.1.4.1. Агрегат как системный объект исследования операций

Приемы декомпозиции являются не единственными при анализе систем. Среди множества других приемов исследований особо следует выделить агрегативный (композиционный) подход.

Агрегат – композиция элементов системы, которая представляется абстрактным объектом в виде черного ящика с множеством входов X и выходов Y . Агрегат A , как объект системы S в результате ее функционирования, изменяет, свои состояния

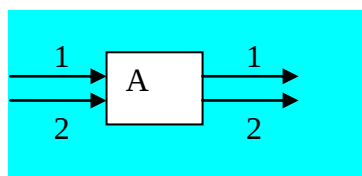


Рис.3.10. Представление агрегата

$Z = \{z_i\}$ в зависимости от времени t . Поэтому он характеризуется оператором изменения состояний $H(X, Z(t)) = Z(t+1)$ и оператором выходов $G(X, Z) = Y$.

В транспортной системе агрегатом может быть любой объект, который сложно исследовать или сложно представить, или по иной причине. Например, это может быть станция, депо и пр. (рис. 3.10).

Множество связанных входами и выходами агрегатов системы образуют ее *агрегативную модель*. Заметим, что в агрегативной модели внешняя среда E по отношению к системе S также представляется агрегатом A_0 .

Пусть в роли агрегатов транспортной системы выступают железные дороги Украины и Укрзализныця:

- A_1 – Львовская дорога, A_5 – Южная дорога,
- A_2 – Одесская дорога, A_6 – Юго-Западная дорога,
- A_3 – Донецкая дорога, A_7 – Укрзализныця,
- A_4 – Приднепровская дорога, A_0 – внешняя среда.

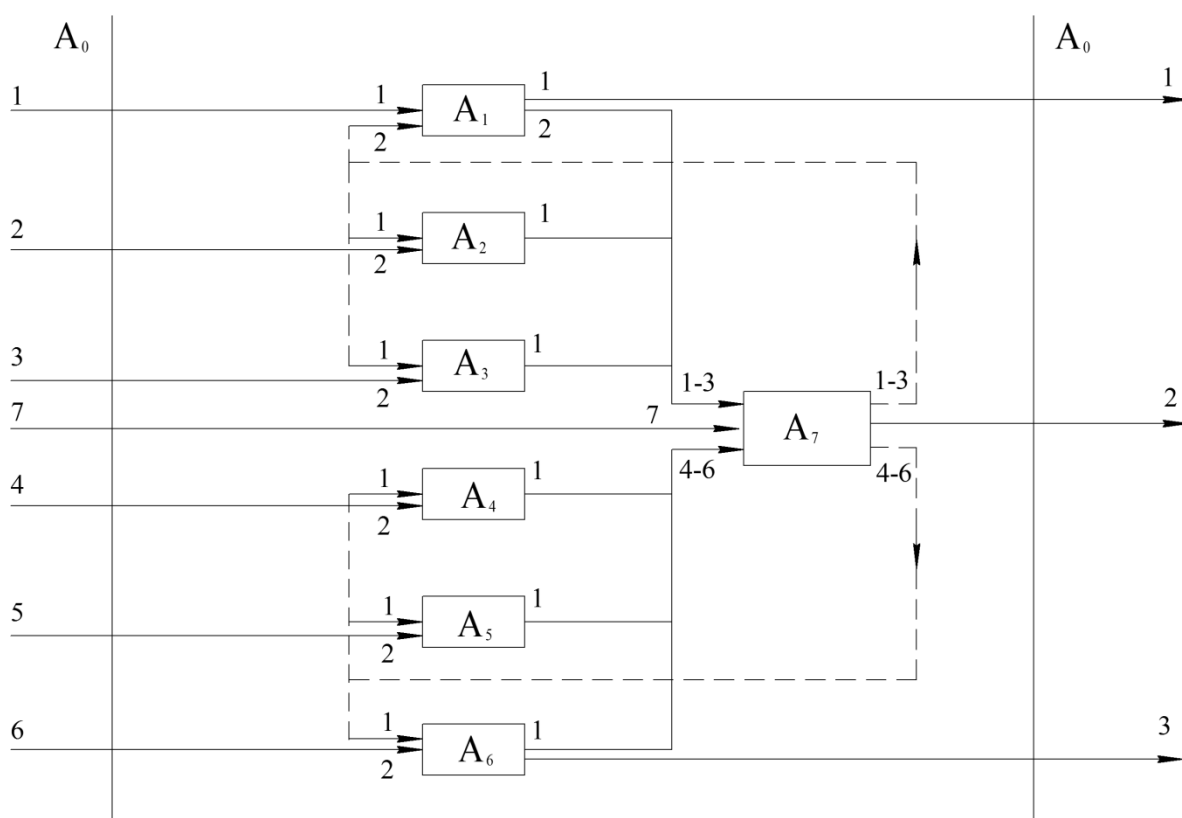


Рис. 3.11. Фрагмент агрегативной модели железных дорог Украины

Элементами множеств состояний $Z_i, i = 1, \dots, 6$ агрегатов $A_1, \dots, A_6$ выступают: грузооборот, пассажиропоток, прибыль, энергозатраты, аварийность и другие выходные показатели дорог. Очевидно, на выходные данные $Y_i = G_i(X, Z)$ влияют внутренние состояния дорог такие, как рентабельность, эффективность эксплуатации подвижного состава, организация управления, исполнительная дисциплина, профессионализм работников и пр. Для соответствующих агрегатов операторы порождения состояний железных дорог H_i и выхода G_i , определяются руководством дорог и административными службами Укрзализныци, например, алгоритмически.

Агрегат A_0 , моделирующий внешнюю среду, оказывает влияние на состояние модели через свои выходы: государственную политику, законодательство, инвестиционный климат и пр.

Фрагмент упрощенного графового представления агрегативной модели железных дорог Украины изображен на рис. 3.11.

Агрегативную модель также можно представить *матрицей сопряжения агрегатов*, которая удобна для обработки и анализа связей модели на ЭВМ.

На рис. 3.12 изображена матрица сопряжения для агрегативной модели, представленной на рис. 3.11. Пары в клетках матрицы изображают номера выходов из агрегата в ее строках и номера входов в соответствующие агрегаты по столбцам матрицы.

	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
A_0		(1,1)	(2,2)	(3,2)	(4,2)	(5,2)	(6,2)	(7,7)
A_1	(1,1)							(2,1)
A_2								(1,2)
A_3								(1,3)
A_4								(1,4)
A_5								(1,5)
A_6	(2,3)							(1,6)
A_7	(7,2)	(1,2)	(2,1)	(3,1)	(4,1)	(5,1)	(6,1)	

Рис. 3.12. Матрица сопряжения агрегативной модели, изображенной на рис. 3.11

Рассмотренная модель системы позволяет проводить анализ системы на агрегативном уровне (анализ входов, выходов, связей, состояний, операторов H_i и G_i , др.) и не рассматривать сложные внутренние составляющие введенных агрегатов.

3.1.4.2. Метод исследования операций

Так как каждый агрегат модели реагирует на определённое внешнее воздействие из множества X и порождает результат из множества Y , то агрегаты можно использовать для моделирования и организации в системах ИТС следующей последовательности *управляющих действий* (операций):

- *отражения внешней среды* – задание значений элементов множества X в результате проведения испытаний, экспериментов, расчетов и иного;
- *рецепции* – восприятие внешней среды агрегатом, построение моделей m_i для восприятия значений элементов x_i множества X ;
- *селекции* – отбор элементов x_i по заданным критериям, построение моделей отбора mo_j ;
- *рефлексии* – формирования ответа (отклика) системным агрегатом, построение функций (отображений) откликов;
- *принятия решения* – выбор лучшего отклика из альтернативных, построение критериев отбора;
- *организации действий* – реализация принятого решения или решений, построение алгоритма действий;
- *формирование выходных данных* – определение множества значений результатов Y .

Если результаты множества Y удовлетворяют выдвинутым критериям ($Y \sim Y^*$, рис. 3.13) к агрегативной подсистеме системы S , то процесс управляющих действий завершается, в противном случае – продолжается.

Системный анализ рассмотренных показателей процесса организации управляющих действий проводится с помощью его математических инструментов – методов исследования операций, теории игр, логики принятия решений, оптимального управления и др. Особое место в анализе поведения ИТС-ЖТ систем уделяется показателю принятия решения, который реализуется в указанных

методах. Понятно, что интеллектуальные системы, как правило, предлагают альтернативные решения и выбор окончательного варианта остается за человеком.

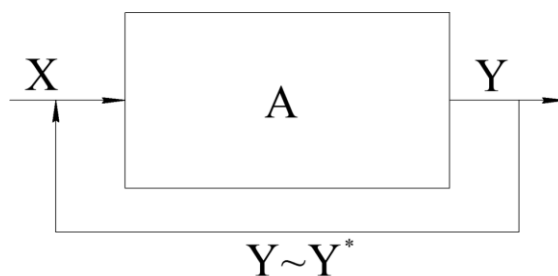


Рис. 3.13. Схема процесса управляющих действий

Вопросами организации рациональных действий в технологических системах, а также их эффективного поведения, занимается наука исследования операций (ИО) и ее составляющие теория игр и логистика. Термин «операция» в ИО понимается обобщенно, как действие или комплекс действий, отличается от понятия «операции» в алгебре. Примерами операций в ЖТС системах являются:

- формирование пассажирского или грузового подвижного состава;
- формирование маршрута следования поезда;
- организация ремонта локомотива;
- организация работы диспетчерской службы;
- организация рациональных перевозок;
- инвестирование реформирования железной дороги и др.

Организация управляющих действий, также как проведение анализа системы, требует определения *цели процесса*. Обычно цель процесса управления действиями представляется *функцией цели*, которую принято называть *целевой функцией*. Модель целевой функции задается аналитически в виде математического выражения или алгоритмическим способом, если аналитическое представление невозможно.

Целевые функции, используемые в технологических системах, всегда предметные, т.е. имеют смысл предметных категорий количества – цены, веса, скорости, времени и др.

С помощью целевой функции оценивается «лучший» *управленческий эффект*. Например, если функция цели F

моделирует процесс финансовых (в денежном представлении) затрат пассажирских перевозок, то правомерна постановка вопроса о минимальных затратах таких перевозок, т.е. поиск условий, при которых функция цели $F \rightarrow \min$. При определенных предметных условиях от функции цели можно требовать выполнения $F \rightarrow \max$.

Иногда в задачах анализа систем при оценке управленческого эффекта возникают противоречия связанные с тем, что функция цели системы по одним предметным показателям должна стремиться к $\min$, а по другим – к $\max$. С помощью линейных преобразований всегда можно представить требования к целевым функциям только в форме максимизации, или же только минимизации. Эти преобразования и выполняются при решении практических задач ИО.

Транспортные системы являются многокритериальными, значит и компромиссными, поскольку их предназначение – перевозка грузов и пассажиров – связано с рациональными перевозками, минимальными затратами и максимальными возможными прибылями.

Проблема многокритериальности во многих случаях решается путем формирования множеств компромиссно-оптимальных решений, из которых на основе дополнительной информации о предпочтениях или же ограничениях выполняется окончательный выбор решений. Принятию компромиссных решений помогает введение ограничивающих условий (операций), которыми дополняется целевая функция. В роли таких условий может выступать предметная область, абстракция и пр. Примерами условий служат:

- ограничения на количество единиц подвижного состава для цели
- достижения максимальной прибыли от перевозки грузов;
- ресурсные ограничения для цели – минимальных затрат;
- эксплуатационные, экологические, экономические ограничения для цели – получения максимальных грузоперевозок.

В технологических системах исследования операций совокупность функции или функций цели и ограничивающих условий называют задачей выбора решений (задачей), которую можно назвать операцией решений.

Таким образом, для построения задачи решений системного анализа необходимо сформулировать или задать функцию цели исследований и ограничительные условия. Формализация этого процесса может быть проведена следующим путем.

Пусть для заданной предметной области удалось построить функцию цели $F(X, B, Z)$ и ограничивающие условия $\Phi(X, D, Z)$, тогда имеет место следующая формализация задачи поиска решений Z .

Задача 1: необходимо найти такое множество значений Z , которое доставляет экстремум ($\max$ или $\min$) функции F и удовлетворяет условиям Φ или формально.

$$\begin{cases} \underset{Z}{\text{ext}} F(X, B, Z), \\ \Phi(X, D, Z), \\ Z - ? \end{cases} \quad (3.5)$$

где B и D – множества параметров функций F и Φ .

Задача (3.5) может иметь аналитическое представление, в виде математических выражений, алгоритмическое или иное представление.

Поиск решения задачи (3.5) выполняется численно по разработанным алгоритмам. Имеется много прикладных пакетов, позволяющих найти приближенное решение для разнообразных видов системы (3.5), представленных аналитически, это ПП *Excel*, *Maple*, *MatLab* и др.

3.1.4.3. Задачи математического программирования в исследовании операций

Математическое программирование это совокупность теории и методов решения задач о нахождении экстремальных значений функций при заданных ограничениях, т.е. в определенном смысле задача математического программирования является частной формой модели задачи (3.5). Математическое программирование есть один из разделов науки исследования операций. Термин «программирование» в этом математическом разделе возник по причине практической невозможности получить количественное решение задач без использования ЭВМ.

Для задач математического программирования по виду функций F и Φ выделяют линейные и нелинейные классы задач; по виду предметной области – транспортные, технологико-экономические и пр.

Рассмотрим линейную постановку транспортной задачи математического программирования.

Предметная область задачи. В промышленном регионе имеется m предприятий $P_1, P_2, \dots, P_m$, которые могут изготавливать продукцию в количествах, не превышающих значений $a_1, a_2, \dots, a_m$, соответственно. В других регионах имеются предприятия-потребители $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ продукции предприятий $P_1, P_2, \dots, P_m$ в количествах не менее значений $d_1, d_2, \dots, d_n$. В промышленном регионе расположена железная дорога, которая осуществляет доставки грузов потребителям. Железные дороги устанавливают тарифы затрат b_{ij} (ден. ед. за ед. груза) доставки грузов от производителя P_i до потребителя Q_j .

Постановка задачи. Требуется составить план перевозок, для которого железнодорожные транспортные затраты были бы минимальными и удовлетворяли потребителей и производителей по показателям потребления и производства продукции.

Формальное представление задачи (модель задачи). Обозначим через z_{ij} количество единиц груза перевезенного от предприятия-производителя P_i к предприятию-потребителю Q_j . Очевидно, что количество перевозимого груза не может быть отрицательным, т.е. $z_{ij} \geq 0$. Кроме того между количеством изготовленной и потребляемой продукции могут быть зависимости:

$$1) \sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n d_j, \quad 2) \sum_{i=1}^m a_i > \sum_{j=1}^n d_j \quad \text{или} \quad 3) \sum_{i=1}^m a_i < \sum_{j=1}^n d_j.$$

Модель системы (2.8) для рассматриваемой задачи имеет вид (3.6).

В (3.6) двойная сумма $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij} z_{ij}$ определяет финансовые затраты перевозок, а суммы $\sum_{j=1}^n z_{ij}$ и $\sum_{i=1}^m z_{ij}$ задают количество груза отгруженного i -м производителем и количество груза полученного j -м потребителем соответственно.

Решение задачи (3.6) при зависимостях между производителями и потребителями 1) и 2) является корректным в том отношении, что заявки потребителей на продукцию будут удовлетворены полностью, а при зависимости 3) удовлетворяются частично.

$$\left\{ \begin{array}{l} F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij} z_{ij} \rightarrow \min \\ \Phi : \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n z_{ij} \leq a_i, \\ \sum_{i=1}^m z_{ij} \geq d_j, \\ z_{ij} \geq 0. \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (3.6)$$

Существует множество других классов задач математического программирования – это нелинейное программирование, выпуклое программирование, целочисленное программирование, однокритериальные и многокритериальные задачи и др.

3.1.4.4. Игры в исследовании операций

Многокритериальность транспортных систем, связанная с противоположностью интересов достижения технологических, экономических и др. целей, естественным образом вписывается в раздел теории игр – раздела исследования операций [20].

Прикладная *теория игр* занимается практическими вопросами принятия решений при возникновении конфликтов производственного, технологического, экологического и других типов. Суть игры состоит в построении последовательности связанных действий (оптимальных решений) между компонентами игры (*игроками*).

Прикладная игра в теории систем связана с *конфликтом* – явлением, по отношению к которому возникают некоторые *исходы* между участниками игры. Каждый игрок имеет свой *исход интересов* и *стратегию действий* (поведения). Игра с позиций одного игрока обычно называется операцией.

Конфликты, исходы, исходы интересов, игроки и стратегии действий игроков определяются (задаются) соответствующими множествами $K, I, I_i \subseteq I, N, St$. Тогда игра определяется структурой.

$$C_I = \langle K, I, I_i \subseteq I, N, St \rangle. \quad (3.7)$$

Виды конфликтов множества K , стратегий из множества St и исходы интересов – I_i , определяют классы игровых задач, а

элементы-игроки множества N , как правило, оказывают влияние на методику поиска решения. Таким образом, до «начала конкретной игры» необходимо задаться в модели (3.7) конфликтом, стратегией (стратегиями, если в игре они меняются) игры, интересами игроков, возможными исходами, количеством игроков. Для корректного проведения игры необходимо определиться с критериями оценки «ходов-действий» игроками $x_i \in N$. Оценка игровых ходов в теории игр осуществляется с помощью критериев эффективности.

Под *критерием эффективности* понимается количественная оценка исхода хода по отношению к исходу интересу. Критерии эффективности определяются для всех участников игры. Существуют различные способы задания критериев. Например, можно использовать методы экспертных оценок с одним или несколькими экспертами или воспользоваться иными подходами. Для одной и той же предметной структуры (3.7) критерии могут быть разными, возможно поставить задачу о лучшей игре по отношению к критериям эффективности.

Пусть имеется n игроков, каждый из которых x_i имеет возможность выбора значения из множества X_i , тогда его критерий эффективности представим выражением $w_i(x_1, x_2, \dots, x_n, B)$, $i = \overline{1, n}$; здесь B – множество параметров критерия. Так как для каждого игрока исходы интересов не должны уменьшаться, то предполагается, что значение критериев w_i не убывают по x_i .

Рассмотрим некоторые примеры форм связей критериев эффективности $w_i \in W$ с множеством интересов It .

1. Если интересы игроков совпадают, то некоторый определяющий критерий эффективности w одинаков для всех игроков. И критерии $w_i \in W$ для игроков можно определить возрастающими функциями f_i так, что $w_i = f_i(w)$.

2. Если для двух игроков интересы противоположны, то форма связи может быть записана так $w_2 = f(-w_1)$, здесь функция f возрастающая.

3. При временной степени антагонизма интересов $c(t)$ между двумя игроками форма связи может быть следующей $w_2 = (c(t) - w_1)$ или более сложной $w_2 = c(t) - f(w_1)$.

Комбинируя формы критериев 1 – 3 для произвольного случая с n игроками, можно получить оценочные критерии эффективности игроков с учетом их интересов.

Пусть определена цель игры, количество игроков, критерии эффективности исходов игры для игроков и стратегия игры. Тогда параметрическая игровая задача (3.8), в которой B_i и D_i множества параметров, производится участниками игры по заданной стратегии игры

$$\left\{ \begin{array}{l} F \rightarrow \text{ext}, \\ W : X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n \rightarrow \max_{x_i} w_i(x_1, x_2, \dots, x_n, B_i), \\ St : X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n \rightarrow P_i(x_1, x_2, \dots, x_n, D_i), \\ x_i \in X_i \ \& \ x_i \in P_i(x_1, x_2, \dots, x_n, D_i), \end{array} \right. \quad (3.8)$$

Стратегия $P_i(x_1, x_2, \dots, x_n, D_i) \in St$ предусматривает для каждого игрока условия начала и окончания игры, условия принятия решения следующего хода. Процесс игры предусматривает процедуру последовательного участия игроков по установленной стратегии, расчетов оценок цели задачи, а также соответствующего критерия эффективности. Результатом игры (3.8) является последовательность операций (принимаемых оптимальных решений), соответствующих заданной цели. Практическое применение элементов теории игр к системам ИТС рассматривается в следующем разделе.

3.1.4.5. Метод логистики в системном анализе

Логистический метод анализа иерархических подсистем предложен Т. Саати. Он основан на экспертных оценках парных сравнений элементов системы. Этот метод исследований может применяться к решению многих задач: рациональная доставка товара от производителя к потребителю, организация рационального ремонта локомотивов, организация рационального графика движения поездов на перегонах и пр. Технологический процесс называют *рациональным*, если его операции удовлетворяют некоторым установленным условиям.

Применение логистического метода предусматривает:

- 1) определение цели исследований;
- 2) выделение в системе подсистемы, соответствующей цели;

- 3) определения критериев эффективности для сравнения элементов подсистемы;
- 4) пошаговое выполнение процесса принятия решений по операциям на основе оценок критериев эффективности;
- 5) построение последовательности рациональных операций или последовательности решений.

Представленная схема принятия решений может быть реализована людьми (экспертами) или с помощью вычислительных систем. Если исследуемая система сложная, то возникает проблема реализации схемы уже на втором этапе. Суть проблемы состоит в том, что методология выделения подсистем из заданной системы несовершенна. Несовершенство проявляется в том, что подсистема, как правило, наследует свойство сложности родителя. При анализе сложность системы противоречит требованию оперативности принятия решения.

Известно, что объемный показатель сложности системы (2.2) определяется количеством ее элементов и количеством связей, причем отношения связей представляют структурным графом. Логистический анализ проводится на выделенной части структурного графа сложной системы.

Сложность системы стараются искусственно снизить, используя интуитивные приемы фильтрации элементов по правилу «важно или неважно для поведения, состояния и пр.». Размытость этого правила не гарантирует корректность принимаемого решения, причем эта некорректность часто проявляется в процессе логистического анализа, что приводит к откатам на второй этап схемы принятия решений.

Фильтрацию можно проводить, используя также разнообразные приемы формализации. Рассмотрим технологию формализованной фильтрации системы на примере множественного атрибута.

Транспортные системы – сложные, часто они описываются моделями на основе классической теории множеств. Однако, такие элементы ЖТС как станции, депо следует представлять упорядоченными по определенному критерию (подчинения, места расположения и др.) элементами списков, поезда – представлять как мультимножества вагонов и др. Таким образом, в моделях реальных ЖТС систем возникают разнообразные гибридные конструкции множественных объектов, математический аппарат исследования

которых требует дальнейшего развития. Рассмотрим более подробно вопрос моделирования (фильтрации) сложных систем на основе множественных объектов.

Множественные объекты конструируются на основе базисных объектов с атрибутами: $\{\cdot\}$ – множество, $[\cdot]$ – упорядоченное множество, $\llbracket \cdot \rrbracket$ – неоднородное множество, $\langle \cdot \rangle$ – мультимножество. Здесь символ « $\cdot$ » предполагает наличие *содержания* $S = (s_1, s_2, \dots, s_r)$ *объекта*.

Во *множестве* $_{\{\}} S \sim \{s_1, s_2, \dots, s_r\}$ с атрибутом $\{\cdot\}$ элементы свободные, т.е. располагаются в любом порядке. В упорядоченном множестве (*списке*) $_{[\cdot]} S \sim [s_1, s_2, \dots, s_r]$ – элементы упорядочены, менять местами их нельзя. Множество (*кортеж*) $_{\llbracket \cdot \rrbracket} S \sim \llbracket s_1, s_2, \dots, s_r \rrbracket$ неоднородное, природа его содержания различна. *Мультимножество* $_{\langle \cdot \rangle} S \sim \langle s_1, s_2, \dots, s_r \rangle$ – его элементы повторяются с некоторой кратностью.

Объект, представленный любым базисным объектом, назовем *множественным объектом нулевого уровня* O_j^0 .

Конкретное содержание S базисного объекта задается перечислением его элементов $s_j \in S$ или иным способом.

Если объект имеет пустое содержание (*пустой объект*, O - *пустой символ*), то он представляется в виде $(o, o, \dots, o)$ или (o) , где под круглыми скобками подразумеваются любые из скобок атрибутов.

Конструктивно с помощью операции суперпозиции ψ можно задать более сложные объекты разных уровней сложности. Например, нулевой уровень сложности определяют базисные объекты, первый уровень сложности: множества множеств, списки списков и так далее, второй уровень – списочные множества списков и пр.

Объект O_i^k k -го уровня сложности порождается рекурсивно:

- 1) O_j^0 – начало рекурсии;
- 2) $O_i^1 = \psi(O_j^0)$ – множественный объект первого уровня;
- 3) $O_i^2 = \psi(O_{j_0}^0, O_{j_1}^1)$ – множественный объект второго уровня;
- $\vdots$
- $k+1$) $O_i^k = \psi(O_{j_0}^0, O_{j_1}^1, \dots, O_{j_{k-1}}^{k-1})$.

Рекурсия выполняется над объектами с пустым содержанием и объекту на последнем уровне приписывается необходимое содержание.

Любой множественный объект O_i^k имеет определенную *структуру* $C(O_i^k)$ и *содержание* $D(O_i^k)$. Отметим некоторые особенности структуры объекта:

- структура определяет строение объекта;
- структура порожденного объекта отражает иерархическую подчиненность дочерних объектов родительскому множественному объекту;
- структура сложного объекта гибридная, она включает в себя структуры подчиненных объектов разных типов и упорядочена по этим типам;
- структура $C(O_i^k)$ объекта O_i^k задается *структурным деревом* или *структурной формой*, или иным способом и составлена из элементарных форм (атрибутов) $\{\cdot\}$, $\square$, $\square\square$ и $\langle \rangle$.

Так структура объекта O_i^4 , представленная структурной формой, может иметь вид

$$C(O_i^4) = \langle \square\square\cdot\square, \{\cdot\}, \{\cdot\}, \square\cdot\square, \{\langle \{\cdot\}, \{\cdot\} \rangle, \langle [\cdot], [\cdot], \{\cdot\} \rangle \rangle, \{ \{\cdot\}, \{\cdot\} \}, \square\cdot\square, \square\cdot\square \rangle. \quad (3.9)$$

В структуре (3.9) внешние скобки $\langle \rangle$ (*основная форма*) соответствуют родительскому объекту O_i^4 , а формы первого уровня ($\square, \{\cdot\}, \{\cdot\}, \square\cdot\square, \square\square$) также как и других старших уровней – дочерние. Отметим, что местоположение любой элементарной формы в структурной форме, в общем случае, определяется уровнем, местом на нем и положением в месте уровня. Например, для первого уровня и первого места на нем $\square$ имеем первую или четвертую форму $\square\square$.

В структурном дереве вершинами являются скобки объектов, а дуги отражают подчиненность объектов по уровням. Вершине дерева (основной форме) соответствуют скобки родительского объекта нулевого уровня, а его листьям – вершины, не имеющие подчинения. Для рассмотренного примера (3.9) листья – базисные объекты с точками.

Содержание сложного множественного объекта определяется содержанием базисных объектов (S_j). Содержание D объекта

O_i^k определим последовательностью объектов (S_j) , читаемых в структуре $C(O_i^k)$ слева на право. Например, для объекта O_i^4 со структурой (3.9) его содержание задается выражением $D(O_i^4) = (\llbracket S_1 \rrbracket, \{S_2\}, \dots, \llbracket S_{13} \rrbracket)$ или $D(O_i^4) = (S_1; S_2; \dots; S_{13})$. В первом случае явно указаны типы содержания, во втором случае тип содержания определяется по структуре объекта.

Из рассмотренного можно утверждать, что:

- по заданной структуре $C(O_i^k)$ и содержанию $D(O_i^k)$ однозначно восстанавливается множественный объект O_i^k ,
- любой множественный объект O_i^k задается упорядоченной парой $O_i^k = (C, D)$,
- объект без содержания $O_i^k = (C, (o))$ – *пустой* и его структура представляется *схемой*,
- объект, имеющий одно содержание и структуру нулевого уровня – *базисный*.

Для дальнейших исследований строения множественных объектов необходимо установить, что означает принадлежность элемента неоднородному содержанию объекта. Отношение $s \in D(O_i^k)$ предполагает наличие места, в последовательности содержаний базисных объектов, которым принадлежит элемент, т.е. $s \in D(O_i^k) \triangleq s \in (S) \subset D(O_i^k)$. Тогда содержание D_1 есть *подсодержанием* содержания D объекта O_i^k $D_1 \subset D(O_i^k)$, если $\forall s \in (S) \subset D_1$ имеет место $s \in (S) \subset D(O_i^k)$.

Структура объекта $C(O_i^k)$ представляет самостоятельный интерес исследования.

Путем подчинения j -го объекта r -му объекту в структуре $C(O_i^k)$ назовем последовательность связанных подчинением дочерних объектов к объекту O_r^m , т.е. $h_{rj} = (O_r^m, O_{r_1}^{m+1}, \dots, O_j^{m+s})$. Объект O_r^m называется *префиксом*, а объект O_j^{m+s} – *суффиксом пути*.

Пути подчинения множественной структуры объекта покрывают всю структуру, обозначим их мультимножество символом – H .

Длина пути подчинения $|h_{ij}|$ определяется как количество связей подчинений между составляющими пути h_{ij} . Путь подчинения h_{jj} , длина которого равна нулю, есть *вырожденный*. Путь с длиной один, называется *элементарным путем*.

Пути подчинения базисных объектов O_j^0 вырождены, а объектов O_j^1 – элементарные.

Структура объекта пустая $C=(o) \in H$, если длина любого ее пути $|h_{ij}|=0$. Очевидно, что любой путь $h \in H$ составлен из вырожденных или элементарных путей.

Всякий путь мультимножества H может оканчиваться или не оканчиваться базисным объектом $(\cdot)$. В первом случае путь назовем *порождающим* некоторый множественный объект, во втором – не порождающим. Порождающий путь в мультимножестве $H(O_i^k)$ назовём *полным* $\bar{h}$, если его префикс является объектом нулевого уровня структуры $C(O_i^k)$.

Два пути $h_1, h_2 \in H$ одинаковы ($h_1 = h_2$), если у них совпадают последовательности объектов связанных отношением подчинения. Одинаковые пути присутствуют в мультимножестве H с определенной кратностью.

Для любого невырожденного пути $h_{mj} \in H$ и элементарного пути $h_{r,r+1}$, имеет место $h_{r,r+1} < h_{mj}$ или $h_{r,r+1} \nless h_{mj}$. Путь h_1 является *подпутем* пути h , т.е. $h_1 \subset h$, если $\forall h_{r,r+1} < h_1$ и справедливо $h_{r,r+1} < h$.

Любой путь мультимножества H можно дополнить до полного пути, следовательно, исследование множественной структуры можно проводить с помощью ее путей. В частности, для элемента S содержания $(S_j) \subset D(O_i^k)$, справедливо $x \in O_i^k$, если в системе образующих структуры $C(O_i^k)$ найдется, хотя бы один полный путь с содержанием (S_j) суффикса, т.е.

$$\forall x \in O_i^k, x = (\bar{h}, s), \bar{h} < C(O_i^k), s \in (S) \subset D(O_i^k).$$

Также через путь подчинения можно определить подструктуру структуры $C(O_i^k)$, а затем подобъект объекта O_i^k .

Структура C_r является *подструктурой* множественной структуры $C(O_i^k)$, $C_r \subset C(O_i^k)$, если $\forall h_r < C_r$ справедливо $h_r < C(O_i^k)$.

Среди множества подструктур структуры $C(O_i^k)$ есть как порождающие пути, так и схемы подчинения. Подструктура $C_r \subset C(O_i^k)$ называется порождающей, если в ней найдется, хотя бы один порождающий путь подчинения.

Подструктуры $C_1, C_2 \subset C(O_i^k)$ одинаковы $C_1 = C_2$, если $\forall h(C_1), \exists h(C_2), h(C_1) \prec h(C_2)$ и наоборот $\forall h(C_2), \exists h(C_1), h(C_2) \prec h(C_1)$.

Объект $O_1 = (C_1, D_1)$, назовем *подобъектом* $O_1 \subset O_i^k$ множественного объекта $O_i^k = (C, D)$, если $C_1 \subset C$ и $D_1 \subset D$.

Логистический анализ систем производится над ее компонентами (элементами, агрегатами и пр.) с помощью критериев эффективности, которые задаются отношениями и функциями. В этой связи рассмотрим категории отношений и функций на множественных объектах.

В классическом анализе отношения и функции действуют на базисных множествах. Распространим эти категории на множественные объекты.

Пусть ρ некоторое отношение на множественном объекте O . Так как объект однозначно определяется структурой и содержанием, т.е. $O = (C, D)$, то под отношением на множественном объекте O будем понимать $\rho = (\rho_C, \rho_D)$. Здесь отношение ρ применяется к компонентам различных типов, свойств и пр. Отношение ρ между множественными объектами не всегда применимо.

Принимаем, что отношения $\rho_C(C_1, C_2)$ и $\rho_D(D_1, D_2)$ согласованы, если пары (C_1, D_1) и (C_2, D_2) определяют объекты O_1^k и O_2^r , на которых задается отношение $\rho = (\rho_C, \rho_D)$. Отношения ρ_C и ρ_D могут применяться различным образом. Рассмотрим вначале способы организации отношений на содержаниях.

Частные отношения общего отношения $\rho_D(D_1, D_2)$ определяются составом подсодержаний содержаний D_1 и D_2 .

Пусть $(S_{1i}) \subset D_1$ и $(S_{2j}) \subset D_2$, тогда отношение $\rho_D((S_{1i}), (S_{2j}))$, определенное на однотипных, или разнотипных подсодержаниях, может обладать или не обладать свойством однотипности. Например, если базисные содержания (S_{1i}) и (S_{2j}) есть множества, то отношение $\rho_D(\{S_{1i}\}, \{S_{2j}\})$ также множество (свойство однотипности), так как оно задается свободным набором пар (s_{ik}, s_{jq}) , $s_{ik} \in S_{1i}$, $s_{jq} \in S_{2j}$. Если на декартовом произведении множеств задать отношение порядка p расположения пар в произведении, тогда отношение $\rho_D^p(\{S_{1i}\}, \{S_{2j}\})$ есть разнотипное, так как отношение ρ_D^p задает упорядоченное множество.

Для однотипных отношений или отношений с разными компонентами содержания (S_{1i}) и (S_{2j}) возможны свойства эквивалентности, толерантности и др.

В общем случае отношение $\rho_D(D_1, D_2)$ определяется суперпозицией пар $((S_{1i}), (S_{2j}))$ и (s_{ik}, s_{jq}) , т.е.

$$\rho_D(D_1, D_2) = (s_{ik}, s_{jq}) \circ ((S_{1i}), (S_{2j})). \quad (3.10)$$

Поэтому можно принять, что свойства отношения $\rho_D(D_1, D_2)$ по необходимости переносятся и на отношения этих пар и наоборот, одинаковые свойства пар приписываются отношению $\rho_D(D_1, D_2)$. То есть, если отношения на парах $((S_{1i}), (S_{2j}))$ и (s_{ik}, s_{jq}) обладает свойством рефлексии, то этим же свойством обладает и их суперпозиция. Очевидно, что при наличии определенных свойств одной из составляющих отношения $\rho_D(D_1, D_2)$ следует говорить о частичном свойстве этого отношения.

Исходя из того, что множественные структуры объектов определяются упорядоченными системами полных путей подчинения $\bigcup_i \bar{h}_{1i} = C_1, \bigcup_j \bar{h}_{1j} = C_2$, то под декартовым произведением структур понимается произведение полных путей. Таким образом,

$$\rho_C(C_1, C_2) = \rho_C(\{\bar{h}_{1i}\}, \{\bar{h}_{2j}\}). \quad (3.11)$$

Отношение на множественных объектах по формулам (3.10) и (3.11) определяется выражением:

$$\rho(O_1^k, O_2^r) = (\rho_C(C_1(O_1^k), C_2(O_2^r)), \rho_D(D_1(O_1^k), D_2(O_2^r))).$$

Пример 1. Пусть $\rho \triangleq \min$ и $\rho_C(O_i^k) : \min\{|\bar{h}_{ij}|; \bigcup_j \bar{h}_{ij} = C_i\}$, а S содержание суффикса минимального пути $\bar{h}_{\min}$, то $\rho_D(O_i^k) : \min S$.

Пример 2.

$$\rho \triangleq \min, \quad \rho_C(O_1^k, O_2^r) : \min\{|\bar{h}_{1j}|, |\bar{h}_{2q}|; \bigcup_j \bar{h}_{1j} = C_1, \bigcup_q \bar{h}_{2q} = C_2\}, \text{ если}$$

S содержание суффикса минимального из путей $\bar{h}_{1j}$ и $\bar{h}_{2q}$, то $\rho_D(O_1^k, O_2^q) : \min S$.

Обобщение бинарного отношения на отношение m -го порядка для множественных объектов $O_i^{k_i}$, $i = \overline{1, m}$ представляется так

$$\rho(O_1^{k_1}, O_2^{k_2}, \dots, O_m^{k_m}) = (\rho_C(C_1, C_2, \dots, C_m), \rho_D(D_1, D_2, \dots, D_m)). \quad (3.12)$$

Отношение (3.12) допускает обобщение посредством нагрузки связей отношения, алгебраическими операциями, алгоритмами действий и пр., поэтому оно порождает отображение или определяет функции множественных объектов

$$F = (F_C, F_D): O_1^{k_1} \times O_2^{k_2} \times \dots \times O_m^{k_m} \rightarrow O_j^r.$$

Области определения и значений функции F могут быть различными: это сами объекты O_i^q и O_j^r или их подобъекты. Способы получения результата функций также могут быть разными, в зависимости от структурной функции F_C и функции содержания F_D .

Структурная функция выделяет подструктуры объектов O_i^q , пути подчинения для доступа к содержаниям объектов, выполняет действия над выделенными структурами для получения структуры объекта O_j^r и др. А функция F_D выполняет действия над отдельными составляющими содержания и их подмножествами, подписками и пр. или над гибридными комплексами содержания.

Рассмотрим несколько примеров задания функций.

Пример 3. Пусть числовая функция f определена на множественном подобъекте $O_j^q \subset O_i^k$ таком, что $O_j^q = (\bar{h}_j, (S_j))$, правилом $F(O_j^q) = (\bar{h}_j, \sum_{s \in A((S_j))} f(s))$, где $A((S_j))$ – класс подсодержаний базисного числового содержания (S_j) . Очевидно, что функция f задает множественный объект $O_i^q = (\bar{h}_j, (S'_j))$, для которого размерность содержания S'_j равна числу 1.

Пример 4. Если множественный объект $O_i^k = (C, D)$, то функцию можно задать так $F(O_s^k) = (C, D')$, где содержание $D' = (D \setminus S_j) \uplus_j \sum_{s \in A((S_j))} f(s)$ и функция f взята из примера 3.

Пример 5. Пусть словарная функция определена на множественном объекте по закону конкатенации $F_{\otimes}(C, D) = (f_{\otimes}(C), f_{\otimes}(D))$ так, что $f_{\otimes}(C) = \otimes(h_C^1, h_C^2) = h_C^3$, где h_C^1 и

h_c^2 пути структурной схемы C , а результирующий схемный путь новой структуры задается выражением:

$$h_c^3 = \begin{cases} 0 \otimes 0 = 0, & \text{если типы форм одинаковы} \\ 0 \otimes 0 = o, & \text{если типы форм различны} \end{cases}$$

Кроме того функция $f_{\otimes}(D) = (l_k)$ имеет значения, которые представляют совокупность содержательных цепочек, задаваемых рекуррентным выражением:

- 1) $l = s_i \otimes s_j$,
- 2) $l = l \otimes s_{j,i} \mid s_{i,j} \otimes l$,
- 3) $l_k = l$.

Здесь $s_i \in S^1 \subset D$ и $s_j \in S^2 \subset D$, а подсодержания S^1 и S^2 порождены путями $\bar{h}^1$ и $\bar{h}^2$ структуры подчинения C .

Возможны определения более сложных словарных функций путем задания конструктивных продукций на грамматических порождающих структурах [41].

Введение конкретных алгебраических операций, отношений и функций на множественных объектах должно сопровождать правилами их применения, как на структурах, так и содержаниях этих объектов. Причем эти правила могут задаваться так, чтобы они вырождались в обычные правила для операций, отношений и функций на базисных объектах. Указанные замечания относительно отношений, операций и функций относятся и к функциональным критериям логистических исследований.

Рассмотрим пример функционирования системы доставки грузов фирмами Fi , ($i = 1, 2, \dots, n$).

Пусть у фирм Fi имеются склады $Si_j, j = 1, \dots, m_i$, на которых хранятся товары $Ti_j, j = 1, \dots, j_i$. Товары доставляются потребителям в контейнерах $Ki_k, k = 1, \dots, k_i$ транспортными средствами (автомобилями, железнодорожными поездами, воздушными и водными судами). Процесс доставки товаров проходит несколько этапов, например, состоящих из следующих пунктов:

- 1) выбор контейнеров и их загрузка товарами на складах;

- 2) выбор вида транспорта и отгрузка контейнеров со складов;
- 3) выбор вида транспорта и прохождение таможенного контроля;
- 4) выбор вида транспорта и перезагрузка на выбранный транспорт для доставки товаров на склад потребителя или прямая доставки товаров на склад потребителя без перегрузки.

Этапы указанного процесса могут быть зависимыми, независимыми или частично независимыми. Например, при зависимых этапах процесс доставки товаров реализует последовательное выполнение определенных этапов, а при частичной зависимости из него могут быть исключены некоторые этапы. Каждый из этапов процесса доставки товаров связан с технологическими операциями обработки грузов, алгоритмами выбора и принятия решений. Анализ составных частей процесса показывает, что в нем используются множества разных типов: списки (склады и операции), мультимножества (контейнеры, операции, транспорт). Поэтому логистические модели функционирования такой системы доставки товаров фирмами F_i целесообразно представлять с помощью специализированной и интерпретированной множественной структуры. Структура составлена из множеств: складов C_i , товаров T_i , контейнеров K_i , транспортных средств $T = \{at_q, gt_r, vt_p, ot_l\}$, используемых фирмами, операций Υ обработки грузов на определенных этапах технологического процесса, алгоритмов A_Y^X (X – входное множество, Y – множество решений) выбора, принятия решений и перехода на следующий технологический этап.

Так как фирмы могут иметь разные технологические процессы доставки и обработки товаров, то соответствующие им интерпретированные множественные объекты также будут различными. Пусть для фирмы F_1 множественный объект – $O_{F_1}^8$ отражает технологию обработки товаров и грузов при международных доставках, и его структура задается формой:

$$C(O_{F_1}^8) = [\langle \llbracket T_{1j} \rrbracket_{123}, \llbracket \llbracket A_{Y_1}^K \llbracket A_{Y_2}^T \llbracket A_{Y_3}^T \llbracket A_{Y_4}^T \rrbracket \cdot \llbracket \Upsilon_4 \rrbracket \cdot \llbracket \Upsilon_3 \rrbracket \cdot \llbracket \Upsilon_2 \rrbracket \cdot \llbracket \Upsilon_1 \rrbracket \rrbracket_{K_{1_1}}, \llbracket \rrbracket_{K_{1_2}}, \dots, \llbracket \rrbracket_{K_{1_{k_1}}} \rrbracket, \langle C_{1_2} \rangle, \dots, \langle C_{1_{m_1}} \rangle],$$

в которой обозначение $[\cdot]_1$ определяет список складов, $\langle \cdot \rangle_2$ – мультимножество их содержаний: неоднородные множества товаров $[\cdot]_3$ и списки контейнеров $[\cdot]_4$. При этом контейнер $[\cdot]_{K1_j}$ подвержен выбору (вида контейнера или транспортного средства), по определенным алгоритмам из списков $([\cdot]_5, [\cdot]_7, [\cdot]_9, [\cdot]_{11})$ и упорядоченной операционной обработке на каждом технологическом этапе $([\cdot]_6, [\cdot]_8, [\cdot]_{10}, [\cdot]_{12})$. Связь списков алгоритмов A_Y^x и соответствующих операций обработки Y , представлена через операцию последовательного выполнения $[A_Y^T] \cdot [Y]$.

Содержанием объекта $D(O_{F1}^8)$ являются товары, алгоритмы выбора и принятия решений, а также операции на этапах технологических процессов.

Анализ структуры и содержания объекта O_{F1}^8 позволяет выделить $8(k+1)m$ содержательных подобъектов, определяющих товары на складах и обработку контейнеров. Эти подобъекты можно принять за систему образующих множественного объекта O_{F1}^8 . Так как каждый из выделенных подобъектов задается единственным полным путем подчинения $\bar{h}$, то его суффикс определяет последовательность (маршрут) операций или алгоритмов, или мультимножество товаров. Для конкретных логистических систем можно построить содержательные маршруты, выполняя определенные операции над путями подобъектов и используя критерий $\min_{h_j} F(\bar{h}_j, O_{F1}^8)$.

3.2 Системный анализ условий неопределенности

Анализ любой реальной системы сопряжен с необходимостью оценки состояния ее элементов, наблюдением основных параметров поведения, что может выполняться человеком или искусственным объектом. В первом случае информация о системе, как правило, воспринимается размыто или нечетко, в силу особенностей восприятия и интерпретации окружающей среды человеком. Во втором случае данные измерений могут быть неточными, отличаются

от реальных значений, запаздывают во времени. Кроме того, как наблюдения за системой, так и характеристики поведения системы могут иметь случайные компоненты. Эти и другие причины порождают различные типы неопределенности в задачах системного анализа, которые необходимо учитывать при проведении исследований и принятии решений.

3.2.1. Понятие нечеткости и его моделирование

Остановимся на простом примере нечеткого сообщения о времени задержки прибытия пассажирского поезда, для пояснения общего содержания потребности введения нового математического аппарата, характеризующего вхождение некоторых элементов в множества, развивающего понятия классической теории множеств. Пусть время прибытия поезда, четкое число t_r , определено расписанием движения, но фактически оно является «ориентиром» для реального времени t прибытия поезда. Тогда разность $|t_r - t| = \Delta t$ определяет отклонение движения поезда от расписания. Если $\Delta t = 0$, то поезд прибыл по расписанию, что характеризуют показателем «1», если $\Delta t > 0$, поезд прибыл на станцию с нарушением графика, что имеет характеристику «0». Таким образом, при любых обстоятельствах реализованного события прибытия поезда на станцию оно характеризуется двужначной функцией (опоздал, не опоздал)

$$\mu_x(t) = \begin{cases} 1, & \Delta t = 1; \\ 0, & \Delta t = 0. \end{cases} \quad (3.13)$$

В случае рассмотрения ожидаемого, будущего события, такое представление (3.13) задержки становится не достаточным, не полностью отражает содержание события «прибытие поезда по расписанию во время t_r ». Оценка точности времени прибытия приобретает нечеткий, размытый характер. Скорее следует говорить о степени уверенности субъекта относительно степени возможности реализации утверждения (3.13), которая здесь означает степень принадлежности события прибытия ко множеству «опоздал – не опоздал», то есть размытие четкого множества элементов $\{0, 1\}$.

Частично проблема такой неопределенности решается заданием временного интервала для событий прибытия поезда в момент T .

3.2.1.1. Элементы интервального анализа

Будем рассматривать интервалы на множестве действительных чисел [28, 36, 43]. Интервалы обозначаются большими символами, отмечая, что интервал A является подмножеством множества действительных чисел. Интервал можно задавать различным способом, например, так $A = \{x; a \leq x \leq b\}$, что читается как «множество элементов x удовлетворяющих условию $a \leq x \leq b$ ». Числа a и b называют соответственно нижней и верхней границами интервала A , поэтому между ними имеет место зависимость $a \leq b$. Практикуется также представление интервала $A = [a, b]$ или $A = [\underline{a}, \bar{a}]$.

Рассмотрим некоторые свойства интервалов.

- Если для интервала $A = [\underline{a}, \bar{a}]$ границы совпадают $\underline{a} = \bar{a} = a$, то интервал переходит в число a , т.е. множество действительных чисел является частным случаем множества интервалов.
- Интервал A включается в интервал B , $A \subseteq B$, если между их границами имеют место зависимости $\underline{a} \geq \underline{b}$ и $\bar{a} \leq \bar{b}$.
- Отношения ($<$) и ($>$) на интервалах неопределенны.
- Длина интервала A определяется правилом $|A| = |\underline{a} - \bar{a}|$.
- Средин интервала $\omega(A) = \frac{\underline{a} + \bar{a}}{2}$.

Рассмотрим алгебру арифметических операций ($+$, $-$, $\times$, $:$) на интервалах.

При выполнении операций над интервалами будем придерживаться правила – результат операции должен быть непротиворечивым и интервалом.

Операция сложения интервалов A и B выполняется по правилу $A + B = [\underline{a} + \underline{b}, \bar{a} + \bar{b}]$.

Операция сложения коммутативна $A + B = B + A$ и ассоциативна $(A + B) + C = A + (B + C)$ из-за коммутативности и ассоциативности действительных чисел (границ интервалов).

Операция вычитания, как обратная к операции сложения, задается непротиворечивым правилом вида:

$$A - B = \begin{cases} [\underline{a} - \bar{b}, \bar{a} - \underline{b}], & A \neq B; \\ [0, 0] = 0, & A = B. \end{cases}$$

Операция умножения интервалов задается как:

$$AB = [\min(\underline{a} \underline{b}, \underline{a} \bar{b}, \bar{a} \underline{b}, \bar{a} \bar{b}), \max(\underline{a} \underline{b}, \underline{a} \bar{b}, \bar{a} \underline{b}, \bar{a} \bar{b})].$$

Если $\underline{a} \geq 0$ и $\underline{b} \geq 0$, то эта формула упрощается $AB = [\underline{a} \underline{b}, \bar{a} \bar{b}]$.

Операция умножения обладает свойством коммутативности и ассоциативности.

Операция деления интервала A на интервал B допустима, если $0 \notin B$, по правилу:

$$A / B = \begin{cases} [\min(\underline{a} / \underline{b}, \underline{a} / \bar{b}, \bar{a} / \underline{b}, \bar{a} / \bar{b}), \max(\underline{a} / \underline{b}, \underline{a} / \bar{b}, \bar{a} / \underline{b}, \bar{a} / \bar{b})], \\ A \neq B; \\ [1, 1] = 1, A = B. \end{cases}$$

Деление интервалов упрощается при условиях $\underline{a} \geq 0$, $\underline{b} > 0$ и $A \neq B$,

$$A / B = [\underline{a} / \bar{b}, \bar{a} / \underline{b}].$$

На множестве интервалов можно ввести понятие интервального вектора $\vec{A} = (A_1, A_2, \dots, A_n)$, интервальной матрицы $A_i = (A_{ij})$, матричных операций и другие обобщения четкого действительного анализа, в частности обобщения линейной алгебры по решению линейных алгебраических уравнений $A_i X = B$ и пр.

3.2.1.2. Нечеткости первого типа

Нечеткости первого рода или просто нечеткости введены Л.А.Заде [26, 27, 31]. Вводя аппарат нечетких величин, Л.А. Заде исходил из того, что человек воспринимает величины нечетко. Например, поезд x , который характеризуется функцией прибытия (3.13), четко опаздывает или не опаздывает. Вместе с тем его характеристика прибытия «почти вовремя» или «задерживается» - не учитывается в модели (3.13). Учесть такую информацию можно заменой пары значений $(0,1)$ функции $\mu_x(t)$ множеством значений из интервала $[0,1]$. Здесь, чем меньше время опоздания поезда Δt , тем ближе значение функции принадлежности $\mu_x(t)$ к 1 значению, наоборот, чем больше Δt , тем ближе значение характеристической функции к нулю. Таким образом, поезд x с точки зрения оценки его прибытия на станцию можно характеризовать парой $\langle x, \mu_x(t) \rangle$.

Любая нечеткая величина $\tilde{a}$ задается упорядоченной парой $\tilde{a} = \langle a, \mu_a(x) \rangle$, в которой a – имя нечеткой величины, $\mu_a(x)$ – функция принадлежности, характеризующая степень нечеткости величины $\tilde{a}$, а $x \in X$ – элемент действительного подмножества. Совокупность нечетких величин $\tilde{a}$ образует нечеткое множество $\tilde{A}$. Множество $\tilde{A}$ содержит и величины, функция принадлежности которых имеет вид (3.13), т.е. нечеткое множество включает в себя четкое множество.

Функции принадлежности элементов нечеткого множества могут быть непрерывными или дискретными [33, 41]. Рассмотрим несколько случаев задания непрерывных функций принадлежности.

Пусть время прибытия поезда на станцию по расписанию $t = d$, а время отклонения от расписания $\underline{d}$ и $\bar{d}$, тогда функцию $\mu(t)$ удобно задать тройкой $(d, \underline{d}, \bar{d})$, для которой график функции представлен на рис. 3.14,

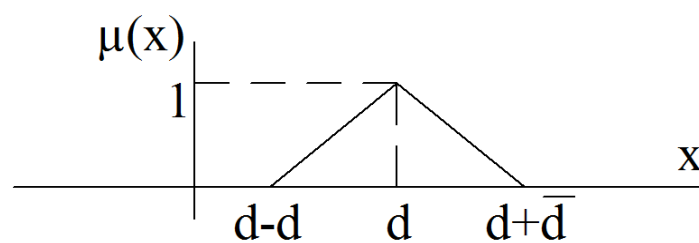


Рис.3.14. График функции принадлежности треугольного вида

а ее аналитическое выражение имеет вид

$$\mu(t) = \begin{cases} \frac{1}{\underline{d}}t + 1 - \frac{d}{\underline{d}}, & d - \underline{d} \leq t \leq d; \\ 1 - \frac{1}{\bar{d}}t + \frac{d}{\bar{d}}, & d + \bar{d} \geq t > d; \\ 0, & \text{в иных случаях.} \end{cases} \quad (3.14)$$

Формула (3.14) универсальна и применима для всех функций принадлежности заданных тройкой $(d, \underline{d}, \bar{d})$. Если величины отклонений $\underline{d}$ и $\bar{d}$ небольшие, то график функции на рис. 3.14 соответствует высказыванию «поезд прибыл на станцию почти вовремя».

Функция принадлежности может иметь и другие виды, например,

трапецевидную, заданную на промежутке (0,4) выражением

$$\mu(x) = \begin{cases} x, & 0 \leq x \leq 1; \\ 1, & 1 < x \leq 2; \\ \frac{4-x}{2}, & 2 < x \leq 4; \\ 0, & \text{в иных случаях;} \end{cases}$$

или S-образную

$$\mu(x, a, b) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-b)}}$$

где a и b числовые параметры такие, что $a < b$.

Многие современные прикладные пакеты имеют встроенное программное обеспечение, которое позволяет оперировать с нечеткими величинами. Например, в прикладном пакете MatLab имеется программный комплекс функций для обработки нечетких величин. Например, функция *sigmf* позволяет отобразить S-образную функцию принадлежности по программе

```
>> x = -10:0.1:10;
>> y = sigmf(x,[1,2]);
>> plot(x,y),grid
```

Результат выполнения, которой есть график, представленный на рис. 3.15.

Нечеткое сообщение «поезд опаздывает» моделирует функция принадлежности, изображенная на рис. 3.15.

В дискретном случае функция μ определяется методом экспертных оценок одного или нескольких экспертов. Рассмотрим две простые методики проведения экспертного эксперимента.

Задача экспертизы I. Пусть имеется множество нечетких категорий (высказываний) $\tilde{B}$, множество элементов X и m выбранных экспертов. Необходимо для заданных имен $x_i \in X$ определить значения функции принадлежности $\mu(x_i)$.

Методика решения задачи проводится по схеме:

- выбирается элемент испытаний x_i ;
- экспертами оценивается (по принципу «да» или «нет») нечеткая категория $\kappa \in \tilde{B}$ по отношению к испытываемому элементу x_i ;
- подсчитывается количество экспертов $m_i \leq m$, ответивших утвердительно при оценивании категории κ ;

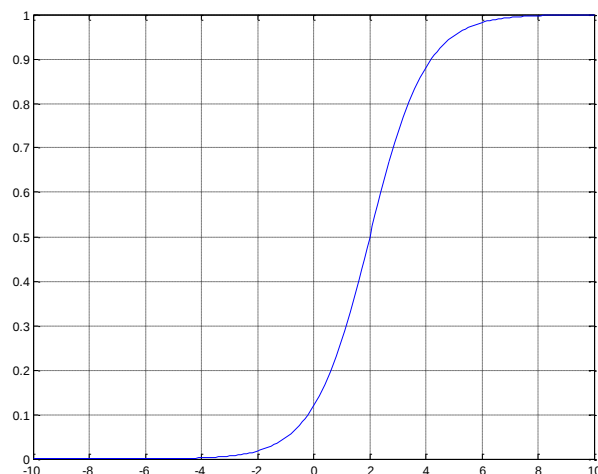


Рис. 3.15. График s -образной функции принадлежности при значениях $a=1$ и $b=2$

- определяется значение $\mu(x_i) = \frac{m_i}{m}$.

Недостатком этой методики является то, что в эксперименте участвуют несколько экспертов, следовательно, результат экспертизы может иметь завышенную субъективность.

Задача экспертизы 2. Пусть в эксперименте принимает участие один эксперт и пусть задана таблица экспертных сравнений категорий κ_i и κ_j для элементов $x_i, x_j \in X$, $(i, j = \overline{1, n})$. Требуется определить значения функции принадлежности $\mu(x_i)$.

В решении задачи 2 используется таблица экспертных оценок, которая предлагается эксперту или строится экспертом. Методики построения таких таблиц разнообразны. Ниже приведен пример таблицы количественных оценок [39].

Процесс нахождения значений функции $\mu(x_i)$, следующий:

- выбираются конкретные элементы $x_i, x_j \in X$;

– эксперт по данным таблицы проводит сравнение категорий этих элементов и устанавливает количество баллов m_{ij} ,

κ_i сравнение κ_j	Количество баллов m_{ij}
приблизительно равны	1
незначительно больше	3
больше	5
значительно больше	7
намного больше	9
промежуточные значения	2, 4, 6, 8

– на значениях m_{ij} формируется асимметричная матрица $(m_{ij})_{i,j=1}^n$, в которой элементы подчинены условиям $m_{ii} = 1$, $m_{ji} = 1/m_{ij}$;

– выбирается произвольный столбец матрицы $(m_{ij})_{i,j=1}^n$, и определяются значения функции принадлежности, как $\mu(x_i) = m_{ij} / \sum_{i=1}^n m_{ij}$.

Отметим, что при качественном процессе проведения экспертизы величина $\mu(x_i)$ практически не зависит от выбранного столбца матрицы.

Над нечеткими величинами можно выполнять арифметические, алгебраические и другие операции с помощью приема «спасения от нечеткости». Этот прием будем проводить, используя α -сечение нечеткой величины.

Под α -сечением нечеткой величины $\tilde{a}$ понимается множество $\tilde{a}_\alpha = \{x \in X; \mu_{\tilde{a}}(x) \geq \alpha\}$. Следовательно, $\alpha \in [0,1]$ и α -сечение для (3.14) представляет четкий интервал.

Определим границы этого интервала для функции принадлежности треугольного вида (3.14) из условия $\mu_{\tilde{a}}(x) \geq \alpha$, тогда

$$\frac{1}{\underline{d}}x + 1 - \frac{d}{\underline{d}} = \alpha, \Rightarrow x = \underline{d}(\alpha - 1) + d,$$

$$-\frac{1}{\bar{d}}x + 1 + \frac{d}{\bar{d}} = \alpha, \Rightarrow x = \bar{d}(1 - \alpha) + d.$$

Таким образом, левая граница α -сечения есть $b_1^\alpha = \underline{d}(\alpha - 1) + d$, а правая граница $b_2^\alpha = \overline{d}(1 - \alpha) + d$ и само сечение $\tilde{a}_\alpha = [b_1^\alpha, b_2^\alpha]$.

Геометрическое толкование α -сечения величины $\tilde{a}$ приведено на рис. 3.16

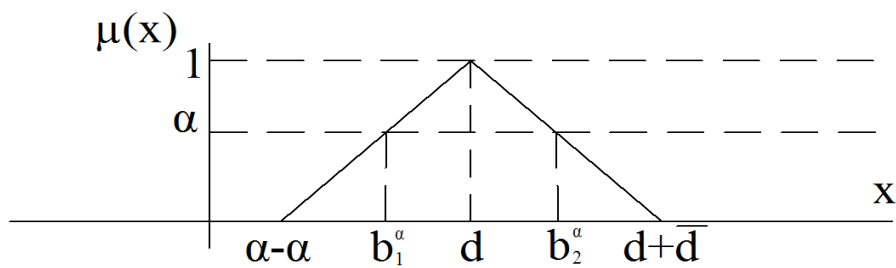


Рис.3.16. α -сечения величины $\tilde{a}$

Для нечетких величин имеет место важный результат о том, что для любой выпуклой функции принадлежности и ее α -сечением существует взаимно однозначное соответствие. Это позволяет по α -сечению однозначно восстановить функцию принадлежности.

Прием формирования α -сечения используется при выполнении любых операций потому, что операции над нечеткими величинами сводятся к действиям над их функциями принадлежности.

Для выполнения арифметических операций над нечеткими величинами воспользуемся указанным выше результатом однозначного восстановления.

Пусть $\circledast$ любая из арифметических «нечетких» операций над нечеткими величинами, тогда процесс вычисления $\tilde{a} \circledast \tilde{b} = \tilde{c}$, выполняется по схеме:

- 1) находятся α -сечения величин $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$;
- 2) выполняется «четкая» операция $*$ над α -сечениями $\tilde{a}_\alpha * \tilde{b}_\alpha = \tilde{c}_\alpha$, как над интервалами;
- 3) по α -сечению $\tilde{c}_\alpha$ восстанавливается функция принадлежности нечеткой величины $\tilde{c}$.

Рассмотрим пример выполнения операции сложения нечетких величин, функции принадлежности которых заданы выражениями:

$$\mu_{\tilde{a}}(x) = \begin{cases} x-1, & 1 \leq x \leq 2; \\ -x+3, & 2 < x \leq 3; \\ 0, & \text{в иных случаях.} \end{cases}$$

$$\mu_{\tilde{b}}(x) = \begin{cases} x-3, & 3 \leq x \leq 4; \\ -x+5, & 4 < x \leq 5; \\ 0, & \text{в иных случаях.} \end{cases}$$

Находим границы α -сечений нечетких величин $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$, а затем $\tilde{a}_\alpha = [\alpha+1, 3-\alpha]$ и $\tilde{b}_\alpha = [\alpha+3, 5-\alpha]$.

Теперь определяем интервальную сумму α -сечений нечетких величин $\tilde{a}_\alpha + \tilde{b}_\alpha = (2\alpha+4, -2\alpha+8) = \tilde{c}_\alpha$.

Наконец восстановим результирующую функцию принадлежности, для этого выполним преобразования

$$2\alpha + 4 = x, \Rightarrow \alpha = x/2 - 2;$$

$$-2\alpha + 8 = x \Rightarrow \alpha = -x/2 + 4.$$

Так как $\alpha \in [0,1]$, то получим

$$\mu_{\tilde{c}}(x) = \begin{cases} 1/2x - 2, & 4 \leq x \leq 6; \\ -1/2x + 4, & 6 < x \leq 8; \\ 0, & \text{в иных случаях.} \end{cases}$$

Обратим внимание на то, при выполнении операций умножения и деления над нечеткими величинами с линейными функциями μ , восстановление функции принадлежности проводится сложнее, т.к. приходится выбирать корень квадратного уравнения, удовлетворяющий условию $\alpha \in [0,1]$ и результирующая функция принадлежности будет нелинейной.

Очевидно, что арифметические операции нечеткого умножения и деления коммутативны и ассоциативны.

Исходя из того, что четкие величины содержатся во множестве нечетких величин, рассмотренные арифметические операции можно применять к комбинациям четких и нечетких величин. Например, результат умножения четкой величины a на величину $\tilde{b}$, характеризуется функцией $\mu_{a \otimes \tilde{b}}(x) = \mu_{\tilde{b}}(x/a)$.

При проведении анализа систем используются переменные величины, которыми оперируют в системных моделях, логических

связках и пр. Рассмотрим некоторые алгебраические операции над нечеткими переменными.

Операция *нечеткого максимума*

$$\max\{\tilde{a}, \tilde{b}\} = \tilde{c} \Rightarrow \mu_{\tilde{c}}(x) = \begin{cases} \mu_{\tilde{a}}(x), & x_a^\alpha \geq x_b^\alpha; \\ \mu_{\tilde{b}}(x), & x_a^\alpha \leq x_b^\alpha. \end{cases}$$

Операция *нечеткого минимума*

$$\min\{\tilde{a}, \tilde{b}\} = \tilde{c} \Rightarrow \mu_{\tilde{c}}(x) = \begin{cases} \mu_{\tilde{a}}(x), & x_a^\alpha \leq x_b^\alpha; \\ \mu_{\tilde{b}}(x), & x_a^\alpha \geq x_b^\alpha. \end{cases}$$

При нахождении нечеткого максимума и минимума используются α -сечения функций принадлежности величин $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$, значения границ которых сравниваются.

Операция *нечеткой конъюнкции (пересечения)* $\tilde{a} \cap \tilde{b}$ величин $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ сводится к двухэтапному выполнению действий над их функциями принадлежности. Сначала находится пересечение областей определения X_a и X_b соответствующих функций принадлежности $X_a \cap X_b = X$, а затем выполняется операция конъюнкции на значениях $\mu_{\tilde{a}}(x)$ и $\mu_{\tilde{b}}(x)$, при условии $x \in X$. Таким образом

$$\tilde{a} \cap \tilde{b} = \tilde{c} \Rightarrow \mu_{\tilde{c}}(x) = \min_{x \in X} \{\mu_{\tilde{a}}(x), \mu_{\tilde{b}}(x)\}.$$

Операция *нечеткой дизъюнкции (объединения)* $\tilde{a} \cup \tilde{b}$ величин $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$

$$\tilde{a} \cup \tilde{b} = \tilde{c} \Rightarrow \mu_{\tilde{c}}(x) = \max_{x \in X} \{\mu_{\tilde{a}}(x), \mu_{\tilde{b}}(x)\}, \quad x \in X = X_a \cup X_b.$$

Операция *нечеткого отрицания* $\tilde{a} \neg$ величины $\tilde{a}$

$$\tilde{a} \neg = \tilde{c} \Rightarrow \mu_{\tilde{c}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{a}}(x), \quad x \in X_a.$$

Для системных исследований в условиях нечеткой определенности систем используются и другие операции, не четкие отношения, функции.

Рассмотренные основные положения математического аппарата нечетких величин, который позволяет учесть их в моделях поведения транспортных систем, тем самым приблизить результаты моделирования к реальным состояниям объектов системного анализа.

3.2.2. Применение нечеткостей в задачах принятия решений

Принятие решений в системном анализе на основе четких данных не всегда оправдано, так часто данные, на которых принимается решение не всегда четкие. К тому же результаты принятого решения на четких данных «сиюминутные» и для перспективных исследований, например, прогноза не корректны. Поэтому в этом подпункте предлагаются некоторые модели принятия решений при нечетких данных.

Предположим, что тарифы на перевозку изменяются в интервале $[\underline{b}_{ij}, \bar{b}_{ij}] = B_{ij}$, а количество перевозимых грузов четкое, тогда задача (3.6) трансформируется в следующую нечеткую задачу.

$$\begin{cases} F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_{ij} z_{ij} \rightarrow \min \\ \sum_{j=1}^n z_{ij} \leq a_i, \\ \sum_{i=1}^m z_{ij} \geq d_j, \quad z_{ij} \geq 0. \end{cases} \quad (3.15)$$

Решение задачи (3.15) позволяет оценить интервальную целевую функцию F в зависимости от изменения тарифной политики из интервала $[\underline{b}_{ij}, \bar{b}_{ij}]$. В частности можно найти пессимистическое решение $\underline{F}$ и оптимистическое решение $\bar{F}$ из задач

$$\begin{cases} \underline{F} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \underline{b}_{ij} z_{ij} \rightarrow \min \\ \sum_{j=1}^n z_{ij} \leq a_i, \\ \sum_{i=1}^m z_{ij} \geq d_j, \quad z_{ij} \geq 0. \end{cases} \quad \begin{cases} \bar{F} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij} z_{ij} \rightarrow \min \\ \sum_{j=1}^n z_{ij} \leq a_i, \\ \sum_{i=1}^m z_{ij} \geq d_j, \quad z_{ij} \geq 0. \end{cases}$$

Если к тому же состояние производств, выпускающих перевозимую продукцию, нестабильное, то модель транспортной задачи (3.6) усложняется.

Пусть тарифы грузоперевозок, количество перевозимых грузов и количества выпускаемой и потребляемой продукции заданы интервально, т.е. соответствующими интервалами B_{ij} , Z_{ij} , A_i и D_j . Если ввести правило сравнения интервалов, например, $A \leq B$ ($A \geq B$) так, что $\underline{a} \leq \underline{b}$ и $\bar{a} \leq \bar{b}$ ($\underline{a} \geq \underline{b}$ и $\bar{a} \geq \bar{b}$) то модель транспортной задачи следующая.

$$\left\{ \begin{array}{l} F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_{ij} Z_{ij} \rightarrow \min \\ \sum_{j=1}^n Z_{ij} \leq A_i, \\ \sum_{i=1}^m Z_{ij} \leq D_j, \\ \sum_{i=1}^m A_i \leq \sum_{j=1}^n D_j, \quad z_{ij} \geq 0. \end{array} \right.$$

На основании рассмотренных постановок задач можно построить другие комбинированные модели задач исследования и принятия решений транспортных систем. Так для учета удовлетворенности потребностей клиентуры следует ввести коэффициент неудовлетворенности $\lambda \in [\underline{\lambda}, \bar{\lambda}] = \Lambda$, где $0 \leq \underline{\lambda}$ и $\bar{\lambda} \leq 1$, и построить модель для этой задачи вида

$$\left\{ \begin{array}{l} |\Lambda| \rightarrow \min, \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_{ij} Z_{ij} \leq \Lambda F^*, \\ \sum_{j=1}^n Z_{ij} \leq \Lambda A_i, \\ \sum_{i=1}^m Z_{ij} \leq \Lambda D_j, \quad z_{ij} \geq 0. \end{array} \right.$$

Здесь F^* заданное значение функции цели (транспортных затрат или др.).

Если тарифы транспортных затрат определены нечеткостями первого рода $\tilde{b}_{ij}$, то в модели транспортной задачи (3.6) необходимо

четкую целевую функцию заменить новой нечеткой функцией и новым экстремальным выражением

$$\tilde{F} = \bigoplus_{ij} \tilde{b}_{ij} \otimes z_{ij} \rightarrow \min, \quad (3.16)$$

оставив неизменными ограничения. С учетом сказанного получим новую нечеткую модель транспортной задачи.

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{F} = \bigoplus_{ij} \tilde{b}_{ij} \otimes z_{ij} \rightarrow \min \\ \sum_{j=1}^n z_{ij} \leq a_i, \\ \sum_{i=1}^m z_{ij} \geq d_j, \quad z_{ij} \geq 0. \end{array} \right. \quad (3.17)$$

Решение построенной нечеткой задачи (3.17) можно найти, воспользовавшись приемом «спасения от нечеткости».

Пусть найдено α -сечение нечетких величин $\tilde{b}_{ij}$, которые задаются интервалами $[\underline{b}_{ij}, \bar{b}_{ij}]$. Заменив в выражении (3.16) величины $\tilde{b}_{ij}$ их α -сечениями $[\underline{b}_{ij}, \bar{b}_{ij}]$ получим интервальную модель задачи (3.15), которую удастся решить для заданного α -сечения. Если значение параметра α неизвестно, то интервальная задача (3.15) решается эвристическим методом.

Если в технологическом процессе перевозок наблюдаются сбои и их можно описать с помощью нечетких величин, например, $\tilde{a}_i$ и $\tilde{d}_j$ задачи (3.17), тогда обобщение этой задачи можно представить моделью (3.18)

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{F} = \bigoplus_{ij} \tilde{b}_{ij} \otimes z_{ij} \rightarrow \min; \\ \min\{\mu_{\tilde{a}_i}(\sum_{j=1}^n z_{ij})\}, \quad i = \overline{1, m}; \\ \max\{\mu_{\tilde{d}_j}(\sum_{i=1}^m z_{ij})\}, \quad j = \overline{1, n}; \quad z_{ij} \geq 0; \\ v = \sup\{\mu_{\tilde{a}}(u) \wedge \mu_{\tilde{d}}(u)\} \in (0, 1]. \end{array} \right. \quad (3.18)$$

где $\tilde{a} = \bigoplus_{i=1}^m \tilde{a}_i$ и $\tilde{d} = \bigoplus_{j=1}^n \tilde{d}_j$, $v \in (0,1]$ – коэффициент согласования задачи.

Значение коэффициента согласования существенно для выяснения согласованности, слабой согласованности или несогласованности задачи (3.18). Поясним это на примере.

Пусть v коэффициент согласования отражает смысл производимых грузов по отношению к потребляемым грузам. Если в системе перевозок большие запросы потребителей на поставки грузов, а у производителей проблемы с производством или доставкой грузов, то пересечение соответствующих функций принадлежностей равно нулю или близко к нулю. При $v=0$ задача (3.18) – *несогласованна*, и ее не следует решать. При значениях коэффициента v близких к нулю задача (3.18) *слабо согласована*.

Рассмотрим еще один вид неопределенности, возникающий при системных исследованиях транспортных систем.

3.2.3. Случайность в ИТС и мера неопределенности

Традиционно в системном анализе неопределенность связывают со случайностью происходящих событий в самой системе, случайностью появления входных данных, наложением шумов на потоки информации и пр. Неопределенность в системах существенно влияет как на их состояния, так и на технологию ведения анализа систем.

Например, процесс транспортных перевозок сопряжен с рядом случайностей технического состояния подвижного состава, железнодорожного пути, контактной сети, со случайным нарушением графика движения, режима энергообеспечения и др., что приводит к нарушению ритмичности работы транспорта.

Исследование систем с учетом случайностей связано с математическим аппаратом теории вероятностей. Однако, на практике вероятности определяются для регулярных (повторяемых) событий комбинаторным способом, для чего необходим долговременный статистический экспериментальный материал. Вместе с тем во многих случаях системных исследований такого материала нет. Это еще одна проблема неопределенности в системном анализе при использовании вероятностного подхода в исследованиях систем.

Во многих случаях системного анализа возникает вопрос количественной оценки неопределенности и степени ее влияния на управляемость, принятие решений, состояния и другие свойства систем. В роли такой меры неопределенности систем выбрана физическая *энтропия*, оценки броуновского движения системы молекул в замкнутом пространстве. Энтропия связана с количеством информации силлогизмом «чем больше информации в событии (сообщении) тем большая в нем неопределенность». Определим энтропию через количественную меру информации.

Человек оценивает полученную информацию относительным показателем. Пусть a и b два события технологического процесса. Количество информации $I(a/b)$, заключенное в событии b относительно a , определяется числом

$$I(a/b) = \log \frac{p(a/b)}{p(a)}. \quad (3.19)$$

Если события одинаковы, т.е. $a = b$, тогда $I(a/a) = I(a)$ и условная вероятность $p(a/a) = 1$, поэтому количество информации в одном сообщении a : $I(a) = -\log p(a)$.

Пусть для некоторого технологического процесса проведено n экспериментов с некоторыми исходами $x_i \in X$, определяемыми ансамблем событий:

$$\begin{matrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ p_1 & p_2 & \cdots & p_n \end{matrix}.$$

Количество информации любого события $I(x_i) = -\log p(x_i)$ есть случайная величина, проведенного эксперимента.

Математическое ожидание количества информации определяет энтропию эксперимента

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i. \quad (3.20)$$

Рассмотренная технология проведения эксперимента служит инструментарием для практического нахождения энтропии.

Сравнивая формулу для количества информации в виде (3.3) с выражением (3.20), убеждаемся в справедливости приведенного

силлогизма и рассмотренные свойства информации (3.3) имеют место для энтропии.

Рассмотрим дополнительные свойства энтропии.

Пусть система S состоит из двух подсистем S_1 и S_2 таких, что $S_1 \cup S_2 = S$ и $S_1 \cap S_2 = \emptyset$. Состояния Z_1 и Z_2 соответствующих подсистем изменяются. Предположим, что сложные состояния $z_{ij} = (z_{1i}, z_{2j})$ системы S изменяются с вероятностями p_{ij} , тогда по аналогии с формулой (3.20) энтропия сложных событий представится выражением

$$H(Z_1, Z_2) = - \sum_i \sum_j p_{ij} \log p_{ij}. \quad (3.21)$$

Если состояния z_{1i} z_{2j} системы S независимы, то $p_{ij} = p_i p_j$ и формула (3.21) изменится

$$H(Z_1, Z_2) = H(Z_1) + H(Z_2).$$

При зависимых состояниях подсистем S_1 и S_2 можно говорить об условной энтропии, например, $H(Z_2 / Z_1)$, которая определяет степень неопределенности остатка состояний подсистемы S_2 после того как состояния системы S_1 определились.

$$H(Z_2 / Z_1) = - \sum_i \sum_j p_{ij} \log p(z_{2j} / z_{1i}).$$

Теперь сложная энтропия представляется через условные энтропии

$$H(Z_1, Z_2) = H(Z_1) + H(Z_2 / Z_1) = H(Z_2) + H(Z_1 / Z_2).$$

Рассмотрим способ задания данных четкими интервалами. Пусть интервал состоит из одного числа $k = [k, k]$, тогда его неопределенность нулевая, если количество элементов интервала увеличивается, неопределенность интервала не уменьшается. Так как количество элементов интервала A может быть непериодическим, то для оценки неопределенности таких интервалов следует использовать его длину. Тогда интервал нулевой длины имеет нулевую неопределенность, а большей длины – большую неопределенность.

Заметим, что заданная таким способом неопределенность не объективна по причине того, что на интервалах одинаковой длины может находиться различное число элементов. Поэтому интервальная неопределенность не может быть определена единообразно

$$H(A) = \begin{cases} \log n, & n - \text{количество элементов на интервале,} \\ |A| \cdot \log |A|, & \text{непрерывный интервал.} \end{cases}$$

Для нечеткостей второго рода предлагается такая оценка неоднородности

$$H(\tilde{a}) = \int_x \mu_{\tilde{a}}(x) dx \log \left(\int_x \mu_{\tilde{a}}(x) dx \right),$$

которая для четкой величины обращается в ноль. В дискретном случае в формуле неопределенности интегралы заменяют суммами.

4. Математическое и компьютерное моделирование интеллектуальных систем транспорта

Раздел посвящен вопросам формализации процессов принятия решений, для которых выполняются процедуры системного анализа. В первую очередь математическое и компьютерное моделирование выполняется в рамках «вычислительной» формы СА, когда его результатами является формирование информационных, математических и других моделей процессов и объектов исходной проблемы, предполагающих некоторую программную реализацию.

4.1. Теоретико-игровые модели управления в транспортных системах в условиях неопределенности

В разделе рассматриваются приложения теории игр (раздел 3.1.4.4) к задачам управления системами транспорта. В прикладной теории игр исследуются процессы, в которых требуется определить их формальное содержание и найти (рассчитать) лучшее решение для поведения участников при противоречивых (несовпадающих) интересах различных групп, а также при неполной информации о состояниях систем [16, 20, 36]. На практике это соответствует многочисленным видам деятельности, когда отдельные участники процессов, подсистемы, стараются достичь своих целей, но никто полностью не влияет на ход событий и конечный результат деятельности зависит от подсистем лишь частично. Конфликтная ситуация общего для всех «рационального» поведения, требует всестороннего анализа в рамках некоторой системной модели принятия решений. Хорошо разработанный, с учетом особенностей конфликтов между несколькими участниками процессов принятия решений, математический аппарат теории игр позволяют использовать ее методы для решения разнообразных задач, которые возникают в различных широких сферах практической деятельности (в рамках социально-экономических, производственных, политических, транспортных и других систем). Прикладная теория

игр (ТИ) представляет раздел современной математики, в котором изучаются математические модели принятия решений в условиях неопределенности, конфликтности целей нескольких сторон процессов, в условиях и при ситуациях, когда интересы сторон (игроков) или противоположные (в случае антагонистических игр) или не совпадают, хотя и не являются противоположными (игры с непротивоположными интересами). Для описания правила принятия решений в условиях неопределенности, конфликтности и вызванного ими риска разработано ряд математических моделей и методов, которые базируются на различных концепциях. Достаточно известной, исследованной и широко применяемой в теории и на практике является концепция теории игр и статистических решений [24, 26].

4.1.1. Теоретико-игровая модель принятия решений

Основой ПТИ является понятия «игры», которое является формализованным описанием (моделью) конфликтной ситуации между участниками, содержащей четко определенные правила действий каждого «игрока». Игроки пытаются достигнуть выигрыша, получить определенную оценку заданной характеристики (наилучшую в установленном смысле), путем выбора конкретной стратегии поведения. В игре субъект (сторона) принятия решения называется игроком, характеристика результата деятельности, целевая или платежная функция. В игре могут принимать участие несколько игроков, причем некоторые из них могут вступать между собой в постоянные или временные коалиции (союзы). В случае образования коалиций игра называется коалиционной. Игра двух лиц называется парной.

Игроки принимают решения, выбирают стратегию своего поведения, с целью максимизации своих выигрышей или минимизации проигрышей. При этом они не знают, каких стратегий придерживаются остальные игроки – каждый игрок принимает свои решения при неопределенности, причем результат выбранной им стратегии зависит от поведения всех участников игры. Различные модели ТИ обусловлены разнообразием проявлений факторов неопределенности и конфликта в реальных процессах и явлениях.

Для исследования статистических моделей в условиях неопределенности, конфликтности и порожденного ими риска используют схему игры со средой (технологической, экономической,

транспортной и др.), составляющими которой являются следующие компоненты и свойства [19]:

1) первый игрок – субъект управления (СПР), выбор стратегии поведения которого базируется на множестве $St = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ взаимоисключающих решений (чистых стратегий), одно из которых ему необходимо принять;

2) второй игрок – технолого-экономическая среда, которая может находиться в одном из n взаимоисключающих состояний θ_j , образующих множество сценариев $\Theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$, один из которых обязательно наступит;

3) отсутствие в СПР априорной информации о том, в каком из своих состояний находится технолого-экономическая среда (какое решение примет второй игрок);

4) точное знание СПР – функционала оценивания (матрицы) $F = (f_{kj} : k = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n)$, элемент которого f_{kj} является количественной оценкой эффективности результата при выборе им стратегии s_k при реализации состояния экономического среды θ_j ($k = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$).

Указанная схема анализа и моделирования процесса принятия решения предполагает такую интерпретацию: второй игрок заменяется «средой», которая случайным выбором или неосознанно принимает свои решения. При этом ситуация принятия решения характеризуется функционалом оценивания F , который также называют матрицей игры, или платежной матрицей. Формально ситуация принятия решения по теоретико-игровой концепции описывается тройкой множеств: $\{St; \Theta; F\}$.

Для практики анализа процессов принятия решений (ППР) представляет интерес смешанная игровая модель, когда множество стратегий субъекта управления St является дискретным, принимает конечное число вариантов, а множество состояний технолого-экономической среды Θ – непрерывно. В таком случае ситуация принятия решений характеризуется совокупностью функций:

$$F = (f(s_k; \theta) = f_k(\theta) : \theta \in \Theta; s_k \in St, k = 1, \dots, m) = (f_1(\theta); \dots, f_m(\theta)).$$

При построения теоретико-игровой модели можно выделить

неформальную, творческую, и формальную составляющие. При разработке модели выбора решений в рамках ТИ выделяют следующие неформальные компоненты:

- формирование множеств решений первого и второго игроков, как перечень чистых стратегий СПР и состояний «среды»;
- определение и формализация основных показателей эффективности и полезности, построение платежной матрицы F ;
- определение (идентификация) имеющейся информационной ситуации, которая характеризует поведение среды процессов ППР;
- выбор критерия для ППР из множества критериев, которые характерны для идентифицированной информационной ситуации;
- принятие согласно выбранному критерию решения среди чистых или смешанных стратегий, если использование последних возможно.

Суть формальной составляющей ППР в условиях неопределенности, конфликтности и вызванного ними риска заключается в применении математического аппарата и выполнении расчетов показателей эффективности, на основе которых строится функционал оценивания F , а также расчетов оптимальной (рациональной) стратегии или множества оптимальных (рациональных) стратегий, в зависимости от выбранного критерия оптимальности в математической модели игры.

4.1.2. Классификация информационных ситуаций модели игры

Для формализации описаний игровой модели ППР вводят классы – градации неопределенности относительно пребывания технологической или же экономической и другой «среды» в одном из своих возможных состояний, которые анализируются в момент принятия субъектом управления решения, выбора альтернативы. Введенные классы называют информационной ситуацией (ИС) [19]. Состояния среды с точки зрения ИС можно представить таким образом:

IS_1 – первая ИС определяется заданными распределениями априорных вероятностей состояний среды, когда принимаются известными компоненты вектора $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$, где q_j – вероятность реализации j -го сценария ($j = 1, \dots, n$). С точки зрения теории вероятности должны выполняться такие условия:

$$\sum_{j=1}^n q_j = 1; \quad (4.1)$$

$$q_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, n; \quad (4.2)$$

Is_2 – вторая ИС характеризуется заданным распределением априорных вероятностей разных состояний «среды» с точностью до неизвестных параметров, характеризующих заданный закон распределения;

Is_3 – третья ИС определяется заданной совокупностью ограничений относительно вероятностей q_j ($j = 1, \dots, n$) состояний среды, включая соотношения (4.1) и (4.2);

Is_4 – четвертая ИС характеризуется следующими условиями ППР:

1) неизвестны распределения априорных вероятностей разных состояний «среды» при условии, что неизвестные вероятности сценариев q_j ($j = 1, \dots, n$) удовлетворяют соотношениям (4.1) и (4.2);

2) отсутствие активного противодействия действующей среды целям субъекта управления;

Is_5 – пятая ИС характеризуется строго противоположными интересами СПР и действующей среды (несклонность субъекта принятия решений к риску), имеет место конфликт между ними. При этом действующая среда является активной, «противником» игрока. В данном случае статистическая игра становится парной матричной игрой с нулевой суммой (игрой двух участников с антагонистическими интересами);

Is_6 – шестая ИС – является промежуточной между стратегиями Is_1 и Is_5 при выборе действующей средой своих состояний, когда одновременно с наличием определенной информации относительно распределения Q априорных вероятностей q_j ($j = 1, \dots, n$) сама среда не является пассивной. Причем существующие противоречия между интересами СПР и действующей средой не обязательно имеют полностью антагонистичный характер;

Is_7 – седьмая ИС – характеризуется нечетким (расплывчатым) множественным числом состояний действующей среды.

Указанные выше типы информационных ситуаций являются глобальными характеристиками уровней неопределенности и степени риска относительно выбора действующей средой своих состояний.

Поэтому каждой информационной ситуации соответствует свой набор критериев принятия решений. Под критерием принятия решений понимают определенный показатель экономической или же другой эффективности и алгоритм, позволяющий выбрать единственное оптимальное решение $s_{k_0} \in St$ (или множество оптимальных решений $St^* \subset St$, если их несколько) из множества решений $St = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ для заданного функционала оценивания F в поле конкретной информационной ситуации. Поиск оптимальных решений моделей ТИ часто связан с применением многокритериальных методов.

4.1.3. Формализация функций риска игровых моделей

В зависимости от целей и заданий управления и планирования выполняется выбор одного или же нескольких показателей, значения которых устанавливают эффективность ППР (функционалы оценивания). Одной из важнейших характеристик таких функционалов является их ингредиент. Показатель эффективности имеет положительный ингредиент, если предпочтительны его максимальные значения. Формально это отображает равенство: $F = F^+$. Если при принятии решения предпочтительны меньшие значения, считается, что показатель имеет отрицательный ингредиент, $F = F^-$.

При формализации категорий риска вводят функции риска, которые определяют в форме линейного преобразования элементов функционала оценивания $F = \{f_{kj}\}$ к принятым в модели ТИ относительным единицам измерения. Элементы матрицы риска $Z = \{z_{kj}\}$ находят по одной из двух формул:

1) если $F = F^+$, то

$$z_{kj}^- = \beta_j^{\max} - f_{kj}^+, \quad k=1, \dots, m, \quad j=1, \dots, n,$$

где $\beta_j^{\max} = \max_{x_k \in X} f_{kj}^+$;

2) если $F = F^-$, то

$$z_{kj}^- = f_{kj}^- - \beta_j^{\min}, \quad k=1, \dots, m, \quad j=1, \dots, n,$$

где $\beta_j^{\min} = \min_{x_k \in X} f_{kj}^-$.

Очевидно, матрица риска имеет отрицательный ингредиент $Z = Z^- = \{z_{kj}^-\}$.

Величины элементов матрицы z_{kj}^- указывают на убытки (неиспользованные возможности), которые может получить СПР в случае выбора им k -ой стратегии S_k в условиях j -го состояния экономической среды θ_j , в сравнении с результатом, который получил бы СПР при выборе самой выгодной для него стратегии в условиях этого же состояния θ_j . Матрица риска показывает, насколько выгодно реализуются, выбранной чистой стратегией, существующие возможности достижения успеха при наличии риска.

4.1.4. Процедуры формирования игровых моделей принятия решений

Остановимся на содержании этапов процесса формирования игровых моделей задач принятия решений с учетом различных категорий неопределенности. Изложение проведем на примере игры двух игроков с нулевой суммой. При формировании необходимо определить и представить правила, которые описывают сущность конфликтной ситуации и устанавливают:

- выбор способа действий игроков на каждом этапе игры;
- объем необходимой информации, которой владеет каждый игрок в момент выбора своего способа действия;
- плату (оценку степени рациональности действий) каждого игрока после завершения любого этапа игры.

Чистой стратегией игрока называется совокупность рекомендаций относительно ведения игры от начала к ее завершению. Игра называется конечной, если у каждого игрока есть конечное количество стратегий. В противоположном случае игра является бесконечной. Если игра является конечной, а результаты решений игроков можно выразить в денежном эквиваленте или с помощью других ценностей игроков, тогда в случае парной игры эти платежи удобно представить виде платежной матрицы. Решение игры заключается в нахождении чистых стратегий для каждого игрока, которые максимизируют выигрыш победителя и одновременно минимизируют проигрыш проигравшего игрока.

Одной из задач теории игр является выявление возможности определенного равновесия, которое называется компромиссом, который в наибольшей степени удовлетворяет всех участников. Если можно считать, что выигрыш первого игрока всегда совпадает с

величиной проигрыша второго, тогда анализируя платежную матрицу выигрышей первого игрока, иногда можно найти оптимальные чистые стратегии обоих игроков.

Пусть известна матрица платежей $F = \{f_{kj} : k=1, \dots, m; j=1, \dots, n\}$ парной игры с нулевой суммой, где элемент платежной матрицы f_{kj} – это выигрыш первого игрока, то есть сумма, которую ему платит второй игрок (проигрыш второго игрока) в случае использования первым игроком своей чистой стратегии $s_k \in St$, а вторым игроком – своей чистой стратегии $\theta_j \in \Theta$ ($k=1, \dots, m; j=1, \dots, n$).

Решить игру означает найти оптимальную стратегию для каждого игрока, которая при многократном повторе игры обеспечивает игроку максимально возможный средний выигрыш (или минимально возможный средний проигрыш). Для нахождения этой пары стратегий используют «принцип минимакса», сущностью которого является рассуждение, что противник сделает все для того, чтобы помешать достижению своей цели противником. Стратегию первого (второго) игрока называют оптимальной, если при ее многократном применении выигрыш (проигрыш) первого (второго) игрока не уменьшается (не увеличивается), какие бы стратегии не применял противник.

Пусть для первого игрока $F = F^+$, поэтому платежную матрицу выигрышей он анализирует, исходя из требований максимизации гарантированного выигрыша, а именно: для каждой своей чистой стратегии s_k ($k = 1, \dots, m$) он определяет минимальное значение выигрыша:

$$a_k^+ = \min_{\theta_j \in \Theta} f_{kj}^+, \quad k=1, \dots, m,$$

и находит чистую стратегию s_{k_0} , для которой

$$a_{k_0}^+ = a^+ = \max_{s_k \in St} a_k^+ = \max_{s_k \in St} \min_{\theta_j \in \Theta} f_{kj}^+.$$

Число a^+ называется нижней ценой игры, или максимином, а соответственно чистая стратегия s_{k_0} первого игрока называется максиминной. Второй игрок имеет целью минимизацию своего гарантированного проигрыша. Для него функционал $F = F^-$, а потому для каждой чистой стратегии θ_j игрок определяет величину максимального проигрыша:

$$\beta_j^- = \max_{s_k \in S} f_{kj}^-, \quad j = 1, \dots, n,$$

а затем находит такую чистую стратегию, что

$$\beta_{j_0}^- = \beta^- = \min_{\theta_j \in \Theta} \beta_j^- = \min_{\theta_j \in \Theta} \max_{s_k \in St} f_{kj}^-.$$

Число β^- называется верхней ценой игры, или минимаксом, а соответствующая чистая стратегия θ_{j_0} второго игрока называется минимаксной. Минимаксные чистые стратегии s_{k_0} и θ_{j_0} являются устойчивыми, то есть образуют оптимальную пару стратегий в том случае, когда нижняя цена игры равняется верхней. Тогда платежная матрица F содержит элемент $f_{k_0 j_0}$, удовлетворяющий условию:

$$f_{k_0 j_0} = a^+ = \beta^-$$

(этот элемент является минимальным в k_0 -ой строке и максимальным в j_0 -ом столбце). Элемент $f_{k_0 j_0}$ называется седловой точкой матрицы F , величина

$$V^* = a^+ = \beta^- = f_{k_0 j_0} \quad (4.3)$$

является чистой ценой игры, а игра называется игрой с седловой точкой. Если игра имеет седловую точку, то чистые стратегии s_{k_0} и θ_{j_0} являются оптимальными. При этом совокупность стратегий s_{k_0} , θ_{j_0} и цена игры $V^* = a^+ = \beta^-$ образуют решение игры. Решение игры обладает свойством, что если один из игроков придерживается своей оптимальной стратегии, то отклоняться от своей оптимальной стратегии для второго игрока невыгодно.

В общем случае, когда игра не имеет седловой точки, а минимаксные чистые стратегии – неоптимальные, значения цены игры удовлетворяют условию $a^+ \leq V \leq \beta^-$. Это значит, что нахождение решения игры в чистых стратегиях становится невозможным и каждая из сторон может улучшить свое состояние многократным случайным выбором своих определенных чистых стратегий из некоторых подмножеств (принадлежат множествам альтернативных чистых стратегий). Такие стратегии называются смешанными.

Пусть $P = (p_1, \dots, p_m)$ — распределение вероятностей относительно выбора чистых стратегий первым игроком при построении своей смешанной стратегии, которое в дальнейшем будем помечать через s_p . Здесь p_k — вероятность выбора первым

игроком чистой стратегии s_k и при этом $\sum_{k=1}^m p_k = 1$, $p \geq 0$, $k = 1, \dots, m$.

Аналогично для второго игрока смешанную стратегию обозначим через θ_Q , где $Q = (q_1, \dots, q_n)$, а q_j — вероятность выбора вторым игроком чистой стратегии θ_j при условии, что $\sum_{j=1}^n q_j = 1$, $q_j \geq 0$, $j = 1, \dots, n$.

Среди смешанных стратегий первого и второго игроков отыщем оптимальные и обозначим их через s_{P^*} и θ_{Q^*} , соответственно. Тогда в общем случае оптимальным решением игры будет совокупность $(s_{P^*}; \theta_{Q^*})$.

Если первый игрок выбрал смешанную стратегию s_P , $P = (p_1, \dots, p_m)$, а второй — смешанную стратегию θ_Q , $Q = (q_1, \dots, q_n)$, то ожидаемый выигрыш первого игрока (проигрыш второго игрока) составляет величину:

$$V = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n f_{kj} p_k q_j \quad (4.4)$$

Методы поиска оптимальных решений игры базируются на таких положениях:

1) каждая конечная игра двух лиц с нулевой суммой имеет, по крайней мере, одно (оптимальное) решение, возможно в смешанных стратегиях;

2) если один из игроков применяет свою оптимальную смешанную стратегию, то его выигрыш равняется цене игры независимо от того, с какими вероятностями (относительными частотами) второй игрок будет использовать стратегии, которые вошли в его оптимальную смешанную стратегию.

Согласно основной теореме теории игр [23, 24]:

$$\min_{P \in \Delta_P} \max_{Q \in \Delta_Q} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n f_{kj} p_k q_j = V^*, \quad (4.5)$$

где

$$\Delta_P = \left\{ P = (p_1, \dots, p_m) : \sum_{k=1}^m p_k = 1 \right\}; \quad (4.6)$$

$$\Delta_Q = \left\{ Q = (q_1, \dots, q_n) : \sum_{j=1}^n q_j = 1 \right\}; \quad (4.7)$$

$$V^* = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n f_{kj} p_k^* q_j^*; \quad (4.8)$$

$$\sum_{k=1}^m p_k^* = 1; \quad p_k^* \geq 0; \quad k = 1, 2, \dots, m; \quad (4.9)$$

$$\sum_{j=1}^n q_j^* = 1; \quad q_j^* \geq 0; \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (4.10)$$

при этом

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n f_{kj} p_k q_j^* \leq V^* \leq \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n f_{kj} p_k^* q_j. \quad (4.11)$$

В ТИ установлено, что цена игры имеет верхний и нижний пределы, а именно:

$$\alpha^+ \leq V^* \leq \beta^-.$$

Подведем итоги анализа ППР на основе формализма описанных выше моделей теории игр:

1) решить конечную игру с нулевой суммой означает найти оптимальные чистые стратегии игроков, если игра имеет седловую точку; или же найти оптимальные смешанные стратегии игроков s_p^* и θ_{q^*} , а точнее — векторы $P^* = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_m^*)$ и $Q^* = (q_1^*, q_2^*, \dots, q_n^*)$, которые удовлетворяют теореме о минимаксе, то есть условия (4.5) – (4.11), а также рассчитать цену игры;

2) любая парная матричная игра имеет решение, если допускается использование смешанных стратегий;

3) игра без седловой точки ($\alpha^+ < \beta^-$) имеет решение, возможно, не единственный, если хотя бы один из игроков использует оптимальную смешанную стратегию.

Таким образом, общепринятое понятие оптимума для задач ППР расширяется за счет включения в модель выбора таких важных элементов, как компромиссное решение, которое удовлетворяет разным сторонам конфликта. Эти и другие особенности теории игр позволяют использовать ее методы для решения разнообразных задач, которые возникают в различных системах ППР. В терминах моделей прикладной теории игр могут быть представлены различные составляющие процедур системного анализа, оценивающего эффективность вариантов выбора альтернатив при учете различных видов неопределенности.

4.2. Модели принятия многокритериальных решений с учетом неоднородной неопределенности данных

В разделе представлены результаты системного анализа для широкого круга многокритериальных задач принятия решений, которые характеризуются различными видами неопределенности – статистическая, нечеткая, интервальная, смещенная, например, интервально-статистическая и другими математическими формами представления факторов неопределенности данных или же условий [23, 28]. В качестве основной концепции формализации моделей рационального выбора здесь принят распространенный подход «скаляризации» – формирования обобщенной целевой модели, интегрального индикатора неопределенности, объединяющей разнородные частные составляющие. Построенная таким образом обобщенная характеристика далее используется при моделировании процессов области системного анализа.

4.2.1. Нечетко-статистические модели и процедуры управления

Изложение нечетко-статистического метода управления опирается на результаты работы [29]. Моделирование и регулирование сложных технологических процессов, для которых во многих случаях отсутствуют математические модели составляющих их объектов и общие законы управления, во многих случаях основывается на всестороннем анализе данных и результатов применения программно-целевого управления – мониторинге. Далее для определенности под сложными технологическими процессами будем понимать процессы управления грузовыми железнодорожными перевозками на полигоне железных дорог Украины, сведения о которых (с точностью до каждой технологической операции) непрерывно накапливаются в базах и хранилищах данных и преобразуются в базы знаний автоматизированных систем управления Укрзаліззниці. Ясно, что в данных мониторинга такого рода отражены все особенности объекта управления, реализации технологических процессов, а также организации управления ним на различных уровнях. Задача автоматизированного преобразования данных мониторинга в форму математических моделей анализа и управления, в данном случае на основе нечетких экспертных систем, представляет значительную

научно-техническую проблему. Предлагаемый метод нечетко-статистического управления (НСУ) имеет целью объединить различные формы описания одного и того же процесса, характеризующие его нормативные (качественные, субъективные) и результирующие (эксплуатационные, фактические) параметры. Введение в модель задачи статистической информации, дополнительной по отношению к показателям степени принадлежности нечетких подмножеств, и представляющей некоторые другие свойства и особенности поведения исследуемых процессов, основывается, прежде всего, на различии между вероятностной и расплывчатой концепциями представления данных [26, 27]. Может быть определена вероятность расплывчатого события как дополнительное свойство, чтобы получить более полное и точное описание исследуемого процесса. Согласно [26, стр. 183], расплывчатое событие в пространстве R^n с заданной в нем вероятностной мерой P является расплывчатым подмножеством, когда его функция принадлежности μ_A измерима. Вероятность соответствующего расплывчатого события задается интегралом

$$P(A) = \int_{R^n} \mu_A(x) dP = \int_{R^n} (\mu_A(x) f_A(x)) dx, \quad (4.12)$$

где $f_A(x)$ – функция плотности вероятности.

Таким образом, вероятность расплывчатого события определяется с помощью оператора математического ожидания $P(A) = E(\mu_A)$. Причем в уравнения вида (4.12) нечеткие и статистические величины входят одновременно и подобным образом, и это далее использовано в системах НСУ.

Классический модуль нечеткого управления на основе обработки лингвистических моделей рассматриваемых процессов основан на правилах нечеткой импликации $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$, и состоит из следующих этапов [27]:

- оценка текущего состояния и “фазификация” входных данных (оценка степеней принадлежности, сопоставление нечетких подмножеств и входных данных);
- модификация нечетких переменных-заключений для всех правил;
- формирование результирующих нечетких множеств (или же их суперпозиции);

– отображение результирующих нечетких множеств в единственное управляющее воздействие (“дефазификация, скаляризация”).

Здесь на этапе выбора значения управляющего параметра могут быть использованы различные методы, в частности, методы центра тяжести, максимума функции принадлежности и др., представленные в [29]. Графическая иллюстрация схемы нечеткого вывода показана на рис. 4.1.

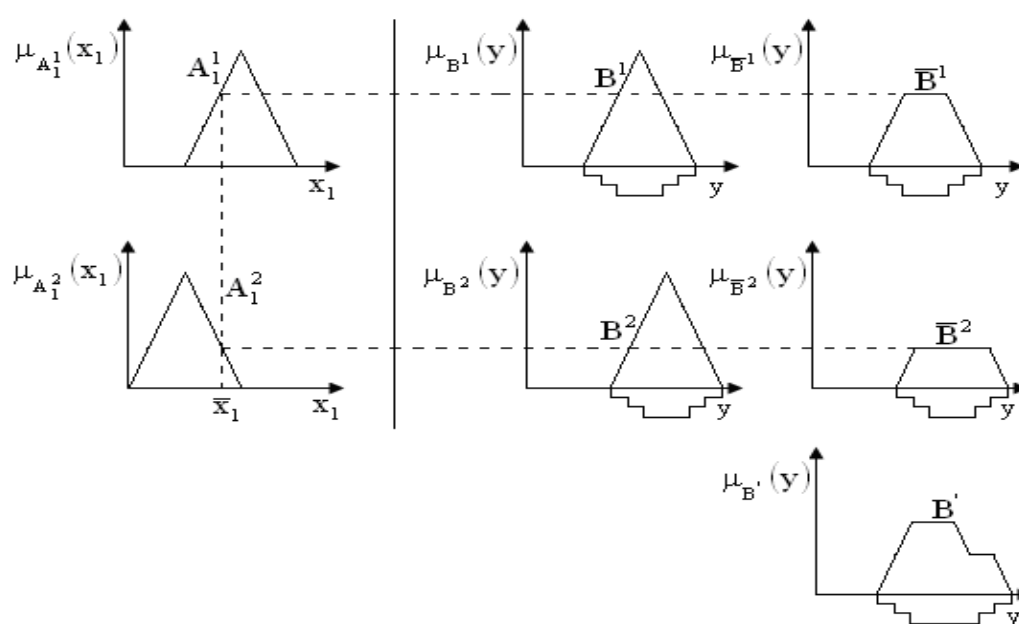


Рис. 4.1. Графическая схема нечеткого вывода

Нетрудно заметить, что представленный метод выбора управления априори предполагает одинаковые вероятности всех возможных значений как входных, так и выходных параметров, относительно которых, в конечном счете, и вычисляется управление. Например, значения параметров управления, имеющие одинаковые (максимальные) значения функции принадлежности, могут различаться по статистическим свойствам – имеют различные вероятности реализации на практике. Неоднородность статистических свойств, как входных переменных, так и управляющих величин, в большинстве случаев имеет место при исследовании параметров сложных технологических процессов. Именно это обстоятельство обосновывает актуальность разработки

методов управления в условиях неопределенности, которые объединяют такие различные категории представления наблюдаемых данных как нечеткие, выражающие субъективную интерпретацию процессов, так и статистические свойства, полученные путем их соответствующего анализа. Композиционные модели и методы управления, использующие и статистическую и нечеткую интерпретацию данных, далее будем называть нечетко-статистическими методами управления.

Помимо стандартной схемы нечеткого производственного управления рис. 4.1 показывает информационную сущность отличий нечетко-статистического метода [19]. На рисунке указаны статистические характеристики переменных-заключений, которые условно представлены в форме гистограмм. Эти данные позволяют рассчитать вероятности нечетких подмножеств $P(\tilde{A})$ различных α -уровней, необходимые для нахождения значений (4.12). Нечеткая компонента характеризует субъективную, нормативную, характеристику состояния объекта, а статистическая – предысторию функционирования.

Автоматизированное формирование статистических описаний технологических процессов в случае грузовых перевозок может выполняться по результатам их мониторинга, что обеспечивает адаптацию систем управления. Возможны несколько способов введения в нечеткие модели статистической информации. Далее рассмотрена модификация классического нечеткого управления.

4.2.2. Постановка задач нечетко-статистического моделирования

Для более полного понимания особенностей предлагаемого метода моделирования и выбора решений рассмотрим несколько содержательных постановок задач управления, условия осуществления и свойства решений которых характеризуются статистической и нечеткой информацией. Они имеют различную содержательную базу, но единую формальную структуру, традиционную для использования концепций нечеткого моделирования. Наряду с этим предполагается наличие данных о подобных ранее реализованных задачах, которые составляют дополнительный статистический базис, используемый далее для более обоснованного выбора управления.

Содержание задач по выбору управления ($\tilde{Y}$) при неопределенности далее сводится к оценке необходимой величины некоторого ресурса, либо прогнозу ожидаемого времени выполнения задания при использовании нормативного ресурса. Управление зависит от двух характеристик: объемного показателя ($\tilde{X}_1$) и удельной трудоемкости ($\tilde{X}_2$). Объемный показатель, показатель трудоемкости, а также требуемый ресурс представляются в виде нечетких величин для двух возможных случаев выбора управлений – функционирования системы в условиях близких к нормальным ($\tilde{S}_1(\tilde{A})$), либо при функционировании с перегрузкой ($\tilde{S}_2(\tilde{B})$). В качестве первого примера задачи выбора нечеткого управления рассматривается программная система по обработке сообщений от множества абонентов. Здесь $\tilde{X}_1$ – средний объем поступающих за некоторый период сообщений, $\tilde{X}_2$ – оценка их удельной трудоемкости (сложность обработки отдельного сообщения), $\tilde{Y}$ – планируемое время обработки сообщений (предполагаемые затраты). Второй пример связан с переработкой вагонов на станциях. В этой задаче $\tilde{X}_1$ – средняя степень загрязнения вагонов после выгрузки, $\tilde{X}_2$ – оценка удельной трудоемкости (размеры и степень смерзания фрагментов и др.), $\tilde{Y}$ – прогнозируемое время подготовки вагонов под погрузку. Представленные задачи выбора управления обладают рядом особенностей, из которых для нашего исследования наиболее существенными является очевидная невозможность задания точных значений параметров $\tilde{X}_1$ и $\tilde{X}_2$, оценивающих условия задач по выбору управлений $\tilde{Y}$.

В указанных примерах необходимость нечетко-статистического управления может быть обусловлена, по меньшей мере, двумя обстоятельствами, затрагивающими переменные-посылки и переменные-заключения правил продукций модуля нечеткого управления. Первое связано с тем, что, например, согласно предыдущим данным частоты разных возможных значений объемного показателя ($\tilde{X}_1$) и показателя удельной трудоемкости ($\tilde{X}_2$) были не одинаковы. В то же время для одних и тех же предварительных оценок степеней достоверности величин требуемых ресурсов (в некоторой области их возможных значений) частоты реализаций фактических времен (затраченных объемов ресурсов) оказываются различными. Очевидно, что операция дефазификации,

как выбор значений параметров управлений (переменных-заключений относительно прогноза требуемых ресурсов) среди одинаковых по достоверности величин (см. рис. 4.1) должна учитывать статистическую природу рассматриваемых процессов.

Содержательно более сложным является учет статистической неоднородности значений переменных-посылок при выборе величин управлений. Заметим, что в структуре стандартного нечеткого вывода, рис. 4.1, роль переменных-посылок состоит в том, чтобы выполнить фаззификацию – соотнести текущую ситуацию (X_*) с описанием каждого нечеткого правила и представить оценку меры их соответствия в виде степени принадлежности ($X_* \in \tilde{A}_k(X)$), где $\tilde{A}_k(X)$ описывает одну из нечетких переменных рассматриваемого правила продукции. Классическая схема (рис 4.1) построена исходя из предположения, что значение (X_*) известно точно, или же есть некоторая модель данных, характеризующих входные данные, в том числе нечеткие величины [29]. Именно это позволяет однозначно по некоторой процедуре вычислить степень принадлежности $\mu_F(X_* \in \tilde{A}_k(X))$. В общем случае статистические свойства переменных-посылок служат дополнительной информацией для расчета более обоснованных значений оценок $\mu_F(X_{*\Delta} \in \tilde{A}_k(X))$. Разумеется, что для различных форм описаний значений входных множеств, представляющих ситуации принятия решений при неопределенности ($\tilde{X}_*$), потребуются соответствующие методики вычисления степеней принадлежности $\mu_F(\tilde{X}_* \in \tilde{A}_k(X))$.

4.2.3. Модуль нечетко-статистического управления

Содержательные основания для применения нечетко-статистического управления как при решении задач фаззификации, так и при выборе результирующего воздействия, дефаззификации, позволяют определить НСУ следующим образом, модифицирующим классическое нечеткое управление [29] с учетом статистической неоднородности процессов на основе выражения (4.12). Для наглядности и краткости изложения остановимся на представлении нечетко-статистического управления в виде графической схемы, изображенной рис. 4.2, которая без труда может быть определена аналитически, следуя результатам работы [27].

Данные, представленные на рис. 4.2, соответствуют рассмотренным в п. 4.2.2 примерам задач по выбору управления, когда правила $\{\pi_j(X \mapsto Y)\}_q$ имеют две нечеткие переменные-посылки $(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2)$ и нечеткую переменную-вывод $\tilde{Y}$. Значения величин $(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2)$ измеряются с помощью показателей $\{u, v\}$. Верхнее правило соответствует ситуации (A_1, A_2) , частота которой при наблюдениях составляла n_1 , в то время как частота ситуации (B_1, B_2) равнялась n_2 . В виде условных гистограмм $G(X_i); i \in \{1, 2\}$ на рис. 4.2, также представлены свойства неоднородности частот возможных значений переменных-посылок и переменных-заключений. В качестве результирующих значений величин, используемых для установления степеней принадлежности наблюдаемых переменных-посылок, на рис. 4.2 указаны (X_1, X_2) . В рамках нечетко-статистического вывода эти значения не определяются однозначно по данным наблюдений (измерений состояний системы), а рассчитываются на основе процедур, подобных вычислению математического ожидания случайных величин, представленных гистограммами. Как показано на рисунке, переменные-заключения $\tilde{Y}$ могут модифицироваться на основе измерений степеней принадлежности посылок в соответствии с различными правилами – Мамдани (минимума), Ларсена (произведения) и др. [27]. В соответствии с одной из основных форм классической процедуры нечеткого управления модификация переменных-заключений $\tilde{Y}$ выполняется с использованием правила Мамдани для степеней принадлежности переменных-посылок (модификация правой часть правила по уровню меньшей из степеней принадлежности посылок).

4.3. Метод управления типа Такаги-Сугено в условиях многократной неопределенности данных

В предыдущем пункте управление в ИТС системах рассматривалось при однокомпонентных (одной размерности) неопределенностях. Вместе с тем в прикладных задачах исследования транспортных систем приходится сталкиваться с многокомпонентными (неоднородными) неопределенностями, методология учета которых представлена далее в разделе.

4.3.1. Проблема управления техническими системами при многократной неопределенности данных

На практике управление сложными экономическими, технологическими процессами и объектами во многих случаях осуществляется в условиях многократной неопределенности и при отсутствии общих математических моделей их функционирования, а также соответствующих законов управления [15, 16, 21]. При этом оценка эффективности реализации действий проводится по значениям набора параметров нормативного, статистического, нечеткого и другого характера. Развитие методов и процедур управления, которые обеспечивают полное и корректное использование имеющихся данных, поступающих из различных источников, учитывая их взаимосвязи, расширяет возможности по созданию и реализации эффективных автоматизированных адаптивных систем управления. В работе исследуется проблема математического моделирования и управления сложными процессами или объектами в случаях, когда одновременно имеют место несколько различных видов неопределенности: случайность, неточность, нечеткость, их комбинации. В большинстве случаев [27] моделирование и управление осуществляется на основе однородных по виду неопределенности величин моделей либо путем перехода к ним. Развитие моделей и процедур управления, которые корректно используют по возможности все имеющиеся данные, полученные из нескольких источников или в разной форме, расширяет возможности методов моделирования сложных систем.

В работе [29] разработан метод и процедуры нечетко-статистического управления (НСУ), обеспечивающие объединение в рамках классической модели нечеткого управления [27] как априорной нечеткой, так и накапливаемой статистической информации. Такие модели можно рассматривать как адаптацию базы нечетких правил.

В упомянутой работе [29] исследована возможность и выполнено усовершенствование методов и средств управления НСУ применительно к условиям неоднородной и многократной неопределенности. Предложена новая процедура формализации условий моделирования систем при различных типах неопределенности параметров, представленных индексом

неопределенности, и усовершенствованные методы нечеткого управления. Для формирования математической модели, представляющей многокомпонентную неопределенность разных видов, был введен параметр – индекс достоверности как среднее геометрическое оценок нормированных мер неопределенностей отдельных компонентов. Модификация процедуры нечеткого управления Такаги-Сугено выполнена на основе индекса неопределенности.

4.3.2. Источники и формализация условий многократной (многокомпонентной) неопределенности данных

В работе [28] приведены возможные типы, источники, модели формализации и методы реализации задач принятия решений с различными типами неопределенности данных, сформулированных подобно моделям задач математического программирования. Здесь также отмечен ряд случаев возникновения величин, имеющих многократные неопределенности данных. Анализ форм представления параметров неопределенности или состояний объектов позволяет выделить ряд их источников, а именно:

- 1) «природа» или способ формирования контролируемых параметров математических моделей (детерминированные, статистические, нечеткие, нечетко-статистические, статистически-нечеткие и др. величины);
- 2) неоднозначность интерпретации результатов наблюдений явлений, использование различных методов измерений и описаний характеристик (различные допущения о свойствах процессов, требований точности и др.);
- 3) наличие нескольких источников информации, которые могут иметь разные методы наблюдений и не совпадать во времени;
- 4) представление сложных форм неопределенных данных через обобщение более простых и др.

Для определенности приведем ясные примеры возникновения величин с многокомпонентной неопределенностью. Важной задачей моделирования и управления на железнодорожном транспорте является оценка остаточного ресурса несущей конструкции железнодорожного экипажа. Здесь используется величина «удельная наработка», представляющая расчетно-экспериментальную оценку наработки несущей конструкции вагона или же локомотива на один

цикл колебаний. При формировании «удельной наработки» используются: эквивалентная сила при некоторой скорости в условиях движения по радиусу заданного типа, вероятность движения с установленной скоростью, а также вероятность движения по установленному радиусу (прямая, кривые разного радиуса и пр.). Двойственная, нечетко-случайная природа величины обусловлена тем, что вероятности условий (радиусы кривых) могут быть оценены, а для скоростей могут быть получены только нечеткие или же интервальные модели описания.

Другим примером нечетко-случайной величины (НСВ, представляющей измеримую функцию из вероятностного пространства в наборе нечетких величин [28]), как математической модели при описании нечетко-статистических явлений, может служить аналог задачи (Negiot and Ralescu), представленный как “измерение” «Спроса на товар» в случайно выбранных местах-пунктах с использованием нечетких значений – «Высокий», «Очень высокий», «Около 6 тыс.» и др.

Эта задача может быть расширена. Пусть после формирования НСВ «Спрос» проведено последовательно еще два измерения спроса и получены две стохастические модели оценки спроса – $P1[h(x,y)>h^*]$, $P2[h(x,y)>h^*]$. Необходимо построить некоторую величину, учитывающую всю информацию об измерениях «Спроса на товар», которая в этом случае будет математической моделью, представляющей многокомпонентную неопределенность, обобщающей ее разные виды – далее это индекс достоверности $d(x)$.

Формирование математической модели, представляющей многокомпонентную неопределенность разных видов – индекс достоверности $d(x)$, предлагается определять средним геометрическим нормированных моделей отдельных компонент:

$$d(x) = \left[d_{D_1^N}(\bar{x}_1) \cdot d_{D_2^N}(\bar{x}_2) \cdot \dots \cdot d_{D_n^N}(\bar{x}_n) \right]^{1/n}. \quad (4.16)$$

Такое представление математической модели в конечном счете соответствует большинству известных способов формализации условий неопределенности различных типов (статистическая, нечеткая и др.), оставляя в стороне вопрос получения собственно частных моделей, а кроме того позволяет построить модели

управляемых процессов по схемам нечеткого [29] или же НСУ управления (см. п. 4.2).

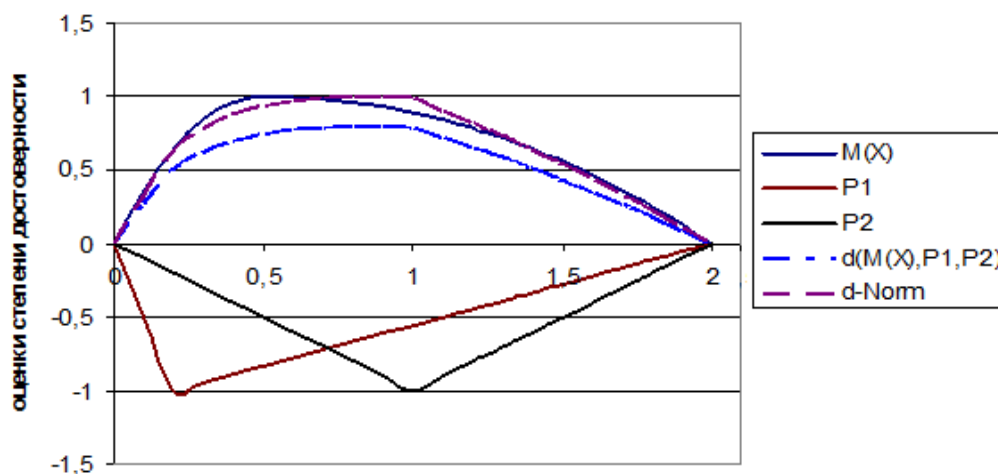


Рис. 4.3. Формирования индекса достоверности при трехкомпонентной неопределенности

На рис. 4.3 приведен пример формирования индекса достоверности при трехкомпонентной неопределенности ситуации моделирования, подобной «Спросу на товар». Здесь выпуклая вверх сплошная линия представляет нечеткую компоненту $\mu(X)$; отрицательной области по оси ординат соответствуют стохастические модели $P1[*]$, $P2[*]$, пунктирные линии – ненормированные и нормированные (область значений $[0; 1]$) значения индекса $d(x)$. Далее показатель достоверности значений, индекс $d(x)$, может быть использован в процедурах вывода типа НСУ и др., подобно степени принадлежности при обработке нечетких величин.

4.3.3. Модифицированное управления Такаги-Сугено

Модифицированное управление типа Такаги-Сугено (Т-С управление) реализуется согласно обобщенной схеме, представленной на рис. 4.4. Как известно, нечеткие величины (здесь и все формы многократной неопределенности) присутствуют только в посылках правил управления, тогда как завершающее решение выбирается на основе детерминированных функций. Степени неопределенности, *индексы достоверности*, характеризующие исследуемые состояния системы, оцениваются весовыми коэффициентами при исчислении интегрального показателя,

учитывающего результаты применения каждого из отдельных правил.

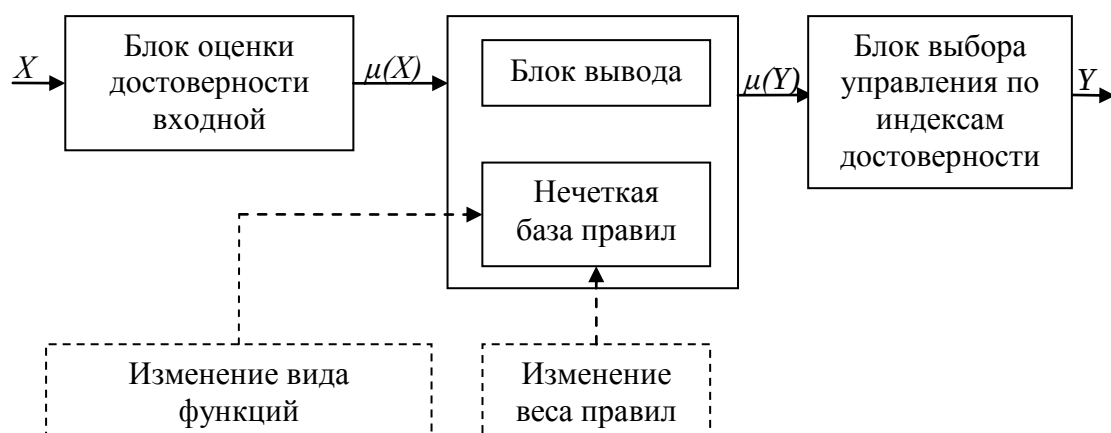


Рис. 4.4 Модифицированное управление Такаги-Сугено на основе индексов достоверности

В модифицированном модуле Т-С управления для каждого из правил вместо степеней принадлежности $\mu_F(\tilde{X}_* \in \tilde{A}_k(X))$ правил используются обобщенные значения $d(x)$, тогда как остальные алгоритмы вычисления достоверности правил сохраняются. Качественно новым является метод выбора интегрированного управления, который обобщает результаты отдельных правил и построен на аксиоматике модели компромисса «относительная уступка» [16], вместо модели компромисса «абсолютная уступка», неявно используемой в классической схеме Т-С управления [27].

В модуле многократно неопределенного Т-С управления используется база правил следующего вида:

$$\begin{aligned} R^{(1)} : IF (x_1 \text{ э } D_1^1 \text{ AND } x_2 \text{ э } D_2^1 \dots \text{ AND } x_n \text{ э } D_n^1), THEN y_1 = f^{(1)}(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ R^{(N)} : IF (x_1 \text{ э } D_1^N \text{ AND } x_2 \text{ э } D_2^N \dots \text{ AND } x_n \text{ э } D_n^N), THEN y_N = f^{(N)}(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (4.17)$$

где $R^{(k)}$ – отдельные правила; D_j^i – обобщенные формы неопределенных, нечетко-статистических или многокомпонентных множеств, которые различны для правил; в правой части правил THEN указаны некоторые функции, использующие оценки входных «сигналов» X_j .

Для управления на основе правил (4.17) необходимо уметь вычислить оценки входных «сигналов» x_j (см. схему рис. 4.4), а также знать «вес» каждого из правил, по данным рис. 4.5.

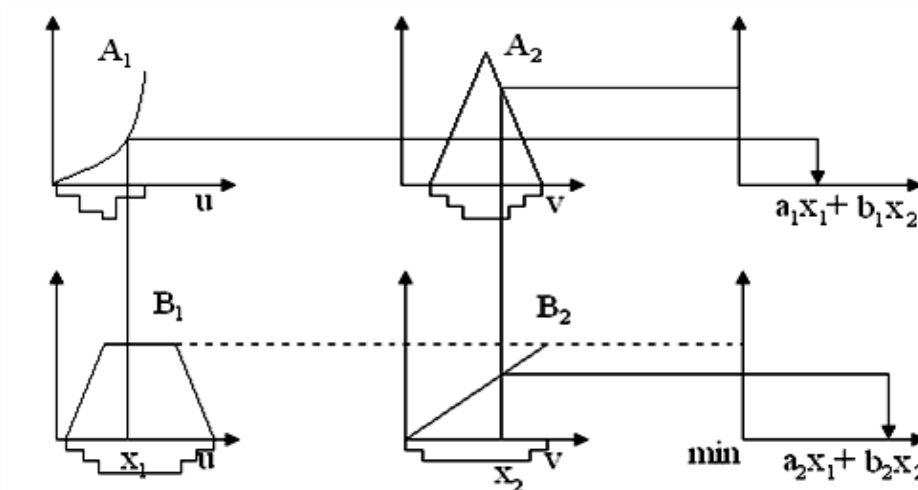


Рис. 4.5. Графическая схема нечетко-статистического управления типа Такаги-Сугено

Блок выбора управления на рис. 4.4 предусматривает формирование результирующего значения на основе результатов отдельных правил (4.17). В частности, результат может соответствовать значению параметра управления, в которой показатель неопределенности имеет лучшие оценки. В базовой схеме управления Такаги-Сугено выходное значение нечеткой модели зависит от ее структуры – базы знаний и параметров: функций принадлежности, реализации логических операций, метода скаляризации (дефазификации), коэффициентов линейных функций в выводах правил. Аксиоматическая форма выбора будет рассмотрена в следующем пункте.

Выделенные пунктиром блоки в схеме 4.4 являются необязательными и могут использоваться с целью оптимизации параметров системы. Блок «Изменение вида функции принадлежности величин» включает перемещение функций в пределах заданного диапазона, а также растяжение (сжатие) функции принадлежности. В блоке «Изменение веса правил» проводится

подбор веса заданного правила, при котором достигается минимум среднеквадратической невязки выходной характеристики системы.

4.3.4. Модуль Такаги-Сугено с аксиоматическим нелинейным многокомпонентным управлением

Из предыдущего пункта известно, что правила модуля Т-С управления имеют вид (4.17), для которого D_j^i – обобщенная модель условий неопределенности, когда оценка степени достоверности входных «сигналов» вычисляется согласно (4.16). Кроме того, по схеме Т-С управления рассчитываются «степени выполнения правил» – методы Мамдани, Ларсена:

$$W^1 = \begin{cases} \min \{d_{D_1^1}(\bar{x}_1), d_{D_2^1}(\bar{x}_2), \dots, d_{D_n^1}(\bar{x}_n)\} \\ d_{D_1^1}(\bar{x}_1) \cdot d_{D_2^1}(\bar{x}_2) \cdot \dots \cdot d_{D_n^1}(\bar{x}_n) = \prod_j d_{D_j^1}(\bar{x}_j) \end{cases} \quad (4.18)$$

Затем по оценкам сигналов X_j вычисляются правые части (4.17) – функции

$$\bar{y}_1 = f^{(1)}(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n). \quad (4.19)$$

Остановимся подробнее на вопросе формирования выходного сигнала модуля управления Сугено, которое выполняется в соответствии с результатами работы [27]:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N w^k \bar{y}_k}{\sum_{k=1}^N w^k}. \quad (4.20)$$

Структура управления (4.20) является результатом аксиом предпочтения для выводов отдельных правил, значения которых обобщаются на основе принципа абсолютной уступки. Компромисс (4.20) приемлем для линейных систем, а его ограничением является отсутствие априорного представления об отношениях между результатами отдельных правил (4.17) в решении (4.20).

Рассмотрим другую, мультипликативную, модель компромисса правил (4.17), соответствующую принципу относительной уступки, которая обеспечивает формирование управления с аксиоматически установленным набором свойств решений согласно (4.17) [16]. С учетом этих свойств компромисса далее разрабатывается модифицированный метод многократно неопределенного управления Такаги-Сугено, использующий оценки активности правил согласно (4.16), (4.18), (4.19) и мультипликативную модель агрегации выводов правил (4.17).

Формирование структуры модели для определения компромиссной величины управления типа Такаги-Сугено, а значит и соответствующего метода неопределенного управления при заданных величинах мер неопределенности посылок (4.16) – (4.19), заключается в поиске обобщенного функционала на основе учета всех частных значений (4.17) $Y_j(k)$, $j=1,2,...,m$. При формулировке модели "справедливого" компромисса $\{Y_j(k)\}_{j=1}^m$ будем исходить из следующих свойств управления: симметрия (все Y_j являются равноправными); учитывается характеристика отклонения групповой оценки; а также величина показателя для каждого $Y_j: Y_j^*(k_j)$. Как известно, такой тип компромисса значений $Y_j(k)$, $j=1,2,...,m$ определяется моделью относительной уступки. При определении модели выбора для каждого Y_j формируется нормируемая характеристика вида

$$\lambda_j = (Y_j^*(k_j) - Y_j^c(k_c)) / \max\{Y_j^*, Y_j^c\}, \quad (4.21)$$

а компромиссно значение рассчитывается как обобщенная функция вида произведения:

$$\prod_{i=1}^b \lambda_i = \prod_{i=1}^m Y_i^c(k_c) \Rightarrow \max_{k_c}, \quad (4.22)$$

значения которой далее максимизируют в задачах выбора оптимального управления. В (4.21), (4.22) через величины Y_j обозначено значение функции согласно (4.17), (4.19), k_c – номер

итерации компромиссной модели (4.21), для управления Такаги-Сугено $k_c=1$.

С учетом (4.21), (4.22) получаем следующий модифицированный метод управления типа Такаги-Сугено:

$$Y = \sum_i \omega_i \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n y_i^{\omega_i}}, \quad (4.23)$$

где n – количество активных правил вывода; y_i – функции выходных величин, полученные в результате выводов по правилу i ; ω_i – степень неопределенности правила « i » (4.18).

При нормировке степеней неопределенности согласно $\omega_i / \sum \omega_i$ модель (4.16) упрощается, принимая вид (4.22). Следует отметить, что модели управления (4.22), (4.23) реализуют нелинейную аппроксимацию нечетких (многокомпонентных неопределенных – (4.16)) величин.

4.3.5. Сравнительный анализ аддитивной и мультипликативной моделей управления Такаги-Сугено

На рис. 4.6 представлены результаты решения задачи по выбору управления на основе линейной и нелинейной нормированных функций $F1$ и $F2$, характеризующих некоторые неопределенные величины (например, нечеткую и статистическую). Область допустимых значений $F1$ и $F2$ – X в интервале $[1; 3]$. Зависимости для $F1$ и $F2$ указаны на рис. 4.6, причем для $F2$ они различаются показателями степени. На рис. 4.6-(а) показатель степени $(3/2)$, а для рис. 4.6-(б) он равен 2. Рисунки показывают качественное изменение свойств модели $F1+F2$, которая для данных рис. 4.6-(б) имеет два максимума ($F1=0$; $F1=1$). Укажем значения параметров компромисса как максимумов соответствующих функций: рис. 4.6-(а) по аддитивной модели $X=1.4$; $F1 = 0,2$; $F2=0,8255$; $F1+F2 = 1,0255$; мультипликативная модель $X=1.9$; $F1= 0,45$; $F2=0,55303$; $F1 \cdot F2=0,248863$; на рис. 4.6-(б) – аддитивная модель $X1=1.0$; $X2=3.0$; $F1+F2 = 1,0$; мультипликативная модель $X=1.8$; $F1= 0,4$; $F2=0,5184$; $F1 \cdot F2=0,20736$. Как видно из рисунка, при аддитивной модели

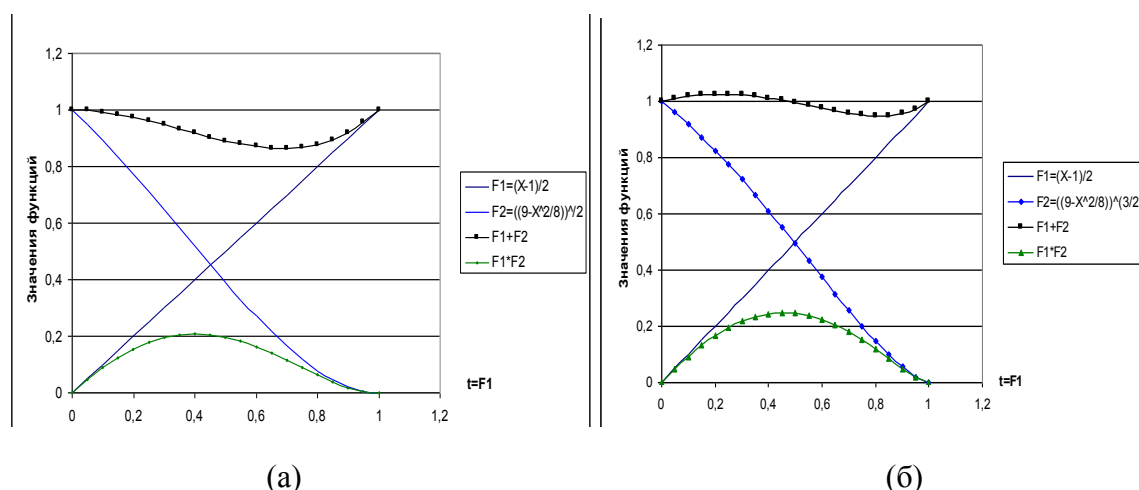


Рис. 4.6. Реализации аддитивной и мультипликативной моделей выбора управления в условиях многокомпонентной неопределенности данных

(соответствующей (4.20)) может иметь место неоднозначное решение, а при мультипликативной – единственное. Параметр $t=F1$. Отметим и достаточную устойчивость решения для мультипликативной модели ($X=1.8$ и $X=1.9$). Если считать $F1$ и $F2$ моделями неопределенности правил вывода классического нечеткого модуля Т-С управления [29], то согласно методу Мамдани для рис. 4.6- а) было бы получено решение – $X= 1.994$, а для – рис. 4.6-(б) $X=1.9$.

На основе изложенного выше приходим к следующим выводам. Усовершенствованный метод нечеткого управления типа Такаги-Сугено применим к условиям неоднородной и многократной неопределенности. При этом разработана новая процедура формализации условий моделирования систем при различных типах неопределенности параметров, представленных индексом неопределенности (4.16), а также построен мультипликативный метод формирования результирующего управления (4.23).

4.4. Нейронные сети в задачах формирования интеллектуальных систем транспорта, сети Хопфилда и Хэмминга

Для интеллектуальных систем транспорта, как и для других интеллектуальных систем, характерным является реализация при функционировании технической или технологической системы некоторых общих задач интеллектуального содержания (интерпретация сложных данных, обобщение, прогнозирование, сопоставление шаблонов на основе ассоциаций и др. [27]), а также использование специализированного инструментария – моделей и методов нечеткого моделирования, нейронных сетей, генетических алгоритмов и т.п. [31]. В разделе представлены простейшие возможности применения нейронных сетей для создания элементов интеллектуальных систем транспорта. В основу рассматриваемых моделей задач интеллектуального управления положена абстрактная модель ассоциативной памяти, которая позволяет одинаковым, подобным образом представить широкий круг задач диспетчерского управления. На основе системного анализа общей оперативной задачи диспетчерского управления можно установить ряд ее характерных признаков. А именно, выявить следующую структуру «нормативной» работы системы диспетчерского управления. На основе сигналов от «датчиков», контролирующих параметры системы управления, в том числе и от таймера, указывающего этапы развития процессов, требуется выполнить процедуру комплексной оценки данных, осуществить «интерпретацию» данных об имеющем место состоянии, далее на основе анализа – выбрать рациональное, предписанное нормативами в том числе, управление. По сути, имеет место нечеткая продукция: (распознать, оценить) – (выполнить действие). Такая процедура управления повторяется многократно, причем управляющие воздействия принимаются через некоторый интервал времени, или же в зависимости от поступающих «сигналов», данных о состоянии контролируемой диспетчером системы.

Заметим, что в рамках описанной процедуры можно реализовать распространенную систему регулирования процессов «по отклонению». В случае выхода некоторой совокупности параметров из установленных диапазонов – вырабатывается определенное корректирующее воздействие. Таким образом, можно представлять и

основу «машино – машинного» взаимодействия в интеллектуальных телематических системах.

Рассмотрим и оценим возможности реализации указанных выше систем диспетчерского управления на основе моделей нейронных сетей Хопфилда и Хэмминга [31].

Среди различных конфигураций искусственных нейронных сетей (НС) встречаются такие, в которых «обучение», вычисление весовых коэффициентов элементов модели, синапсов, выполняется только однажды перед началом функционирования сети. Эта процедура реализуется на основе информации об обрабатываемых данных, и все обучение сети сводится именно к этому расчету. Предъявление априорной информации можно расценивать как помощь «учителя». Фактически сеть просто запоминает образцы до того, как на ее вход поступают реальные данные, и не может изменять свое поведение.

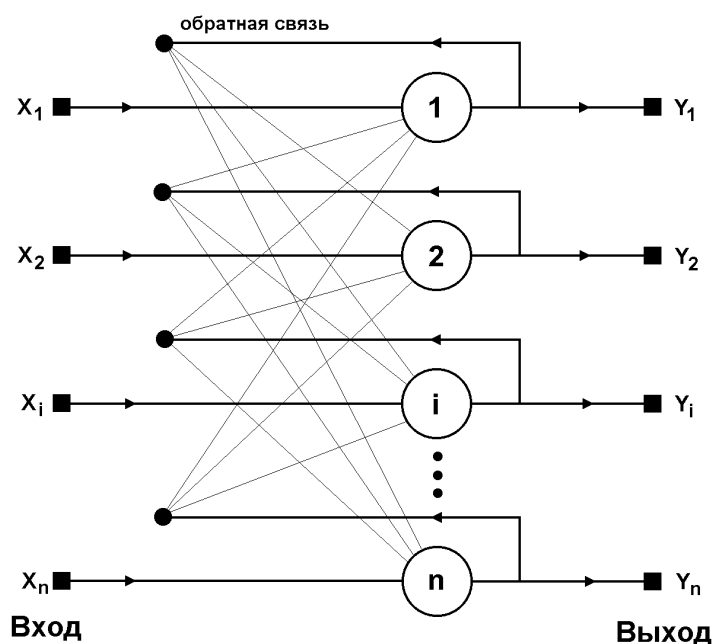


Рис.4.7 Структурная схема сети Хопфилда

Из сетей с подобной логикой работы наиболее известны сеть Хопфилда и сеть Хэмминга, которые обычно используются для организации ассоциативной памяти.

Структурная схема сети Хопфилда приведена на рис.4.7. Она состоит из единственного слоя нейронов, число которых является одновременно числом входов и выходов сети. Каждый нейрон связан

синапсами со всеми остальными нейронами, а также имеет один входной синапс, через который осуществляется ввод сигнала. Выходные сигналы, как обычно, образуются на элементах аксонах.

Задача, решаемая данной сетью в качестве ассоциативной памяти, как правило, формулируется следующим образом. Известен некоторый набор двоичных сигналов (изображений, звуковых оцифровок, прочих данных, описывающих некие объекты или характеристики процессов), которые считаются образцовыми. Сеть должна уметь из произвольного неидеального сигнала, поданного на ее вход, выделить («вспомнить» по частичной информации) соответствующий образец (если такой есть) или "дать заключение" о том, что входные данные не соответствуют ни одному из образцов. В общем случае, любой сигнал может быть описан вектором $\mathbf{X} = \{x_i: i=0...n-1\}$, n – число нейронов в сети и размерность входных и выходных векторов. Каждый элемент x_i равен либо $+1$, либо -1 . Обозначим вектор, описывающий k -ый образец, через $\mathbf{X}^k$, а его компоненты, соответственно, – x_i^k , $k=0...m-1$, m – число образцов. Когда сеть распознает (или "вспомнит") какой-либо образец на основе предъявленных ей данных, ее выходы будут содержать именно его, то есть $\mathbf{Y} = \mathbf{X}^k$, где $\mathbf{Y}$ – вектор выходных значений сети: $\mathbf{Y} = \{y_i: i=0,...,n-1\}$. В противном случае, выходной вектор не совпадет ни с одним образцовым.

Например, если сигналы можно интерпретировать как некие изображения, то, отобразив в графическом виде данные с выхода сети, можно будет увидеть картинку, полностью совпадающую с одной из образцовых (в случае успеха) или же не известную оператору (в случае неудачи).

На стадии инициализации сети весовые коэффициенты синапсов устанавливаются следующим образом [31]:

$$w_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=0}^{m-1} x_i^k x_j^k, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases} \quad (4.24)$$

Здесь i и j – индексы, соответственно, предсинаптического и постсинаптического нейронов; x_i^k , x_j^k – i -ый и j -ый элементы вектора k -ого образца.

Процесс функционирования нейронной сети происходит поэтапно (итерационно). Пусть p – номер итерации, тогда алгоритм функционирования сети следующий:

1. На входы сети подается неизвестный сигнал. Фактически его ввод осуществляется непосредственной установкой значений аксонов:

$$y_i(0) = x_i, i = 0...n-1, \quad (4.25)$$

поэтому обозначение на схеме сети входных синапсов в явном виде носит чисто условный характер. Ноль в скобке справа от y_i означает нулевую итерацию в цикле работы сети.

2. Рассчитывается новое состояние нейронов

$$s_j(p+1) = \sum_{i=0}^{n-1} w_{ij} y_i(p), j=0...n-1 \quad (4.26)$$

и новые значения аксонов

$$y_j(p+1) = f[s_j(p+1)] \quad (4.28)$$

где f – активационная функция в виде скачка, приведенная на рис. 4.8 а.

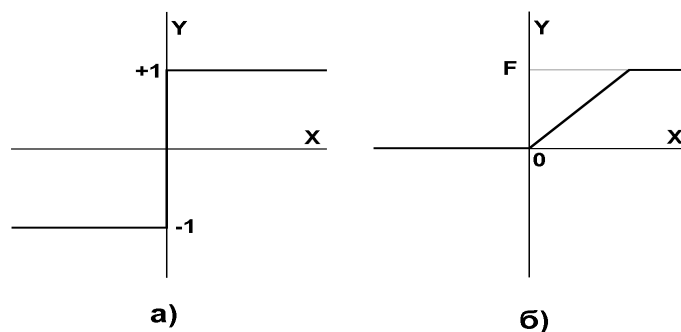


Рис. 4.8 Активационные функции сети Хопфилда

3. Проверка, изменились ли выходные значения аксонов за последнюю итерацию. Если да – переход к пункту 2, иначе (если выходы стабилизировались) – конец. При этом выходной вектор представляет собой образец, наилучшим образом сочетающийся с входными данными. Здесь можно считать, что система выполнила

«логическую интерпретацию» набора входных сигналов, что позволяет выбрать наиболее рациональное управление.

В некоторых случаях сеть не может провести распознавание и выдает на выходе несуществующий образ. Это связано с проблемой ограниченности возможностей сети. Для сети Хопфилда число запоминаемых образов m не должно превышать величины, примерно равной $0.15 \cdot n$, где n – число входов сети. Кроме того, если два образа А и Б сильно похожи, они, возможно, будут вызывать у сети перекрестные ассоциации, то есть предъявление на входы сети вектора А приведет к появлению на ее выходах вектора Б и наоборот.

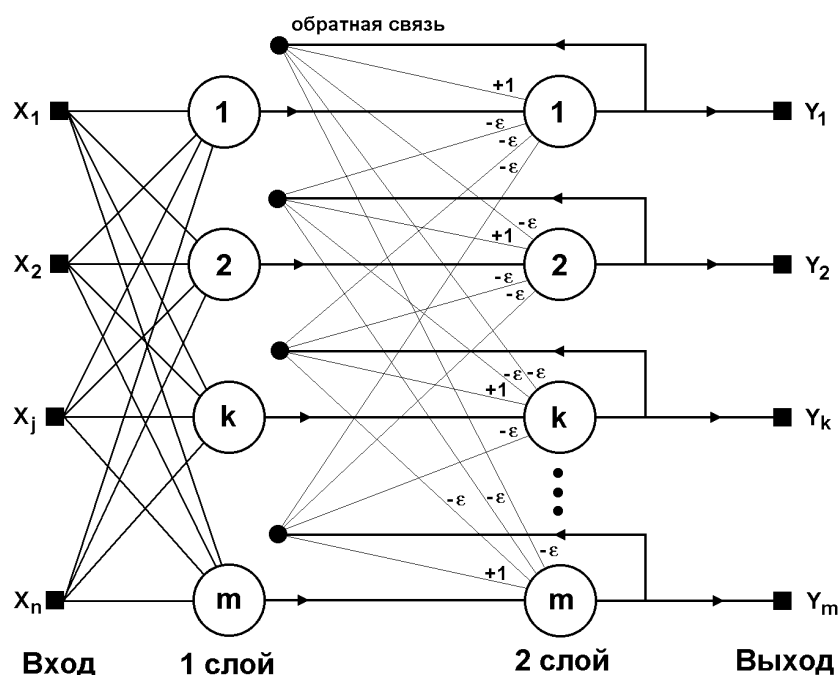


Рис.4.9 Структурная схема сети Хэмминга

Часто нет необходимости, чтобы сеть в явном виде выдавала образец, характеризующий сущность текущей ситуации. Если для управления достаточно получать номер образца, тогда ассоциативную память успешно реализует сеть Хэмминга. Данная сеть характеризуется меньшими затратами на память и объемом вычислений, что становится очевидным из ее структуры (рис. 4.9).

Сеть состоит из двух слоев. Первый и второй слои имеют по m нейронов, где m – число образцов, которые следует учитывать при выборе управлений. Нейроны первого слоя имеют по n синапсов,

соединенных с входами сети. Нейроны второго слоя связаны между собой ингибиторными (отрицательными обратными) синаптическими связями. Единственный синапс с положительной обратной связью для каждого нейрона соединен с его же аксоном, выходом.

Идея работы сети состоит в нахождении расстояния Хэмминга от тестируемого образа до всех образцов. Расстоянием Хэмминга называется число отличающихся битов в двух бинарных векторах. Сеть должна выбрать образец с минимальным расстоянием Хэмминга до неизвестного входного сигнала, в результате чего будет активизирован только один выход сети, соответствующий этому образцу.

На стадии инициализации весовым коэффициентам первого слоя и порогу активационной функции присваиваются следующие значения:

$$w_{ik} = \frac{x_i^k}{2}, i=0...n-1, k=0...m-1 \quad (4.29)$$

$$T_k = n / 2, k = 0...m-1 \quad (4.30)$$

Здесь x_i^k – i -ый элемент k -ого образца.

Весовые коэффициенты тормозящих синапсов во втором слое берут равными некоторой величине $0 < \varepsilon < 1/m$. Синапс нейрона, связанный с его же аксоном имеет вес $+1$.

Алгоритм функционирования сети Хэмминга следующий:

1. На входы сети подается неизвестный вектор $\mathbf{X} = \{x_i; i=0...n-1\}$, исходя из которого рассчитываются состояния нейронов первого слоя (верхний индекс в скобках указывает номер слоя):

$$y_j^{(1)} = s_j^{(1)} = \sum_{i=0}^{n-1} w_{ij} x_i + T_j, j=0...m-1 \quad (4.31)$$

После этого полученными значениями инициализируются значения аксонов второго слоя:

$$y_j^{(2)} = y_j^{(1)}, j = 0...m-1$$

2. Вычислить новые состояния нейронов второго слоя:

$$s_j^{(2)}(p+1) = y_j^{(2)}(p) - \varepsilon \sum_{k=0}^{m-1} y_k^{(2)}(p), k \neq j, j = 0...m-1$$

и значения их аксонов:

$$y_j^{(2)}(p+1) = f[s_j^{(2)}(p+1)], j = 0...m-1 \quad (4.32)$$

Активационная функция f имеет вид порога (рис. 4.8 б), причем величина F должна быть достаточно большой, чтобы любые возможные значения аргумента не приводили к насыщению.

3. Проверить, изменились ли выходы нейронов второго слоя за последнюю итерацию. Если да – перейти к шагу 2. Иначе – конец.

Из оценки алгоритма видно, что роль первого слоя весьма условна: воспользовавшись один раз на шаге 1 значениями его весовых коэффициентов, сеть больше не обращается к нему, поэтому первый слой может быть вообще исключен из сети (заменен на матрицу весовых коэффициентов), что и было сделано в ее конкретной реализации, описанной ниже.

Кроме указанных выше моделей нейронных сетей, реализующих ассоциативную память, существуют сети для формирования двунаправленной ассоциативной памяти, сети Коско [31]. Такая сеть способна запоминать пары ассоциированных друг с другом образов. Пусть пары образов записываются в виде векторов $\mathbf{X}^k = \{x_i^k: i=0...n-1\}$ и $\mathbf{Y}^k = \{y_j^k: j=0...m-1\}$, $k=0...r-1$, где r – число пар. Подача на вход первого слоя некоторого вектора $\mathbf{P} = \{p_i: i=0...n-1\}$ вызывает образование на входе второго слоя некоего другого вектора $\mathbf{Q} = \{q_j: j=0...m-1\}$, который затем снова поступает на вход первого слоя. При каждом таком цикле вектора на выходах обоих слоев приближаются к паре образцовых векторов, первый из которых – $\mathbf{X}$ – наиболее походит на $\mathbf{P}$, который был подан на вход сети в самом начале, а второй – $\mathbf{Y}$ – ассоциирован с ним. Ассоциации между векторами кодируются в весовой матрице $\mathbf{W}^{(1)}$ первого слоя. Весовая матрица второго слоя $\mathbf{W}^{(2)}$ равна транспонированной первой $(\mathbf{W}^{(1)})^T$. Процесс обучения, также как и в случае сети Хопфилда, заключается в предварительном расчете элементов матрицы $\mathbf{W}$ (и соответственно $\mathbf{W}^T$) по формуле:

$$w_{ij} = \sum_k x_i y_j, i = 0...n-1, j = 0...m-1 \quad (4.33)$$

Эта формула является развернутой записью матричного уравнения

$$\mathbf{w} = \sum_k \mathbf{x}^T \mathbf{y}. \quad (4.34)$$

Для частного случая, когда образы записаны в виде векторов, при этом произведение двух матриц размером соответственно $[n \times 1]$ и $[1 \times m]$ приводит к выражению (4.33).

Характеризуя приведенные примеры НС можно сделать следующее обобщение, имеющее системное значение. Сети Хопфилда, Хэмминга и Коско позволяют просто и эффективно разрешить задачу воссоздания образов по неполной и искаженной информации. Невысокая емкость сетей (число запоминаемых образов) объясняется тем, что, сети не просто запоминают образы, а позволяют проводить их обобщение, например, с помощью сети Хэмминга возможна классификация по критерию максимального правдоподобия [15, 16]. Вместе с тем, легкость построения программных и аппаратных моделей делают эти сети привлекательными для многих применений. Таким образом, приведенные выше нейросетевые модели действительно позволяют единообразно решать целый класс задач формирования диспетчерских и других приложений, построенных на основе методик интеллектуального управления.

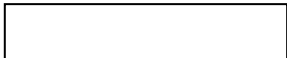
4.5. Моделирование и анализ систем транспорта на основе сетей Петри. Реализация управлений по отклонениям

4.5.1. Основные элементы моделей Петри

Модели сетей Петри реализуют общий принцип отражения функционирования как последовательности некоторых событий. При этом фиксируется не параметр времени, как отображение динамики, а возникновение конкретной последовательности условий и обусловленных ними действий, представленных как «срабатывания переходов». В графических моделях сетей Петри (СП) [30] используют два вида элементов, представляющих вершины графа (граф - двудольный): позиции-условия (кружки) и позиции-действия (черточки, барьеры). Виды вершин СП:

○ - условие (или же совокупность условий, которые можно рассматривать одновременно, позиция);

■ или | – действие, переход, барьер (мгновенный переход);
{◦•} – маркеры (свидетельствуют о том, что условие имеет место, выполнено, количество маркеров в позиции – кратность);

 – непримитивный переход – любая возможная структура в рамках моделей сетей Петри;

→ – ориентированная связь (дуга между элементами сети, вершинами противоположной категории: от условия к барьерам, от барьеров к условиям-кружкам). Дуги имеют свойство – кратность, указывающее число маркеров, которые могут перемещаться по ней (указывается непосредственно рисунком или же числом на зачеркивающей дугу линии).

Маркеры, размещаемые в кружках, позициях, указывают выполнение соответствующих условий, характеризуют емкость этих условий. Совокупность маркеров, находящихся на определенном этапе функционирования модели в позициях, образуют разметку СП, а смена разметки от этапа к этапу – выражает процесс функционирования системы, заданной в форме модели СП, рис. 4.10.

Выделяются структура моделей Петри и правила функционирования, устанавливающие требования к разметкам, при выполнении которых осуществляются действия в системе – срабатывают переходы. Кроме этого правила устанавливают результаты срабатывания, новые разметки модели СП. Таким образом, функционирование отображается с помощью перемещения маркеров между позициями, которое происходит при срабатывании переходов.

Модели Петри позволяют отображать асинхронное параллельное функционирование элементов системы. Уже в простейшей форме модели Петри является более мощным методом моделирования, чем конечные автоматы. Расширение моделей Петри позволяет отображать процессы на уровне машин Тьюринга (МТ) [37].

Неформальное условие срабатывания состоит в том, что в каждой позиции, которая является входной к барьеру, размещается количество маркеров, которое не меньше, чем кратность дуги.

В моделях Петри конфликт между срабатыванием барьеров формально не решается, то есть модели характеризуются недетерминизмом.

Главное предназначение моделей сетей Петри (с точки зрения формализации процессов исследования систем в рамках системного подхода) – отображение логической структуры процессов функционирования, выраженной возможными последовательностями

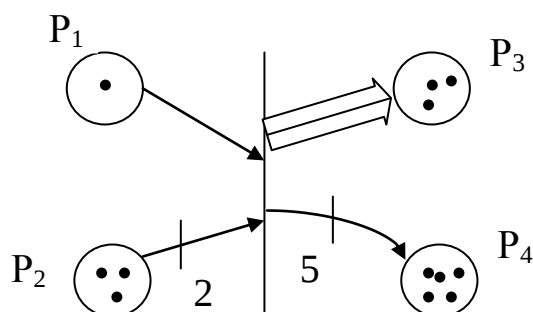


Рис. 4.10. Пример срабатывания перехода фрагмента СП

срабатывания переходов, то есть последовательностями соответствующих переходам действий (выполнение комплексов работ, процедур обработки информации и др.). При этом могут быть обнаружены «тупики» (система заблокирована), динамически блокировки (зацикливание), исследуется параллелизм выполнения некоторых процессов и др. Например, с помощью моделей Петри исследуются протоколы взаимодействия вычислительных и коммуникационных процессов в распределенных системах, компьютерных и транспортных сетях и др.

Рассмотрим понятия сети и сети Петри подробнее.

Сеть – это алгебраическая структура C , состоящая из трех компонент:

$$C = \langle P, T, F \rangle,$$

в которой $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – множество позиций, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ – множество барьеров и $F = P \times T \cup T \times P$ – отношение инциденции, задаваемое списком пар

$$[(p_1, t_2), (p_2, t_3), \dots, (p_k, t_j), (t_1, p_3), (t_4, p_1), \dots, (t_i, p_r)].$$

При этом выполняются структурные условия:

$$1) \quad P \cap T = \emptyset,$$

2) $x F y \Rightarrow (x \in P \ \& \ y \in T) \mid (x \in T \ \& \ y \in P)$, а также условия упрощения связей.

Свойств моделей сетей Петри исследуются с помощью построения деревьев допустимых маркировок, разметок. Анализ деревьев разметок позволяет установить все структурные и другие свойства моделей функционирования систем. К таким общим свойствам моделей СП относятся, например, следующие: безопасность и ограниченность маркировок позиций, живость переходов, консервативность сети, достижимость заданных разметок в дереве разметок и др.

Рассмотрим некоторые обобщения моделей СП, которые позволяют расширить область их применения. При этом также укажем некоторые свойства таких моделей.

Помеченные Модели Петри (МП) предполагают задание дополнительной компоненты – помечающей функции: В СП все барьеры – различные. Однако на практике бывает необходимым сделать некоторые барьеры одинаковыми, как выполняющими одну функцию. Для этого их помечают одинаковыми символами некоторого алфавита. Имеем:

а) $t_i \in T, t_i \neq t_k, i \neq k$ (предполагается, что все действия разные)

б) $a_k \in A, A$ – алфавит

$\Sigma: \{t_i \rightarrow a_k\}$ или $\Sigma: T \rightarrow A$ – помечающая функция для переходов t_i .

$N_{P\Sigma} = (Np, \Sigma)$ – модель помеченной СП.

Помечающая функция за счет введения разметки действий дает возможность их формально отождествлять, приписывая разным переходам одинаковые символы.

Сравнение моделей $N_{P\Sigma}$ и Конечных Автоматов (КА). Нетрудно установить, что любой КА может быть преобразован в помеченную модель сети Петри: Действительно, рассмотрим язык $\{a^m b^n c^k, m > 0, n > 0, k > 0\}$, порождаемый следующим конечным автоматом, который задан графически на рис. 4.11.

Укажем простые правила преобразования конечного автомата в $N_{P\Sigma}$. Для этого каждую дугу пересекают барьером, помечают каждый такой барьер с помощью символов из Σ , наконец, и ставят маркер в начальную вершину графа автомата q_0 . То есть необходимо выполнить действия:

1. На дугах ввести барьеры.
2. Ввести функцию Σ , которая помечает переходы, $t_i \rightarrow a_k$.

3. Установить начальный маркер в состояние автомата q_0 и каждую вершину КА связать с соответствующей позицией сети Петри P_j ($q_j \rightarrow P_j$).

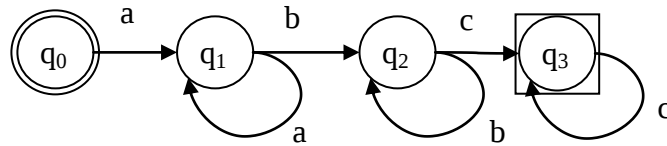


Рис. 4.11. Модель КА для языка $\{a^m b^n c^k, m>0, n>0, k>0\}$

Такая помеченная модель СП, как легко проверить, имеет тот же язык, что и конечный автомат рис. 4.11.

Укажем соотношение моделей $N_{P\Sigma}$ и магазинных автоматов. Установлено, что модели магазинных автоматов (МА) и $N_{P\Sigma}$ не могут быть сопоставимы. Это означает, что существуют модели таких сетей Петри более мощные, чем МА и наоборот. Ограниченность моделей сетей Петри заключается в том, что в них отсутствует механизм проверки позиции на отсутствие маркера. Эта проблема решается средствами СП с приоритетом.

Кратко охарактеризуем СП с приоритетами. *Приоритет* – это механизм для разрешения конфликта между переходами, которые могут быть выполнены при заданной разметке позиций, он корректирует правила срабатывания барьеров. Укажем возможные варианты срабатывания барьеров схемы СП на рис. 4.12:

а) $m(p_1) = 0$, срабатывание перехода t_2 при появлении маркера в позиции P_2 $\{m(P_1)=0, m(P_2)=1\}$, $m(P_4)>0$, в P_4 маркер отсутствует.

б) $m(P_1)=1$, $m(P_2)=1$, вводим приоритеты $\text{Pr}(t_1)=1$, $\text{Pr}(t_2)=2$ для решения конфликтов. При этом при разметке $\{m(P_1)=1, m(P_2)=1\}$ после срабатывания перехода с более высоким приоритетом $\text{Pr}(t_1)=1$ в позиции P_3 маркер присутствует. Следовательно, помещение маркера в позицию P_2 , $m(P_2)=1$, позволяет идентифицировать наличие маркера в P_1 , а при отсутствии будем иметь $m(P_4)=1$, иначе – $m(P_3)=1$.

Правило срабатывания СП корректируется следующим образом: если согласно правилам СП могут срабатывать переходы t_{i1} и t_{i2} , тогда срабатывает имеющий высший приоритет. В случае рис. 4.12 комбинация $m(P_3)=1$, $m(P_4)=0$ означает, что в позиции P_1 был маркер.

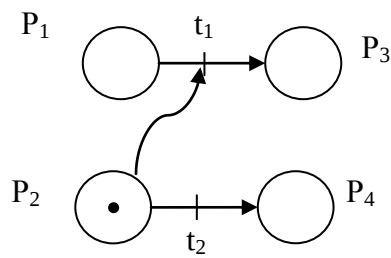


Рис. 4.12. Сеть Петри с приоритетом барьеров.

Установлено, что модели Петри с приоритетами соответствуют МТ. Существуют другие расширения моделей СП до уровня МТ, например ингибиторные сети. При одинаковых приоритетах надо строить правила следующего уровня.

Для процедур системного анализа особенно важно, что с помощью графического построения СП можно представить процессы функционирования, проектирования и другие сети для сложных параллельно функционирующих асинхронных систем любого уровня. Это достигается путем ведения непримитивных переходов, которые при дальнейшем анализе и формализации уточняются, их содержание в ходе всестороннего анализа исследуемого объекта конкретизируется. Пример такой процедуры детализации модели системы будет приведен в дальнейшем изложении.

4.5.2. Сети Петри с временными задержками

Отметим, что сети Петри является средством формального описания процессов функционирования дискретных систем. В дискретной системе изменения ее состояния встречаются в особые моменты времени, когда возникают условия для совершения события. Реализация события означает изменение состояния системы, а значит, возникновение или не возникновение условий для других событий. Процесс функционирования дискретной системы - это упорядоченная во времени последовательность событий.

Представим формализацию на основе СП процессов обслуживания.

Для определенности рассмотрим процедуру обслуживания клиентов некоторым банкоматом, как последовательность существенных для описания событий [30]. Событие первое

закljučается в том, что клиент подходит к банкомату, второе – он начал выполнять нужные ему операции, третье – выполнение операции закончено, наконец, событие четвертое – клиент оставил банкомат. Если в момент, когда клиент появился перед банкоматом, банкомат занят другим клиентом, то клиент ожидает освобождения банкомата. Условия, предшествующие выполнению определенного события называют *предпосылками*. Условия, которые являются результатом осуществления события, называют *постусловиями*.

Таблица 4.1

Таблица взаимосвязей между событиями и условиями

Событие	Предпосылки события	Постусловия события
«Клиент подошел к банкомату»	«Возможно, что клиент подойдет к банкомату»	«В очереди клиентов есть клиент»
«Клиент начал выполнять операции»	«В очереди клиентов есть клиент», «банкомат свободный»	«Клиент обслуживается»
«Клиент закончил выполнять операции»	«Клиент обслуживается»	«Банкомат свободный», «есть обслуживаемый клиент»
«Клиент оставил банкомат»	«Есть обслуживаемый клиент»	«Количество обслуженных клиентов увеличилось на единицу»

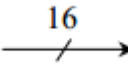
Предпосылками событию «клиент начал выполнять операции» являются условия а) «банкомат свободный» и б) «в очереди клиентов присутствует клиент». Постусловием для события «клиент начал выполнять операции» является условие «клиент обслуживается». Предпосылками события «клиент закончил выполнять операции» является условие «клиент обслуживается». Постусловия этого события являются условия а) «банкомат свободный» и б) «есть обслуженный клиент». Взаимосвязи между событиями и условиями устанавливает.

таблица 4.1.

При графическом представлении сети Петри также пользуются следующими обозначениями, приведенными в табл. 4.2. События изображаются планками, барьерами, которые также называют *переходами*. Условия для возникновения событий изображаются кружками, которые называют *позициями*. Связи между позициями и переходами изображаются дугами.

Таблица 4.2

Обозначения элементов сети Петри

Переход		обозначает событие
Позиция		обозначает условие
Дуга		обозначает связи между событиями и условиями
Маркер(один)		обозначает выполнение (или не выполнение) условия
Много фишек		обозначает многократное выполнение условия
Много дуг		обозначает большое количество связей

Выполнение (или невыполнение) условия изображается наличием (или отсутствием) маркера в позиции. Маркер обозначается точкой. В позиции может находиться не одна маркер, а несколько, что означает многократное выполнение условия запуска перехода. Число, которое записано в позиции, означает количество маркеров, содержащейся в ней. Если предпосылкой запуска является наличие не одной, а определенного количества маркеров в позиции, то между позицией и переходом существует не один, а несколько связей. Для большого количества связей введем обозначения пучка связей – дуга с косой чертой и числом у нее, которое означает количество связей в пучке связей.

Когда срабатывает переход «клиент подошел к банкомату», в позиции «в очереди клиентов является клиент» появится маркер. Наличие маркеров в позициях «в очереди клиентов является клиент» и «банкомат свободный» означает, что выполнены условия для события «клиент приступил к операции». При запуске перехода «клиент начал выполнять операции» маркеры с позиций «в очереди клиентов есть клиент» и «банкомат свободный» удаляются, а в позиции «клиент обслуживается» маркер появляется. Наличие маркера в позиции «клиент обслуживается» означает, что выполнены условия для события «клиент закончил выполнять операции». При запуске этого перехода маркер с позиции «клиент обслуживается» удаляется, а в позиции «банкомат свободный» и «есть обслуживаемый клиент» маркеры добавляются. Наличие маркера в позиции «есть обслуживаемый клиент» является условием запуска перехода «клиент оставляет банкомат». При запуске этого перехода маркер с позиции «есть обслуживаемый клиент» удаляется.

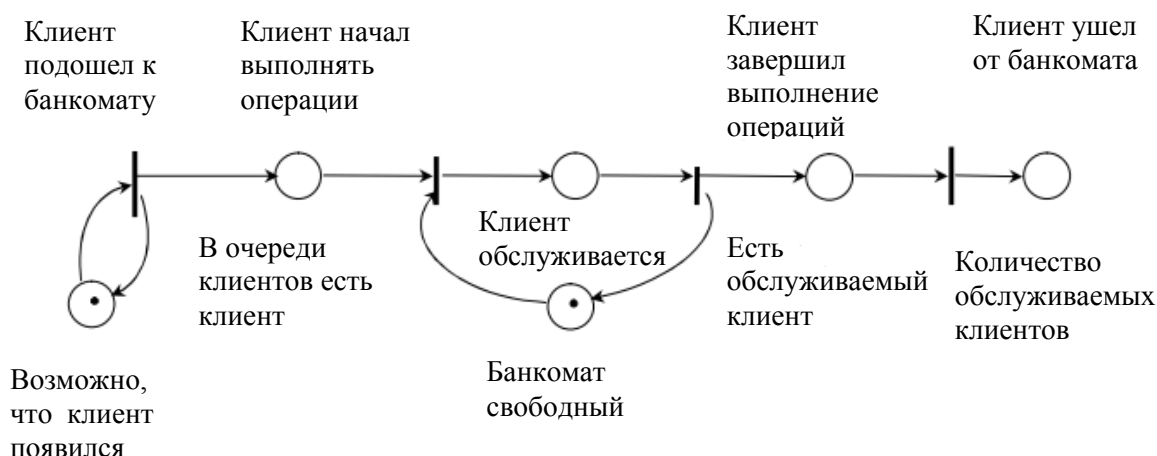


Рис. 4.13. Сеть Петри процесса обслуживания клиентов банкоматом

Может показаться, что условие «банкомат свободный» является лишним. Но наличие условия «банкомат свободный» обеспечивает свойство – что обслуживание клиентов осуществляется по одному.

Случайный характер процессов, которые моделируются, проявляется в случайном запуске переходов, для которых выполнены предпосылки: если выполнены предпосылки одновременно для нескольких переходов, то последовательность их запуска определяется случаем, в самом формализме СП не установлена.

В процессе обслуживания клиентов можно наблюдать несколько

возможных последовательностей срабатывания переходов:

1) клиент подошел к банкомату; начал выполнять операции; закончил выполнять операции; оставил банкомат; подошел к банкомату.

2) клиент подошел к банкомату; он начал выполнять операции; клиент подошел к банкомату; клиент закончил выполнять операции; клиент подошел к банкомату; он оставил банкомат; начал выполнять операции; он закончил выполнять операции; клиент оставил банкомат.

В первом случае клиентам не приходится ожидать освобождения банкомата, а во втором наблюдается очередь клиентов до двух человек.

Чтобы представить систему средствами сетей Петри нужно:

- выделить события, возникающие в системе, и поставить в соответствие каждому событию переход сети Петри;
- выяснить условия, при которых возникает любое из событий, и поставить в соответствие каждому условию позицию сети Петри;
- определить количество фишек в позиции сети Петри, что символизирует выполнение условия;
- соединить позиции и переходы в соответствии с логикой возникновения событий в системе: если условие предшествует выполнению события, то соединить в сети Петри соответствующую позицию с соответствующим переходом; если условие является следствием выполнения события, то соединить в сети Петри соответствующий переход с соответствующей позицией;
- выяснить изменения, которые происходят в системе при осуществлении каждого события, и поставить в соответствие изменениям перемещения определенного количества фишек из позиций в переходы и из переходов в позиции;
- определить числовые значения временных задержек в переходах сети Петри;
- определить состояние сети Петри в начале моделирования.

Количества маркеров в пронумерованных позициях образуют составленный вектор, который называется маркировкой. В графическом представлении сети Петри изображаются только начальные

маркировки. В процессе функционирования сети Петри маркировка меняется.

Условие запуска перехода является наличие маркеров в его входных позициях в количестве не меньшем числа связей. Если условие запуска перехода выполнено, то производится запуск перехода: из всех входных позиций маркеры удаляются в числе равном количеству связей, а во все исходные позиции маркеры добавляются в числе равном количеству связей. Например, на рис. 4.14 условие запуска перехода T_1 выполнено, поскольку в позиции P_1 один маркер, в позиции P_2 тоже один маркер. В то же время условие запуска перехода T_2 – не выполнено, так как в позиции P_2 не имеет трех маркеров. После запуска перехода T_1 в позиции P_1 маркер останется, в позиции P_2 станет один маркер, а в позиции P_3 появятся два маркера.

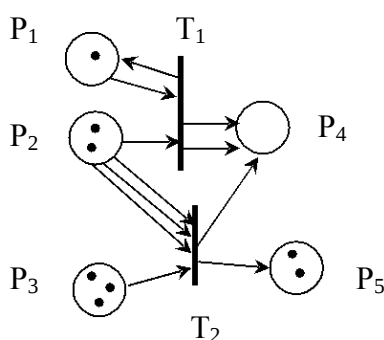


Рис. 4.14. Фрагмент сети Петри

При изображении сети Петри маркеры в позициях расставляются так, как они расположены в начале работы модели. В ходе функционирования модели их расположение меняется, что определяется запусками переходов.

Имитационные модели сложных систем часто формируют на основе сетей Петри с временными задержками, когда для переходов может быть задана временная задержка, после которой выполняется процедура срабатывания. При этом в случае выполнения условия срабатывания, запуска перехода, из всех входных позиций маркеры удаляются, но добавляются маркеры в выходные позиции только после того, как пройдет время задержки. Сеть Петри, в которой

заданы временные задержки, называют сетью Петри с временными задержками. Процесс функционирования такой сети Петри заключается в последовательном просмотре всех переходов и выполнении следующих действий: если условие запуска перехода выполнено, осуществляется вход маркеров в переход и запоминание момента выхода маркеров из перехода. Затем выбирается переход, для которого момент выхода маркеров по переходу наименьший и осуществляется процедура выхода маркеров из выбранного перехода. Выход маркеров из перехода меняет маркировку сети Петри, поэтому снова проверяется условие запуска перехода и т.д. Процесс продолжается, пока запускается хоть один переход, или пока исчерпается время наблюдения сети Петри.

Для примера процедуры формирования модели СП, рассмотрим некоторые фрагменты сетей Петри, возникающие при моделировании дискретных систем, в частности, «поступление», когда в систему поступают объекты в количестве k штук через заданный интервал времени t . Сеть Петри по реализации этой функции представлена на рисунке 4.15. Событие «поступления» происходит всегда, то есть во входной позиции этого события всегда есть маркер. Выполнение события «поступления» означает передачу k маркеров в позицию «очередь». Для события «поступления» задается временная задержка t единиц времени.

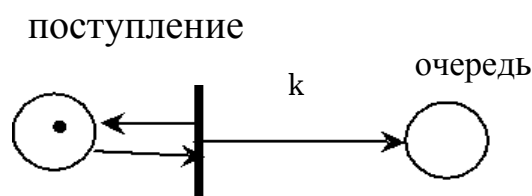


Рис. 4.15. Сеть Петри для события «поступления»

Типичными для моделей СП являются процессы «Захват ресурса», когда некоторый ресурс в количестве p используется для обработки объектов O_1 и O_2 . Объекты O_1 требуют для своей обработки m единиц ресурса, объекты O_2 – n единиц ресурса. Далее это «сборка объектов двух типов в количестве m и n в один объект», процедура «Поломка», когда в модели отображается процесс

поломки, наладки и включения в работу некоторого технического «устройства» или же сложного объекта.

С помощью сетей с задержками могут быть формализованы и исследованы самые разнообразные сложные динамические системы, при этом, наряду со структурными свойствами моделей систем, получают количественные оценки значения заданных характеристик процессов функционирования.

4.5.3. Примеры формализации фрагментов телематических систем транспорта

При постановке и формализации задач по созданию фрагментов телематических систем управления часто учитывают необходимость обеспечения автоматического «машина – машинного» управления, которое реализуется на основе анализа отклонений параметров от нормативных, эталонных значений, технологических и эксплуатационных шаблонов. На этом основана работа многих автоматических систем железнодорожной телематики.

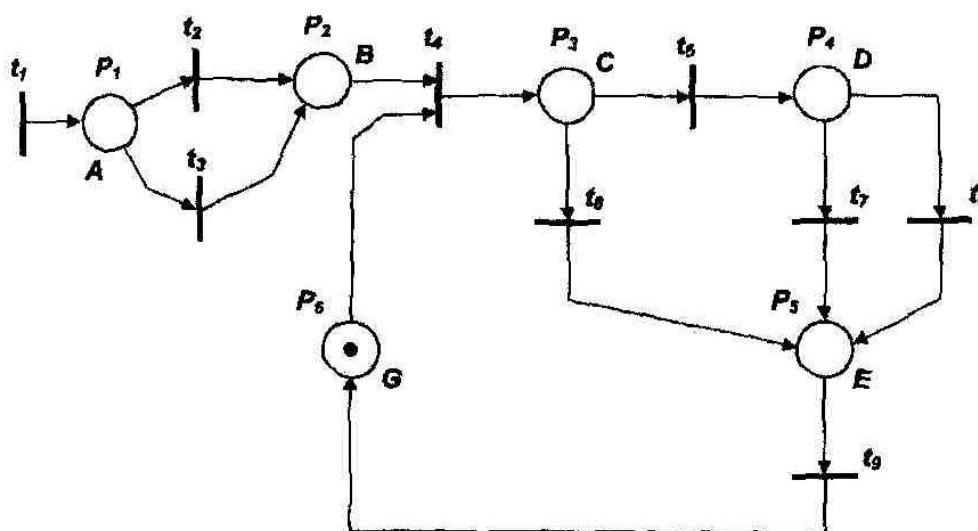


Рис. 4.16. Сеть Петри для моделирования процессов контроля обработки железнодорожных составов

Представим пример формального описания фрагмента телематической системы проверки железнодорожных составов на основе модели Сети Петри. Модель управления процессом контроля представлена на рис. 4.16.

Сеть устанавливает логическую корректность последовательности

действий при одновременном учете их асинхронности и параллелизма. В табл. 4.3 указаны идентифицирующие процессы переработки поездов. События, отнесенные к той или иной позиции (кружок), узлы-барьеры отражают соответствующие действия, выполняемые при комплексе событий. Маркер-точка указывает позицию-условие, отображающую текущее состояние системы обработки составов. В модели учтены основные события – от прибытия поезда, до окончания обработки и перевода системы контроля и управления в состояние готовности проверки очередного поезда.

Рис. 4.16 и табл. 4.3 наглядно представляют фрагмент формальной модели телематической системы управления процессом переработки составов.

Таблице 4.3.

Состояния сетевой модели обработки железнодорожных составов

Условное обозначение	УСЛОВИЕ
$P_1(A)$	Прибывающий поезд во входной горловине
$P_2(B)$	ИНВ считаны и переданы в СТС для обработки
$P_3(C)$	Считанные ИНВ обработаны
$P_4(D)$	Проект откорректированных ТГНЛ и сортировочного листка готов и выведен оператору СТС для утверждения
$P_5(E)$	Сформированы откорректированные ТГНЛ и сортировочный листок
$P_6(G)$	Обработка окончена, система готова к контрольной проверке состава очередного поезда

Другим примером применения системного анализа и моделирования сложных технологических процессов и систем железнодорожного транспорта на основе СП, является формализация процессов функционирования сортировочной станции [32].

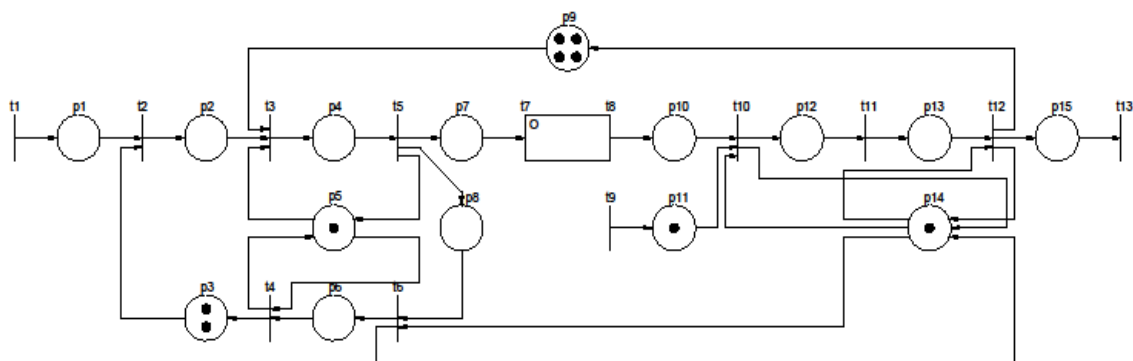


Рис. 4.17. Сеть Петри для моделирования процессов подсистемы формирования поездов на сортировочной станции

Модель СП построена для исследования функционирования сортировочных станций, а именно - подсистем формирования поездов, рис. 4.17. Сети Петри созданы для моделирования параллельных (синхронных и асинхронных) систем и процессов, что в полной мере соответствует особенностям технологических процессов станций. Кроме того, здесь средства СП позволяют учесть много факторов, которые невозможно в полной мере учесть принятыми для станций аналитическими и статистическими методами (например, занятость горловин станций, наличие готового локомотива и др.). Это, в свою очередь, повысит достоверность результатов исследований и оптимизации процессов.

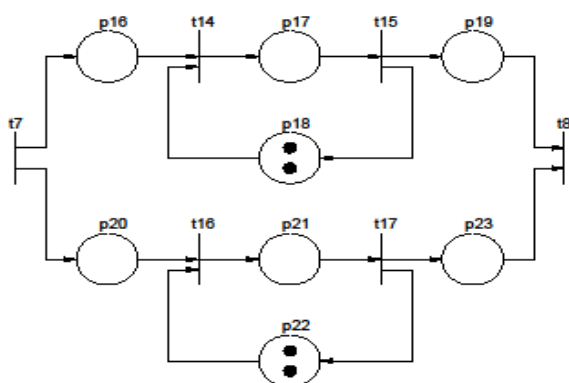


Рис. 4.18. Сеть Петри для моделирования процессов коммерческого осмотра составов поездов.

Как было указано, построить модель системы в виде сети Петри – это значит необходимо определить элементы следующей

формальной структуры:

$$N_p = (P; T; F; W; M_0).$$

Они для нашего случая имеют вид

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_{23}\}; \quad T = \{t_1, t_2, \dots, t_{17}\};$$

$F = \{(t_1; p_1); (t_2; p_2); (t_3; p_4); (t_5; p_7); (t_5; p_8); (t_5; p_5); (t_6; p_6); (t_4; p_3); (t_4; p_5); (t_8; p_{10}); (t_9; p_{11}); (t_{10}; p_{12}); (t_{10}; p_{14}); (t_{11}; p_{13}); (t_{12}; p_{14}); (t_{12}; p_{15}); (t_{12}; p_{19}); (t_7; p_{16}); (t_7; p_{20}); (t_{14}; p_{17}); (t_{15}; p_{18}); (t_{15}; p_{19}); (t_{16}; p_{21}); (t_{17}; p_{22}); (t_{17}; p_{23}); (p_1; t_2); (p_2; t_3); (p_3; t_2); (p_4; t_5); (p_5; t_3); (p_5; t_4); (p_6; t_4); (p_7; t_7); (p_8; t_6); (p_9; t_3); (p_{10}; t_{10}); (p_{11}; t_{10}); (p_{12}; t_{11}); (p_{13}; t_{12}); (p_{14}; t_{10}); (p_{14}; t_{12}); (p_{14}; t_6); (p_{15}; t_{13}); (p_{16}; t_{14}); (p_{17}; t_{15}); (p_{18}; t_{14}); (p_{19}; t_8); (p_{20}; t_{16}); (p_{21}; t_{17}); (p_{22}; t_{16}); (p_{23}; t_8)\}$. Отношение инцидентности представляет структуру связей, изображенных стрелками на рис. 4.17 и 4.18.

Начальная разметка сетевой модели задается множеством.

$$M_0 = \{0; 0; 2; 0; 1; 0; 0; 0; 4; 0; 1; 0; 0; 1; 0; 0; 0; 2; 0; 0; 0; 2; 0\}.$$

Содержание модели, общий состав учтенных процессов, а также основные операции при обработке составов, указывают описания переходов, а также условий реализации. Переходы модели имеют следующее содержание: t_1 – накопление очередного состава; t_2 – окончание формирования; t_3 – перестановка в парк отправления; t_4 – возвращение маневрового локомотива: движение по чётной горловине; t_5 – закрепление состава; t_6 – возвращение маневрового локомотива: движение по нечётной горловине; t_7 – начало технического и коммерческого осмотров; t_8 – окончание технического и коммерческого осмотров; t_9 – поступление поездных локомотивов, готовых к постановке под состав; t_{10} – прицепка поездного локомотива; t_{11} – проба тормозов, снятие закрепления и передача машинисту пакета документов; t_{12} – отправление; t_{14} – начало технического осмотра; t_{15} – окончание технического осмотра; t_{16} – начало коммерческого осмотра; t_{17} – окончание коммерческого осмотра.

Позиции модели указывают условия, при которых выполняются соответствующие действия, технологические процедуры:

P1 – накопленные составы; P2 – составы в ожидании перестановки; P3 – свободные маневровые локомотивы; P4 – составы в ожидании закрепления; P5 – свобода чётной горловины; P6 – ходовой путь; P7 – составы в ожидании технического и коммерческого осмотра; P8 – маневровый локомотив в ожидании возвращения на вытяжной путь; P9 – свободные пути отправочного парка; P10 – составы в ожидании прицепки поездного локомотива; P11 – готовые поездные локомотивы; P12 – поезда в ожидании снятия закрепления и выдачи поездных документов; P13 – поезда в ожидании отправления; P14 – свобода нечётной горловины; P15 – отправленный поезд; P16 – поезда в ожидании технического осмотра; P17 – поезда под техническим осмотром; P18 – бригады пункта технического осмотра (ПТО); P19 – поезда, прошедшие технический осмотр; P20 – поезда в ожидании коммерческого осмотра; P21 – поезда под коммерческим осмотром; P22 – бригады пункта коммерческого осмотра (ПТО); P23 – поезда, прошедшие коммерческий осмотр.

Необходимо подчеркнуть связность моделей СП, представленных на рисунках рис. 4.17 и 4.18. Второй из них детализирует предыдущий, раскрывая содержание непримитивного перехода, $t_7 - t_8$. Возможность первоначальной обобщенной декомпозиции сложной системы и последующей детализации установленных свойств процессов – важный механизм реализации системного подхода. Указанные свойства системы моделей сетей Петри делают их важным инструментом исследования сложных систем и процессов, включая интеллектуальные системы транспорта.

5. Прикладные процедуры Системного Анализа интеллектуальных систем, технологий транспорта и ИТС

Раздел посвящен практическим задачам применения методологии системного анализа для решения конкретных задач в сфере совершенствования систем и технологий транспорта. Представлены постановки и реализации задач системного анализа в различных формах – в рамках логического, концептуального, и компьютерного, оптимизационного, подходов СА.

5.1 Системный анализ городской интеллектуальной транспортной системы

Проведем СА области «Организация дорожного движения и перевозок» города, который выполняется для построения модели улично-дорожной сети города, транспортного потока, средств организации дорожного движения. В результате исследовательских разработок необходимо создать программный комплекс, содержащий базы данных, экспертные системы, системы моделирования, которые работают в едином пространстве данных [5-8, 18]. Потребность в увеличении затрат на развитие транспортной инфраструктуры продиктована необходимостью постоянного роста объема транспортных услуг, повышении надежности, безопасности и качества. С увеличением количества автомобилей (в местах концентрации транспортных потоков на участках сети, функционирующих в режимах, близких к пропускной способности) растут число дорожно-транспортных происшествий (ДТП), токсичные выбросы, шум; снижаются скорости движения, растут заторы в часы «пик», потери времени для участников движения, перепробеги, повышается расход топлива, увеличиваются эксплуатационные затраты. Учитывая стохастическую природу и динамичность дорожного движения, большую сложность оценки и

прогнозирования изменений дорожно-транспортных ситуаций на сети автомобильных дорог, возникают потребности в использовании технологий ИТС систем. Интеллектуальная транспортная система характеризует комплекс интегрированных средств управления дорожным движением и перевозками, применяемых для решения всех видов транспортных задач на основе инфокоммуникационных технологий, методов моделирования транспортных процессов, программного обеспечения, организации информационных потоков в реальном масштабе времени. Современные тенденции развития ИТС показывают, что одной из основных целей их функционирования является предоставление мультимодальной информации не только для управленческих структур, но и персонально участникам движения.

Остановимся на вопросах использования СА при проектировании дорожных ИТС. Анализ и синтез сложной системы, подобной транспортной системе региона, предполагает использование системного подхода. ИТС как сложная система характеризуется следующими особенностями:

- наличием большого числа взаимосвязанных между собой элементов;
- многомерность и иерархичность системы, обусловленная большим числом связей между элементами;
- целостностью (эмерджентностью) системы;
- многокритериальностью, обусловливаемой имманентностью (несовпадением) целей отдельных элементов системы;
- многофункциональностью элементов системы;
- управляемостью;
- сложностью информационных процессов.

С позиций структурно-функционального подхода ИТС можно определить как единство структуры, функций и целостности [3, 10, 11]. Структура характеризует элементы ИТС и их взаимодействие. Функции определяют природу связей между элементами и поведением ИТС. Целостность выражает взаимозависимость структуры и функций ИТС и проявляется в наличии у реальной системы таких свойств, которые не присущи отдельным ее элементам и не выводимы из свойств этих элементов и способов их соединения.

На рис. 5.1 показана функциональная схема ИТС г Самары, которая представляет собой сложноорганизованную систему, характеризующуюся интегральным взаимодействием следующих факторов:

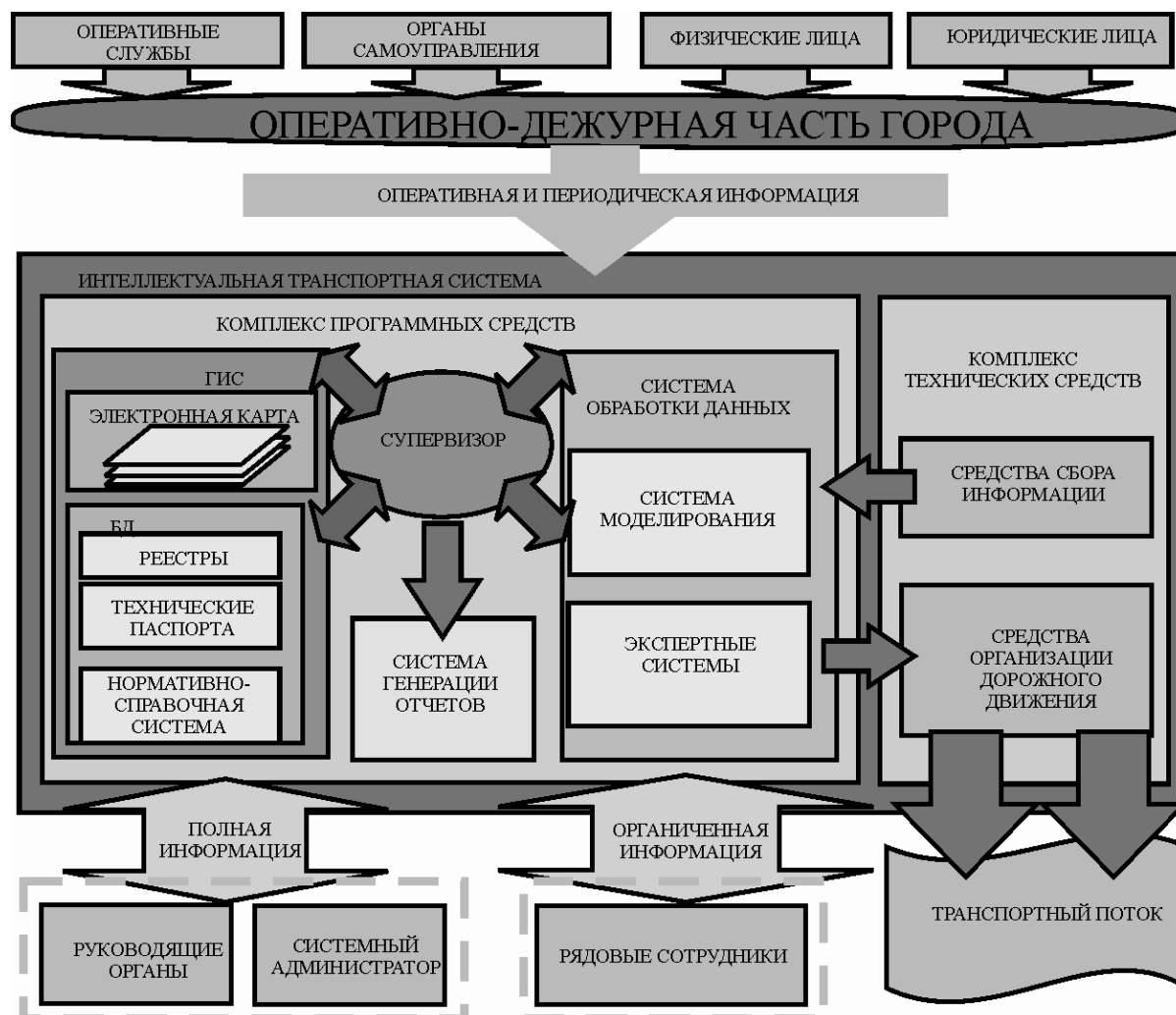


Рис. 5.1. Функциональная схема ИТС

- ИТС является сложной динамической иерархической и стохастической системой, состоящей из многочисленных взаимодействующих и взаимосвязанных распределенных компонентов;
- ИТС представляет собой синергию транспортных, материальных, информационных, финансовых и др. потоков и процессов, образующих адаптивную систему, включающую объект и субъект управления;

- при формировании транспортной инфраструктуры должна использоваться интегральная логистическая парадигма, реализующая общую стратегическую или оперативную цель функционирования компонентов системы при оптимальном использовании в системе транспортных, материальных, финансовых, информационных и трудовых ресурсов, а также согласования локальных критериев функционирования компонентов ИТС с глобальной целью оптимизации.

Целевая функция общесистемной проблемы оптимизации транспортной инфраструктуры и функционального состава ИТС является многокритериальной. В целом управление ИТС региона не может быть полностью формализовано (алгоритмизировано), что вызывает необходимость построения комплекса формализованных моделей и неформальных (эвристических) процедур и представлений [8-10]. Информационно-аналитическая и компьютерная поддержка функционирования ИТС должна охватывать как можно большее количество объектов и процессов управления.

Для решения указанной проблемы на основе методологии системного анализа реализован логистический поход при формировании и управлении инфраструктурой, что потребовало развития соответствующих методик организации транспортных процессов и математического аппарата. При этом были актуальными постановки и решения задач в области структурного синтеза сложных систем со слабо формализуемыми внутренними связями. Синергетический эффект при проектировании ИТС проявляется в форме организационно обусловленного перехода от имманентности к синергии за счет расширенной системной и функциональной интеграции:

- постановка проблем организации движения и перевозок;
- функциональные требования пользователей и государства;
- разработка концепции функционирования ИТС;
- определение функциональных возможностей ИТС;
- транспортная, экономическая, информационная логистика;
- разработка управленческих решений по интеграции ИТС;
- функциональная, институциональная, временная интеграция, интеграция баз данных;
- развитие подсистем в каждой функциональной группе;

- интеграция информационных потоков между подсистемами;
- реализация конкретных функций ИТС.

Таким образом, ИТС является в некотором смысле синтезом субъектов и объектов логистического управления, которые являются экономически и функционально обособленными, имеют свои организационно-функциональные структуры и локальные критерии оптимизации функционирования, причем эти целевые характеристики подсистем в общем случае могут не совпадать с глобальной целью функционирования ИТС.

Программно-аппаратный комплекс ИТС региона имеет функциональную схему, представленную на рис. 5.1. В первую очередь отметим «системность» этой структуры, которая представляет и связывает различных участников ИТС, элементов сложной дорожно-транспортной системы и системы регионального управления. Можно утверждать, что схема рис. 5.1 является результатом логического СА рассматриваемой проблемы. Она показывает, какой должна общая быть организация административного, технологического, информационного и программно-аппаратного комплексов, чтобы обеспечить формирование и функционирование ИТС.

Функционирование системы осуществляется по некоторому обобщенному сценарию. Например, в оперативно-дежурную часть города поступает информация от различных юридических и физических лиц, органов исполнительной власти, дорожно-патрульной службы, оперативных служб города: «01», «02», «03», «ГО и ЧС» и др. Данные записываются в соответствующие базы данных и обрабатываются по мере поступления запросов к ним. На основе этих и других подобных данных осуществляется оперативное планирование и управление подсистемами ИТС. Информационное обеспечение системы поддерживает комплекс программных средств, который включает в себя следующие компоненты:

- супервизор – сервер приложений;
- оцифрованная карта города на базе геоинформационной системы MapInfo;
- единое хранилище семантических данных;
- система обработки данных;
- система генерации отчетов др.

Сервер приложений является многокомпонентной системой, реализованной как набор СОМ-объектов. Основные СОМ-объекты бизнес-уровня системы:

- административный модуль, отвечающий за настройку конфигурации системы (управление системой авторизации и изменения уровня доступа, обеспечивает разграничение прав доступа, изменение служебно-технической информации);
- компонент, предоставляющий доступ к СУБД через MS ADO;
- компонент, предоставляющий доступ к ГИС, используя DCOM\СОМ интерфейс.

Географическая информационная система, как одна из подсистем ИТС, обеспечивающая сбор, хранение, обработку, доступ, отображение и распространение пространственно-координированных данных. Это картографические данные о гео-объектах, их семантические атрибуты, справочники и некоторые дополнительные данные, необходимые для функционирования системы.

В состав ИТС входят подсистема сбора, хранения, редактирования и обработки информации, касающейся улично-дорожной сети (УДС) и объектов на ней, подсистема генерации сводных отчетов (XML-шаблоны отчетов), экспертные системы по вопросам дислокации технических средств организации дорожного движения на УДС города, дислокации постов дорожно-патрульной службы, проектирования структуры светофорного цикла, прогнозирования интенсивности движения транспортных потоков. Важнейшими в комплексе ИТС (рис. 5.1) являются системы моделирования координированного управления транспортным потоком; оптимального распределения транспортных потоков на улично-дорожной сети города и др.

На основе анализа информации выдаются указания, предписания и рекомендации соответствующим службам: водоканалу, муниципальным энергетическим предприятиям, транспортным управлениям, аварийным службам и др. По запросам формируются отчеты для руководящих организаций и средств массовой информации.

5.2 Системный анализ потоков в сетях с неоднородными носителями

Объектом системного исследования, выполненного в этом разделе, является комплекс информационно-аналитических технологий используемых в структуре ИТС для оптимального планирования и управления многокритериальными и многопродуктовыми потоками (транспортными, информационными и др.), которые образуются при учете специализации носителей потоков и условий неоднородной неопределенности состояний, а также текущих, оперативных данных. Анализ свойств и формирование технологий управления такими транспортными (грузопотоками и пассажиропотоками) и другими специализированными потоками составляет отдельную научно-прикладную проблему [22].

Актуальность проблемы СА потоков с неоднородными носителями вызвана рядом причин. Приоритетным направлением современного мирового развития является проблема мобильности, одной из составляющих которой выступает задача управления индивидуальными объектами, входящими в состав различных систем. Подавляющее большинство существующих технологических, экономико-математических и других математических моделей и соответствующих информационных технологий не в полном объеме учитывают специфические свойства элементов образующих потоки. Мощное развитие средств телематики открывает возможности усовершенствования комплекса информационно-аналитических технологий, предназначенных для повышения качества услуг и конкурентоспособности работы операторов по планированию и управлению многокритериальными и многопродуктовыми потоками в транспортных сетях. Именно множественность индивидуальных, но взаимодействующих элементов, имеющих собственные цели и ресурсы, определяет необходимость применения здесь методологии системного анализа.

5.2.1. Модели задач о потоках сетях, однородные и неоднородные потоки

При изучении характеристик транспортных и других сетей возникает необходимость вычисления оптимальных значений

функции потока, протекающего от некоторого источника к стоку [22]. Рассмотрим проблемы анализа и оптимального планирования потоков в сетях, когда отдельные единицы потока (носители, транспортные средства) различаются своими свойствами. В качестве свойств носителей потока может быть следующее:

- перемещение носителей по некоторым известным маршрутам, траекториям;
- ограничения на возможность совместного движения единиц потока различных типов по дугам;
- определенные последовательности движения носителей;
- неоднородность единиц потока по «праву собственности», что приводит к необходимости учета индивидуальных оценок цели и допустимых перемещений носителей.

Известные математические модели задач планирования и управления на основе анализа потоков лишь частично учитывают такие требования. В настоящее время управление потоками с учетом специализации свойств отдельных элементов потоков становится одной из актуальных проблем. В разделе выполнен сравнительный анализ основных моделей потоковых задач и показано, что новый класс математических моделей, учитывающих специфические свойства отдельных перемещаемых элементов, является непосредственным обобщением классических моделей.

В литературе рассматривается несколько основных постановок задач о потоках в сетях, в которых учитывается неоднородность элементов. Прежде всего, это однопродуктовые (когда поток в дугах соответствует потоку некоторого однородного продукта) и многопродуктовые модели потоковых задач, которые обобщаются в форме задач о перевозках. Для однопродуктового потока исследуются две основные задачи. Первая – задача максимизации суммарного потока между двумя заданными вершинами при условии, что поток через каждую дугу ограничен сверху и снизу. Эта естественная постановка соответствует, например, максимизации транспортного потока при ограниченной пропускной способности отдельных участков дорог. Вторая задача состоит в нахождении ограниченных потоков минимальной стоимости, когда дугам приписаны стоимости передачи по ним единицы потока.

Представим формулировку задачи об однопродуктовом потоке минимальной стоимости в виде задачи линейного программирования

(ЛП) [22]. Рассмотрим сеть с α источниками, β стоками и ϕ промежуточными узлами. Предположим, что однопродуктовый поток должен протекать из источников в стоки через промежуточные узлы. Каждая дуга сети характеризуется верхней границей U_{ij} потока x_{ij} через нее и стоимостью c_{ij} единицы потока. Сеть может быть представлена в виде ориентированного графа $G=(N,A)$, где $N=N_\alpha \cup N_\beta \cup N_\phi$, а N_α , N_β и N_ϕ - множества источников, стоков и промежуточных узлов соответственно. Задача нахождения потока минимальной стоимости может быть переформулирована математически следующим образом:

$$\min \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \quad (5.1)$$

при условии, что

$$\sum_j x_{ij} - \sum_j x_{ji} \leq a_i, \quad i \in N_\alpha, \quad (5.2)$$

$$\sum_j x_{ij} - \sum_j x_{ji} = 0, \quad i \in N_\phi, \quad (5.3)$$

$$\sum_j x_{ji} - \sum_j x_{ij} \geq b_i, \quad i \in N_\beta, \quad (5.4)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq U_{ij}, \quad (i, j) \in A. \quad (5.5)$$

Из неравенства (5.2) следует, что в нашем распоряжении находится не менее $\sum_i a_i$ единиц продукта, а согласно неравенствам (5.4), в стоки должно быть доставлено не менее $\sum_i b_i$ единиц. Рассматривают несколько обобщений модели (5.1) – (5.5), которые, в целом, сохраняют ее основной смысл. Как можно установить по (5.1) – (5.5) единицами потока выступают x_{ij} , относительно которых нет никаких дополнительных требований или же условий.

5.3.2. Многопродуктовые и многокритериальные модели задач о потоках в сетях

Характерная особенность задач о многопродуктовом потоке состоит в том, что по дугам сети протекает, не один, а несколько неоднородных потоков, соответствующих процессам транспортировки различных продуктов. При этом суммарная величина потоков всех продуктов, перемещаемых по дугам, ограничена их пропускной способностью.

Задачи о многопродуктовом потоке также могут быть сформулированы как задачи линейного программирования [22]. Пусть x_{ij}^k – поток k -ого продукта из i -ого источника в j -й сток, а c_{ij}^k – стоимость транспортировки единицы этого продукта. Далее пусть a_i^k и b_j^k – это предложение узла i и спрос узла j для k -ого продукта, соответственно, обозначим u_{ij} – пропускная способность дуги (i, j) . Тогда постановка многопродуктовой транспортной задачи имеет вид:

$$\min \sum_{k=1}^r \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij}^k x_{ij}^k \quad (5.6)$$

при условиях, что

$$\sum_i x_{ij}^k = b_j^k \text{ для всех } j, k, \quad (5.7)$$

$$\sum_j x_{ij}^k = a_i^k \text{ для всех } i, k, \quad (5.8)$$

$$\sum_k x_{ij}^k \leq u_{ij} \text{ для всех } i, j, \quad (5.9)$$

$$x_{ij}^k \geq 0 \text{ для всех } i, j, k. \quad (5.10)$$

Здесь, как и в однопродуктовой модели, предполагается, что для каждого продукта суммарное предложение равно суммарному спросу,

$$\sum_i a_i^k = \sum_j b_j^k \text{ для всех } k. \quad (5.11)$$

В многопродуктовых задачами о перевозках вводятся промежуточные узлы [22], которым не приписывается ни

предложение, ни спрос, но требуется выполнение условия сохранения потока. Многопродуктовые задачи о перевозках могут быть представлены следующей моделью задач линейного программирования:

$$\min \sum_{k=1}^r \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^k x_{ij}^k. \quad (5.12)$$

Причем:

1) если узел i является источником продукта k , то

$$\sum_j x_{ij}^k - \sum_j x_{ji}^k = a_i^k, \quad (5.13)$$

2) если узел i является промежуточным узлом, то

$$\sum_j x_{ij}^k - \sum_j x_{ji}^k = 0, \quad (5.14)$$

3) если узел j является стоком продукта k , то

$$\sum_i x_{ij}^k - \sum_i x_{ji}^k = -b_j^k, \quad (5.15)$$

также должны выполняться ограничения вида:

$$\sum_k x_{ij}^k \leq u_{ij} \text{ для всех } (i, j) \in A, \quad (5.16)$$

$$x_{ij}^k \geq 0 \text{ для всех } k \text{ и } (i, j) \in A. \quad (5.17)$$

Многопродуктовую задачу можно решить независимо для каждого продукта, как соответствующую транспортную задачу, используя, например, алгоритм дефлекта.

Модели потоковых задач (5.1) – (5.5), (5.6) – (5.11) и (5.12) – (5.17) формируют оптимальные планы транспортировки на основе спросов и предложений узлов, по сути, не рассматривая процесс транспортировки, носителей потоков, неявно предполагая их однородность, эквивалентность.

Можно установить, что многопродуктовые задачи являются частным случаем задач о потоках со специализацией носителей, когда единицы потока (исполнитель транспортировки) могут

различаться, иметь индивидуальные свойства. В качестве этих свойств, в частности, могут быть: перемещение по известным маршрутам (в классических моделях не рассматривается), ограничения на возможность совместного движения по дугам, задание определенной последовательности продвижения носителей, право собственности. Последнее из них задает набор индивидуальных оценок качества и цели перемещения носителей. Одной из отличительных особенностей потоковых задач со специализацией носителей является необходимость формирования набора траекторий движения единиц потока. На этом множестве и разыскиваются решения задач.

Заметим, что многопродуктовая задача является частным случаем потоковой задачи с индивидуальными свойствами. Напримет, таким индивидуальным свойством может выступать качество – «быть продуктом типа P ». Необходимо указать, что математическая формулировка многопродуктовой задачи (5.6) – (5.11) (и ее обобщения (5.12) – (5.17)) фактически является одной из моделей компромисса многокритериальных задач оптимального планирования. А именно, если в качестве обобщенной скалярной функции (5.6) или (5.12) выступает аддитивная функция такая, что каждый частный критерий $P_k = \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^k x_{ij}^k$ - равноценен, имеет один и

тот же весовой коэффициент γ_k , например, единицу. Разумеется, компромиссная модель содержит все ограничения в совокупности, а также включает дополнительные ограничения на общую пропускную способность сети. Простейшим обобщением многопродуктовой постановки, выполненной с позиций учета специализации свойств носителей потока, «право собственности», является модель типа (5.6) – (5.11), в которой частные критерии неравноценны $\gamma_k \neq \gamma_j$. $\sum \gamma_k = 1$. Разумеется, что вместо аддитивной модели скаляризации, как (5.6) и (5.12), можно использовать любые другие модели компромиссов [15, 16]; например, функцию максимума.

Чтобы продолжить сравнение моделей многопродуктовых задач о потоках в сетях с моделями задач с индивидуальными свойствами, при специализации носителей потоков, подробнее рассмотрим такое свойство, как «право собственности». Для наглядности считаем, что каждый продукт принадлежит отдельному собственнику, характеризуется своей функцией цели. То есть в задачу типа (5.6) – (5.17) первоначально вводится вектор частных целей, отдельных для

каждого собственника. Для решения такой, теперь уже многокритериальной, задачи могут быть использованы различные модели и методы, в том числе и скаляризация, в частности, приводящая к критерию (5.6). Кроме того при рассмотрении задачи как многокритериальной, предполагающей формирование компромисса, естественно может быть расширена система ограничений, подобных (5.9), (5.16). На допустимую область решения могут быть наложены новые, дополнительные требования. Например:

$$x_{ij}^k \leq u_{ij}^k, k = \overline{1, m}, \quad (5.18)$$

хотя

$$\sum_{k=1}^m x_{ij}^k \leq u_{ij} \text{ для всех } (i, j) \in A, \quad (5.19)$$

где m - количество различных продуктов.

В настоящее время известен ряд алгоритмов для решения многопродуктовых потоковых задач (алгоритм Ху, метод «агрегирования» и др.). Эти методы прямо не могут быть использованы для потоковых задач со специализацией носителей, при задании для них индивидуальных свойств. Они непосредственно не учитывают дополнительные ограничения типа (5.18) и др., а также возникающую при определенных условиях многокритериальность, а значит и качественно новый аспект проблемы – компромиссный характер функции цели и решения в целом.

Остановимся на методах исследования сформулированных выше задач исследования операций, как вычислительных структур СА.

5.2.3. О реализации многокритериальных потоковых задач с использованием клеточных автоматов

Неоднородность элементов, определяющих решения предложенного класса математических моделей задач о потоках в сетях, делает актуальными разработки некоторого достаточно общего метода, по крайней мере, определения общего подхода, к их численной реализации. Решение этой задачи осложняется тем, что индивидуальные свойства носителей потока вводят в модель многочисленные неоднородные в математическом и логическом плане условия. Исследования показали, что одним из общих методов

реализации рассматриваемого класса потоковых задач может быть модель клеточных автоматов [22]. Особенностью решения задач в приложении к транспортным, в том числе и к железнодорожным сетям, является большое число вершин и значительная вычислительная сложность применения известных алгоритмов. В то же время модели клеточных автоматов позволяют организовать эффективное распараллеливание процессов расчетов характеристик сети. Вычислительная система, организованная в соответствии с архитектурой клеточных автоматов, характеризуется функционированием всех элементов системы по единому набору правил, что позволяет описать свойства всей системы на основе локальных зависимостей.

Для демонстрации примера применения моделей клеточных автоматов рассмотрим известную модель задачи поиска кратчайших путей в транспортных сетях. Задача, как известно, состоит в нахождении путей минимального «веса» от некоторой заданной вершины до всех имеющихся в сети вершин. Решение подобных задач имеет важное практическое значение в различных приложениях, когда веса дуг означают время, стоимость, расстояние, затраты и др.

Для решения этой задачи предлагается в качестве первичного элемента модели транспортной сети использовать клеточный автомат. Автомат представлен равномерной сеткой, каждая ячейка которой (клетка) содержит несколько элементов данных; структура сети представляет набор клеточных автоматов. Время в системе, представляет этапы итерационного процесса, изменяется дискретно, любая клетка модели на каждом шаге вычисляет по единственному набору правил свое новое состояние, используя значения параметров состояний соседних клеток. Таким образом, законы функционирования транспортной системы с учетом всех требований и ограничений выполняются единообразно. Локальный характер модели клеточных автоматов означает требование одновременного изменения всех узлов-клеток на основе значений параметров (состояний) соседних. Развитие процессов в этих моделях идет поэтапно. В качестве клетки была выбрана вершина транспортной сети. Для каждой вершины известно множество клеток, с которыми она связана (соседние вершины), а также расстояние, «веса дуг», между ними. На каждом этапе любая клетка модели вычисляет свое

новое состояние (длину кратчайшего пути) по состояниям «соседних».

Для задачи о нахождении путей «минимального веса» предложен следующий клеточно-автоматный алгоритм. В алгоритме i - номер текущей вершины; L_i - длина пути к i -ой вершине; Q_i - вершина, из которой есть дуга в i ; $\Gamma^{-1}(i)$ - множество вершин, из которых есть дуги в i ; s - заданная вершина, из которой находятся кратчайшие пути; c_{ij} - длина дуги (i, j) .

Шаг №1

$L_s = 0; Q_s = 0; L_i = \infty, Q_i = \infty$ для всех $i \neq s$.

Шаг №2

$flag = true$; для каждого i находим множество $\Gamma^{-1}(i)$;

для всех $u \in \Gamma^{-1}(i)$ вычисляем $r = L_u + c_{ui}$;

если $r < L_i$, то $L_i \leftarrow r; Q_i \leftarrow u; flag = false$.

Шаг №3

Если $flag = true$, то Конец,
иначе переходим на Шаг №2.

В итоге вектор L будет содержать кратчайшие пути к соответствующим вершинам, при этом, используя вектор Q , можно найти все пути, которые соответствуют кратчайшим расстояниям вектора L .

Представленный клеточно-автоматный алгоритм за конечное число шагов находит все пути «минимального веса» от некоторой заданной вершины до всех остальных вершин.

Перспективность применения моделей клеточных автоматов в многокритериальных потоковых задачах со специализацией носителей обусловлена возможностью локальной проверки требуемых свойств потоков. За счет этого при соблюдении требований модели локально, для каждой клетки автомата на всех этапах вычислительного процесса, они будут выполнены и в целом. Кроме того, при этом подходе достаточно просто могут быть применены параллельные алгоритмы.

Таким образом, на основе СА получено обобщение многопродуктовых и многокритериальных моделей оптимизационных задач о потоках в сетях, прежде всего –

транспортных. Отличие предлагаемых обобщенных моделей состоит в учете специализации единиц потоков, носителей, как новых компонентов задач о потоках в сетях. Для реализации таких типов математических моделей задач планирования и управления предложен общий подход на основе клеточных автоматов.

5.3 Логистические модели планирования поездок в транспортных системах с пересадками с учетом специализации требований пассажиров

В настоящее время при организации железнодорожных, а также комбинированных пассажирских перевозок, в которых задействованы несколько видов транспорта, все больше внимания уделяют применению логистических принципов планирования и управления. В этом разделе представлена одна из типичных задач подобного рода. Для определённости изложения рассмотрены пассажирские железнодорожные перевозки. Вместе с тем, приведенные здесь математические модели, предназначенные для выбора наиболее приемлемого способа реализации потребностей в переездах с пересадками, могут найти применение и для учета возможностей логистического взаимодействия нескольких видов транспорта, с целью повышения своей конкурентоспособности, за счет синергетического системного эффекта, реализуемого разработанными моделями планирования.

Процесс планирования пассажиропотоков с пересадками в железнодорожных транспортных сетях затруднен неравномерностью пассажиропотоков во времени и пространстве. Для реализации этого требуется проведение исследований загрузки инфраструктуры железнодорожных вокзалов и станций при изменениях размеров движения пассажирских поездов. При планировании необходимо заранее определить станции пересадки пассажиропотоков и категории пассажирских поездов, для которых следует предусмотреть увязку времени прибытия и отправления в графиках движения. В математическом смысле здесь возникает задача оптимизации распределения потоков в многопродуктовых сетях [21, 22, 24]. Вместе с этим в работе предложено обобщенную модель

планирования поездок с пересадками, которая учитывает неоднородность требований пассажиров к процессу пассажирских перевозок.

5.3.1. Модель планирования железнодорожных поездок с пересадками

Задача по усовершенствованию моделирования распределения пассажиропотоков по поездкам с пересадками заключается в следующем. Железнодорожная сеть представляется в виде ориентированного графа $G(E, A)$, где вершины E сети соответствуют станциям формирования и оборота пассажирских поездов, а ориентированные ребра A физического графа соответствуют возможным направлениям назначения пассажирских поездов. Величина интенсивности пассажиропотока (количество пассажиров, следующих по каждому из направлений за установленный период, например, за сутки) для каждого направления, который направляется r – из источников s^r к стокам t^r , известна и равна f^r . Обозначим через x_{ij}^r – поток по дуге A_{ij} , соответствующий числу пассажиров, следующих из станции i до станции j r - тым направлением поездов. Пусть c_{ij}^r – стоимость перевозки единицы потока (пассажира) со станции i до станции для j r - того направления поездов, в которую входит и стоимость за пересадку для некоторых станций. Тогда математическая модель оптимального планирования поездок с пересадками может быть представлена в виде:

$$\sum_r \sum_i \sum_j c_{ij}^r x_{ij}^r \rightarrow \min \quad (5.20)$$

при ограничениях :

$$\sum_j x_{ij}^r - \sum_j x_{ji}^r = -f^r, i \in s^r, r = 1, 2, \dots, R \quad (5.21)$$

$$\sum_j x_{ij}^r - \sum_j x_{ji}^r = 0, i \notin E_s, j \notin E_t, r = 1, 2, \dots, R \quad (5.22)$$

$$\sum_j x_{ji}^r - \sum_j x_{ij}^r = f^r, i \in t^r, r = 1, 2, \dots, R \quad (5.23)$$

$$0 \leq \sum_r x_{ij}^r \leq U_{ij}, (i, j) \in A \quad (5.24)$$

В этой модели U_{ij} – пропускная способность ребра (i, j) , например, число мест в пассажирских поездах, которые следуют со станции i до станции j .

Для примера рассмотрим логический граф сети G вида, рис. 5.2 [25]: На рисунке толстыми стрелками (**—**) показаны потоки пассажиров, тонкими ($\rightarrow$) – возможные варианты следования потоков пассажиров, а пунктирные стрелки соответствуют дугам графа транспортной сети.

В графе узлы – это станции, которые пронумерованы, пропускные способности каждой дуги известны и равны следующим условным параметрам:

Пропускные способности U_{ij} дуг X_{ij}						
X_{12}	X_{15}	X_{24}	X_{37}	X_{45}	X_{56}	X_{67}
4	4	7	3	7	7	8

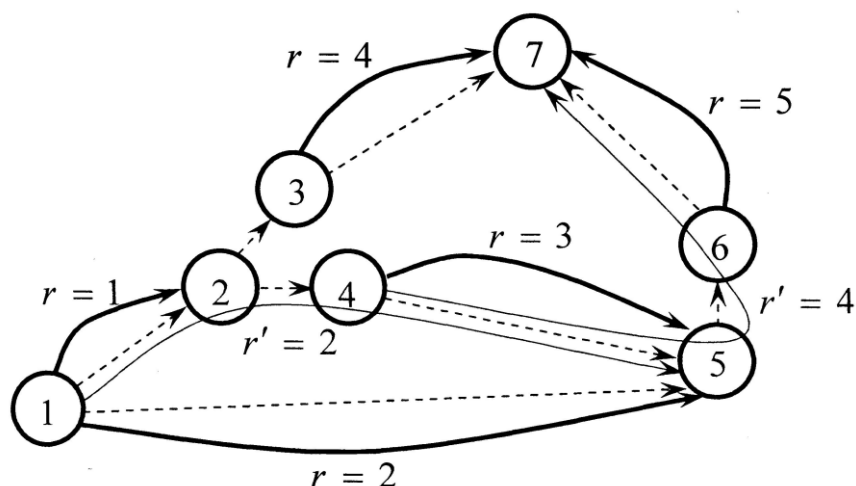


Рис. 5.2. Логический граф сети пассажиропотоков G .

Здесь X_{ij} – обозначение дуги, которая связывает вершину i с вершиной j , для нее пропускная способность – равна U_{ij} .

Стоимости перевозок единицы потока (пассажира) по дугам равны:

Стоимости перевозок C_{ij} единицы потока по дугам транспортной сети X_{ij}						
X_{12}	X_{15}	X_{24}	X_{37}	X_{45}	X_{56}	X_{67}
4	4	7	3	7	7	8

Для решения задачи (5.20)-(5.24) в [29] был использован метод «роя частиц», который дал результаты, представленные на рис. 5.3, где показаны пассажиропотоки по направлениям транспортной сети.

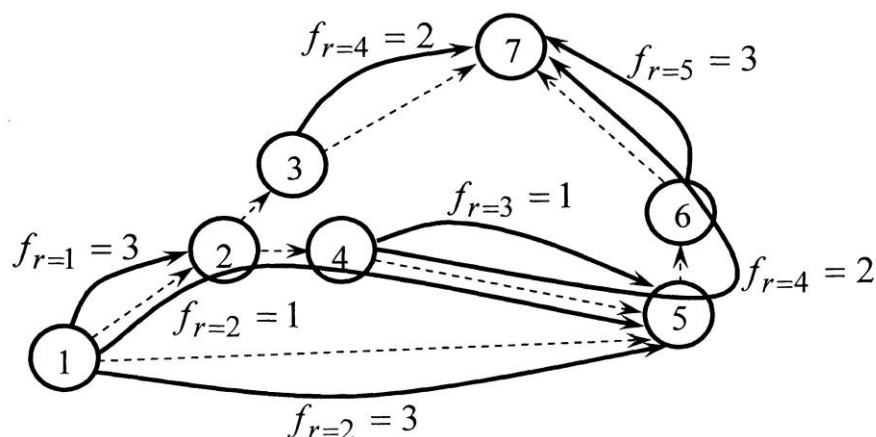


Рис. 5.3. Оптимальный вариант распределения пассажиропотоков по направлениям транспортной сети

При этом значение функции цели (5.20) (минимальная стоимость перевозок) составила 293 условных денежных единиц.

5.3.2. Планирование перевозок при учете неоднородности требований пассажиров к транспортной сети

Учет требований пассажиров, их неоднородность, существенно изменяет содержание и сложность задач планирования. В этих случаях возникают модели планирования с индивидуальными свойствами элементов, участников потока [25]. Для нового класса задач, когда учитывают индивидуальные свойства носителей потока, метод роя частиц уже не может быть использован непосредственно, из-за большого количества дополнительных ограничений модели. Сущность специализации требований пассажиров для модели (5.20) - (5.24) заключается в учете категорий пассажиров (места в вагонах различных типов: плацкарт, купейный и другие). Решение оптимизационных задач, подобных (5.20) – (5.24) с учетом индивидуальных свойств носителей потока, выполняется с помощью метода редукции - путем увеличения количество состояний модели планирования.

Построим логистическую математическую модель планирования поездок с пересадками, которая имеет системный характер и расширяет модель (5.20) – (5.24) за счет учета неоднородности требований пассажиров. При планировании пассажирских поездок с пересадками удобно представить железнодорожную сеть в виде ориентированного графа $G(E, A)$. Величина интенсивности пассажиропотока для каждого типа вагонов k , для каждого r -того направления, который следует из источника i к стоку j , известна и равна f^{rk} . Обозначим через x_{ij}^{rk} – поток по дуге A_{ij} , соответствующей числу пассажиров, следующих из станции i до станции j r – тым направлением поездов в k - том типе вагона, также пусть c_{ij}^{rk} – стоимость перевозки единицы потока (пассажира) со станции i к станции j для r - того направления поездов и k - того типа вагонов, в которую входит и стоимость за пересадку для некоторых станций. Тогда математическая модель планирования с учетом неоднородности элементов потока будет иметь вид:

$$\sum_r \sum_k \sum_i \sum_j c_{ij}^{rk} x_{ij}^{rk} \rightarrow \min \quad (5.25)$$

при ограничениях:

$$\sum_k \sum_j x_{ij}^{rk} - \sum_k \sum_j x_{ji}^{rk} = -f^{rk}, i \in s^r, r = 1, 2, \dots, R; \quad (5.26)$$

$$\sum_k \sum_j x_{ij}^{rk} - \sum_j x_{ji}^{rk} = 0, i \notin E_s, j \in E_t, r = 1, 2, \dots, R; \quad (5.27)$$

$$\sum_k \sum_j x_{ji}^{rk} - \sum_k \sum_j x_{ij}^{rk} = f^{rk}, i \in t^r, r = 1, 2, \dots, R \quad (5.28)$$

$$0 \leq \sum_r x_{ij}^{rk} \leq U_{ij}^k, (i, j) \in A, k = 1, 2, \dots, K. \quad (5.29)$$

В этой модели U_{ij}^k – пропускная способность ребра (i, j) , то есть число мест в поездах, следующих со станции i до станции j в k - том типе вагона. В отличие от модели (5.20) – (5.24) количество ограничений модели (5.25) – (5.29) увеличивается на порядок, таким образом использовать метод роя частиц будет сложно и не эффективно. Логистико-математическая модель с учетом индивидуальных свойств носителей потока (5.25) - (5.29) после

редукции относится к классу задач линейного программирования и для решения задачи может быть использован симплекс-метод [20].

5.3.3. Реализация модели поездок с пересадками с учетом неоднородности требований пассажиров

Для вычислительного примера был рассмотрен тот же физический граф, рис. 5.2, в этом графе по r -тым направлениям передвигаются пассажиры двух категорий: пассажиры купейных и плацкартных вагонов. Для каждой дуги графа также известны пропускные способности по каждой категории пассажиров:

Пропускные способности U_{ij} дуг X_{ij} по категориям пассажиров							
	X_{12}	X_{15}	X_{24}	X_{37}	X_{45}	X_{56}	X_{67}
Плацкарт	1	4	7	3	7	7	8
Купе	4	4	7	3	7	7	8

Как и в задаче (5.20)-(5.24), здесь известны стоимости перевозок единицы потока (пассажира) по категориях пассажиров:

Стоимости перевозки C_{ij} единицы потока по дугам X_{ij}							
	X_{12}	X_{15}	X_{24}	X_{37}	X_{45}	X_{56}	X_{67}
Плацкарт	10	30	5	20	11	2	14
Купе	11	34	7	27	13	3	18

При решении этой задачи симплекс-методом получены следующие результаты относительно пассажиропотоков по направлениям; в модели отмечена последовательность дуг X_{12} - X_{24} - X_{45} , которые принадлежат направлению $r' = 2$ на рис. 5.2:

Пассажиропоток по направлениям (плацкарт)						
X_{12}	X_{12} - X_{24} - X_{45}	X_{15}	X_{45}	X_{37}	X_{45} - X_{56} - X_{67}	X_{67}
1	0	2	1	2	2	3

Пассажиропоток по направлениям (купе)						
X_{12}	X_{12} - X_{24} - X_{45}	X_{15}	X_{45}	X_{37}	X_{45} - X_{56} - X_{67}	X_{67}
2	2	0	0	0	0	0

Общая минимальная стоимость перевозки пассажиров различных категорий также имеет значение: 293 условных дененжных единиц. В связи с этим результатом следует отметить, что хотя общая величина целевой функции, как оценки оптимальности перевозки пассажиров, не изменилась по сравнению с результатами задачи (5.20) – (5.24), но произошло разделение потока по категориям пассажиров. Результаты расчетов по планированию пассажиропотоков по индивидуальным свойствам носителей потока и с учетом пересадок показали, что введение в модели (3.25) - (5.29) для каждой дуги графа отдельных ограничений на пропускную способность по разным типам вагонов, приводит к разделению потока по категориям пассажиров. С помощью этого результата можно получить различные маршруты передвижения единиц потока, в зависимости от категории, т.е. требований к перевозкам. Вместе с тем, в общем случае возможны другие формы ограничений (5.29), при которых полученное выше разделение потоков пассажиров может не выполняться. Применение процедуры редукции размерности модели оптимального планирования, разумеется, приводит к росту сложности численной реализации, но для линейных моделей, подобных (5.25) - (5.29), это не является существенным препятствием. Более важным является гарантированное обеспечение расчета параметров глобального оптимума в транспортной сети.

Таким образом, на основе подхода СА предложена усовершенствованная логистическая модель оптимального планирования поездок с пересадками с учетом различий требований пассажиров к качеству услуг транспортной сети. Показано, что использование процедуры редукции размерности пространства состояний модели задачи планирования дает возможность применения для их решения методов линейного программирования, что обеспечивает более эффективную численную реализацию подобных задач логистического планирования поездок с пересадками.

5.4 Задача интеллектуального управления расформированием-формированием поездов

Задача расформирования-формирования поездов – одна из ключевых для технологий грузовых перевозок железнодорожного транспорта. Управление очередностью расформирования-формирования поездов на сортировочных станциях осуществляется в первую очередь с целью уменьшения эксплуатационных расходов. Это достигается путем сокращения простоя вагонов на станции, при этом дополнительно учитываются такие показатели как простои поездов на подходах к станции, простои локомотивов на станции и объемы маневровой работы. Также управление очередностью расформирования поездов дает возможность осуществления предварительной сортировки вагонопотоков, что носит системный характер, сказывается на эксплуатационных расходах уже не отдельной станции, а всей железнодорожной сети в целом [13].

Парки приема и отправления сортировочных станций являются системами массового обслуживания, в которых происходит подготовка поездов соответственно к расформированию и к отправлению со станции. В общем случае поезда в этих системах обслуживаются в порядке поступления заявок (т.н. дисциплина обслуживания FI-FO – First In – First Out). Такая технология обслуживания традиционно использовалась с тех времен, когда информационное обеспечение текущего планирования работы станций было недостаточным для возможности управления процессами расформирования-формирования. Развитие автоматизированных систем управления сортированными станциями позволило изменить эту ситуацию. В современных условиях есть возможность, используя данные АСК ВП УЗ-Е (автоматизированной системы управления грузовыми перевозками Укрзализныци), дать управленческому персоналу инструменты, с помощью которых он сможет принимать активное участие в управлении процессами расформирования-формирования поездов. В данном случае под управлением имеется в виду выбор очередности обслуживания поездов в парках станции.

Для решения задачи управления очередностью расформирования-формирования поездов (УОРФП) необходимо располагать следующими исходными данными:

- прогноз прибытия поездов на станцию;
- сведения о составах поездов, поступающих в расформирование (в объеме документа ТГНЛ);
- сведения о наличии вагонов по назначениям плана формирования поездов на путях сортировочного парка;
- текущее состояние путей всех парков сортировочной станции;
- нормы времени выполнения технологических операций на станции;
- емкость в условных вагонах сортировочных путей;
- сведения о наличии поездных локомотивов, готовых к подаче под поезда своего формирования.
- график движения поездов.

Часть перечисленных данных являются нормативными, другая же часть является оперативными сведениями, которые можно получить из АСК ВП УЗ-Е. Огромное значение имеет достоверность полученных из АСК ВП УЗ-Е данных. Следует отметить, что большинство данных можно с достаточной уверенностью отнести в разряд достоверных. Исключение составляет прогноз прибытия поездов.

Точность прогноза прибытия поездов может очень сильно колебаться в зависимости от используемого метода прогнозирования. Эффективное управление очередностью расформирования-формирования поездов возможно при средней ошибке прогнозирования не более величины горочного технологического интервала. Поэтому используемый метод прогнозирования должен обеспечивать точность не меньше указанной величины.

Опыт эксплуатации показывает, что удовлетворительные результаты обеспечивает прогнозирование движения поездов на основе анализа «схожих» ситуаций, которые происходили в прошлом – так называемый ситуационно-эвристический метод прогнозирования (СЭМП). «Схожесть» ситуации определяется на основе большого числа факторов влияния, которые фиксируются в АСК ВП УЗ-Е. К таким факторам можно отнести массу, длину поезда, график движения поездов, наличие пассажирских поездов с

опозданиями, загруженность участков поездами, погодные условия и т.д. В современных условиях на железных дорогах Украины реализуется обширная программа по оснащению поездных локомотивов GPS-трекерами. С помощью использования спутниковых GPS-технологий возможно отслеживать местоположение подвижного состава в реальном масштабе времени и с большой точностью. За счет этого теперь стало возможным при прогнозировании движения поездов точно учитывать взаимное расположение поездов на перегонах, и как следствие этого – учитывать показания светофоров автоблокировки при прохождении их поездами. Эта информация является новой и ранее недоступной в среде автоматизированных систем управления железнодорожным транспортом.

В общем виде задача прогнозирования моментов прибытия поездов формулируется следующим образом. Пусть необходимо определить прогнозируемые моменты прибытия поездов $\tilde{Y}_1, \tilde{Y}_2, \dots, \tilde{Y}_l, \dots, \tilde{Y}_L$. Сокращенно обозначим всю их совокупность через $\{\tilde{Y}_L\}$. Будем считать, что значения прогнозируемых моментов прибытия поездов зависят от основных и дополнительных факторов. На прогнозируемый период значения факторов известны. Обозначим их совокупности, соответственно, через $\{\hat{O}_i^* : i = 1..I\}$ и $\{\hat{O}_v^* : v = 1..Θ\}$.

В предплановую ситуацию (Φ_i^*, Φ_v^*) должна войти вся известная до начала оперативного расчета информация, которая помогает более достоверно выполнять прогнозирование. В качестве дополнительных факторов приняты – календарные особенности планового периода δ и погодные условия ω , дальше считаем, что $(\Phi_v^* = (\delta^*, \omega^*))$. В качестве исходной предплановой ситуацией принимаем $(\Phi_i^*, \delta^*, \omega^*)$.

Количественные характеристики ситуации и соответствующие им отчетные значения прогнозируемых длительностей движения по участкам будем называть строкой опыта. Данные по реализации процессов перевозок за Z предплановых периодов образуют массив опыта. Вид матрицы, характеризующей массив накопленных прецедентов, представлен в табл. 5.1 [14].

Принципиальной особенностью СЭМП является построение функции связи прогнозируемых продолжительностей движения по участкам не со всеми элементами массива опыта, а лишь с

элементами близких строк (по отношению к ситуации в начале планового периода).

Таблица 5.1

Массив наблюдений за Z предплановых периодов

Строка опыта	Факторы			Выполненные показатели
	Основные	Дополнительные		
1	$\Phi_1^1,...,\Phi_i^1,...\Phi_l^1$	δ^1	ω^1	$Y_1^1,...Y_l^1,...Y_L^1$
...	...	...	...	...
j	$\Phi_1^j,...,\Phi_i^j,...,\Phi_l^j$	δ^j	ω^j	$Y_1^j,...Y_l^j,...Y_L^j$
...	...	...	...	...
z	$\Phi_1^z,...,\Phi_i^z,...\Phi_l^z$	δ^z	ω^z	$Y_1^z,...Y_l^z,...Y_L^z$
z+1	$\Phi_1^*,...,\Phi_i^*,...,\Phi_l^*$	δ^*	ω^*	? ? ?

Таким образом, для прогноза работы в плановый период учитывается не весь имеющийся опыт деятельности железнодорожного полигона, а только наиболее близкий к текущей оперативной обстановке. Здесь можно провести некоторую параллель с деятельностью человека, который, принимая оперативное решение, перебирает в памяти решения, принятые ранее в похожих ситуациях.

В массиве опыта может оказаться и ситуация, которая по значению факторов полностью совпадает с текущей ситуацией на предплановый период. Но из этого не следует, что в качестве прогноза можно выбирать соответствующее отчетное значение. Это объясняется недостаточным количеством факторов влияния, которые учитываются и неопределенностью ситуации на предплановый период. Поэтому результаты прогнозирования будут более надежными, если использовать не единственный опыт, а несколько опытов, близких по ситуации.

Анализируются все строки массива прецедентов. Ситуация определяется вектором с координатами $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_i$. Для оценки близости ситуации j и $z+1$ используется способ покоординатной оценки. В массиве подобных, близких данных о реализации перевозки, (см. табл. 5.2) собираются строки, упорядоченные в соответствии с увеличением критерия $K_{min}^1 < K^2 < \dots < K^m < \dots < K^M$.

Таблица 5.2

Массив подобных вариантов условий перевозок

Строка опыта	Критерий схожести	Основные факторы	Выполненные показатели
1	$K_{\min}^1$	$\Phi_1^1, \dots, \Phi_i^1, \dots, \Phi_I^1$	$\ddot{Y}_1^1, \dots, \ddot{Y}_l^1, \dots, \ddot{Y}_L^1$
...		...	...
m	K^m	$\Phi_1^m, \dots, \Phi_i^m, \dots, \Phi_I^m$	$\ddot{Y}_1^m, \dots, \ddot{Y}_l^m, \dots, \ddot{Y}_L^m$
...		...	...
M	K^M	$\Phi_1^M, \dots, \Phi_i^M, \dots, \Phi_I^M$	$\ddot{Y}_1^M, \dots, \ddot{Y}_l^M, \dots, \ddot{Y}_L^M$
$M+1$		$\Phi_1^*, \dots, \Phi_i^*, \dots, \Phi_I^*$	? ? ? при известных $\dot{\delta}, \dot{\omega}$

Связь между отобранными строками и исходной предплановой ситуацией $(\{\Phi_i^*\}, \delta^*, \omega^*)$, приведенной в строке $M+1$ (табл. 5.2), можно определить несколькими способами, например путем усреднения факторов и показателей массива близких строк или способом многомерной линейной экстраполяции.

На основе полученного прогноза прибытия поездов решается задача УОРФП. Данная задача является дискретной комбинаторной и решается путем перебора вариантов (полного или на ограниченной части вариантов).

Все множество очередностей расформирования-формирования обозначим как $X = \{X^{(t)}\}$. Среди всех вариантов $X^{(t)}$ необходимо выбрать такой, который обеспечивает минимальные общие эксплуатационные расходы сортировочной станции. В этой случае целевая функция задачи УОРФП формулируется следующим образом:

$$C(X^{(t)}) \longrightarrow \min_{\forall X^{(t)} \in X} \quad (5.30)$$

Системный анализ эксплуатационных расходов показал, что они включают в себя расходы, связанные с простым вагонов и локомотивов на станции, простым поездов на подходах к станции, а также с дополнительной маневровой работой, вызванной изменением очередности обслуживания поездов на станции. Модели задачи

УОРФП должны учитывать, что каждый поезд, прибывающий на станцию, может быть принят в парк приема с отклонением от прогноза времени прибытия. С этой целью были обработаны исходные данные натурных обследований, которые представлены гистограммой, характеризующей вероятности различных времен отклонения от прогнозного времени в прибытия поездов. Для формализации этих результатов анализа процессов перевозок поступают следующим образом.

Пусть $\{\theta_i\} = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_f\}$ – множество возможных состояний системы "Станция – Прилегающие участки", которая определяется возможными моментами подхода поездов к станции – $\theta_i = \{T_1, T_2, \dots, T_k\}$. Множество $\{\theta_i\}$ формируется на основе статистических данных о точности прогноза прибытия поездов. Считается, что вероятность $P(\theta_i)$ каждого состояния известна. Учитывая возможность отклонения времени фактического прибытия поездов от прогноза, получаем целевую функцию задачи УОРФП на основе модели стохастического программирования следующего вида:

$$M[C(X^{(t)})] = \sum_{i=1}^f (C(X^{(t)}; \theta_i) \cdot P(\theta_i)) \longrightarrow \min_{\forall X^{(t)} \in X}, \quad (5.31)$$

где $C(X^{(t)}; \theta_i)$ – общие эксплуатационные расходы на реализацию очередности расформирования $X^{(t)}$ в условиях θ_i .

Формализация задачи УОРФП на основе модели стохастического программирования значительно увеличивает объемы вычислительных расчетов. В то же время, поскольку управление очередностью расформирования-формирования поездов осуществляется в оперативных условиях, то возникновение ситуации задержки обработки поездов, связанной с ожиданием окончания расчетов, является недопустимой. В связи с этим возникает необходимость разработки мер, направленных на сокращение размерности задачи УОРФП, уменьшение объема перебора вариантов последовательностей расформирования-формирования.

Одним из путей решения поставленной задачи является ее декомпозиция, разбивка графа вариантов очередности расформирования на отдельные менее громоздкие процессы (см. рис. 5.4). Рисунок показывает, как с этой целью граф вариантов

очередности роспуска поездов глубиной в три состава разбивается на основное дерево вариантов глубиной в один состав и дополнительные деревья глубиной по два состава. Выполняется сравнение вариантов основного дерева, дополнительные деревья вариантов служат для более точной оценки вариантов основного дерева.

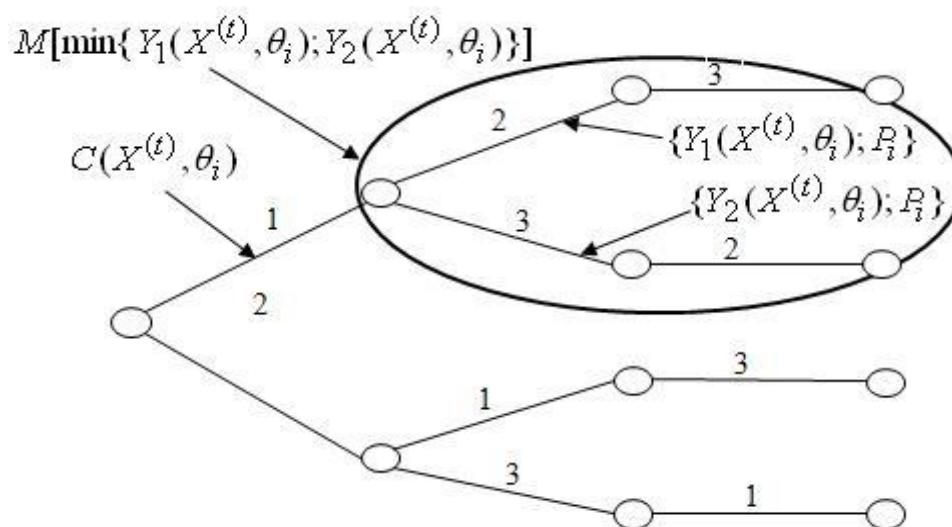


Рис.5.4. Граф возможных вариантов очередностей расформирования поездов в случае декомпозиции задачи УОРФП

Каждый вариант основного дерева оценивается расходами $C(X^{(t)}, \theta_i)$, варианты дополнительного дерева оцениваются расходами $Y_j(X^{(t)}, \theta_i)$. Модель 2-х этапной задачи имеет вид:

$$C^* = M[C(X^{(t)}, \theta_i) + \min\{Y_j(X^{(t)}, \theta_i)\}] \rightarrow \min \quad (5.32)$$

где $j = 1 \dots n$ – номер вариант дополнительного дерева.

Использование в качестве целевой функции задачи УОРФП выражения (5.32) позволяет учитывать стохастическую природу прогноза прибытия поездов, а также избежать чрезмерного увеличения объема расчетов при расчете стохастических оценок затрат по отдельным вариантам. Рис. 5.4 указывает и основную вычислительную трудность решения задачи УОРФП прямым перебором, поскольку она является, как говорят, NP-полной задачей математического программирования [40]. Для сокращения перебора в работе [14] разработана специализированная процедура

приближенной декомпозиции дерева перебора вариантов, подобного рис. 5.4, основанная на введении понятия «идеальная последовательность» очередности вариантов. Формализация «идеальных последовательностей» основана на понимании, системном анализе, конкретных технологических процессов. В нашем случае роспуска составов с целью реформирования, определяющих свойства вновь полученных составов для заданных направлений перевозки. Сущность таких решений в том, что при идентификации «идеальных» состояний в дереве вариантов, дальнейший перебор относительно них становится не рациональным, что сокращает общий объем вычислений [14].

5.5 Инновационные технологии процессов перевозки. Системный анализ проблемы организации высокоскоростного движения поездов на направлении Москва – Санкт-Петербург

Одной из крупных технико-технологических проблем железнодорожного транспорта Российской Федерации является организация высокоскоростного движения пассажирских поездов между Москвой и Санкт-Петербургом. Ее решение потребовало создания целого комплекса принципиально новых средств и технологий, в основе которых находятся современные информационные и коммуникационные технологии. Высокая комплексность и стоимость реализации задач этой проблемы, разумеется, потребовала проведения целого комплекса исследований системного характера, при поведении которых были выработаны общая концепция и программы (научные, технические, технологические и др.), необходимые для организации такого движения скоростного поезда «Сапсан». Нам важно подчеркнуть, по сути, здесь была применена методология системного анализа в его логической, концептуальной форме. Когда результатом анализа проблемы является, прежде всего, создание концепции реализации проекта на основе некоторого четко определенного фундамента. Для высокоскоростного движения поездов – это применение глобальных информационных технологий и принципов интеллектуальных

транспортных систем, применительно к условиям ОАО «РЖД». Применение СА для решения задач формирования транспортной инфраструктуры, совершенствования комплекса автоматизированных систем, учитывая их взаимодействие с подвижным составом, позволило значительно снизить эксплуатационные расходы за счет унификации и реализации проекта в целом по единым техническим решениям.

Рассмотрим отдельные решения в рамках указанной проблемы, учитывая в первую очередь роль «интеллектуальной» составляющей. В настоящее время наиболее успешным использованием ИТС железнодорожного транспорта в «РЖД» является система управления движением скоростного поезда «Сапсан», направление Москва – Санкт-Петербург [7-9]. В ней впервые на практике были реализованы такие интеллектуальные подсистемы, как «Автодиспетчер» и «Автомашинист», в которых реализуются

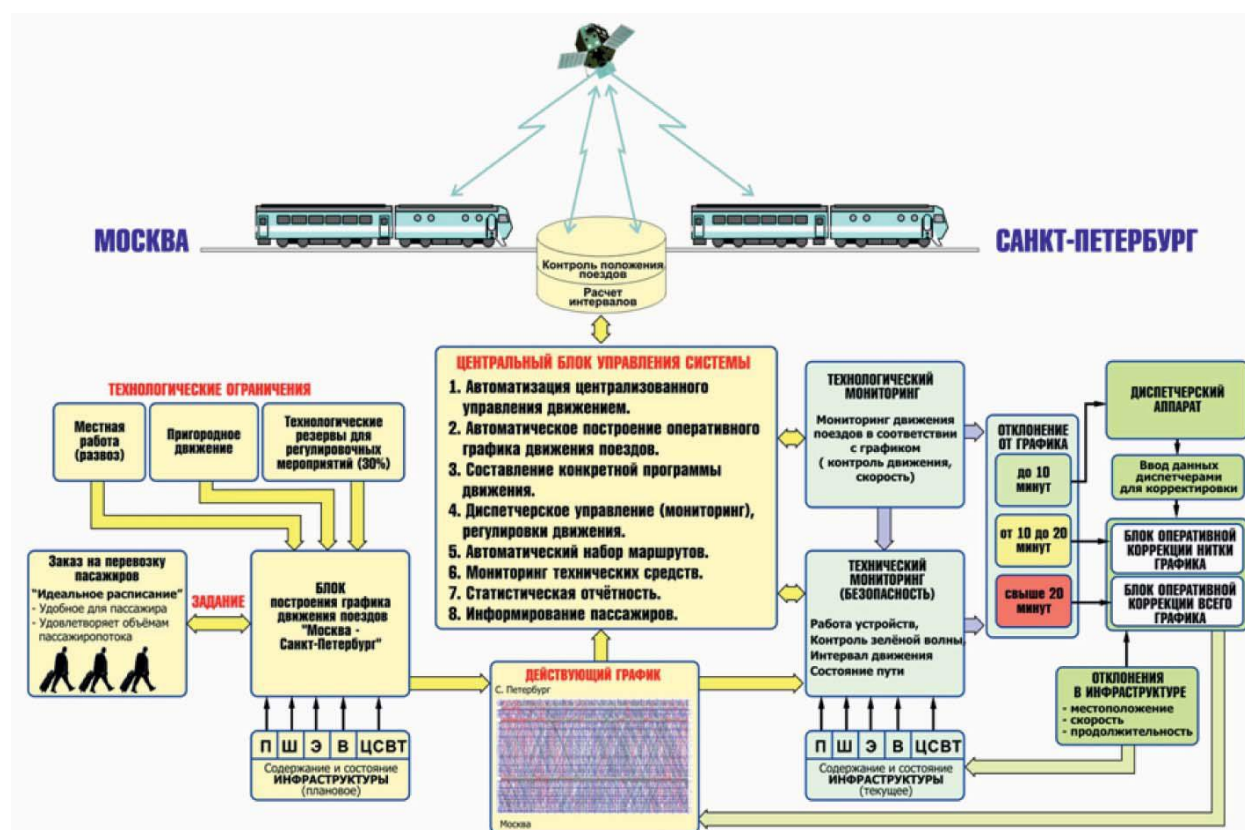


Рис. 5.5. Общая схема интеллектуальной системы управления движением поездов направления «Санкт-Петербург – Москва»

процедуры аналитической обработки информации (ситуационной и диагностической), увязанные с моделированием и прогнозированием развития событий. Общая схема данной системы представлена на схеме рис. 5.5.

В системе управления в локомотивное устройство КЛУБ-У встроена адаптивная подсистема, обеспечивающая контроль над параметрами движения, содержащая программно-технические решения с применением элементов искусственного интеллекта. В настоящее время продолжается работа по дальнейшему расширению функций системы управления движением поезда, закладываются более сложные алгоритмы контроля состояний и управления, которые существенно расширяют количество параметров, контролируемых техникой в автоматическом режиме.

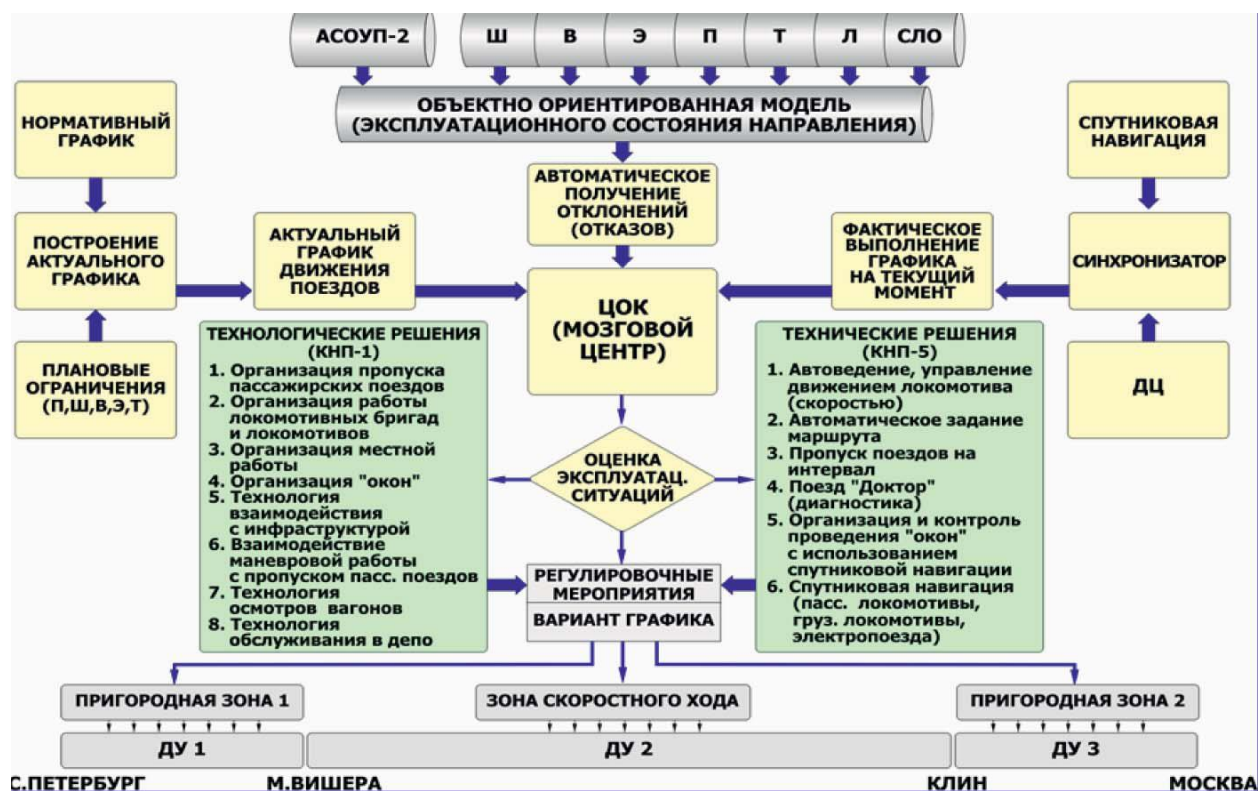


Рис. 5.6. Схема процедур интеллектуального управления перевозками на участках направления «Санкт-Петербург – Москва»

В рамках обеспечения безопасности разработан приемник сигналов автоматической локомотивной сигнализации нового поколения, реализованный на перспективной элементной базе с

использованием специализированных алгоритмов приема и обработки сигналов. Предусмотрено внедрение системы автоблокировки тональными рельсовыми цепями централизованным размещением аппаратуры и дублирующими каналами передачи информации (АБТЦ-М). Предложенное решение представляет собой микропроцессорную систему интервального регулирования и обеспечения безопасности движения поездов на перегонах.

На рис. 5.6 представлена структура интеллектуальной системы управления перевозками на участках направления Санкт-Петербург – Москва.

Отличительной особенностью указанной системы является структурирование ее на следующие системно увязанные ключевые блоки: диспетчерского управления движением поездов, функции «Автодиспетчер» и «Автомашинист», с применением спутниковых навигационных технологий и систем цифровой связи; блок обеспечения безопасности движения с расширением функций комплексной локомотивной системы безопасности КЛУБ-У, включающей в свой состав спутниковые приемники ГЛОНАСС/GPS, мониторинга состояния инфраструктуры и диагностирования подвижного состава; магистральная и технологическая сети связи и системы передачи данных; центр ситуационного управления.

Для увеличения пропускной способности линий и сокращения эксплуатационных затрат, при соблюдении необходимого уровня безопасности движения поездов, компанией Бомбардье Транспортейшн была разработана система интервального регулирования движения поездов на базе радиоканала СИРДП-Е [24].

Структурная схема системы СИРДП-Е представлена на рис. 5.7. Система СИРДП-Е состоит из стационарного и бортового оборудования, она обеспечивает новый подход к управлению движением поездов с использованием беспроводных технологий обмена данными между стационарным и бортовым оборудованием. Для динамического определения местоположения поездов используются технологии и средства спутниковой навигации.

Как показывает схема системы, рис. 5.7, в стационарную часть системы входят центр радиоблокировки RBC с автоматизированным рабочим местом поездного диспетчера (АРМ ДНЦ) в едином диспетчерском центре управления движением поездов (ЕДЦУ).

Кроме того имеются объектные контроллеры (ОК) или системы централизации на станциях, а также базовые передающие станции БС и вышки радиоканала.

При наличии единых диспетчерских центров на участке, оборудованном системой СИРД-Е, открывается возможность управления станциями как локально, так и из удаленного центра. Такой системный подход к формированию транспортной инфраструктуры позволяет значительно снизить эксплуатационные расходы за счет унификации и реализации проекта в целом по единым техническим решениям. Одновременно выполняется изменение технологии обслуживания устройств и работы участка в целом. Если на участке имеются станции, оборудованные микропроцессорной централизацией (МПЦ), то их увязка с центром радиоблокировки осуществляется по протоколу передачи данных. При наличии релейной централизации (ЭЦ) на станции устанавливаются безопасные объектные контроллеры для сопряжения с маршрутами приема-отправления. На разъездах достаточно одного объектного контроллера.

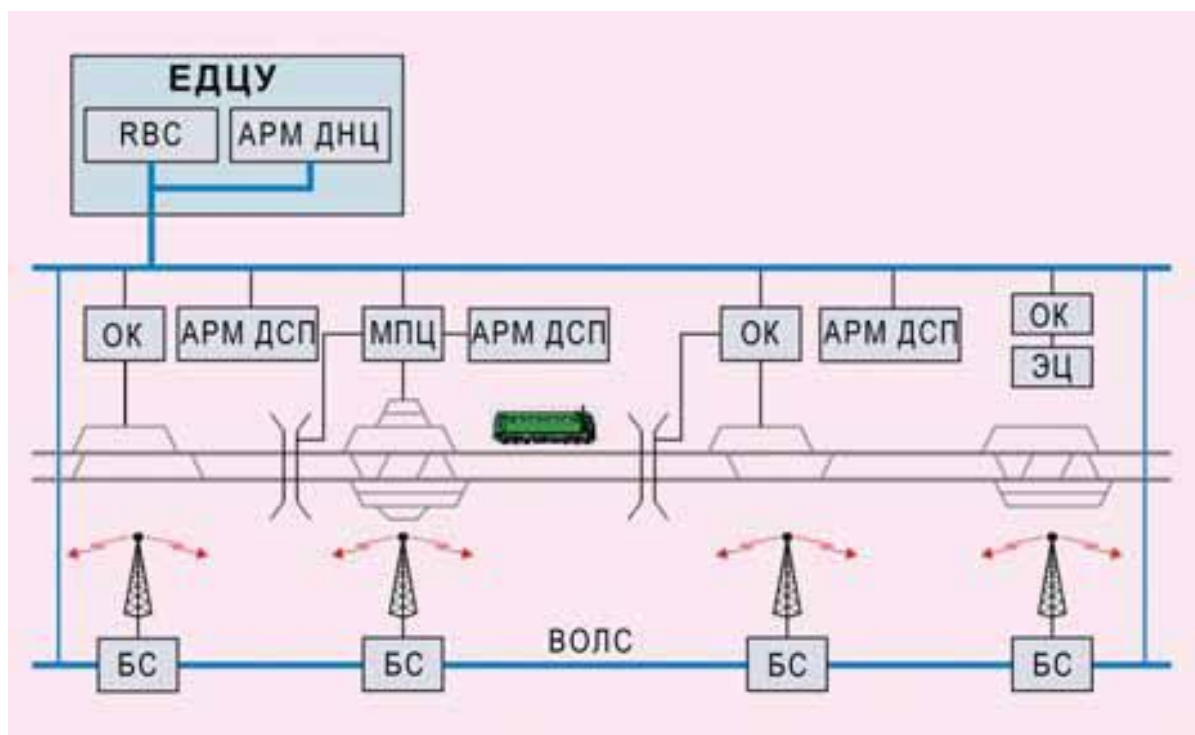


Рис.5.7. Общая структурная схема стационарной части системы СИРДП-Е

Комплект локомотивного оборудования СИРДП-Е дополняет ло-

комотивное устройство безопасности КЛУБ-У и включает в себя бортовое процессорное устройство БПУ, радиопередающее оборудование и антенны, а также инновационную разработку компании Бомбардье Транспортейшн – линдометр, который позволяет выявлять пред отказные состояния рельсов и осуществлять мониторинг их целостности, определяя видимые и скрытые дефекты, качество крепления рельсов, а также точно измерять скорость и пройденное расстояние на любых скоростях движения.

Система интервального регулирования движения поездов СИРДП-Е имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными, которые выражаются в следующем: значительное повышение пропускной способности линии; существенное сокращение затрат в инфраструктуру из-за отсутствия светофоров, рельсовых цепей и др. на перегонах; использование электронной карты маршрутов, автоматически загружаемых по радиоканалу при изменении допустимых параметров движения; система непрерывно контролирует действия машиниста, обеспечивая помощь в принятии решений; гибкость технических решений по организации движения поездов с применением фиксированных или подвижных блок-участков; определение местоположения подвижных единиц посредством бортовых систем с корректировкой пассивными реперными датчиками и/или системами спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS; использование радиоканала для обмена информацией с подвижными объектами (радиоканалы различных стандартов, поддерживающих цифровую передачу данных); возможность использования различных сетей связи (волоконно-оптические линии связи, спутниковые, цифровые системы радиосвязи различных стандартов) для обмена информацией между стационарными объектами.

Применение методологии системного анализа, в данном случае в логической форме, позволило найти эффективное решение комплексной проблемы по формированию транспортной инфраструктуры, по совершенствованию комплекса автоматизированных систем с учетом их взаимодействия с подвижным составом, а также других факторов. В целом это позволило значительно снизить эксплуатационные расходы за счет унификации решений и реализации проекта по единым техническим решениям.

Список использованной литературы

1. Козлов Л.С. Интеллектуальные транспортные системы для повышения конкурентоспособности и рентабельности // www.gosbook.ru/node/23744.
2. «Разработка концепции создания интеллектуальной транспортной системы на автомобильных дорогах федерального значения» // Отчет. Москва, МАДИ, 2009. – 95 с.
3. Kabashkin I. Transport Telematics. - Riga: RAU, 1999. – 342 p.
4. Архитектура интеллектуальных транспортных систем на примере U.S. DoT ITS. www.iteris.com/itsarch/index.htm.
5. Сладковски А., Соловьев В.П., Скалзуб В.В. Концепция международной магистерской программы в области железнодорожных интеллектуальных транспортных систем // В сб. Материалы II международн. научно-практической конференции – «ИнтеллектТранс-2012». СПб, ПГУПС, 2012. – С. 468 – 473.
6. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года // www.atb-tsa.ru/zakonodatelstvo/transport.
7. Гапанович В.А., Розенберг И.Н. Основные направления развития интеллектуального железнодорожного транспорта // Железнодорожный транспорт. – 2011. – №4. – С. 5–11.
8. Розенберг Е.Н., Розенберг И.Н.. Интеллектуальный железнодорожный транспорт. // www.ecw.ru/publ1.php.publid=2010-05a13.
- 9.. Intelligent Transport Systems (ITS) for sustainable mobility. UN, Economic Commission for Europe, UNECE. Geneva, February 2012. – 120 pp.
10. Интеллектуальные транспортные системы. Схема построения архитектуры интеллектуальных транспортных систем. Часть 1. Сервисные домены в области интеллектуальных транспортных систем, сервисные группы и сервисы. ГОСТ РФ № ГОСТ Р ИСО 14813-1 – 2011.
11. Modern Transport Telematics / Ed. Jerzy Mikulski //11th International Coference on Transport Systems Tlematics, TST 2011. Katowice-Ustron, Poland, October 19-22, 2011. – 418 p.
12. Спицнадель В. Н. Основы системного анализа: Учеб. пособие. – СПб.: «Изд. дом «Бизнес-пресса», 2000. – 326 с.
13. Тулупов Л. П., Жуковский Е. М., Гусятинер, А. М. Автоматизированные системы управления перевозочными процессами на железных дорогах. – М.: Транспорт, 1991. – 208 с.

14. Скалозуб В. В. О приближенной декомпозиции NP-полных задач управления сложными процессами [Текст] / В.В. Скалозуб, и др. // Системные технологии. Региональный межвуз. сб. научн. трудов. – 2011. – №4(75). – С. 174-184.
15. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981. – 488 с.
16. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. – М.: Наука, 1971. – 384 с.
17. Экон-киб
18. Кренке Д. Теория и практика построения баз данных. СПб: Питер, 2003. – 800 с.
19. Вітлінський В.В. Ризикологія в економіці та підприємстві: Монографія [Текст] / В.В. Вітлінський, Г.І. Великоіваненко – К.: КНЕУ, 2004. – 480 с.
20. Крушевский А.В. Теория игр. – Киев: Вища школа, 1977. – 214 с.
21. Филлипс Д. И. Методы анализа сетей / Д. И. Филлипс, А. Гарсиа-Диаз. – М.: Мир, 1984. – 496 с.
22. Скалозуб В. В Развитие многопродуктовых и многокритериальных моделей потоковых задач с учетом специализации носителей потоков / В. В. Скалозуб, Л. А. Паник. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. №4. – С. 7 – 12.
23. Дилигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. – М.: Изд-во Машиностроение, 2004. – 378 с.
24. Басакер Р. Введение в теорию исследования операций / Р. Басакер, Т. Саати. Москва. Наука. 1974. – 366 с.
25. Бутько Т.В., Скалозуб В.В., Прохорченко А.В., Панік Л.О. Планування поїздок в транспортних системах з пересадками з урахуванням спеціалізації вимог пасажирів /Зб. наук. праць ДонІЗТ, Випуск №30, 2013. - С. 5-10.
26. Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях. – М.: Мир, 1976. – С.172 – 215.
27. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 452 с.
28. Лю Б. Теория и практика неопределенного программирования / Б. Лю; Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 416 с.
29. Скалозуб В.В. Метод управления типа Такаги-Сугено в условиях многократной неопределенности данных. Системні технології, 1' (50), 2008. С. 120 – 127.
30. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984. – 196 с.

31. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
32. Дидечкин Т. О. Исследование технологических процессов работы сортировочных станций с помощью сетей Петри // В сб. Тез. докл. Международной научно-практической конференции «Современные проблемы развития интеллектуальных систем транспорта». Днепропетровск, 2014. С. 35.
33. Бусленко Н.П., Калашников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем. – М. : Сов. радио, 1973. – 439 с.
34. Садовский В. Н. Основания общей теории систем. Логико-методологический анализ. – М.: , 1974
35. Острейковский В. А. Теория систем. — М.: Высш. шк., 1997. – 240 с.
36. Молчанов А.А. Моделирование и проектирование систем. – К.: Выща шк., 1988. – 359 с.
37. Трахтенброт Б.А., Барздинь Я.М. Конечные автоматы (поведение и синтез). – М.: Наука, – 1976. – 400 с.
38. Шаратов А. Д., Сиднев С. В. Системный анализ. Учеб. пособие. – К.: Техника, 1993. – 573 с.
39. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. / Перев. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. – 280 с.
40. Грешилов А.А. Прикладные задачи математического программирования. 2-е издание. – М.: Логос, 2006. – 288 с.
41. Ильман В.М., Скалозуб В.В., Шинкаренко В.І. Формальні структури та їх застосування. – Д.: Вид.-во Дніпропетр.нац. ун-ту залізн.трансп., 2009. – 205 с.
42. Шинкаренко В.И., Ильман В.М., Скалозуб В.В. Структурные модели алгоритмов в задачах прикладного программирования. I. Формальные алгоритмические структуры. // Кибернет. и сист. анализ, 2009, № 3. С. 3–14.
43. Калмыков С.А., Шокин Ю. И., Юлдашев З.Х. Методы интервального анализа. – Новосибирск: Наука, 1986. – 221 с.

Авторы: **Скалозуб Владислав Васильевич**,
профессор, декан факультета «Техническая кибернетика»,
заведующий кафедрой компьютерных информационных
технологий Днепропетровского национального
университета железнодорожного транспорта имени
академика В. Лазаряна, Днепропетровск. Украина

Ильман Валерий Михайлович,
доцент кафедры "Компьютерные информационные
технологии" Днепропетровского национального
университета железнодорожного транспорта имени
академика В. Лазаряна, Днепропетровск. Украина.

Рецензенты (Украина): **Белозеров Василий Евгеньевич**,
доктор физико-математических наук, профессор, профессор
кафедры информационных систем Днепропетровского
национального университета имени Олеся Гончара,
г. Днепропетровск. Украина.

Михалев Александр Ильич,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Информационные системы и технологии»,
Днепропетровская национальная металлургическая
академия Украины, Днепропетровск, Украина.

Наукове видання

Скалозуб Владислав Васильович, **Ільман** Валерій Михайлович

Прикладний системний аналіз інтелектуальних систем транспорту

Посібник
(Російською мовою)

У авторській редакції

Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Ум. друк. арк.. 12,56 . Обл.-вид. арк.. 12,64.

Тираж 20 пр. Зам. №24.

Видавництво Дніпропетровського національного університету залізничного
транспорту вмені академіка В. Лазаряна
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003 р.