

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи

ХОРОШЕВ

Валерий Вячеславович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО
ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА
УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ
НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ВОПРОСНИКОВ**

Специальность 2.9.4 – «Управление процессами перевозок»

Диссертация

на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук, доцент

Д. В. Ефанов

Москва – 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ КРИТИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ	12
1.1. Актуальность проблемы разработки и внедрения средств технического диагностирования и непрерывного мониторинга для устройств и систем критического действия	12
1.2. Системы технического диагностирования и мониторинга: краткий обзор развития технологий	17
1.3. Построение алгоритмов диагностирования.....	20
1.4. Выводы по разделу.....	30
ГЛАВА 2. ТЕОРИЯ ВОПРОСНИКОВ – МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ СИНТЕЗА АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА	31
2.1. Понятие вопросника.....	31
2.2. Классификация вопросников	33
2.3. Способы задания вопросников	35
2.4. Основные задачи теории вопросников	41
2.5. Обзор методов оптимизации алгоритмов диагностирования построенных на основе теории вопросников.....	44
2.5.1. Алгоритм Хаффмана	46
2.5.2. Алгоритм Пархоменко – Ретоллы	46
2.5.3. Метод динамического программирования	47
2.5.4. Метод ветвей и границ	49
2.5.5. Метод корневого вопроса	50
2.5.6. Метод толерантных перестановок	51

2.5.7. Метод «загрубления».....	52
2.6. Выводы по разделу.....	54
ГЛАВА 3. ГЕТЕРОГЕННЫЕ И ГОМОГЕННЫЕ ВОПРОСНИКИ	55
3.1. Виды и преобразования вопросников	55
3.2. Бинарно-тернарные вопросники.....	57
3.3. Оптимизация бинарно-тернарных вопросников методом корневого вопроса	60
3.3.1 Постановка задачи оптимизации	60
3.3.2 Метод корневого вопроса для оптимизации гомогенных и гетерогенных вопросников.....	61
3.4. Алгоритм выбора корневого вопроса	82
3.5. Пример оптимизации бинарно-тернарного вопросника	84
3.5. Обобщение функции предпочтения вопросов	91
3.6. Выводы по разделу.....	92
ГЛАВА 4. ВОПРОСНИКИ ОСОБЫХ ВИДОВ.....	93
4.1. Вопросники особых видов в технической диагностике.....	93
4.2. Постановка задачи оптимизации вопросников особого вида.....	94
4.3. Вопросники с вопросами, допускающими ошибки.....	94
4.5. Вопросники с неопределённостями в ответах	102
4.5. Вопросники, допускающие ошибки и неопределённости в ответах	103
4.6. Выводы по разделу.....	104
ГЛАВА 5. ПОДСИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ, ПОЛУЧАЕМЫХ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ .	105
5.1. Системы мониторинга устройств железнодорожной автоматики	105
5.2. Особенности диагностического обеспечения систем мониторинга	109

5.3. Пример реализации системы поддержки принятия решения в железнодорожной отрасли	116
5.4. Прикладная теория вопросников устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики	120
5.4.1. Классификация вопросников в технической диагностике.....	120
5.4.2. Особенности базовых устройств железнодорожной автоматики	123
5.4.3. Синтез динамических вопросников для стрелочных электроприводов	128
5.4.4. Примеры алгоритмов диагностирования базовых устройств железнодорожной автоматики и телемеханики	142
5.5. Пример внедрения технологии на реальной станции	165
5.5. Техничко-экономические вопросы.....	169
5.7. Выводы по разделу.....	171
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	173
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	176
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	178
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	180
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	199
Приложение А. Пример оптимизации бинарно-тернарного вопросника методом динамического программирования	199
Приложение Б. Справки об использовании результатов диссертационного исследования.....	208
Приложение В. Апробация результатов на семинаре при научном совете информатизации Санкт-Петербурга.....	213

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертационного исследования обусловлена тем, что на полигонах магистральных железных дорог, железных дорог промышленных предприятий и в метрополитенах функционируют системы управления движением поездов, разработанные ещё в середине прошлого столетия. Принципы управления движением поездов, фактически, не меняются на протяжении полувека. Релейная техника продолжает выполнять свои функции на подавляющем числе станций (более 90% в ОАО «РЖД» и в ГУП «Московский метрополитен» и т. д.), однако происходит физическое и моральное устаревание компонентов, что обуславливает необходимость тщательного надзора за состоянием отдельных объектов автоматики. Несмотря на обширное внедрение микропроцессорных систем, быстрое обновление технической базы устройств автоматики и телемеханики оказывается экономически не выгодным и технически затруднённым (невозможно осуществить переключение средств управления с действующих на микропроцессорные без останова технологического процесса перевозок). Вопрос надёжности, по-прежнему, остаётся актуальным. Любой отказ в устройстве автоматики и телемеханики несёт в себе угрозу бесперебойности движения, а в худших случаях, при возникновении опасных отказов, – безопасности движения поездов. Любые нарушения перевозочного процесса несут в себе как огромные экономические потери для компаний-перевозчиков, так и социальные потери, связанные со снижением доверия клиентов и ухудшением имиджа компании в целом.

Для своевременного обнаружения отказов на стадии их зарождения, связанных с работой устройств автоматики и телемеханики, были определены регламентные работы по техническому обслуживанию, которые проводят в соответствии с планом-графиком и технологическими картами. Однако такие мероприятия не дают гарантий непрерывного функционирования объектов, а только позволяют периодически наблюдать за состояниями устройств и выполнять при необходимости восстановительные процедуры. Для повышения отказоустойчивости объектов автоматики за счёт непрерывных измерений их ответственных парамет-

ров и установления предотказных состояний были разработаны системы технического диагностирования и мониторинга (СТДМ). Они призваны повысить информативность обслуживающего персонала, сократить некоторую часть рутинных и часть избыточных операций по измерениям рабочих параметров устройств автоматики и способствовать переходу на техническое обслуживание по фактическому состоянию.

Современные СТДМ в области железнодорожной автоматики и телемеханики (ЖАТ) производят автоматические измерения ограниченного набора параметров некоторых типов устройств автоматики и телемеханики. К ним относятся следующие объекты напольной автоматики: стрелочные электроприводы, рельсовые цепи, светофоры, устройства переездной сигнализации. На долю этих устройств по статистике приходится до 80% отказов всех устройств ЖАТ [32, 78]. В технологических окнах автоматизированных рабочих мест (АРМ) персонал, занятый обслуживанием объектов ЖАТ, могут видеть в режиме реального времени результаты измерений, а также предварительного анализа системой – информационные сообщения. Сами измерительные процедуры осуществляются специализированными диагностическими приборами – измерительными контроллерами. Результаты измерений передаются в концентратор диагностической информации для хранения, обработки и последующего их качественного анализа [53]. Анализ проводится частично программными средствами СТДМ, частично – обслуживающим персоналом. Затем создаётся план мероприятий по поддержанию работоспособности объектов ЖАТ. В силу того, что собирается большой объём данных и вся их обработка производится преимущественно вручную, качество анализа данных зависит от опыта работника. Все это накладывает ограничения на качество производимого анализа и, как следствие, на результаты мониторинга. Кроме того, процедуры анализа данных отнимают много времени. В АРМ СТДМ частично внедрена автоматизация вывода сообщений об отказах ряда объектов, например, электроприводов стрелочных переводов. Так, к примеру, если произошло завышение времени перевода стрелки, то система оповестит рабочий персонал о нарушении работы устройства по данному параметру. В свою очередь, дан-

ный отказ может случиться как внезапно, по причине попадания постороннего предмета, так и постепенно, ввиду ухудшения работы внутренних частей стрелочного электропривода или конструкции стрелочного перевода. Если случайное попадание постороннего предмета предупредить не удаётся, то все неисправности, связанные с износом составных частей прогнозируемы. Развитие отказов отслеживается при оборудовании технических объектов СТДМ, что способствует получению информации о состояниях устройств в реальном времени, а интеграция в программное обеспечение аппарата автоматизации построения наиболее рациональной последовательности диагностических процедур позволит уменьшить время локализации неисправности.

Проведённое в ходе написания диссертации исследование по повышению эффективности СТДМ ЖАТ с помощью математического аппарата теории востросников позволит помимо автоматического анализа данных построить систему поддержки принятия решений (СППР) для персонала, обслуживающего и эксплуатирующего объекты автоматизации. Данное нововведение позволит фиксировать в автоматическом режиме развитие неисправности, что, в свою очередь, способствует парированию отказов до того, как они возникнут. Основным эффектом от внедрения данной технологии в программное обеспечение (ПО) СТДМ позволяет сократить число ситуаций, препятствующих осуществлению логистических задач компании-перевозчика по причине отказов устройств ЖАТ. Помимо устройств ЖАТ, данное решение позволяет снабдить СППР не только обслуживающий персонал, но и эксплуатирующий. Для персонала, занятого эксплуатацией, система способна работать в режиме «советчика», подсказывая наиболее рациональные действия по поиску неисправности при их возникновении, давая информацию по затратам времени, скажем, на перестройку маршрута и т. д. Все эти мероприятия позволяют сократить как количество инцидентов нарушения перевозочного процесса, так и снизить затраты времени на восстановление движения. Современные СТДМ ЖАТ без развитого ПО и встроенных СППР, к сожалению, не способны выйти на высокий уровень автоматизации анализа диагностической информации

и, как следствие, остаются только инструментами хранения больших объёмов данных и средствами, позволяющими упростить их ручную обработку [53].

Степень разработанности темы исследования. В области повышения эффективности обслуживания устройств ЖАТ известны работы таких учёных как В. М. Алексеева, А. И. Брейдо, С. В. Власенко, А. В. Горелика, И. Е. Дмитриенко, А. А. Прокофьева, В. В. Сапожникова, Вл. В. Сапожникова, А. А. Сепетого, В. И. Шаманова и др. В области технической диагностики и методов синтеза алгоритмов диагностирования работали и работают известные учёные и научные школы под их руководством – М. Ф. Каравай, А. Ю. Матросова, В. И. Хаханов, M. Gössel, Z. Navabi, R. Ubar и многие другие. Непосредственно в направлении теории вопросников известны работы А. Ю. Аржененко, В. А. Вестяка, Д. В. Ефанова, О. Г. Казаковой, А. Н. Павлова, П. П. Пархоменко, Б. Н. Чугаева, Y. Chesari, F. Dubail, G. Duncan, C. F. Picar, S. Retolla и других исследователей.

Несмотря на большое количество работ учёных в области синтеза алгоритмов диагностирования и дискретного поиска и, непосредственно, в области теории вопросников, до конца неизученными остаются вопросы построения оптимальных (по критерию минимума цены обхода) и близких к оптимальным (квази-оптимальных) алгоритмов, включающих в себя проверки с несколькими исходами (а не только проверок с двумя исходами).

Тема диссертации соответствует паспорту специальности 2.9.4 – «Управление процессами перевозок» по пункту 7 (системы автоматизации и телемеханики, предназначенные для управления перевозочным процессом, методы их построения и испытания).

Цели и задачи диссертации. Целью диссертационного исследования является разработка методов повышения эффективности работы алгоритмического обеспечения систем технического диагностирования и мониторинга железнодорожной автоматизации с использованием математического аппарата теории вопросников, развитие теории вопросников и её использование для решения прикладных задач диагностирования технических объектов ЖАТ.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Исследование возможностей оптимизации вопросников по критерию минимума цены обхода¹, включающих в себя вопросы с различными основаниями и поиск методов оптимизации, имеющих полиномиальную трудоёмкость.
2. Разработка алгоритма синтеза вопросников, имеющих вопросы с различными основаниями, с полиномиальной трудоёмкостью на основе простых операций сравнения вопросов.
3. Исследование особых типов вопросников, допускающих ошибки и неопределённости в ответах.
4. Разработка динамических вопросников для устройств и систем железнодорожной автоматики, функционирующих в составе программных средств поддержки принятия решений обслуживающим персоналом дистанций сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ).
5. Применение теории вопросников при синтезе алгоритмического обеспечения систем автоматизированного технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики.

Объектом исследования являются системы технического диагностирования и мониторинга средств железнодорожной автоматики и телемеханики, а предметом – алгоритмы диагностирования, основанные на математическом аппарате теории вопросников.

Научная новизна представленного исследования заключается в следующем:

1. Разработан метод синтеза оптимального неоднородного вопросника с вопросами, имеющими два и три исхода (бинарно-тернарного вопросника), с учётом различных весов событий и цен вопросов, основанный на использовании принципа корневого вопроса.
2. Предложены способы построения оптимальных бинарно-тернарных вопросников, допускающих ошибки и неопределённости в ответах.

¹ Далее в тексте сам критерий не упоминается, а подразумевается использование только этого критерия

3. Разработаны динамические вопросники для основных напольных объектов железнодорожной автоматики в различных режимах их функционирования.
4. Предложен способ совершенствования программного обеспечения СТДМ за счёт интеграции в них разработанных динамических вопросников.

Методология и методы исследования. Используются методы булевой алгебры и дискретной математики, теории вопросников и технической диагностики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод синтеза оптимального бинарно-тернарного вопросника, учитывающий различные стоимости вопросов и веса событий.
2. Метод синтеза бинарно-тернарных вопросников при условии наличия проверок, допускающих ошибки, и вероятных неопределённостей в ответах.
3. Алгоритмы диагностирования для устройств железнодорожной автоматики и телемеханики, полученные на основе введённых в рассмотрение динамических неоднородных вопросников.
4. Технические предложения по совершенствованию подсистемы поддержки принятия решений эксплуатационным персоналом хозяйства автоматики и телемеханики, интегрированной в программные средства СТДМ ЖАТ.

Степень достоверности результатов, полученных в диссертационной работе, основана на корректном применении математических аппаратов, методов дискретной математики, комбинаторики, теории графов, теории алгоритмов, технической диагностики и мониторинга систем автоматики.

Апробация результатов. Полученные автором результаты докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях: семинарах «Автоматика и дискретная математика» кафедры «Автоматика и телемеханика на железных дорогах» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, 2016 – 2018 гг.; международных конференциях «IEEE East-West Design & Test Symposium», 2017 – 2020 гг.; «Актуальные вопро-

сы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов», Гомель, Беларусь, 2018 год; «International Russian Automation Conference», Сочи, РФ, 2018 – 2020 гг.; «Проблемы безопасности на транспорте», Гомель, Беларусь, 2019 г.; заседания кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Российского университета транспорта, 2019 – 2020 гг.; городском семинаре «Информатика и компьютерные технологии» при Научном совете по информатизации Санкт-Петербурга «Информатика и автоматизация» 14.05.2021 года в конференц-зале Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской Академии наук (СПИИРАН); семинаре кафедры «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» Ташкентского государственного транспортного университета в рамках международного обмена опытом 25.05.2021 г.; расширенном заседании кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте» Уральского государственного университета путей сообщения 29.09.2021 г.

Публикации. Основные научные результаты, полученные в ходе исследования, опубликованы в 22 печатных работах, включая 1 публикацию в издании Академии наук РФ, 7 публикаций в журналах из Перечня ВАК РФ, 11 статей, индексированных в международные наукометрические базы данных WoS и Scopus.

Основные научные и практические результаты, полученные в ходе исследований, внедрены в программное обеспечение интегрированной с системой централизации стрелок и сигналов СТДМ ЖАТ, реализованной на базе промышленных логических контроллеров, разработанной в ООО «ЛокоТех-Сигнал» и принятой к проектированию на ряде железнодорожных станций промышленных предприятий. Кроме того, ведутся работы по адаптации подхода к использованию в составе системы структурированного мониторинга (СМИС/СМИК) для совершенствования программных средств анализа данных о состоянии искусственных сооружений (конкретное приложение – мостовой переход через Керченский пролив).

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ И МОНИТОРИНГА УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ КРИТИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

1.1. Актуальность проблемы разработки и внедрения средств технического диагностирования и непрерывного мониторинга для устройств и систем критического действия

Перевозочный процесс на железнодорожном транспорте обеспечивается слаженной работой большого количества хозяйств и эксплуатационного персонала. Одну из важнейших ролей в поддержании безопасной реализации графика движения поездов исполняют устройства и системы ЖАТ, которые относятся к объектам критического действия. Их отказы могут как не повлиять на перевозочный процесс при своевременном их устранении в периоды, когда нет движения поездов, так и явиться причинами сбоев в графике движения поездов, аварий и даже катастроф. Таким образом, важнейшей задачей в сфере систем управления на железнодорожном транспорте является эксплуатация и совершенствование устройств и систем ЖАТ.

Для поддержания заданного уровня отказоустойчивости устройств и систем ЖАТ проводится их техническое обслуживание по специально разработанным технологическим картам с установленным периодом проверок. Годы эксплуатации, а также исследования наших соотечественников, показали, что традиционный подход к поддержанию отказоустойчивости устройств ЖАТ не просто морально устарел, но и экономически не выгоден. Приходится содержать эксплуатационный штат, выполнять рутинные операции, которые зачастую не дают эффекта, а сами отказы часто возникают в периоды между проведением проверок. Развитие информационных и компьютерных технологий позволило прийти к возможности автоматического измерения ряда ключевых параметров устройств и систем ЖАТ, а также к своевременному установлению диагноза и последующему прогнозу. Появилась возможность «предсказания» в работе устройств ЖАТ, к предупреждению развития отказов и фиксации их на стадиях предотказных состояний. Всё это стало возможным благодаря внедрению систем технического ди-

агностирования и мониторинга (СТДМ) [53]. При должном развитии СТДМ ЖАТ могут стать конечными звеньями в задаче автоматического регулирования работы самих устройств и систем критического действия и, соответственно, автоматически влиять на работу систем диспетчеризации перевозочного процесса на железнодорожном транспорте, формируя сигналы к адаптации к внешним дестабилизирующим факторам.

Обратимся к недавнему прошлому и отметим, что развитие и совершенствование мира техники и технологий идёт по спирали. Около 100–150 лет назад были предложены принципы реализации систем управления в области железнодорожной автоматики, при которых использовалась распределённая архитектура с местными зависимостями и местным питанием. В то время данная структура была не совершенной, однако, с развитием технологий во второй половине XX века она снова становится актуальной [48, 90, 157]. Тем не менее, многие принципы реализации систем управления сохраняются, так как технологические процессы на железнодорожном транспорте не изменились. Достижения учёных и инженеров XX века и по сей день являются базовыми при создании, конструировании, разработке и проектировании устройств и систем управления.

При создании средств автоматизации на базе электромеханических и электрических приборов (реле, двигателей, трансформаторов и т. д.) в первой половине прошлого столетия диагностические функции не закладывались. Однако со временем оказалось, что процесс технического диагностирования является важнейшим при эксплуатации средств автоматизации. Разрабатываемые системы выполняют свои функции, однако надёжность со временем снижается, неизбежен отказ [17, 21, 38, 79]. Для поддержания высокого уровня отказоустойчивости проводятся регулярные мероприятия по техническому обслуживанию, которые по своей сути являются ручным диагностированием и ремонтом (реакцией на отклонение измеренных параметров от норм). В процессе эксплуатации устройства или системы в любой отрасли науки и техники конечная стоимость эксплуатации в разы превышает стоимость их разработки. Чем сложнее система, тем выше стоимость её обслуживания, что отрицательно сказывается на стоимости жизненного

цикла системы. Многие современные разработчики поставляют устройства и системы с контрактами жизненного цикла. Сами разработчики систем заинтересованы в своевременном определении нарушений в работе устройств от норм и создают развитое диагностическое обеспечение.

Техническая диагностика – область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов [26]. Данное направление развивается параллельно с развитием систем управления. С усложнением систем управления растёт и сложность построения технических средств диагностирования. В сложных технических устройствах находится множество компонентов, которые в свою очередь могут содержать огромное количество неисправностей. При решении задач технической диагностики синтезируются математические модели устройств для выявления всех состояний, в которых они могут находиться, локализации неисправностей, определения причин их возникновения. Объектом диагностирования называют устройство, для которого производится процедура проверки (тестирования) всех составных компонентов. Если устройство по своей структуре сложное, то необходимо разделить его на функциональные блоки и производить тестирование каждого функционального блока отдельно. В модели того или иного объекта указывается множество входных воздействий, множество выходных данных получаемые в результате работы объекта диагностирования, внутренняя работа блока описывается математической моделью. На основе полученных данных производится анализ работы объекта диагностирования и делается вывод о тех состояниях, в которых он может находиться. Множество состояний, в которых может находиться объект диагностирования: исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное, рабочее, нерабочее, предельное, опасное, предотказное, отказное, защитное [53]. Каждое состояние характеризуется своими выходными сигналами объекта диагностирования.

При проектировании объекта диагностирования производят функциональное тестирование для того, чтобы выявить все возможные состояния, в которых он может пребывать. Все это позволяет проверить устойчивость объекта к отказам и разработать мероприятия, позволяющие парировать возникающие отказы.

В технической диагностике выделяют три основные задачи: определение технического состояния объекта в текущий момент времени (диагностирование), определение состояния в котором находился объект в некоторый прошлый момент времени (генезис) и некоторый будущий момент времени (прогнозирование). Самой интересной задачей, по мнению соискателя, является задача прогноза. Решение данной задачи позволяет узнать в каком состоянии будет объект в будущем, предсказать с некоторой вероятностью место возникновения дефекта. Все эти данные позволят заранее предпринять меры по недопущению развития отказа. Тем самым повысится отказоустойчивость объекта диагностирования. Но для решения задачи прогноза необходимо знать «прошлое» и «настоящее» объекта диагностирования.

Диагностирование может быть, как тестовым, так и функциональным. Тестовое диагностирование производится в те моменты времени, когда объект диагностирования отключают, подают на его входы специальные наборы импульсов под названием «тестовые наборы» и по выходным данным с устройства делают вывод о его работе. В системах критического действия использование тестового диагностирования затруднено тем, что такие системы функционируют во времени непрерывно, и их отключение как экономически, так и со стороны безопасности не выгодно. В таких системах часто используют резервирование и функциональное диагностирование. В таких случаях к функционирующему устройству подключают измерительные компоненты с соблюдением всех условий безопасности. Данные измерительные компоненты не должны оказывать влияния на объект диагностирования. Методов функционального диагностирования достаточно много [31, 54, 77, 78, 107, 117].

В современном технологически развивающемся мире техника становится более функциональной, а габариты управляющих устройств и их компонентов уменьшаются. С развитием микропроцессорной техники становится возможным построение различного рода систем управления и контроля, расширение возможностей измерительной аппаратуры. Устройства на основе микропроцессорной техники уже в полной мере вытесняют устройства на основе релейной техники,

которые всего 30 лет назад, например, составляли все системы автоматизации на железнодорожном транспорте. При этом необходимо удерживать на высоком уровне и надёжность систем [24, 89, 101, 102, 129, 138, 149, 151]. Малые габариты микропроцессорной техники позволяют создавать системы с дублированием или троированием. Под дублированием понимается установка системы управления, в которой имеется два комплекта управляющей аппаратуры, которые могут работать в режиме горячего или холодного резерва, либо работать совместно.

В микропроцессорных системах управления для поддержания высокой отказоустойчивости используют также методы повышения надёжности работы программного обеспечения [74, 89, 101, 102, 108, 131, 133]. Так, к примеру, используют программное обеспечение, созданное двумя разными разработчиками и/или используют для программирования более надёжный язык.

Все вышеперечисленные методы способны повысить надёжность функционирования систем критического действия, однако помимо разработки отказоустойчивых структур необходимо осуществлять и контроль их функционирования. Все системы управления и контроля функционируют в различных климатических условиях или химических средах. Все они подвержены тем или иным деструктивным воздействиям, спектр которых настолько широк, что разработка мероприятий под каждую систему для её устойчивости – не реалистичная задача. Для простых примеров можно упомянуть системы контроля самолёта, которые за всё время полёта испытывают множество различных нагрузок, также напольные устройства железнодорожной автоматики располагаются в различных местностях и испытывают индивидуальные для каждого устройства деструктивные нагрузки. Ясно, что необходимы мероприятия, позволяющие в реальном режиме времени следить за параметрами работы объекта диагностирования.

С появлением сложных вычислительных систем и микроэлектронных и микропроцессорных приборов стало возможным автоматизировать процесс диагностирования, а также выполнять его с малыми промежутками времени (малым периодом диагностирования). Так возникли системы мониторинга – наблюдения за параметрами технических объектов с архивированием данных и их анализом

[14, 16, 18, 22, 25, 30, 53, 61, 63, 71]. Принципы построения систем мониторинга в разных областях техники одинаковы: имеется объект диагностирования, у этого объекта имеется ряд параметров, за которыми необходимо вести наблюдение, для каждого параметра определяются границы нормальной работы объекта, располагается измерительное оборудование. Далее различными методами происходит работа с полученными данными. Рассматривая огромную базу работ в области диагностирования и мониторинга технических систем и объектов можно сделать некоторое умозаключение о том, что можно построить устройство и систему любой сложности и с любыми функциями, но её нужно сделать надёжной и безопасной. Этого нельзя сделать без использования диагностического обеспечения.

Анализ во всей промышленности и на всем транспорте показывает, что принципы разработки систем диагностирования и мониторинга одинаковые, но подхода к интеллектуальной обработке как такового не имеется.

Итак, за долгое время существования устройств автоматики и телемеханики и их развития, опыт показал, что процесс поддержания работоспособного состояния устройств методом периодического обслуживания мало эффективен и с технической и с экономической точек зрения. Более того, современные СТДМ ЖАТ не обеспечивают 100%-ное решение задач технической диагностики, на что, прежде всего, влияет недостаточная полнота и глубина диагностирования. Актуальной задачей является задача развития и повышения эффективности работы СТДМ ЖАТ, так как подобные системы напрямую способны влиять на качество перевозочного процесса и обеспечивать его бесперебойность за счёт фиксации и предупреждения отказа на этапе его зарождения.

1.2. Системы технического диагностирования и мониторинга: краткий обзор развития технологий

В современном мире существует множество видов систем мониторинга. Все они реализуются под соответствующие типы объектов диагностирования. Так, существуют системы мониторинга искусственных сооружений (СМИС) для

наблюдения за мостами, тоннелями, зданиями. Системы технического диагностирования и мониторинга (СТДМ) устройств автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте, системы диагностирования и мониторинга экологической обстановкой, системы мониторинга условий труда на тяжёлых производствах и атомных станциях, СТДМ частей летательных аппаратов. Каждая система предназначена для наблюдения и анализа различных параметров, которые, в свою очередь, измеряются разнообразными типами приборов.

Для примера рассмотрим мониторинг насосного оборудования при эксплуатации атомной электростанции (АЭС) [14, 18, 29]. Как утверждается в [14], для продления работы энергоблока, важными задачами считаются:

- управление и контроль ресурса оборудования;
- повышение остаточного ресурса;
- повышение надёжности и безопасности эксплуатации оборудования.

В представленной статье описана система мониторинга насосного оборудования «Источник-Н». Сама по себе система является информационно-поисковой базой данных об отказах и наработке оборудования. В статье [13] идёт речь о коррозионно-усталостном мониторинге.

Приведём пример из индустрии летательных аппаратов [22, 23, 128, 153]. Создаются новые типы датчиков, которые позволяют производить наблюдение шасси самолётов. В [128] сказано о новых датчиках и методе анализа нагрузок при эксплуатации шасси самолётов. Из диаграмм видны нагрузки, и появляется возможность анализа технического состояния и эксплуатационных нагрузок. В [153] описано построение системы мониторинга шасси самолёта, в составе системы находится оптоволоконные технологии и тензометрические датчики. Целями построения данной системы, является:

- получение данных от подсистем датчиков;
- измерение нагрузок на шасси;
- обнаружение критических событий: рост трещин, падение давления масла или азота в демпфере шасси;

- определение прогноза и диагноза для событий;
- сбор и хранение данных в специальной базе.

Из диаграмм Бодэ в статье для трех различных ситуаций видно различное поведение параметров шасси.

На железнодорожном транспорте эксплуатируются такие системы мониторинга как: «Аппаратно-программный комплекс диспетчерского контроля» (АПК-ДК), «Автоматизированная система диагностирования и контроля устройств сигнализации, централизации и блокировки» (АДК-СЦБ), система технического диагностирования и мониторинга устройств ЖАТ на базе аппаратно-программных средств «Автоматизированная система диспетчерского контроля (АСДК), горючие встроенные системы контроля и диагностирования и т. д. Данные системы построены по похожим принципам и позволяют проводить процедуры по измерению параметров устройств железнодорожной автоматики удалённо в автоматическом режиме. Так, к примеру, в статье [99] описываются измерительные контроллеры для стрелочных электроприводов, позволяющие производить измерения мощности двигателя переменного тока при переводе стрелки. По полученным диаграммам можно сделать вывод о некоторых типах отказов или предотказов стрелочного перевода.

Кроме того, исследуя литературу по данному направлению, нельзя не отметить стремительное развитие в технике и технологии СТДМ. Так в работах [15] исследуется применение нейросетей в анализе параметров мощности работы двигателя стрелочного электропривода. В иностранных публикациях хотелось бы подчеркнуть технические решения по мониторингу устройств стрелочного электропривода разработанные в Оксфордском университете [161]. В статье [135] приводится пример построения современных систем мониторинга, основанных на беспроводной передаче данных, что в свою очередь расширяет спектр применения диагностического оборудования. Так называемые сенсорные сети позволяют по радиоканалу передавать измеренные параметры от датчиков, до которых невозможно проложить проводной канал передачи данных.

Изучая разработки и исследования в области технической диагностики и мониторинга, можно сделать вывод об огромном шаге технического прогресса: изобретено множество видов измерительного оборудования, развиты беспроводные технологии, интегрируются современные решения по обработке и хранению диагностических данных.

В данной диссертационной работе *внимание обращено на проблему отсутствия систем информационной поддержки принятия решения техническим персоналом*. Такая система реализуется на основе классификации и разделения событий. Оснащение систем мониторинга подобным программным обеспечением позволит создать основу для интеллектуальных систем диагностирования и мониторинга. С внедрением алгоритмов диагностирования возможны: автоматизация обнаружения отказа, автоматизация прогнозирования и создание платформы для системы поддержки принятия решения (СППР) технического персонала.

1.3. Построение алгоритмов диагностирования

Как упоминалось ранее, диагностирование бывает функциональным (рабочим) и тестовым. Все они используются в равной мере. Все элементарные проверки, производимые над объектом диагностирования, должны происходить в той или иной последовательности. Таким образом, создаётся алгоритм диагностирования. Обозначим ниже основные определения, касающиеся понятия алгоритмов диагностирования.

Определение 1.1 [26]. Алгоритмом диагностирования называется установленная последовательность выполнения проверок.

По своей сути, благодаря построению алгоритма диагностирования, появляется возможность решить задачу разбиения (идентификации) некоторого набора событий (всех неисправных состояний объекта диагностирования) на отдельные события или подмножества событий [6, 8, 56, 58-67, 75, 79, 83, 84, 87, 88]. Если удаётся разбить множество событий на одноэлементные подмножества, то-

гда говорят о том, что выполнена задача полной идентификации. Если же подмножества остаются не одноэлементными, то решена задача неполной идентификации. Алгоритмы диагностирования в зависимости от использования проверок делятся на два класса: условные и безусловные.

Определение 1.2. Безусловным называют алгоритм, в котором для идентификации состояний объекта диагностирования используется одна и та же проверка.

Определение 1.3. Условным называется алгоритм, в котором для идентификации состояний объекта диагностирования используются разные элементарные проверки.

Алгоритмы диагностирования в самом общем случае классифицируют по признаку остановки их реализации.

Определение 1.4. Алгоритм диагностирования, который подразумевает использование всех имеющихся в наличии проверок вне зависимости от получения результата, называется алгоритмом с безусловной остановкой.

Определение 1.5. Если алгоритм подразумевает остановку после нахождения неисправного узла, он называется алгоритмом с условной остановкой.

Условием является признак остановки алгоритма. В большинстве случаев из-за необходимости обнаружить отказ используют именно алгоритм с безусловной остановкой.

Алгоритмы диагностирования представляют в виде древовидных графов, в которых существуют вершины трех типов. Далее для описания подобных графов будем пользоваться терминологией теории графов. Вершины висячие – соответствуют разделяемым событиям, отказам, состояниями объекта диагностирования. Внутренние вершины – вершины, в которые заходит одна дуга и выходит несколько. Корневая вершина – вершина, из которой дуги только исходят, такая вершина в графе одна. Корневой и промежуточным вершинам соотносят элемен-

тарные проверки, с помощью которых производится разбиение множества событий, отказов, состояний объекта диагностирования. У таких древовидных графов имеется такой параметр как ранг.

Определение 1.6. Рангом графа называют, число исходящих дуг по одному пути от корневой вершины к корню.

В древовидных графах нет контуров [75].

Для оценки эффективности алгоритмов диагностирования существуют несколько показателей. К примеру, каждая элементарная проверка имеет свою цену. В данном исследовании под ценой понимается количество затраченного времени на реализацию элементарной проверки. От того, в какой последовательности будут производиться проверки, будет зависеть цена (затраченное время) реализации алгоритма. Помимо цены элементарной проверки алгоритмы диагностирования учитывают вероятность возникновения того или иного события (отказа, состояния объекта) – вес технического состояния. Как упоминается в [75], цена алгоритма диагностирования выражается следующей функцией:

$$C(q_0, X) = \sum_{x_j \in X} c(q_0, x_j) p(x_j). \quad (1.1)$$

где, X – множество технических состояний, в которые может перейти объект диагностирования, q_i – элементарная проверка, q_0 – корневая вершина дерева проверок, x_j – одно из множества состояний объекта X , $c(q_0, x_j)$ – цена идентификации события от корневого вопроса q_0 к висячей вершине x_j , $p(x_j)$ – вероятность появления состояния x_j .

Существуют различные способы построения алгоритмов диагностирования [6, 8, 55-57, 59, 68, 75, 77, 79, 103, 104, 142, 150, 158, 159]. Они подразумевают учёт различных параметров: как проверок, так и самих отказов. Кроме того, может быть учтена структурная связь между функциональными единицами устройства или системы. Существует множество методов построения алгоритмов диагностирования. Приведём кратко примеры некоторых из них. Так, в [75] описан метод последовательного восстановления блоков. Процедура, которая проводится

в четыре этапа. Задачей данного метода поиск отказавшего блока из множества «подозреваемых» блоков. Данный метод является ничем иным, как методом перебора, так как все блоки заменяются по очереди до тех пор, пока не будет достигнуто свойство работоспособности объекта. Как указывалось ранее, этот алгоритм является безусловным, так как для перебора всех «подозреваемых» блоков используется одна и та же проверка. Там же описан метод составления графа причинно-следственных связей объекта диагностирования, который применяется для решения задачи поиска отказов в сложных объектах.

Определение 1.7. Графом причинно-следственных связей, называется ориентированный граф, вершины которого представляют параметры, события или явления, а дуги отображают причинно-следственные связи между ними [75].

При использовании данного графа строится логическая модель устройства, на которой указываются параметры диагностируемого устройства.

Так или иначе, все алгоритмы диагностирования схожи по своим принципам. Для построения алгоритма необходимо построить модель объекта диагностирования, необходимо проанализировать принцип работы объекта диагностирования, проанализировать все его состояния, в которых он может пребывать, и определить вероятность пребывания в каждом из них и описать стоимость реализации алгоритма и т. д.

Стоит упомянуть и такие методы построения алгоритмов диагностирования, как информационный метод поиска неисправности и метод «время-вероятность» [79].

Информационный метод поиска отказа заключается в применении формулы К. Э. Шеннона, по которой оценивают убыль энтропии передаваемой информации:

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i. \quad (1.2)$$

При синтезе алгоритма диагностирования проверка находится в приоритете, если она несёт больше информации, то есть проверка π_i даёт большую убыль энтропии. Такая проверка считается эффективной. При вычислении убыли энтропии по формуле (1.2) не учитывается время, затрачиваемое на реализацию проверки. Для этого вводятся коэффициенты эффективности проверки:

$$\gamma_i = \frac{H_i}{c_i}, \quad (1.3)$$

где c_i – цена проверки.

Первой проверкой выполняют ту, у которой наибольшая эффективность (1.3).

Ещё одним вариантом построения алгоритма диагностирования является метод «время-вероятность». Такой метод не учитывает количество информации и структуру объекта диагностирования. Данный метод реализуется в три простых этапа, на первом этапе необходимо определить отношение вероятности к времени $\frac{p_i}{c_i}$ проверки π_i . На втором шаге происходит упорядочивание полученных коэффициентов в порядке убывания $\frac{p_1}{c_1} \geq \frac{p_2}{c_2} \geq \dots \geq \frac{p_n}{c_n}$. На третьем этапе строится алгоритм диагностирования из $n - 1$ проверки.

Одним из развитых аппаратов синтеза алгоритмов диагностирования является аппарат теории вопросников, введённый в техническую диагностику профессором П. П. Пархоменко в 60-е годы прошлого столетия [75]. Сама теория в большей степени является подразделом теории графов и рассматривалась ранее К. Ф. Пикаром [112, 118, 154, 155] в обобщённом виде.

Определение 1.8. Вопросником называется совокупность множества вопросов $Q = \{q_i | i = \overline{1, n}\}$, необходимых для разделения множества событий, или состояний $X = \{x_j | j = \overline{1, m}\}$, в которых может находиться объект диагностирования.

В технической диагностике принято понимать под вопросом те проверки, которые производят с объектами диагностирования. В то время, как ответом на

данные вопросы могут быть множество состояний объекта диагностирования. По своей сути, теория вопросников служит для решения задач поиска или разбиения множества событий на подмножества. По этой причине данный аппарат нашёл своё применение в технической диагностике, а именно из-за принципа перебора различных состояний объекта диагностирования. Перебор происходит до тех пор, пока не будет найдено состояние, в котором пребывает объект в данный момент времени. Таким образом, данный алгоритм диагностирования принято считать алгоритмом диагностирования с условной остановкой. Аппарат теории вопросников позволяет строить условные алгоритмы диагностирования для проведения технической диагностики сложных систем и для построения систем принятия решения для персонала, который занимается техническим обслуживанием критических систем. На практике имея несколько вопросов можно построить алгоритм диагностирования того или иного устройства. Вопросники можно строить несколькими методами: задавать функциями, строить по проверочной анкете, представлять в виде древовидного графа.

Вопросник Q в виде древовидного графа состоит из:

- 1) Вопроса – единичной проверки, которая производится с объектом диагностирования. Примем обозначение вопроса за q_i .
- 2) Исхода – исходящая из вопроса дуга, показывающая при каком ответе на вопрос, множество состояний разобьётся на какое-либо подмножество. Исходы вопроса принято подписывать цифрами в соответствии с количеством исходов вопроса.
- 3) Ответа – подмножество, которое образуется при разбиении множества событий вопросом q_i . Принято обозначать как $X_{q_i}^k$, где k – исход вопроса q_i . При разных исходах вопроса образуются разные подмножества или ответы.

Для удобства описания обозначим основные виды вопросников, исследование которых ведётся далее. Вопросы, имеющие два ответа принято называть бинарными (q_{Bi}) и далее по тексту, будем обозначать вопросник, состоящий только из бинарных вопросов, как BQ . Исходы такого вопроса будем нумеровать по сле-

дующему правилу: нумерация происходит слева направо, цифрами 1 и 0, по аналогии с двоичной логикой, или как ответ на вопрос: «Да» / «Нет». Также в дальнейшей работе необходимо такое понятие как тернарный вопрос (q_{Ti}). Тернарным вопросом называют вопрос, количество ответов на который равно трём. Исходы тернарных вопросов также будем нумеровать слева направо. Будем использовать цифры 2, 1 и 0. Подробнее про основания вопросов речь пойдёт далее.

Изобразим на рис. 1.1 пример вопросника в виде древовидного графа с пояснениями.

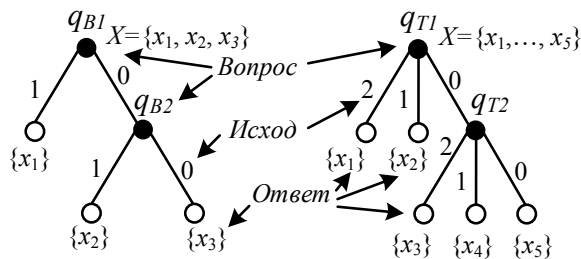


Рисунок 1.1. Вопросник, заданный в виде древовидного графа

Далее покажем возможность применения аппарата теории вопросников на примере рис. 1.2 для поиска отказа стрелочного электропривода из [41, 42]. Сформулируем вопросы и ответы на них (табл. 1.1).

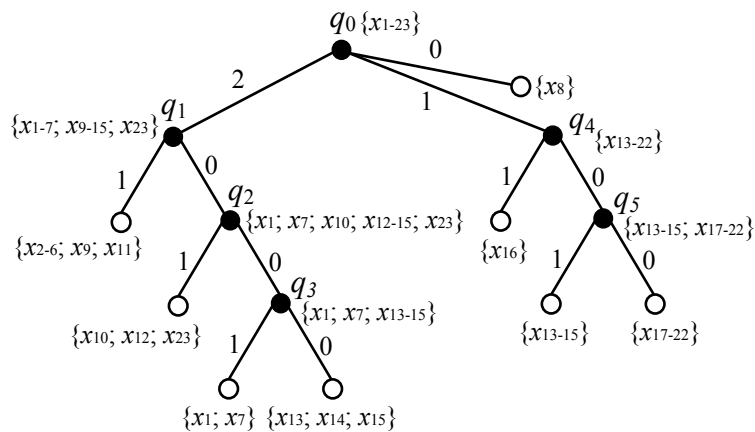


Рисунок 1.2. Алгоритм поиска отказа в железнодорожном стрелочном электроприводе марки СП-6М, построенный на основе теории вопросников

Несмотря на более чем полувековую историю, теория вопросников не исчерпана. В ней хорошо развиты основы, принципы и методы оптимизации во-

просников. Однако как показывает исследование литературы в предметной области, пробелом теории вопросников, по мнению соискателя, являются две ключевые ветви:

- вопросы поиска алгоритмов оптимизации с полиномиальной сложностью для построения вопросников с наименьшими показателями эффективности (минимального времени идентификации событий) для общего случая вопросников с вопросами, имеющими различное число ответов;
- абсолютно не развита прикладная теория вопросников, например, прикладная теория вопросников устройств и систем железнодорожной автоматики.

Таблица 1.1. Формулировка вопросов и ответов

Вопрос, q_i	Ответ, x_i
q_0 – Каково показание амперметра?	2) сначала стрелка амперметра делает бросок до 5А, а в течение перевода наблюдается показание 2А; 1) сначала стрелка амперметра делает бросок, а в течение перевода стрелки значение тока перевода наблюдается значительно меньше 2А; 0) стрелка неподвижна.
q_1 – Обнаруживается ли неисправность стрелочного электропривода после визуального осмотра всех частей автопереключателя и контрольных линеек на наличие излома, а также обнаружена ли неисправность шибера типа «попадание постороннего предмета»?	1) Да; 0) Нет.
q_2 – Обнаруживается ли неисправность привода после механической проверки следующих устройств: ослабление крепление контрольных линеек или шибера, неисправность редуктора?	1) Да; 0) Нет.
q_3 – В норме ли сопротивление изоляции монтажа?	1) Да; 0) Нет.
q_4 – Обнаруживается ли неисправность привода после визуального осмотра курбельного контакта?	1) Да; 0) Нет.
q_5 – Обнаруживается ли неисправность при измерении в электродвигателе?	1) Да; 0) Нет.

Следует дать некоторые пояснения касаясь второго направления. В работе [8] предложено использовать теорию вопросников для синтеза алгоритмов диагностирования программного обеспечения. В работе [72] предлагается применять теорию вопросников при построении организационных иерархий. В [81] предло-

жено применять теорию вопросников при разработке систем обучения поиску отказов систем железнодорожной автоматики для выбора различных сценариев.

Остановимся подробнее на предложениях авторов работы [81]. Суть состоит в следующем. Для выбранного устройства или системы железнодорожной автоматики строится вопросник на основе экспертного мнения (опыта электромеханика СЦБ по поиску отказов), а также с учётом вероятностей возникновения самих отказов. Эти вероятности предложено брать из автоматизированной системы учёта отказов хозяйства СЦБ. В [40, 124] приводится процесс построения алгоритма диагностирования для стрелочного электропривода. Можно отметить, что получается абсолютно статический вопросник, где «жёстко» определены вопросы, время их выполнения, состав отказов и их вероятности. Такой подход весьма эффективен в общем случае именно для обучения процессу поиска. Однако на практике на параметры вопросника влияют разнообразные факторы: расположение объектов друг относительно друга, исторические данные о процессах ввода в эксплуатацию, обслуживании, связи с другими объектам. Этих факторов вопросники из обозначенных работ не учитывают.

Определение 1.9. Назовём вопросник для какого-либо конкретного объекта, в котором все параметры неизменны во времени, статическим вопросником.

Именно статические вопросники – это и есть приложение теории вопросников к системам обучения. Не обязательно это поиск отказов. Это могут быть совершенно различные системы обучения.

Введём следующее понятие.

Определение 1.10. Динамический вопросник – такой вопросник, который меняет свои параметры во времени.

Для описанного выше примера с алгоритмом диагностирования СЭП, принимая во внимание все параметры работы устройства и внешние факторы, влияющие на его работу, рассмотрим применение динамических вопросников. СЭП работает в двух режимах, рабочем и контрольном режиме. В каждом режиме ра-

боты задействовано различное количество составных частей. Если рассмотренный вопросник на рис. 1.2 можно применить к рабочему режиму СЭП, так как во время перевода стрелки задействованы все составные его части, то в контрольном режиме задействована только часть составных блоков. Таким образом в контрольном режиме невозможно возникновение отказа того компонента СЭП, который не принимает участие в работе. Благодаря этому количество элементарных проверок сокращается ввиду того, что необходимо произвести поиск меньшего числа отказов, а алгоритм диагностирования сократится.

Данный вид вопросников можно синтезировать для большинства систем критического действия.

Какой практический эффект от применения аппарата теории вопросников в диагностировании систем критического действия? Ответ приведём на примере железнодорожного транспорта, так как большое число устройств автоматики и систем критического действия используется в данной отрасли. Поезда на железных дорогах курсируют в соответствии с графиком движения (ГДП). Любая задержка в движении поездов приводит к изменению графика, задержкам последующих поездов. Все это влечёт за собой экономические потери для владельцев железнодорожной инфраструктуры. Аналогично в метрополитенах при отказах средств управления происходят задержки в движении поездов, усложняется процесс ввода поездов в график. Это все серьёзные экономические потери, но существует ещё и проблема безопасности движения. Безопасность движения поездов зависит от ряда факторов: качественного исполнения ГДП, соблюдения установленных межпоездных интервалов, качества работы устройств критического действия, устройств автоматики и телемеханики, технического состояния инфраструктуры. Нарушение безопасности движения может стать угрозой для жизни человека и возникновения экологической катастрофы. Всему виной может быть либо вовремя не обнаруженное предотказное состояние устройства, либо допущенная халатность при производстве технического обслуживания персоналом. Несвоевременное обнаружение предотказного состояния происходит по причине отсутствия непрерывного мониторинга состояния объекта, так как на железнодо-

рожном транспорте используют принцип технического обслуживания с некоторым периодом времени. Помимо этого, сам предотказ может внести и обслуживающий персонал при производстве работ.

Для того чтобы повысить качество функционирования устройств автоматики и телемеханики, необходимо производить непрерывный контроль их состояния и внедрять СТДМ. Для того чтобы система мониторинга была интеллектуальной, способной автоматически произвести анализ работы устройства диагностирования, проанализировать измеренные параметры и выдать подсказку по работе над объектом диагностирования для обслуживающего персонала, необходимы алгоритмы диагностирования. Для такого практического приложения подходит теория вопросников, которая позволит создать систему поддержки принятия решения по поиску развивающихся отказов и уже возникших отказов для обслуживающего персонала. При реализации данной прикладной задачи теория вопросников позволяет повысить качество перевозочного процесса.

1.4. Выводы по разделу

Подводя итог описанному выше, отметим следующее:

1. Системы диагностирования и мониторинга широко распространены во всех сферах транспорта и производства.
2. СТДМ, по-прежнему, имеют недостаточную автоматизацию и интеллектуализацию.
3. Использование в программном обеспечении СТДМ алгоритмов диагностирования на основе теории вопросников позволит повысить качество её работы и создать СППР для обслуживающего персонала.
4. Для адаптации теории вопросников необходимо исследование как вопросников особого вида, так и методов их оптимизации.
5. Решение проблемы интеллектуализации СТДМ, а также проблемы глубины и полноты диагностирования стратегически важны для развития железнодорожной отрасли.

ГЛАВА 2. ТЕОРИЯ ВОПРОСНИКОВ – МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АППАРАТ СИНТЕЗА АЛГОРИТМОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА

2.1. Понятие вопросника

Применение математического аппарата теории вопросников в технической диагностике позволяет решать различные задачи поиска и идентифицировать состояния объектов управления. Как описывалось выше, вопросник – это совокупность вопросов, или проверок, которые разбивают множество технических состояний объекта на подмножества. Теория вопросников подразумевает использование математического аппарата комбинаторики, статистики, теории графов и теории информации.

Вопросник может быть задан древовидным нагруженным графом $G(Y, \Gamma)$, где $Y = Q \cup X$; $y = x \in X \Rightarrow \Gamma_x = \emptyset$; $y = q \in Q \Rightarrow |\Gamma_q| = a(q)$; $Q \cap X = \emptyset$, а Γ -планарный граф, иными словами вопросник представлен в виде взвешенного графа G у которого имеется множество Y вершин, состоящее из множества X внешних и внутренних Q вершин, при этом если вершина y является элементом x множества X , то у такой вершины y последователей нет ($\Gamma_x = \emptyset$), а если вершина y является элементом q множества Q , то у такой вершины y мощность множества последователей равняется основанию вопроса q ($|\Gamma_q| = a(q)$). Принято обозначать конечное множество событий $X = \{x_j | j = \overline{1, m}\}$ и конечное множество вопросов $Q = \{q_i | i = \overline{1, n}\}$, разделяющий множество событий X на непересекающиеся подмножества [8, 75]. Каждому x_j соответствует неотрицательная весовая функция $w(x_j)$, $x_j \in X$ – вес события x_j . Множество вопросов Q в технической диагностике соответствует множеству элементарных проверок $\Pi = \{\pi_i | i = \overline{1, n}\}$, разбивающих множество X на подмножества $a(q_i)$, называемых ответами. Задать вопрос на множестве X – означает разбить множество на $a(q_i)$ подмножеств. При этом, если задать вопрос на подмножестве $Q^* \subseteq Q$, то подмножество Q^* разбивается на $b(q_i)$, когда $b(q_i) \leq a(q_i)$. Каждому q_i приписаны параметры – цена вопроса и весовой коэффициент. Цена вопроса – это положительное число, обозначаемое

как $c(q_i)$, и соответствующее затратам на реализацию данного вопроса. В техническом диагностировании цена вопроса часто связана с затратами времени проведения той или иной проверки π_i . Часто весовые коэффициенты нормируются в виде условных вероятностей событий:

$$p(x_j) = \frac{\omega(x_j)}{\sum_{j=1}^m \omega(x_j)}. \quad (2.1)$$

При этом:

$$\sum_{j=1}^m p(x_j) = 1. \quad (2.2)$$

Если вопросы разделяют множество событий на одноэлементные подмножества, то решается задача полной идентификации. Если же подмножества содержат более одного события, то решается задача неполной идентификации. При решении одной и той же задачи идентификации может быть построено количество вопросников равное $N = n!$ (где n – число вопросов) и один или несколько из них будет иметь минимальную стоимость реализации. Такой вопросник называется оптимальным. Близкий к оптимальному вопросник часто называют квазиоптимальным. Для каждого вопросника можно определить стоимость затрат на идентификацию множества событий X – так называемую цену обхода вопросника, которую далее для удобства будем выражать в минутах.

Определение 2.1. Цена обхода вопросника – это математическое ожидание цены идентификации всех событий в вопроснике.

Цена обхода вопросника вычисляется по формуле:

$$C(Q) = \sum_{j=1}^m p(x_j) c(q_0, x_j). \quad (2.3)$$

где $p(x_j)$ – условная вероятность события, $c(q_0, x_j)$ – цена идентификации события от корневого вопроса q_0 к висячей вершине x_j .

Имеется возможность определение минимального количества необходимых для идентификации всех событий $X = \{x_j | j = \overline{1, m}\}$ вопросов $Q_{min} = \lceil \log_t m \rceil$,

где $t = a(q_i)$, то есть число исходов вопроса или основание вопроса, к примеру, для бинарных вопросов $Q_{min} = \lceil \log_2 m \rceil$. Запись $\lceil \dots \rceil$ обозначает целое сверху от вычисляемого значения. Следовательно, из вышеописанного – избыточное множество вопросов, это $|Q| \geq Q_{min}$. Если $|Q| = Q_{min}$, то вопросник называется компактным.

2.2. Классификация вопросников

Классификацию вопросников [6, 8, 75, 78, 80] приведём на рис. 2.1 и дадим пояснение по каждому виду.

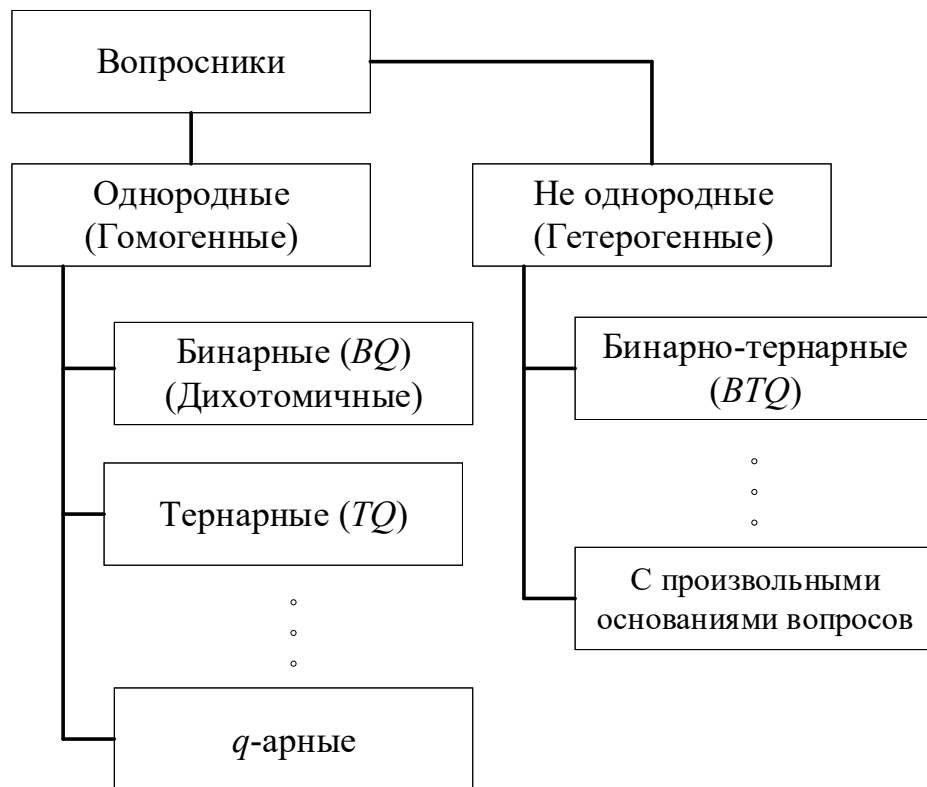


Рисунок 2.1. Классификация вопросников

В первую очередь стоит сказать о том, что вопросники делят на два класса по значениям оснований имеющихся вопросов.

Определение 2.2. Однородным вопросником называют вопросник, в котором все вопросы имеют одинаковые основания. Также в литературе такие вопросники называются гомогенными.

Простым примером такого вопросника является бинарный вопросник, у которого $\forall q_i \in Q, a(q_i) = 2$.

Определение 2.3. Неоднородным вопросником называют вопросник, в состав которого входят вопросы с различными основаниями. Также в литературе такие вопросники называются гетерогенными.

В свою очередь, однородные и неоднородные вопросники можно выделить в классы по критерию вида вопросов, из которых состоит вопросник. Как упоминалось ранее, вопросник, в который входят только бинарные вопросы называют бинарным вопросником. Стоит выделить класс гомогенных вопросников, таких как тернарные, и отдельный класс гетерогенных, таких как бинарно-тернарные вопросники. Эти классы вопросников подробно исследуются в данной диссертационной работе. Дадим определения для бинарно-тернарных и тернарных вопросников.

Определение 2.4. Бинарно-тернарным вопросником называется такой вопросник в составе которого присутствуют как вопросы бинарного, так и тернарного вида.

В дальнейшем бинарно-тернарные вопросники будем обозначать как *BTQ* (*binary-ternary questionnaire*). Данный класс вопросников можно считать самым простым классом, к которому можно применять точные методы оптимизации, применяемые для оптимизации бинарных вопросников, но с некоторой адаптацией. В следующем разделе подробнее остановимся на методах оптимизации и рассмотрим примеры их адаптации.

Определение 2.5 [49, 124]. Тернарный вопросник – такой вопросник, в составе которого присутствуют только вопросы тернарного вида.

Тернарный вопросник относится к гомогенным вопросникам. В дальнейшем будем обозначать тернарные вопросники как *TQ* (*ternary questionnaire*). *TQ*, это вопросник, у которого $\forall q_i \in Q, a(q_i) = 3$.

Вопросники, все ответы, в которых имеют один и тот же весовой коэффициент $w(x_j) = const$, $x_j \in X$ – называют равновесными. Если в вопроснике все вопросы имеют одинаковые цены событий $c(q_i) = const$, $q_i \in Q$, такие вопросники называют равноценными.

2.3. Способы задания вопросников

Вопросники можно задавать несколькими способами. Самыми распространёнными являются: задание вопросника перечислением всех допустимых вопросов и разбиений, задание вопросника в виде матрицы, которую также называют анкетой вопросника, или в виде древовидного графа.

Приведём примеры.

Зададим абстрактный вопросник следующим набором вопросов и укажем разбиение множества событий на подмножества (во всех способах задачи для наглядности будем задавать один и тот же BTQ):

$$\begin{aligned}
 q_{T_1} &= \{x_1, x_2, x_3\} \cup \{x_4, x_5, x_6\} \cup \{x_7, x_8, x_9\}, \\
 q_{T_2} &= \{x_1, x_4, x_7\} \cup \{x_2, x_5, x_8\} \cup \{x_3, x_6, x_9\}, \\
 q_{B_3} &= \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_9\} \cup \{x_5, x_6, x_7, x_8\}, \\
 q_{B_4} &= \{x_1, x_3, x_6, x_7\} \cup \{x_2, x_4, x_5, x_8, x_9\}, \\
 q_{B_5} &= \{x_2, x_3, x_5, x_7, x_8\} \cup \{x_1, x_4, x_6, x_9\}, \\
 q_{B_6} &= \{x_1, x_2, x_5, x_6, x_9\} \cup \{x_3, x_4, x_7, x_8\}.
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Из вышеперечисленного вопроса являются $q_i \in Q$, которые разделяют множество событий $X = \{x_j | j = \overline{1, m}\}$ на непересекающиеся подмножества. Обозначим их как $X_{q_i}^k$, где $q_i \in Q$, $k \in \{1, 2, \dots, v\}$.

Следующий способ задания вопросника – это матричный. Он подразумевает составление таблицы неисправностей, или анкеты для вопросника. Такая анкета задаёт все разбиения множества событий $X = \{x_j | j = \overline{1, m}\}$ вопросами из множества $Q = \{q_i | i = \overline{1, n}\}$. Анкетой является матрица $\|b_{ij}\|$ размерности $m \times n$, такая

что $b_{ij} = \beta$ если событие x_j принадлежит β -му исходу вопроса q_i . Анкета будет являться логически полной, если любая пара событий может быть разделена с помощью перечисленных в ней вопросов. В таб. 2.1 дана анкета, включающая в себя бинарные и тернарные вопросы.

Таблица 2.1. Анкета вопросника

q_i	$c(q_i)$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
q_{T_1}	$c(q_{T_1})$	2	2	2	1	1	1	0	0	0
q_{T_2}	$c(q_{T_2})$	2	1	0	2	1	0	2	1	0
q_{B_3}	$c(q_{B_3})$	1	1	1	1	0	0	0	0	1
q_{B_4}	$c(q_{B_4})$	1	0	1	0	0	1	1	0	0
q_{B_5}	$c(q_{B_5})$	0	1	1	0	1	0	1	1	0
q_{B_6}	$c(q_{B_6})$	1	1	0	0	1	1	0	0	1
$p(x_i)$		$p(x_1)$	$p(x_2)$	$p(x_3)$	$p(x_4)$	$p(x_5)$	$p(x_6)$	$p(x_7)$	$p(x_8)$	$p(x_9)$

Следующий способ – это задание вопросника в виде древовидного графа. Изобразим на рис. 2.2 вопросник в виде графа и далее дадим подробно описание.

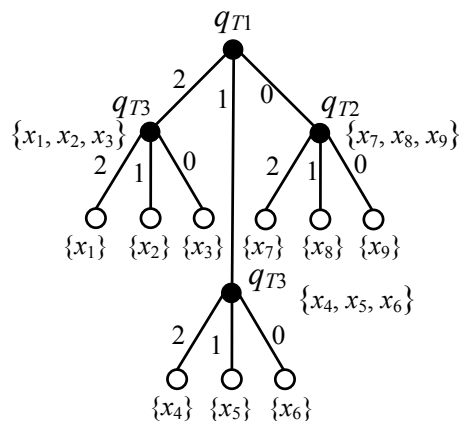


Рисунок 2.2. Вопросник, заданный в виде графа

Итак, как видно из рис. 2.2, у вопросника имеются три вида вершин. Первый вид – это корневая вершина. Корневой является вершина, из которой исходят дуги, но в вершину не заходит ни одной дуги. Корневая вершина соответствует множеству событий $X = \{x_j | j = \overline{1, m}\}$. На рис. 2.2 корневая вершина, соответствующая вопросу q_{T_1} . Второй тип вершин – это висячие вершины. Висячие вершины соответствуют подмножеству событий, возникающих в результате разбиения вопросами в вопроснике множества $X = \{x_j | j = \overline{1, m}\}$. В висячие вершины

дуги только заходят, но не исходят из них. На рис. 2.2 все висячие вершины обозначены как $x_1 - x_9$. Третий вид – промежуточные вершины. Промежуточные вершины соответствуют проверкам, проводимым на подмножествах множества $X = \{x_j | j = \overline{1, m}\}$. В промежуточную вершину заходит только одна дуга, а исходящих может быть несколько. На рис. 2.2 промежуточными вершинами являются q_{T_2}, q_{T_3} . На графах принято отображать веса событий, цены вопросов и номера исходов.

Помимо графа и матрицы вопросники можно задавать с помощью логических схем алгоритмов (ЛСА) [60].

Определение 2.6. ЛСА – выражение, состоящее из операторов и логических условий, следующих друг за другом, содержат нумерованные стрелки, расставленные определенным образом.

Впервые ЛСА были предложены А. А. Ляпуновым и впоследствии использовались как язык задания алгоритмов функционирования программных управляющих устройств. Главной задачей, решаемой данным языком, является перебор информации определенным алгоритмом, выбор отдельных операций или актов алгоритма и поиск порядка их выполнения. Каждой операции в ЛСА сопоставляется оператор, обозначаемый большими латинскими буквами – A, B, C и так далее. Если оператор зависит от каких-либо параметров, то эти параметры обозначаются через индексы – A_i, B_{ij} . Операторы с различными параметрами выполняют действия над разными частями перерабатываемой информации. Последовательность выполнения операторов возможна как последовательно, так и разветвленно, в которых выполнение операторов зависит от некоторых логических условий. Такие условия обозначаются строчными латинскими буквами и могут зависеть от нескольких переменных:

$$p[f(x_1, x_2, \dots, x_m)]. \quad (2.2)$$

Логическое условие может принимать только два значения – 1 или 0 (выполняется или не выполняется соответственно). Среди логических условий целесообразно выделять тождественно-ложные, такие, когда логическое условие все-

гда принимает значение 0. Такие условия не требуют проверки и обозначаются для простоты буквой ω . Таким образом, операторы и логические условия являются основными составляющими ЛСА, а тождественно-ложные – вспомогательными. Нумерованные стрелки начала – \uparrow^i , ставятся справа от логического условия, а её конец \downarrow^i – ставится слева от оператора, который должен выполняться, если логическое условие принимает нулевое значение.

ЛСА записывается в виде конечной строки и должна удовлетворять следующим условиям:

- в начале строки ставится оператор входа (начала) – A_n , а в конце оператор выхода (конца) – A_k ;
- перед оператором входа и после оператора выхода не должно быть никаких стрелок;
- после каждого оператора должна стоять верхняя стрелка;
- на каждую верхнюю стрелку с номером i должна быть минимум одна нижняя стрелка с номером i ;
- на каждую нижнюю стрелку с номером i должна быть минимум одна верхняя стрелка с номером i .

Первым этапом формализации алгоритма является его описание при помощи логических схем, для этого необходимо содержательное описание алгоритма. Логическая схема допускает как формальные, так и содержательные равносильные преобразования.

Опишем абстрактный пример ЛСА:

$$A_n A_1 p_1 \uparrow^1 A_3 \bar{p}_3 \uparrow^2 \downarrow^1 A_2 \omega \uparrow^3 \downarrow^2 A_4 p_2 \uparrow^4 A_5 \downarrow^3 \downarrow^4 A_k \quad (2.3)$$

В данной строке имеются:

A_n, A_k – операторы начала и конца алгоритма;

$A_1 - A_5$ – операторы микрокоманд;

$p_1 - p_3$ – логические условия;

\bar{p}_3 – обратное логическое условие p_3 ;

$\omega \uparrow^3$ – тождественно-ложное условие.

Начальному состоянию автомата соответствует A_n , при котором никакие выходные сигналы не выдаются. При запуске автомата он перейдет в новое состояние и при этом будет выполнен оператор A_1 . Далее анализируется условие (входной сигнал) p_1 . Если $p_1 = 1$, то выполняется оператор A_3 . Если $p_1 = 0$, то происходит переход по стрелке вверх \uparrow^1 к стрелке вниз \downarrow^1 , и выполнение оператора A_2 . После оператора A_2 находится тождественно-ложное условие $\omega \uparrow^3$, по которому попадаем на конечный оператор A_k .

При $p_2 = 1$, выполняется оператор A_5 и конечный A_k . Если $p_2 = 0$, то происходит переход по стрелке вверх \uparrow^4 к стрелке вниз \downarrow^4 , и выполнение оператора A_k .

В случае с \bar{p}_3 логика обратная, при $p_3 = 1$ происходит переход по стрелке вверх \uparrow^2 к стрелке вниз \downarrow^2 , и выполнение оператора A_4 . Далее анализируется условие p_2 . Если логическое условие $p_3 = 0$, то выполняется оператор A_2 и по далее стоящему тождественно-ложному условию $\omega \uparrow^3$ попадаем на конечный оператор A_k .

Данный анализ ЛСА позволяет осуществить при необходимости переход к матричной схеме алгоритмов (МСА) [60].

Представим для примера возможность применения ЛСА на абстрактном примере бинарного вопроса. На рис. 2.3 представлен бинарный вопрос.

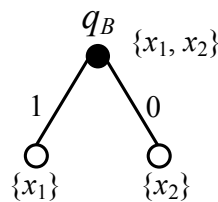


Рисунок 2.3. Бинарный вопрос

На заданный вопрос q_B имеется только ответ «1» или «0» (аналогия «да» или «нет»). Представим через ЛСА бинарный вопрос, представленный на рис. 2.3.

$$A_n q_B \uparrow^1 x_1 \omega \uparrow^2 \downarrow^1 x_2 \downarrow^2 A_k \quad (2.4)$$

В алгоритме (2.4), следующие элементы:

A_n, A_k – операторы начала и конца алгоритма;

$x_1 - x_2$ – операторы микрокоманд или же исход вопроса;

q_B – логические условия или задаваемый вопрос;

$\omega \uparrow^3$ – тождественно-ложное условие.

Алгоритм работает следующим образом: после запуска A_n происходит анализ вопроса q_B . Если $q_B = 1$, то происходит выбор оператора x_1 и по далее стоящему тождественно-ложному условию $\omega \uparrow^2$ попадаем на выход из алгоритма A_k . Если $q_B = 0$, то происходит переход по стрелке вверх \uparrow^1 к стрелке вниз \downarrow^1 , и выбор оператора x_2 , далее выход из алгоритма A_k .

Построим на основе полученного блока ЛСА вопроса, вопросник, состоящий из пяти вопросов.

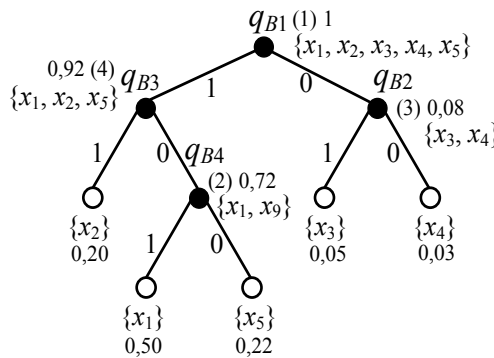
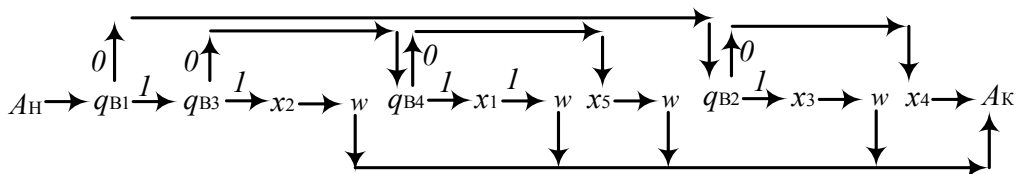


Рисунок 2.4. Бинарный вопросник из пяти вопросов

ЛСА для вопросника на рис. 2.4 будет следующий:

$$\begin{aligned}
 A_n q_{B1} \uparrow^1 q_{B3} \uparrow^2 x_2 \omega \uparrow^3 \downarrow^2 q_{B4} \uparrow^4 x_1 \omega \uparrow^3 \downarrow^4 x_5 \omega \uparrow^3 \downarrow^1 \\
 q_{B2} \uparrow^5 x_3 \omega \uparrow^3 \downarrow^5 x_4 \downarrow^3 A_k
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

Графически, работа алгоритма, следующая:



Следует отметить, что для корректного использования ЛСА при работе с вопросниками следует расширить язык задания, внося в него цены вопросов и веса событий.

2.4. Основные задачи теории вопросников

Математический аппарат теории вопросников позволяет решать различные задачи классификации и разбиения некоторого заданного множества. В литературе по теме вопросников имеется множество вариантов применения данного математического аппарата, к примеру, в [8] указывается решение задачи Яглома – Яглома, задача о городах лжецов и честных людей. В [6] упоминаются задачи об угадывании числа и о фальшивой монете. В теории диагностики математический аппарат теории вопросников позволяет решать задачи поиска отказов в технических объектах. Для градостроительной и транспортной отрасли данная задача является важной, так как она позволяет снизить экономические затраты на эксплуатацию объектов.

Касаясь только теории вопросников необходимо сделать акцент и назвать первоочередную задачу теории вопросников. Таковой задачей является построение оптимальной последовательности вопросов в вопроснике таким образом, чтобы полученный в результате процедуры оптимизации вопросник был оптимальным по некоторому критерию. Как и в выше указанных задачах, так и в теории диагностики необходимо прийти к ответу за минимально возможное время или количество вопросов. В результате решения данной задачи было проведено множество исследований и созданы методы позволяющие производить действия над вопросником, которые позволят оптимизировать его по некоторому необходимому критерию [5, 6, 8, 10-12, 20, 41, 51, 62, 72, 73, 76, 85, 86, 98, 119, 120, 154-156]. В итоге получившийся вопросник назвали оптимальным. В представленном диссертационном исследовании вопросник оптимизируется по критерию минимума времени, которое необходимо затратить на его реализацию, то есть имея некоторую анкету можно построить $n!$ вопросников и все они будут иметь различное время реализации, необходимо найти такой вопросник, время реализации которого минимально относительно остальных вопросников, построенных по заданной анкете.

Такую задачу можно решать различными методами, такие задачи условно поделим на три класса, первый – методы перебора, второй – методы оптимизации с экспоненциальной трудоёмкостью, третий – методы оптимизации с полиномиальной трудоёмкостью. Основные различия между методами заключаются в трудоёмкости, то есть в том, какое количество ресурсов необходимо для решения поставленной задачи. Под ресурсами можно понимать объем необходимой памяти или время, которое будет затрачено на реализацию метода оптимизации. Так как в данном исследовании идёт речь о построении оптимальной последовательности вопросов в вопроснике, то необходимо сказать о «временной трудоёмкости». Произвести оценку трудоёмкости алгоритма можно либо для конкретной модели, когда известны все шаги выполнения, либо рассчитать *асимптотическую сложность*. Под асимптотической сложностью понимается рост числа шагов алгоритма оптимизации с ростом размерности поставленной задачи. Асимптотическая сложность функции $f(n)$ в качестве оценки представляется функцией $r(n)$, которая даёт верхнюю оценку такую, что $O(r(n))$ при которой $f(n) \leq c \cdot g(n)$ для $\forall n \geq N$ и нижнюю оценку такую, что $\Omega(r(n))$ при которой $f(n) \geq c \cdot g(n)$ для $\forall n \geq N$, где c и N – положительные константы. Алгоритмом оптимизации с полиномиальной трудоёмкостью считается такой алгоритм, у которого функция $r(n)$ – полиномиальная функция n^i где $i = 1, 2, 3, \dots$, а алгоритмом оптимизации с экспоненциальной трудоёмкостью считается такой алгоритм, у которого функция $r(n)$ – экспоненциальная функция i^n где $i = 2, 3, \dots$. Соответственно, чем больше размерность задачи, тем больше времени понадобится для её решения. К примеру, задача размерности $n = 30$ алгоритмом оптимизации с полиномиальной трудоёмкостью займёт время равное $3 \cdot 10^{-5}$ с, а $n = 50$ займёт $5 \cdot 10^{-5}$ с. Решая задачу методом оптимизации с экспоненциальной трудоёмкостью рост вычислений будет следующий, при размерности задачи в $n = 30$ – 17,9 минут, при размерности $n = 50$ – 35,7 лет. При решении задачи поиска в теории диагностики размерность задачи может быть велика и выгоднее, как это видно на примере выше, использовать алгоритмы с экспоненциальной трудоёмкостью. Далее в тексте будут рас-

смотрены примеры оптимизации, которые можно использовать в теории вопросников.

Задача построения оптимального вопросника берёт своё начало из принципа оптимальности Р. Э. Беллмана, принцип оптимальности гласит – каковы бы ни были начальные состояния и начальное управление, последующее решение должно определять оптимальную стратегию относительно состояния, полученного в результате первоначального управления [109]. При работе с построением оптимального вопросника необходима стратегия для решения задачи дискретного оптимального управления. Задача построения оптимального вопросника сводится к многошаговому управляющему процессу, при котором происходит разбиение всей задачи на подзадачи и достигается оптимальное решение подбором оптимальных подрешений по целевой функции. Такой функцией является цена обхода вопросника. Взяв за основу принцип оптимальности Р. Э. Беллмана, профессор П. П. Пархоменко описал применение принципа оптимальности для вопросников. Теорема 2.1 является формулировкой принципа оптимальности Беллмана для теории вопросников, в которой решение задачи оптимального управления – это оптимальный по критерию минимума цены обхода вопросник, а для решения данной задачи вопросник разбивается на подвопросники (подзадачи). Таким образом решая задачу построения оптимальной последовательности постановки вопросов в вопроснике, вся задача разбивается на подзадачи или подвопросники, и на каждом шаге оптимизации выбирается по некоторой функции оптимальный подвопросник (или подрешение). В результате из таких подвопросников (подрешений) складывается оптимальный вопросник или оптимальное решение задачи.

Теорема 2.1. Вопросник является оптимальным, если он состоит из оптимальных подвопросников.

Подвопросник, в свою очередь, это подмножества идентифицируемых событий с наилучшим вариантом разбиения с помощью исходного множества вопросов. Рассматривая теорию вопросников применительно к теории диагностики, необходимо упомянуть, что из одного и того же набора вопросов может полу-

читься $n!$ число вопросников. Таким образом, каждый вопрос интерпретирует элементарную проверку, производимую на объекте диагностирования и такие проверки можно проводить в различных последовательностях. Решая задачу оптимальности, необходимо выбирать критерий, по которому алгоритм диагностирования должен быть оптимизирован. Исследуя данную задачу, применяя теорию вопросников, авторы преследуют цель построить оптимальный алгоритм диагностирования, который занимает наименьшее количество времени на его реализацию среди всех возможных $N = n!$ алгоритмов построенных по одной и той же анкете неисправностей.

Далее приведём примеры уже известных методов оптимизации вопросников. Следует сказать, что все методы имеют разную трудоёмкость, учитывают или не учитывают те или иные весовые функции, и т. д. По этой причине появляется ограничения на использование тех или иных методов оптимизации, так как при большом количестве вопросов и множестве событий, сложность решения задачи поиска оптимального вопросника растёт, а при том, что не все методы оптимизации учитывают весовые функции или работают с конкретными задачами, в которых вопросы равноценны или исходы равновероятны. Далее рассмотрим примеры методов оптимизации.

2.5. Обзор методов оптимизации алгоритмов диагностирования построенных на основе теории вопросников

Рассмотрим распространённые методы оптимизации вопросников. Приведём краткий обзор, уже известных на момент начала данного диссертационного исследования, методов оптимизации вопросников. Все описанные ниже методы исследовались и применялись для синтеза оптимальных вопросников как гомогенных, так и гетерогенных.

Для того чтобы качественно выполнить процедуру оптимизации необходимо правильно и точно сформулировать постановку задачи оптимизации вопросников в общем виде.

Постановка задачи. Дано конечное множество X событий из n элементов – ($X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$) и множество Q из m вопросов, имеющих смысл на заданном множестве – ($Q = \{q_{a_1}, q_{a_2}, \dots, q_{a_m}\}$), где запись q_{a_m} обозначает вопрос q по основанию a и порядковым номером m . Множество Q вопросов позволяет разбить множество X на одноэлементные подмножества, при этом каждый вопрос $q_i \in Q$ имеет своё число ответов, называемых основанием вопроса $a(q_i)$, показывающее число классов в разбиении. Все исходы вопросов $q_i \in Q$ являются детерминированными. Каждое событие $x_j \in X$ характеризуется вероятностью возникновения $p(x_j)$ такой, что $0 \leq p(x_j) \leq 1$ и $\sum_{x_j \in X} p(x_j) = 1$. Каждый вопрос $q_i \in Q$ характеризуется неотрицательной весовой функцией называемой ценой вопроса $c(q_i)$, которая обозначает время, затраченное на их реализацию. Одним из видов представления вопросника является взвешенный граф $G(Y, \Gamma)$, у которого $Y = X \cup Q$; $y = x \in X \Rightarrow \Gamma_x = \emptyset$; $y = q \in Q \Rightarrow |\Gamma_q| = a(q)$; $X \cap Q = \emptyset$. По предложенным данным можно построить $n!$ число вопросников. Так как граф взвешенный, то имеется возможность рассчитать цену реализации всего графа. Цена реализации или цена обхода графа (2.6) – это математическое ожидание цены идентификации событий по множеству L всех путей, начинающихся в корневой вершине q_0 и заканчивающихся в $x_j \in X$.

$$C(Q) = \sum_{j=1}^m p(x_j) c(q_0, x_j); \quad (2.6)$$

Требуется решить задачу построения оптимальной последовательности вопросов на множестве X , такую при которой время реализации вопросника будет минимальным – ($C(Q) \Rightarrow \min$) (задача нахождения минимума целевой функции (2.6)). Заранее оговоримся, что при проведении процедуры поиска отказа подразумевается, что одновременно возможен только один отказ во всём объекте диагностирования.

2.5.1. Алгоритм Хаффмана

Алгоритм Хаффмана используется для построения оптимального гомогенного вопросника, у которого все цены равны и система вопросов полная. Данный алгоритм помогает найти за $O(N \log_a N)$ операций оптимальное решение. Алгоритм (1) для бинарного вопросника следующий [8]:

1. Упорядочить события x_i в соответствии с их вероятностями, так, что $\forall i: p(x_i) \geq p(x_{i+1})$.
2. Если число событий больше двух, то объединить два последних события в одно с суммарной вероятностью (вычеркнув x_{N-1} и x_N), ввести x_{N-1}^I так, что $p(x_{N-1}^I) = p(x_{N-1}) + p(x_N)$, $p(x_i^I) = p(x_i) |_{1 \leq i \leq N-2}$.
3. Повторить пункт 1.
4. Когда событий останется два, тогда следует задать корневой вопрос q_1 , разделяющий два события.
5. Конец алгоритма.

2.5.2. Алгоритм Пархоменко – Ретоллы

П. П. Пархоменко и независимо С. Ретолла решал задачу в более общем виде. В задаче задаётся вопросник $G(Y, \Gamma)$, идентифицирующий множество событий X , у которых имеются вероятности возникновения $p(x_i)$, а также множество разделяющих их вопросов Q . Алгоритм базируется на правилах перестановки подвопросников, цен, оснований вопросов и упорядочивании вершин на одном ранге и выглядит алгоритм следующим образом:

1. Создать список A из вероятностей событий так, что $\forall i: p(x_i) \leq p(x_{i+1})$.
2. Из оснований и цен вопросов организовать список B , так, что $\forall j: a_j \leq a_{j+1}$, $c_j \geq c_{j+1}$, $i=1$.

3. Взять из списка B пару (a_j, c_j) и поставить в соответствие этой паре вопрос q_i . Далее из списка A вычеркнуть a_i , определить вес вопроса $q_i: p(q_i) = \sum_{k=1}^{a_i} p(x_k)$.
4. Необходимо проверить значения j . Если $j < |Q|$, преобразовать список A сохраняя в нем вероятности не вычеркнутых событий и добавив к ним вес вопроса q_i . Упорядочить список аналогично, как это делается в пункте a . Увеличить значение j на единицу и перейти к шагу b . Когда $j = |Q|$, алгоритм завершается.
5. Конец алгоритма.

2.5.3. Метод динамического программирования

Вышеописанные алгоритмы работают только в специальных случаях вроде построения префиксных кодов, в задачах угадывания числа или при решении задачи диагностирования при неполных исходных данных. В задачах технической диагностики практически никогда не соблюдается условие полноты множества допустимых вопросов, также различны и их цены. В таких случаях говорят, что вопросник реализуемый – вопросник, у которого каждый вопрос принадлежит множеству допустимых. В таком случае принято пользоваться методом динамического программирования [6, 8, 53, 86], методом корневого вопроса, метод ветвей и границ. Тот или иной метод имеют свои недостатки, например метод динамического программирования является экспоненциально сложным, то есть от роста количества вопросов и событий растёт и трудоёмкость процесса оптимизации. Метод корневого вопроса, напротив, имеет полиномиальную трудоёмкость.

Метод динамического программирования, изначально сформулированного Р. Э. Беллманом позволяет строить оптимальные стратегии решения сложных задач путём декомпозиции на более мелкие и простые подзадачи, пользуясь некоторым правилом отыскивать оптимальные подрешения из которых в итоге складывается оптимальное решение. При использовании метода динамического про-

граммирования в теории вопросников работа методы схожа, только вместо термина «оптимальное решение» используется термин «оптимальный вопросник», а вместо термина «подзадача» используется «подвопросник». Таким образом оптимальный вопросник ничто иное как оптимальная стратегия решения задачи поиска отказа по критерию минимального затрачиваемого времени. В теории вопросников метод динамического программирования подразумевает первоначальный поиск всех возможных подмножеств разбиения исходного множества событий с числом элементов, не менее двух (они называются ситуациями, а число событий в соответствующем подмножестве – порядком t ситуации), а затем определение для каждого полученного подмножества событий наилучшего с точки зрения цены обхода вопроса по уравнению оптимальности Р. Э. Беллмана [53]:

$$C_{min}(L_t, X_t) = \min_{q \in Q_t} \left\{ c(q_i) + \sum_{k=1}^{k=\alpha(q)} p_k C_{min}(L_t^k, X_{t,y}^k) \right\} \quad (2.6)$$

где t – порядок ситуации (число событий в разделяемом подмножестве);

(L_t, X_t) – ситуация L_t порядка t , включающая в себя подмножество идентифицируемых событий X_t , которые могут быть разделены вопросами из подмножества вопросов Q_t , имеющих смысл для идентифицируемого подмножества событий;

$c(q_i)$ – цена вопроса $q_i \in Q_t$;

$C_{min}(L_t^k, X_{t,y}^k)$ – наименьшая цена разбиения ситуации $(L_t^k, X_{t,y}^k)$ на k подмножеств $X_{t,y}^k$ при постановке вопроса $q_i \in Q_t$;

$p_k = \frac{\sum_{x_i \in L_t^k} p(x_i)}{\sum_{x_i \in L_t} p(x_i)}$ – условная вероятность идентификации событий по каждому

исходу.

Уравнение (2.6) сформулировал профессор П. П. Пархоменко в своих исследованиях по методам оптимизации вопросников. Алгоритм работы:

1. Принять порядок ситуации $t = 1$.
2. Для каждой возможной ситуации (L_t, X_t) порядка t построить оптимальный подвопросник, используя имеющиеся подвопросники.

3. При условии, что $t \leq N$ увеличить t на единицу и вернуться к шагу 2, в противном случае оптимальный вопросник построен.
4. Конец работы алгоритма.

Метод динамического программирования позволяет строить оптимальный вопросник, «двигаясь» от висячих вершин к корню. Альтернативой использованию метода динамического программирования является применение метода ветвей и границ, который позволяет строить оптимальный вопросник от корня к висячим вершинам.

2.5.4. Метод ветвей и границ

Относится к методам направленного перебора, как и метод динамического программирования, с той лишь разницей, что при данном методе строится вопросник от корня. Для реализации данного метода необходимо вычислить нижние границы целевой функции различных ветвей дерева решений. Наиболее эффективным является алгоритм П. П. Пархоменко, где в качестве нижней границы для подмножества L_a вычисляется цена оптимального, но нереализуемого вопросника построенного по алгоритму П. П. Пархоменко при произвольном определении ответов на вопросы, имеющие смысл относительно подмножества событий L_a . Подробно алгоритм метода ветвей и границ изложен далее:

1. Сформировать список событий с указанием их вероятностей, список цен и оснований вопросов. Идентифицируемое множество событий L_a берем равной системе событий L .
2. Для множества событий L_a выбрать все вопросы из множества T , имеющие смысл относительно L_a . Эти вопросы образуют подмножество T_a . Каждый вопрос из T_a вносится в граф решений, образуя отдельную ветвь на подмножестве L_a .
3. Для каждой получившейся ветви определяем значения нижней границы, для этого используют алгоритм П. П. Пархоменко (2). При определении значений нижней границы в множество заданных вопросов включается

лишь вопросы, имеющие смысл на данном подмножестве событий $L_a - Q_a$. Число их меняется от $|L_a|$ до $k = \lceil \log Q_a \rceil$. Значение нижней границы берут равным минимальной цене гипотетического вопросника для L_a .

4. В графе решений выбрать висячую вершину, имеющее минимальное значение нижней границы. Если данная вершина соответствует невырожденному подвопроснику (в бинарном случае $|L_a| > 2$), то повторить шаг 2. В противном случае имеем оптимальный реализуемый подвопросник для некоторого подмножества событий $L_\beta \supseteq L_a$. Все висячие вершины, относящиеся к L_β , помечают символом X и исключают из дальнейшего рассмотрения.
5. Если $L_\beta \subset L$, последующему рассмотрению подлежат висячая вершина ветви, относящаяся к подмножеству $L' = L \setminus L_\beta$, и повторяется шаг 2. Если $L_\beta = L$, то значение нижней границы совпадает с ценой некоторого реализуемого вопросника. Все висячие вершины, нижние границы которых больше цены данного вопросника, помечают символом X и исключают из дальнейшего рассмотрения.
6. Из оставшихся висячих вершин графа решений, соответствующих невырожденному подвопроснику, выбрать вершину, имеющую минимальное значение нижней границы, и повторить процесс. Алгоритм заканчивает работу, когда все оставшиеся вершины соответствуют вырожденным подвопросникам. Оставшиеся вершины соответствуют оптимальному вопроснику.
7. Конец алгоритма.

2.5.5. Метод корневого вопроса

Данный метод является методом построения вопросника на основе выбора наиболее предпочтительных вопросов на каждом этапе разбиения. Алгоритм оп-

тимизации вопросников, полученный на основе метода корневого вопроса, содержит следующие шаги:

1. Осуществляется попарное сравнение вопросов.
2. Определяется, можно ли установление отношений между всеми вопросами? Если нет, то выбирается другой метод оптимизации, если да – осуществляется переход к следующему пункту алгоритма.
3. Формируются пары вопросов.
4. Для каждой пары определяется функция предпочтения $\Phi(q_a, q_b)$ и устанавливается наиболее предпочтительный вопрос.
5. Осуществляется построение графа предпочтений.
6. Анализируется граф предпочтений и выбирается корневой вопрос.
7. Осуществляется постановка корневого вопроса и разбиение исходного множества событий на подмножества.
8. Полученные подмножества идентифицируемых событий анализируются и определяются вопросы, имеющие смысл для каждого из них.
9. Проверяется, все ли идентифицируемые события разделены? Если нет, то повторяются шаги 3 – 8 для каждого из подмножеств неразделённых событий. Если да, то искомым вопросник построен.
10. Конец алгоритма.

Основные шаги данного алгоритма связаны с определением отношений сравнения для каждой пары вопросов, вычислением значения функции предпочтения $\Phi(q_a, q_b)$ для каждой пары вопросов q_a и q_b , построением графа предпочтения и выбором корневого вопроса. Эти процедуры прделываются последовательно от разделения полного множества событий до разделения каждого из получаемых подмножеств.

2.5.6. Метод толерантных перестановок

Метод основывается на принципе толерантной замены [7, 9], сформулированной на общемосковском семинаре по технической диагностике

П. А. Правильщиковым [9]. Две структуры считаются толерантными, если среди множества пар вопросников, один из которых в каждой паре принадлежит первой структуре, а другой – второй, существует такая пара, в которой один вопросник может быть получен из другого путём перестроения одного вопроса предпоследнего ранга.

1. Построить таблицу исходов.
2. Из имеющихся в ней R структур выбрать структуру с максимальным суммарным весом пар ранней идентификации и выбрать её в качестве текущей. Перейти к её описанию в дополненной таблице исходов.
3. Сгенерировать для текущей структуры G_t все возможные толерантные замены по описанным выше правилам.
4. Из всех полученных структур выбрать структуру с максимальным суммарным весом пар ранней идентификации G_s .
5. Если $C(G_s) < C(G_t)$, то выбрать в качестве текущей структуру G и перейти к 3. В противном случае конец работы алгоритма. Оптимальной является структура G_t .

2.5.7. Метод «загрубления»

В некоторых случаях можно воспользоваться методом расщепления/склейки или загрубления² [43, 124]. На основании исследований и практических соображений предложим следующий алгоритм оптимизации:

1. На основании множества исходных данных формируется перечень допустимых вопросов и диагностируемых событий.
2. Для сложных элементов, состоящих из нескольких структурных единиц, в которых допустимая проверка подразумевает более двух вариантов исходов, но при этом, никак иначе не разделяемых, уменьшается глубина диа-

² Данное название предложил в личной беседе с соискателем член-корреспондент РАН П. П. Пархоменко (ИПУ РАН).

гностирования и создаётся «общее событие» (производится уменьшение детализации событий).

3. Формируется перечень бинарных проверок с уменьшенной глубиной диагностирования.
4. Известными методами оптимизируется бинарный вопросник.
5. Диагностические события, полученные на этапе 2, детализируются (события «расщепляются»).

Представленный алгоритм оптимизации позволяет за счёт первоначального уменьшения глубины диагностирования строить оптимальный или близкий к оптимальному, а затем его расширять за счёт увеличения числа исходов части проверок. Такой подход был использован, например, для оптимизации алгоритма диагностирования стрелочного привода по данным автоматизированной системы управления хозяйством сигнализации, централизации и блокировки [43].

Все вышеописанные алгоритмы описаны в литературе и имеют примеры на основе бинарных или дихотомичных вопросников. В части технического диагностирования изученный тип вопросников является самым простым. По итогам исследований получены алгоритмы оптимизации, направленные на сокращение времени поиска отказов – для построения оптимальных или квазиоптимальных вопросников. Постановка вопросов играет важную роль при сокращении времени на поиск отказа, так как все они имеют различные цены. Таким образом, при поиске отказов в напольных устройствах автоматики на железнодорожном транспорте время реализации одной проверки (вопроса) может варьироваться от нескольких секунд (в случае, когда производится автоматическое измерение параметра устройства удалённо с автоматизированного рабочего места оператора, кликая мышкой можно быстро узнать в норме ли данный параметр или нет) до нескольких часов (в случае если проверку необходимо провести на месте неисправного объекта, скажем, измерить напряжение на лампе светофора на железнодорожном перегоне, тогда работнику необходимо потратить время на дорогу до объекта диагностирования).

Бинарные вопросники – хоть и самый простой вид вопросников, на практике могут давать не наилучшие результаты в построении алгоритмов разбиения множеств на подмножества. В данном исследовании одной из задач ставится определение условий, при которых вопросники с бóльшим основанием, чем бинарные, могут иметь цену обхода вопросника меньшую, чем бинарные. Каждый вопросник нетрудно привести к бинарному виду, но для сокращения цены обхода этот метод не подходит. Привести вопросник к бинарному виду можно с помощью метода расщепления, когда из абстрактного неоднородного вопросника, построенного на основе статистических данных, происходит переформулировка вопросов в бинарный вид [124]. Но, как и оговаривалось ранее, может привести к росту стоимости реализации вопросника.

2.6. Выводы по разделу

На основании анализа основных положений теории вопросников и методов их оптимизации можно сделать следующие выводы:

1. Существует большое разнообразие способов задания вопросников, однако на практике широкого применения достигли только анкетная форма и древовидная. Может быть предложена модификация языка ЛСА для задания вопросников с последующей оптимизацией их как алгоритмов.
2. Наиболее простыми по своей структуре являются бинарные вопросники, методы оптимизации которых, достаточно хорошо проработаны.
3. При оптимизации гетерогенных вопросников могут быть использованы известные методы динамического программирования и ветвей и границ с экспоненциальной сложностью, для упрощения которых может применяться метод «загрубления».
4. Методы оптимизации гетерогенных вопросников, обладающие полиномиальной сложностью, глубоко не изучены.

ГЛАВА 3. ГЕТЕРОГЕННЫЕ И ГОМОГЕННЫЕ ВОПРОСНИКИ

3.1. Виды и преобразования вопросников

Однородные вопросники бинарного вида являются самыми простыми примерами вопросников, но в теории диагностирования не всегда могут иметь эффективные решения. Бинарные вопросники – вопросники, у которых $\forall q_i \in Q, a(q_i) = 2$. В диагностике и мониторинге одним из важных показателей является время диагностирования, а количество и стоимость вопросов напрямую влияют на эту величину. В вопросах бинарного вида ответы могут иметь следующие интерпретации: «Да» или «Нет», «1» или «0» и т. д. Пример вопросника представлен на рис. 3.1.

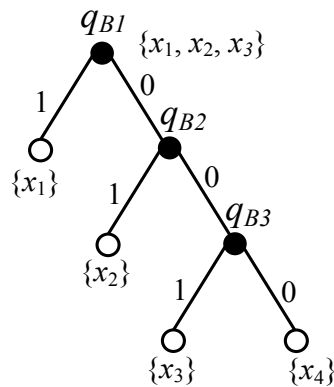


Рисунок 3.1. Бинарный вопросник

Таким образом, вопросы интерпретирующие проверки в объекте диагностирования. Можно формулировать следующим образом: «Имеется ли напряжение питание объекта?», ответ – «Да» или «Нет», следующий вопрос: «Питающее напряжение ниже 198 Вольт?», ответ – «Да» или «Нет», и следующий вопрос: «Питающее напряжение выше 242 Вольт?», ответ – «Да» или «Нет». Ответ «Да» на каждый из вышеприведённых вопросов представляет отдельный тип отказа. Данный пример олицетворяет проверку питающего напряжения объекта номиналом 220 вольт. По поставленным бинарным вопросам можно составить суждение о том, находится ли напряжение питание объекта диагностирования в норме, на что понадобилось три бинарных вопроса и у каждого имеется свои затраты вре-

мени. Для объектов диагностирования состоящих из множества частей такой бинарный вопросник будет содержать огромное количество вопросов (проверок), что значительно усложняет оптимизацию такого вопросника и увеличивает цену обхода.

Вопросы с большими основаниями позволяют сократить «громоздкость» вопросника и снизить цену обхода. Так, в примере о напряжении питания объекта диагностирования вместо бинарного можно задать вопрос тернарный: «В каких пределах находится напряжение питания объекта?», ответы – «0», «ниже 198 Вольт» и «выше 242 Вольт». По каждому из ответов будет понятно, какой отказ произошёл. Пример вопросника представлен на рис. 3.2.

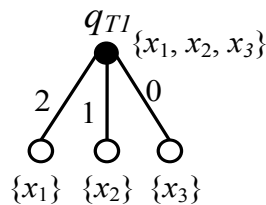


Рисунок 3.2. Тернарный вопрос эквивалентный бинарному вопроснику на рис 3.1

Таким образом, необходимо произвести только одну проверку вместо трех, как в примере с бинарными вопросниками. Такие тривиальные примеры хорошо демонстрируют, что помимо гомогенных (однородных) вопросников, могут оказаться полезными и гетерогенные (неоднородные) в которых содержатся помимо бинарных и тернарные вопросы, а также такие вопросники могут иметь и преимущество перед однородными.

Из вышеописанного можно сделать вывод, что от формулировки вопроса (проверки) зависит оптимальность алгоритма. Как и в примере с напряжением питания, были переформулированы вопросы и вместо бинарного вопросника с тремя вопросами был получен один тернарный вопросник. В технической диагностике, к примеру, на железнодорожном транспорте в устройствах автоматики функционирует аппаратура, параметры, которой для нормальной работы должны находиться в заданных пределах. Завышение или занижение параметра соответствует отказу оборудования. К примеру, в устройствах тональной рельсовой цепи,

напряжение на путевом приёмнике должно находиться в пределах установленной нормы и формулировка вопроса, следующая: «Напряжение на путевом приёмнике находится в пределах $U_{\text{ост}} \leq U_{\text{пп}} \leq U_{\text{мин}}$ ». И таких примеров может быть ещё множество.

Следствием вышеперечисленного является то, что вопросы могут быть преобразованы из одного вида в другой для получения вопросника с наименьшей ценой обхода. Рассмотрим данный факт далее вместе с особенностями бинарно-тернарных вопросников.

3.2. Бинарно-тернарные вопросники

Наиболее простым гетерогенным (неоднородным) вопросником является бинарно-тернарный вопросник, включающий в себя вопросы с двумя и тремя исходами. Согласно определению 2.4 в его составе имеются как минимум один бинарный и как минимум один тернарный вопрос. Рассмотрим особенности BTQ на примере анкеты, представленной в таблице 3.1. Как можно увидеть, задача полного разбиения множества событий X решается построением алгоритма диагностирования на основе тернарного, бинарного или бинарно-тернарного вопросника.

Таблица 3.1. Анкета неисправностей

q_i	$c(q_i)$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
q_{T_1}	3	2	2	2	1	1	1	0	0	0
q_{T_2}	4	2	1	0	2	1	0	2	1	0
q_{B_3}	3	1	1	1	1	0	0	0	0	1
q_{B_4}	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0
q_{B_5}	2	0	1	1	0	1	0	1	1	0
q_{B_6}	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1
$p(x_i)$		0,1	0,1	0,05	0,2	0,1	0,05	0,1	0,15	0,15

Все параметры, цена вопроса и вероятности идентификации события даны в таблице 3.1. Основываясь на данной информации, построим вопросник каждого вида и вычислим для них цены обхода.

Бинарный вопросник, построенный по табл. 3.1 изображён на рис. 3.3.

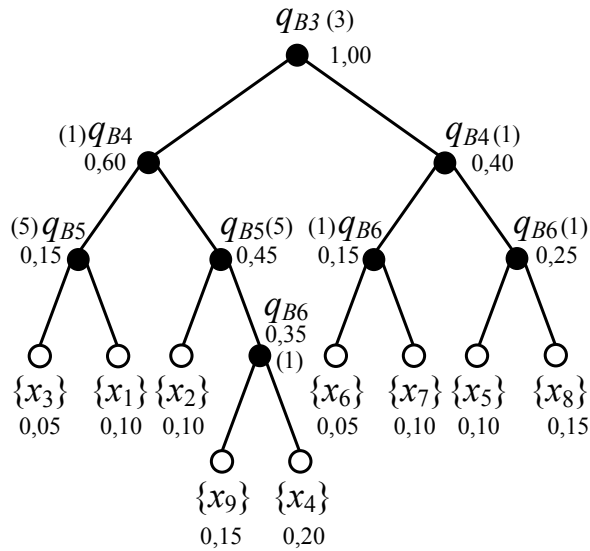


Рисунок 3.3. Бинарный вопросник

Цена обхода вопросника, представленного на рис. 3.3, следующая:

$$\begin{aligned}
 C_{BQ} = & 3,00 \cdot 1,00 + 4,00 \cdot (0,10 + 0,10 + 0,05 + 0,20 + 0,15) + \\
 & + 2,00 \cdot (0,10 + 0,05) + 2,00 \cdot (0,10 + 0,20 + 0,15) + 1,00 \cdot (0,20 + 0,15) + \\
 & + 1,00 \cdot (0,10 + 0,05 + 0,10 + 0,15) + 1,00 \cdot (0,05 + 0,10) + \\
 & + 1,00 \cdot (0,10 + 0,15) = 3,00 + 0,60 + 0,30 + 0,90 + 0,35 + \\
 & + 0,50 + 0,15 + 0,25 = 6,05.
 \end{aligned}$$

Тернарный вопросник, построенный по табл. 3.1, изображён на рис. 3.4.

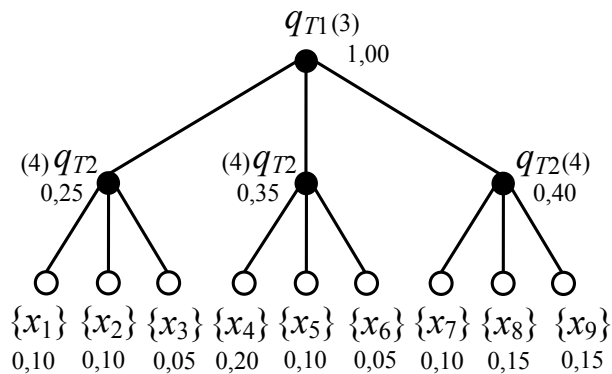


Рисунок 3.4. Тернарный вопросник

Цена обхода вопросника, представленного на рис. 3.4, следующая:

$$\begin{aligned}
 C_{TQ} = & 3,00 \cdot 1,00 + 4,00 \cdot (0,10 + 0,10 + 0,05) + 4,00 \cdot (0,20 + 0,10 + 0,05) + \\
 & + 4,00 \cdot (0,10 + 0,15 + 0,15) = 3,00 + 1,00 + 1,40 + 1,60 = 7,00.
 \end{aligned}$$

Бинарно-тернарный вопросник, построенный по табл. 3.1, изображён на рис. 3.5.

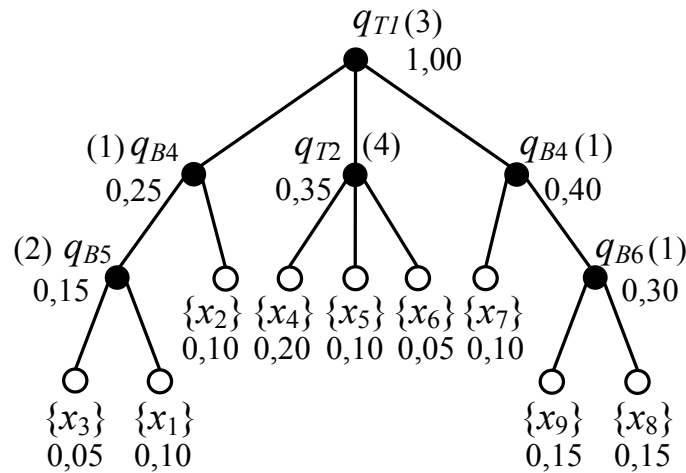


Рисунок 3.5. Бинарно-тернарный вопросник

Цена обхода вопросника, представленного на рис. 3.5, следующая:

$$C_{BTQ} = 3,00 \cdot 1,00 + 1,00 \cdot (0,10 + 0,10 + 0,05) + 2,00 \cdot (0,10 + 0,05) + \\ + 4,00 \cdot (0,20 + 0,10 + 0,05) + 1,00 \cdot (0,10 + 0,15 + 0,15) + \\ + 1,00 \cdot (0,15 + 0,15) = 3,00 + 0,25 + 0,30 + 1,40 + 0,40 + 0,30 = 5,65.$$

Сравнив цены вопросов каждого полученного вопросника, можно заметить, что вопросник бинарно-тернарного вида позволяет идентифицировать события в среднем быстрее, чем два других. В вариантах с иными ценами вопросов и весовых коэффициентов идентифицируемых событий, возможно, что выгоднее будет бинарный или тернарный вопросник.

Основываясь на вышесказанном, сформулируем свойства присущие бинарно-тернарным вопросникам:

Свойство 3.1. Бинарно-тернарный вопросник требует постановки меньшего числа вопросов, чем бинарный, позволяющий идентифицировать то же множество событий.

Такое свойство вытекает из оснований вопросов: у тернарного вопроса три ответа, а у бинарного – только два.

Свойство 3.2. Максимальная длина маршрута в бинарно-тернарном вопроснике может оказаться такой же или меньшей, чем в бинарном вопроснике.

Маршрут – это последовательность вершин и рёбер от корневого вопроса к одной из висячих вершин, а число рёбер в маршруте – длина маршрута.

Вышеописанные свойства позволяют говорить о преимуществе бинарно-тернарных вопросников.

Применение и преимущества бинарно-тернарных вопросников на примере синтеза алгоритмов диагностирования для устройств железнодорожной автоматики и телемеханики рассмотрены в пятой главе настоящей диссертации.

3.3. Оптимизация бинарно-тернарных вопросников методом корневого вопроса

3.3.1 Постановка задачи оптимизации

Дано конечное множество X событий из n элементов – ($X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$) и множество Q из m вопросов, имеющих смысл на заданном множестве – $Q = \{q_{a_1}, q_{a_2}, \dots, q_{a_m}\}$. Множество Q вопросов разбивает множество X на одноэлементные подмножества. Все исходы вопросов $q_i \in Q$ являются детерминированными. Вопрос q_{B_i} имеет $a(q_i) = 2$, называется бинарным, а вопрос q_{T_i} имеет $a(q_i) = 3$, называется тернарным. Каждое событие $x_j \in X$ характеризуется вероятностью возникновения $p(x_j)$. Каждый вопрос $q_i \in Q$ характеризуется неотрицательной весовой функцией называемой ценой вопроса $c(q_i)$, которая обозначает время, затраченное на их реализацию. Вопросника далее будет представляться в виде взвешенного графа $G(Y, \Gamma)$, у которого $Y = X \cup Q$; $y = x \in X \Rightarrow \Gamma_x = \emptyset$; $y = q \in Q \Rightarrow |\Gamma_q| = a(q)$; $X \cap Q = \emptyset$. По предложенным данным можно построить $n!$ число вопросников.

Краткая математическая запись постановки задачи:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n \mid \forall x_j \in X, 0 \leq p(x_j) \leq 1, \sum_{x_j \in X} p(x_j) = 1\}.$$

$$Q = \{q_{a_1}, q_{a_2}, \dots, q_{a_m} \mid a(q_{B_i}) = 2, a(q_{T_i}) = 3\}.$$

$$Q(Y, \Gamma): Y = X \cup Q; y = x \in X \Rightarrow \Gamma_x = \emptyset; y = q \in Q \Rightarrow |\Gamma_q| = a(q); X \cap Q = \emptyset.$$

$$f: C(Q) = \sum_{j=1}^m p(x_j) c(q_0, x_j): C(Q) \Rightarrow \min.$$

3.3.2 Метод корневого вопроса для оптимизации гомогенных и гетерогенных вопросников

Ранее уже шла речь об оптимизации методом корневого вопроса для бинарных вопросников. В данном подразделе произведём адаптацию данного метода для других видов гомогенных и гетерогенных вопросников (для тернарных и бинарно-тернарных вопросников), а в следующем разделе рассмотрим пример оптимизации данным методом бинарно-тернарного вопросника.

Для того чтобы проводить оптимизацию, необходимо установить все возможные отношения сравнения между вопросами, затем определить критерий предпочтительности Φ одного вопроса перед другим.

Для полноты картины опишем отношения сравнения для двух бинарных вопросов, двух тернарных вопросов и для отношения сравнения для бинарного и тернарного вопросов.

Отношения сравнения бинарных вопросов

Рассмотрим отношения сравнения бинарных вопросов.

Определение 3.1. Два вопроса q_i и q_j находятся в отношениях сравнения в том случае, когда подмножество какого-либо исхода одного из них является собственным подмножеством какого-либо исхода другого вопроса.

Утверждение 3.1. Между вопросами бинарного вида можно установить только одно отношение сравнения.

Пусть имеется конечное множество идентифицируемых событий $X = \{x_j | j = \overline{1, m}\}$, разбиваемое конечным множеством вопросов $Q = \{q_i | i = \overline{1, n}\}$ на непересекающиеся подмножества. Бинарный вопрос q_{B1} разбивает множество событий X , на два подмножества: $X_{q_{B1}}^1 \subset X$, $X_{q_{B1}}^0 \subset X$, $X \setminus (X_{q_{B1}}^1 \cup X_{q_{B1}}^0) = \emptyset$, вопрос q_{B2} на: $X_{q_{B2}}^1 \subset X$, $X_{q_{B2}}^0 \subset X$, $X \setminus (X_{q_{B2}}^1 \cup X_{q_{B2}}^0) = \emptyset$. Обозначим множество событий X , которое разбивается вопросом q_{B1} , как $X_{q_{B1}}$, а множество X разбиваемое вопросом q_{B2} , - $X_{q_{B2}}$, при этом $X_{q_{B1}} = X_{q_{B2}}$.

Исходя из условий того, что бинарный вопрос разбивает множество идентифицируемых событий X на два непересекающихся подмножества, логично заключить, что отношение сравнения бинарных вопросов может быть только одно – когда одно из подмножеств бинарного вопроса q_{B1} полностью содержит в себе одно из подмножеств бинарного вопроса q_{B2} и часть второго подмножества бинарного вопроса q_{B2} , и наоборот. Иначе говоря, $(X_{q_{B2}}^1 \cup X_{q_{B1}}^1 \setminus X_{q_{B2}}^0) = X_{q_{B1}}^1$ и $(X_{q_{B1}}^0 \cup X_{q_{B2}}^0 \setminus X_{q_{B1}}^1) = X_{q_{B2}}^0$. Условие равенства одного из подмножеств вопроса q_{B1} и q_{B2} не имеет смысла. Отношение сравнения бинарных вопросов представлено на рис. 3.6.

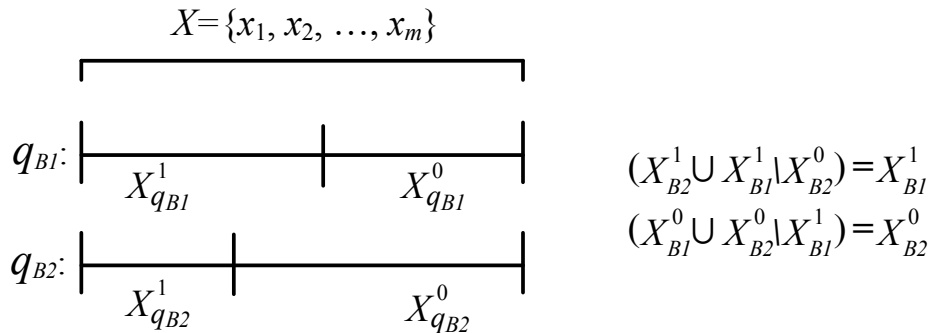


Рисунок 3.6. Отношение сравнения бинарных вопросов.

Функция предпочтения для сравнения бинарных вопросов

Прежде, чем перейти к получению выражения, описывающего предпочтительность одного выражения перед другим, дадим определение:

Определение 3.2. Функцией предпочтения называется такая функция, которая показывает, какой из сравниваемых вопросов задавать предпочтительнее (или выгоднее) для поставленной задачи.

Функция предпочтения обозначается как $\Phi(q_i, q_j)$. Если $\Phi(q_i, q_j) < 1$, то вопрос q_i предпочтительней вопроса q_j – ($q_i > q_j$). Если $\Phi(q_i, q_j) < 1$, то вопрос q_j предпочтительней вопроса q_i – ($q_i < q_j$). При $\Phi(q_T, q_B) = 1$ вопросы равнозначны.

Выведем выражения для функции предпочтения для представленного на рис. 3.7 варианта сравниваемых вопросов.

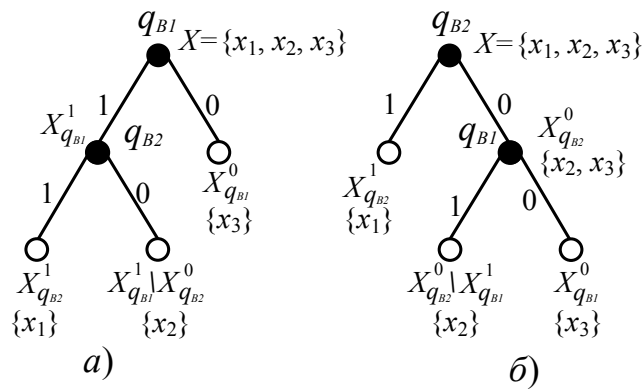


Рисунок 3.7. Пример для отношения сравнения бинарных вопросов

Введём обозначение цены обхода для каждого из разбиений исходного множества событий вопросами q_{B1} и q_{B2} : $c(X_{q_{B1}}^r)$, где $r \in \{0,1\}$ и $c(X_{q_{B2}}^h)$, где $h \in \{0,1\}$.

Цена обхода вопросника $Q(q_{B1}q_{B2})$:

$$C_{Q(q_{B1}q_{B2})} = 1 \cdot c(q_{B1}) + c(X_{q_{B1}}^0) + c(X_{q_{B2}}^1) + c(X_{q_{B1}}^1 \setminus X_{q_{B2}}^0) + c(q_{B2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{B2}}^1 \cup X_{q_{B1}}^1 \setminus X_{q_{B2}}^0)} p_i; \quad (3.1)$$

Цена обхода вопросника $Q(q_{B2}q_{B1})$:

$$C_{Q(q_{B2}q_{B1})} = 1 \cdot c(q_{B2}) + c(X_{q_{B2}}^1) + c(X_{q_{B1}}^0) + c(X_{q_{B2}}^0 \setminus X_{q_{B1}}^1) + c(q_{B1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{B2}}^0 \setminus X_{q_{B1}}^1 \cup X_{q_{B1}}^0)} p_j; \quad (3.2)$$

Определим разницу цен вопросников $Q(q_{B1}q_{B2})$ и $Q(q_{B2}q_{B1})$:

$$\begin{aligned}
\Delta C = C_{Q(q_{B1}q_{B2})} - C_{Q(q_{B2}q_{B1})} = & \left(c(q_{B1}) + c(X_{q_{B1}}^0) + c(X_{q_{B2}}^1) + \right. \\
& c(X_{q_{B1}}^1 \setminus X_{q_{B2}}^0) + c(q_{B2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{B2}}^1 \cup X_{q_{B1}}^1 \setminus X_{q_{B2}}^0)} p_i \left. \right) - \left(c(q_{B2}) + c(X_{q_{B2}}^1) + \right. \\
& c(X_{q_{B1}}^0) + c(X_{q_{B2}}^0 \setminus X_{q_{B1}}^1) + c(q_{B1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{B2}}^0 \setminus X_{q_{B1}}^1 \cup X_{q_{B1}}^0)} p_j \left. \right) = c(q_{B1}) + \\
& c(X_{q_{B1}}^0) + c(X_{q_{B2}}^1) + c(X_{q_{B1}}^1 \setminus X_{q_{B2}}^0) + c(q_{B2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{B2}}^1 \cup X_{q_{B1}}^1 \setminus X_{q_{B2}}^0)} p_i - \\
& c(q_{B2}) - c(X_{q_{B2}}^1) - c(X_{q_{B1}}^0) - c(X_{q_{B2}}^0 \setminus X_{q_{B1}}^1) - \\
& - c(q_{B1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{B2}}^0 \setminus X_{q_{B1}}^1 \cup X_{q_{B1}}^0)} p_j ;
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Упростим полученное выражение:

$$\begin{aligned}
\Delta C = c(q_{B1}) - c(q_{B2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{B2}}^0 \setminus X_{q_{B1}}^1 \cup X_{q_{B1}}^0)} p_i - \\
- c(q_{B2}) - c(q_{B1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{B2}}^0 \setminus X_{q_{B1}}^1 \cup X_{q_{B1}}^0)} p_j ;
\end{aligned} \tag{3.4}$$

При условии $\Delta C < 0$ вопрос q_{B1} будет предпочтительнее вопроса q_{B2} . Это условие может быть записано в виде:

$$\begin{aligned}
c(q_{B1}) + c(q_{B2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{B2}}^1 \cup X_{q_{B1}}^1 \setminus X_{q_{B2}}^0)} p_i < \\
< c(q_{B2}) + c(q_{B1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{B2}}^0 \setminus X_{q_{B1}}^1 \cup X_{q_{B1}}^0)} p_j ;
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Пользуясь выражением (3.5), введём функцию предпочтения, характеризующую предпочтительность одного вопроса перед другим.

Функция предпочтения имеет вид:

$$\Phi(q_{B1}, q_{B2}) = \frac{c(q_{B1}) + c(q_{B2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{B2}}^1 \cup X_{q_{B1}}^1 \setminus X_{q_{B2}}^0)} p_i}{c(q_{B2}) + c(q_{B1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{B2}}^0 \setminus X_{q_{B1}}^1 \cup X_{q_{B1}}^0)} p_j}. \tag{3.6}$$

Отношения сравнения тернарных вопросов

Определим, какие бывают отношения сравнения между тернарными вопросами.

Утверждение 3.2. Между вопросами тернарного вида можно установить пять вариантов отношения сравнения. Другие варианты отношений сравнения, учитывая возможности равнозначной замены номеров исходов, совпадают.

Отношения сравнения тернарных вопросов q_{T1} и q_{T2} . На множестве идентифицируемых событий $X = \{x_j | j = \overline{1, m}\}$ зададим два тернарных вопроса. Каждый тернарный вопрос q_{T1} и q_{T2} , разбивает множество событий на три непересекающихся подмножества. Вопрос q_{T1} разбивает множество X на $X_{q_{T1}}^2 \subset X$, $X_{q_{T1}}^1 \subset X$, $X_{q_{T1}}^0 \subset X$, $X \setminus (X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T1}}^0) = \emptyset$, вопрос q_{T2} разбивает на $X_{q_{T2}}^2 \subset X$, $X_{q_{T2}}^1 \subset X$, $X_{q_{T2}}^0 \subset X$, $X \setminus (X_{q_{T2}}^2 \cup X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T2}}^0) = \emptyset$.

Начнём рассмотрение отношений сравнения со случая, когда у двух сравниваемых вопросов имеется по одному равному подмножеству. На рис. 3.8 представлен случай с $X_{q_{T1}}^2 = X_{q_{T2}}^2$, при котором $X_{q_{T2}}^1 \subset X_{q_{T1}}^1$ и $X_{q_{T1}}^0 \subset X_{q_{T2}}^0$.

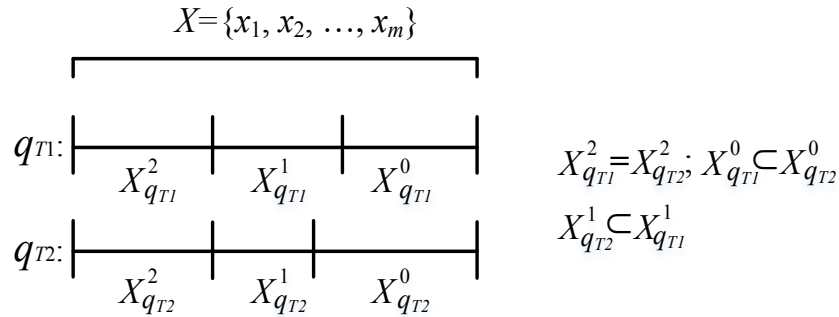


Рисунок 3.8. Отношения вопросов при $X_{q_{T1}}^2 = X_{q_{T2}}^2$

В случае с одним равным подмножеством $X_{q_{T1}}^2 = X_{q_{T2}}^2$ оставшиеся подмножества можно рассматривать так же как в отношениях бинарных вопросов. Таким образом, в любом случае будет одно из двух оставшихся исходов вопроса q_{T2} полностью входить в одно подмножество вопроса q_{T1} и наоборот. В случае, представленном на рис. 3.8, видно как подмножество исхода «1» вопроса q_{T2} полностью входит в подмножество исхода 1 вопроса q_{T1} — $X_{q_{T2}}^1 \subset X_{q_{T1}}^1$, а подмножество исхода «0» вопроса q_{T1} полностью входит в подмножество исхода «0» вопроса q_{T2} : $X_{q_{T1}}^0 \subset X_{q_{T2}}^0$.

Существует ещё один вариант равенства подмножеств сравниваемых вопросов: когда два подмножества вопроса q_{T2} равны одному подмножеству вопроса q_{T1} , или $X_{q_{T1}}^0 = (X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T2}}^0)$. При этом «автоматически» оставшиеся два под-

множества вопроса q_{T1} становятся равны оставшемуся подмножеству вопроса q_{T2} , или $X_{q_{T2}}^2 = (X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1)$. Данный пример изображен на рис. 3.9.

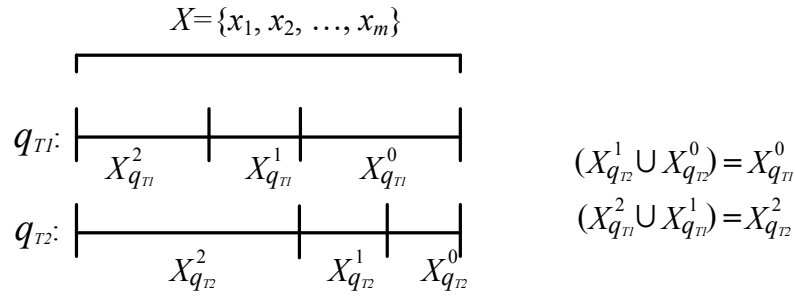


Рисунок 3.9. Отношения вопросов при $X_{q_{T1}}^0 = (X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T2}}^0)$ и $X_{q_{T2}}^2 = (X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1)$

Рассмотрим далее случаи отношений сравнения, в которых отсутствуют равные подмножества среди сравниваемых вопросов. Для начала, при сравнении тернарных вопросов возможны ситуации, когда в одно подмножество тернарного вопроса полностью входит одно или два подмножества другого сравниваемого с ним вопроса. Другие ситуации исключаются исходя из условия разбиения одного и того же множества идентифицируемых событий, а также из условия непересекающихся подмножеств.

Рассмотрим случай, когда в подмножество одного вопроса полностью входят два подмножества другого сравниваемого с ним вопроса. Изобразим такой случай на рис. 3.10.

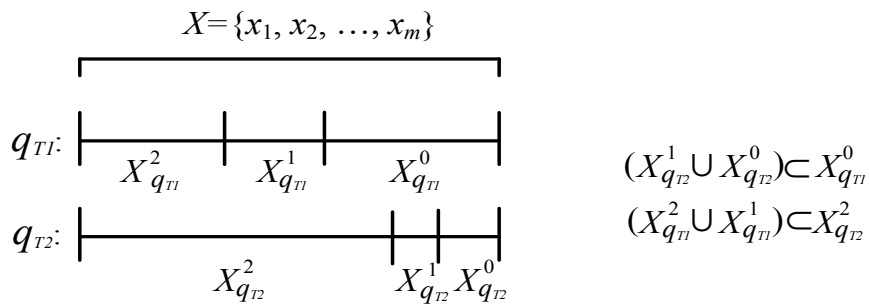


Рисунок 3.10. Отношения вопросов при $(X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1) \subset X_{q_{T2}}^2$ и $(X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T2}}^0) \subset X_{q_{T1}}^0$

Как видно из рис. 3.10. подмножества $X_{q_{T1}}^1$ и $X_{q_{T1}}^2$ вопроса q_{T1} полностью входят в подмножество вопроса q_{T2} и наоборот, то есть $(X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1) \subset X_{q_{T2}}^2$ и

$(X_{q_{T_2}}^1 \cup X_{q_{T_2}}^0) \subset X_{q_{T_1}}^0$. При данном отношении сравнения также частично входят друг в друга подмножества $X_{q_{T_2}}^2$ и $X_{q_{T_1}}^0$.

Следующим вариантом отношения сравнения тернарных вопросов является полное вхождение одного подмножества вопроса в подмножество другого сравниваемого с ним вопроса. Тут возможны два подварианта, рис. 3.11. а) и б).

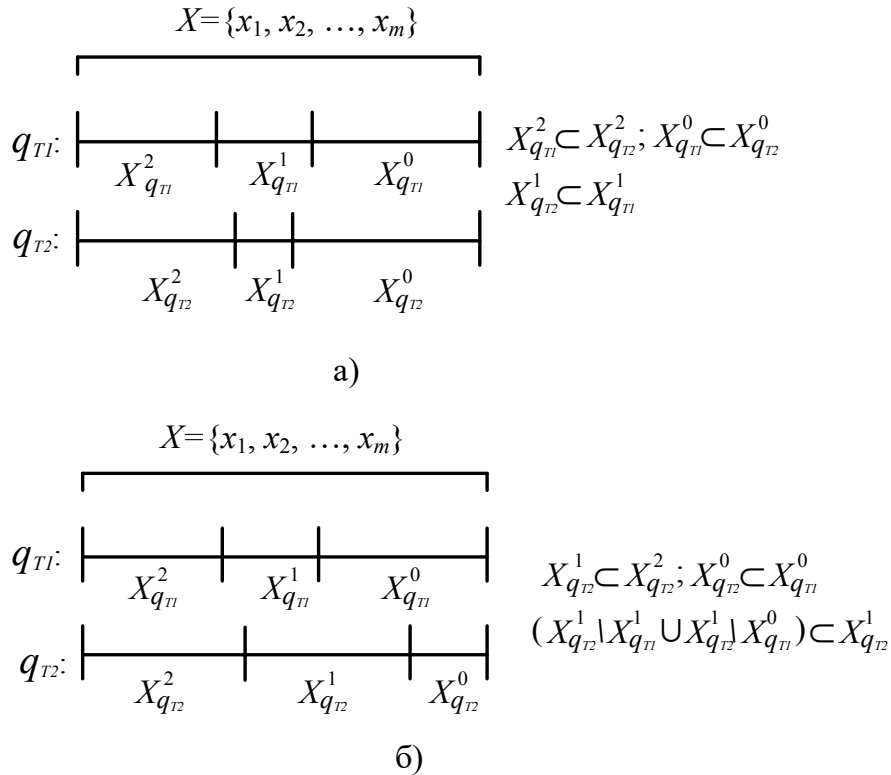


Рисунок 3.11. Отношения вопросов при полном вхождении одного подмножества вопроса в одно подмножество другого вопроса

Функция предпочтения для сравнения тернарных вопросов

Найдём функцию предпочтения для представленного на рис. 3.12 варианта сравниваемых вопросов.

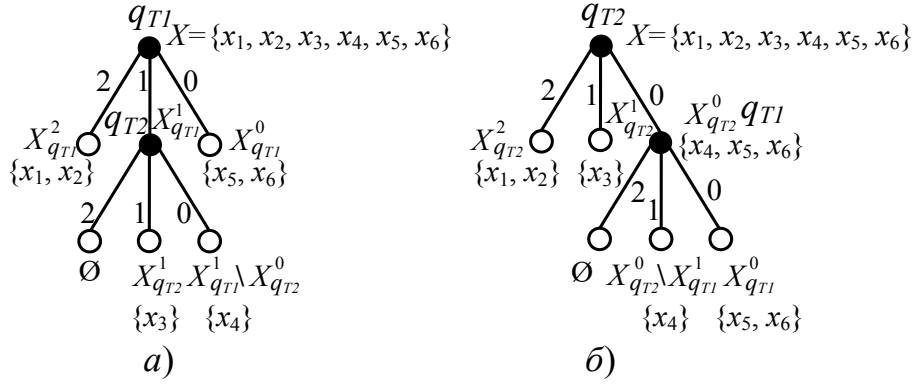


Рисунок 3.12. Пример отношения тернарных вопросов при $X_{q_{T1}}^2 = X_{q_{T2}}^2$

Обозначение цены обхода для каждого из разбиений исходного множества событий вопросами q_{T1} и q_{T2} : $c(X_{q_{T1}}^r)$, где $r \in \{0,1,2\}$ и $c(X_{q_{T2}}^h)$, где $h \in \{0,1,2\}$.

Цена обхода вопросника $Q(q_{T1}q_{T2})$:

$$C_{Q(q_{T1}q_{T2})} = 1 \cdot c(q_{T1}) + c(X_{q_{T1}}^2) + c(X_{q_{T1}}^0) + c(X_{q_{T2}}^1) + c(X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^0) + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^0)} p_i. \quad (3.7)$$

Цена обхода вопросника $Q(q_{T2}q_{T1})$:

$$C_{Q(q_{T2}q_{T1})} = 1 \cdot c(q_{T2}) + c(X_{q_{T2}}^2) + c(X_{q_{T2}}^1) + c(X_{q_{T2}}^0 \setminus X_{q_{T1}}^1) + c(X_{q_{T1}}^0) + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^0 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T1}}^0)} p_j. \quad (3.8)$$

Определим разницу цен вопросников $Q(q_{T1}q_{T2})$ и $Q(q_{T2}q_{T1})$:

$$\begin{aligned} \Delta C &= C_{Q(q_{T1}q_{T2})} - C_{Q(q_{T2}q_{T1})} = \left(c(q_{T1}) + c(X_{q_{T1}}^2) + c(X_{q_{T1}}^0) + c(X_{q_{T2}}^1) + c(X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^0) + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^0)} p_i \right) - \\ &- \left(c(q_{T2}) + c(X_{q_{T2}}^2) + c(X_{q_{T2}}^1) + c(X_{q_{T2}}^0 \setminus X_{q_{T1}}^1) + c(X_{q_{T1}}^0) + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^0 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T1}}^0)} p_j \right) = \\ &= c(q_{T1}) + c(X_{q_{T1}}^2) + c(X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^0) + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^0)} p_i - c(q_{T2}) - c(X_{q_{T2}}^2) - \\ &- c(X_{q_{T2}}^0 \setminus X_{q_{T1}}^1) - c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^0 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T1}}^0)} p_j. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Упростим полученное выражение с учётом того, что $X_{q_{T1}}^2 = X_{q_{T2}}^2$:

$$\begin{aligned} \Delta C = c(q_{T1}) + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^0)} p_i - c(q_{T2}) - \\ - c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^0 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T1}}^0)} p_j \end{aligned} \quad (3.10)$$

При условии $\Delta C < 0$ вопрос q_{T1} будет предпочтительнее вопроса q_{T2} . Это условие может быть записано в виде:

$$\begin{aligned} c(q_{T1}) + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^0)} p_i < \\ < c(q_{T2}) + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^0 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T1}}^0)} p_j. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Пользуясь выражением (3.11), введём функцию предпочтения, характеризующую предпочтительность одного вопроса перед другим.

Функция предпочтения для тернарных вопросов данного случая является следующее выражение:

$$\Phi(q_{T1}, q_{T2}) = \frac{c(q_{T1}) + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^0)} p_i}{c(q_{T2}) + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^0 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T1}}^0)} p_j}. \quad (3.12)$$

Найдём функцию предпочтения для представленного на рис. 3.13 варианта сравниваемых вопросов.

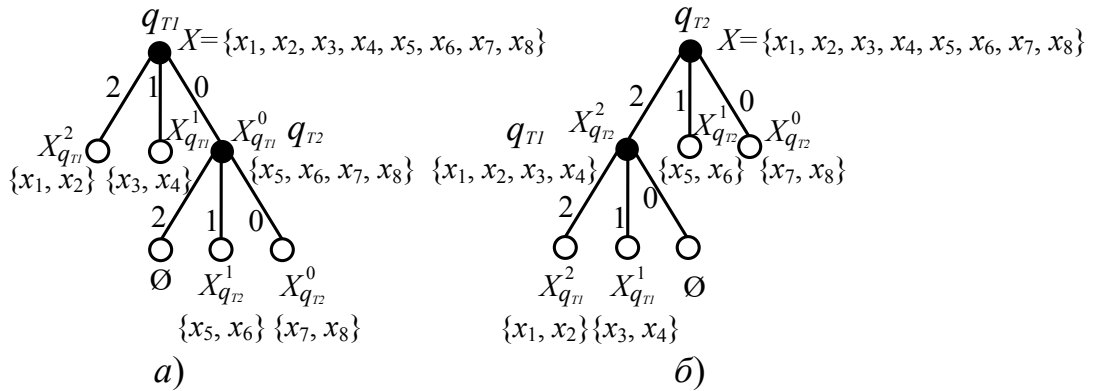


Рисунок 3.13. Пример отношения вопросов при $X_{q_{T1}}^0 = (X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T2}}^0)$ и $X_{q_{T2}}^2 = (X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1)$

Цена обхода вопросника $Q(q_{T1}q_{T2})$:

$$\begin{aligned} C_{Q(q_{T1}q_{T2})} = 1 \cdot c(q_{T1}) + c(X_{q_{T1}}^2) + c(X_{q_{T1}}^1) + c(X_{q_{T2}}^1) + c(X_{q_{T2}}^0) + \\ + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T2}}^0)} p_i. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Цена обхода вопросника $Q(q_{T2}q_{T1})$:

$$C_{Q(q_{T2}q_{T1})} = 1 \cdot c(q_{T2}) + c(X_{q_{T2}}^1) + c(X_{q_{T2}}^0) + c(X_{q_{T1}}^2) + c(X_{q_{T1}}^1) + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1)} p_j. \quad (3.14)$$

Определим разницу цен вопросников $Q(q_{T1}q_{T2})$ и $Q(q_{T2}q_{T1})$:

$$\begin{aligned} \Delta C &= C_{Q(q_{T1}q_{T2})} - C_{Q(q_{T2}q_{T1})} = \\ &= \left(c(q_{T1}) + c(X_{q_{T1}}^2) + c(X_{q_{T1}}^1) + c(X_{q_{T2}}^1) + c(X_{q_{T2}}^0) + \right. \\ &+ c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T2}}^0)} p_i \left. \right) - \left(c(q_{T2}) + c(X_{q_{T2}}^1) + c(X_{q_{T2}}^0) + \right. \\ &+ c(X_{q_{T1}}^2) + c(X_{q_{T1}}^1) + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1)} p_j \left. \right) = c(q_{T1}) + \\ &+ c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T2}}^0)} p_i - c(q_{T2}) - c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1)} p_j. \end{aligned} \quad (3.15)$$

При условии $\Delta C < 0$ вопрос q_{T1} будет предпочтительнее вопроса q_{T2} . Это условие может быть записано в виде:

$$\begin{aligned} c(q_{T1}) + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T2}}^0)} p_i < \\ < c(q_{T2}) + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1)} p_j. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Функция предпочтения для сравниваемых вопросов на рис. 3.13 имеет вид:

$$\Phi(q_{T1}, q_{T2}) = \frac{c(q_{T1}) + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T2}}^0)} p_i}{c(q_{T2}) + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1)} p_j}. \quad (3.17)$$

Найдём функцию предпочтения для представленного на рис. 3.14 примера сравниваемых вопросов.

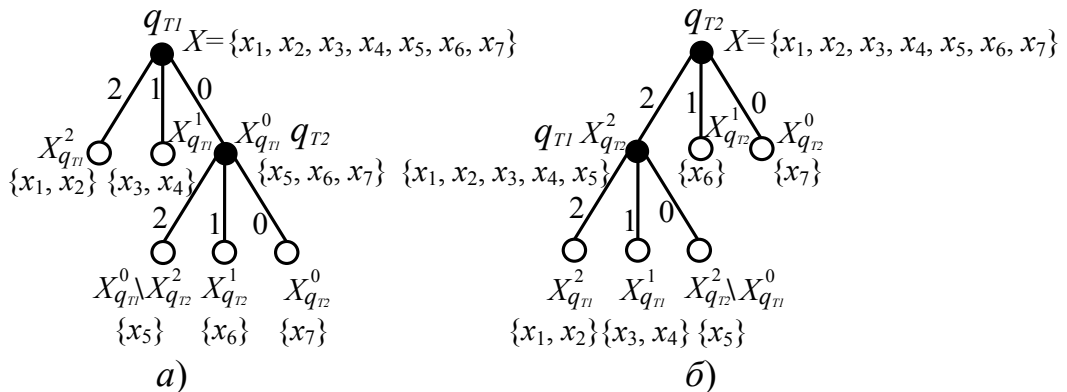


Рисунок 3.14. Пример отношения вопросов при $(X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1) \subset X_{q_{T2}}^2$ и $(X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T2}}^0) \subset X_{q_{T1}}^0$

Цена обхода вопросника $Q(q_{T1}q_{T2})$:

$$C_{Q(q_{T1}q_{T2})} = 1 \cdot c(q_{T1}) + c(X_{q_{T1}}^2) + c(X_{q_{T1}}^1) + c(X_{q_{T1}}^0 \setminus X_{q_{T2}}^2) + \\ + c(X_{q_{T2}}^1) + c(X_{q_{T2}}^0) + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^0 \setminus X_{q_{T2}}^2 \cup X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T2}}^0)} p_i. \quad (3.18)$$

Цена обхода вопросника $Q(q_{T2}q_{T1})$:

$$C_{Q(q_{T2}q_{T1})} = 1 \cdot c(q_{T2}) + c(X_{q_{T1}}^2) + c(X_{q_{T1}}^1) + c(X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^0) + \\ + c(X_{q_{T2}}^1) + c(X_{q_{T2}}^0) + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^0)} p_j. \quad (3.19)$$

Определим разницу цен вопросников $Q(q_{T1}q_{T2})$ и $Q(q_{T2}q_{T1})$:

$$\Delta C = C_{Q(q_{T1}q_{T2})} - C_{Q(q_{T2}q_{T1})} = \\ = \left(c(q_{T1}) + c(X_{q_{T1}}^2) + c(X_{q_{T1}}^1) + c(X_{q_{T1}}^0 \setminus X_{q_{T2}}^2) + c(X_{q_{T2}}^1) + c(X_{q_{T2}}^0) + \right. \\ \left. + c(q_{T1}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^0)} p_i \right) - \\ - \left(c(q_{T2}) + c(X_{q_{T1}}^2) + c(X_{q_{T1}}^1) + c(X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^0) + c(X_{q_{T2}}^1) + c(X_{q_{T2}}^0) + \right) = \\ = c(q_{T1}) + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^0)} p_i - \\ - c(q_{T2}) - c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^0)} p_j. \quad (3.20)$$

При условии $\Delta C < 0$ вопрос q_{T1} будет предпочтительнее вопроса q_{T2} .

Это условие может быть записано в виде:

$$c(q_{T1}) + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^0)} p_i < \\ < c(q_{T2}) + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^0)} p_j. \quad (3.21)$$

Функция предпочтения для сравниваемых вопросов на рис. 3.14 равна:

$$\Phi(q_{T1}, q_{T2}) = \frac{c(q_{T1}) + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^0)} p_i}{c(q_{T2}) + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^0)} p_j}. \quad (3.22)$$

Приведём примеры на рис. 3.15 и 3.16 вопросников для отношений сравнения изображённых на рис. 3.11.

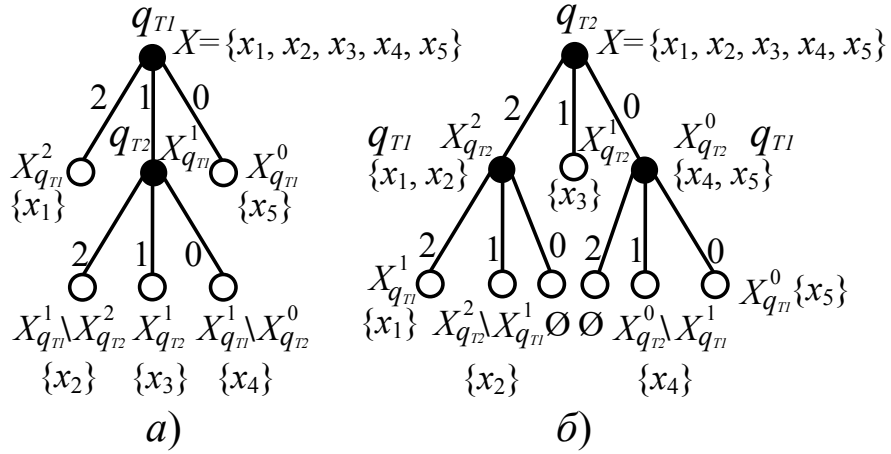


Рисунок 3.15. Пример отношения вопросов при полном вхождении одного подмножества вопроса в одно подмножество другого вопроса (Вариант а)

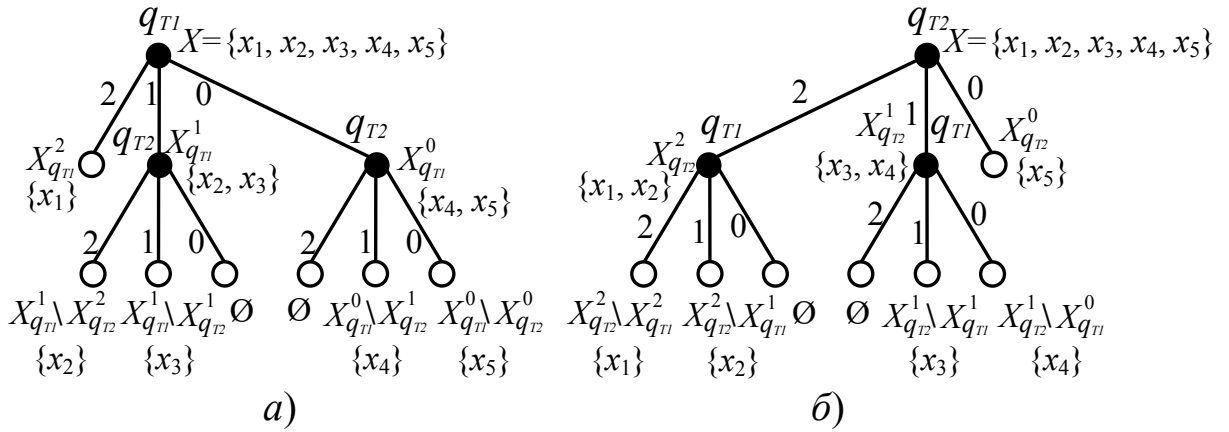


Рисунок 3.16. Пример отношения вопросов при полном вхождении одного подмножества вопроса в одно подмножество другого вопроса (Вариант б)

Подвариант на рис. 3.15 демонстрирует следующие варианты вхождения подмножеств $X_{q_{T1}}^2 \subset X_{q_{T2}}^2$, $X_{q_{T2}}^1 \subset X_{q_{T1}}^1$ и $X_{q_{T1}}^0 \subset X_{q_{T2}}^0$. Помимо этого, тут же наблюдается частичное вхождение $(X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^0) \subset X_{q_{T1}}^1$ и $X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^1 \subset X_{q_{T2}}^2$, $X_{q_{T2}}^0 \setminus X_{q_{T1}}^1 \subset X_{q_{T2}}^0$.

Функция предпочтения для представленного на рис. 3.12 а) варианта сравниваемых вопросов.

Цена обхода вопросника $Q(q_{T1}q_{T2})$:

$$\begin{aligned}
 C_{Q(q_{T1}q_{T2})} = & 1 \cdot c(q_{T1}) + c(X_{q_{T1}}^2) + c(X_{q_{T1}}^0) + c(X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^2) + \\
 & + c(X_{q_{T2}}^1) + c(X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^0) + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^2 \cup X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^0)} p_i.
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

Цена обхода вопросника $Q(q_{T2}q_{T1})$:

$$\begin{aligned} C_{Q(q_{T2}q_{T1})} = & 1 \cdot c(q_{T2}) + c(X_{q_{T1}}^2) + c(X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^1) + c(X_{q_{T2}}^1) + \\ & + c(X_{q_{T2}}^0 \setminus X_{q_{T1}}^1) + c(X_{q_{T1}}^0) + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T1}}^2)} p_j + \\ & + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^0 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T1}}^0)} p_j. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Определим разницу цен вопросников $Q(q_{T1}q_{T2})$ и $Q(q_{T2}q_{T1})$:

$$\begin{aligned} \Delta C = C_{Q(q_{T1}q_{T2})} - C_{Q(q_{T2}q_{T1})} = & \\ = & \left(\begin{aligned} & c(q_{T1}) + c(X_{q_{T1}}^2) + c(X_{q_{T1}}^0) + c(X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^2) + c(X_{q_{T2}}^1) + \\ & + c(X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^0) + \\ & + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^2 \cup X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^0)} p_i \end{aligned} \right) - \\ - & \left(\begin{aligned} & c(q_{T2}) + c(X_{q_{T1}}^2) + c(X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^1) + c(X_{q_{T2}}^1) + c(X_{q_{T2}}^0 \setminus X_{q_{T1}}^1) + c(X_{q_{T1}}^0) + \\ & + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T1}}^2)} p_j + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^0 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T1}}^0)} p_j \end{aligned} \right) = \\ = & c(q_{T1}) + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^2 \cup X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^0)} p_i - c(q_{T2}) - \\ - & c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T1}}^2)} p_j - c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^0 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T1}}^0)} p_j. \end{aligned} \quad (3.25)$$

При условии $\Delta C < 0$ вопрос q_{T1} будет предпочтительнее вопроса q_{T2} . Это условие может быть записано в виде:

$$\begin{aligned} c(q_{T1}) + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^2 \cup X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^0)} p_i < \\ < c(q_{T2}) + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T1}}^2)} p_j + \\ + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^0 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T1}}^0)} p_j. \end{aligned} \quad (3.26)$$

Функция предпочтения для сравниваемых вопросов на рис. 3.15 имеет следующий вид:

$$\Phi(q_{T1}, q_{T2}) = \frac{c(q_{T1}) + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^2 \cup X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^0)} p_i}{c(q_{T2}) + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T1}}^2)} p_j + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^0 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T1}}^0)} p_j}. \quad (3.27)$$

Подвариант на рис. 3.16 демонстрирует ситуацию с $X_{q_{T1}}^2 \subset X_{q_{T2}}^2$, $X_{q_{T2}}^0 \subset X_{q_{T1}}^0$. Помимо этого, тут же наблюдается частичное вхождение $(X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^1) \subset X_{q_{T1}}^1$ и $(X_{q_{T2}}^1 \setminus X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T2}}^1 \setminus X_{q_{T1}}^0) \subset X_{q_{T2}}^1$, $X_{q_{T1}}^0 \setminus X_{q_{T2}}^1 \subset X_{q_{T1}}^0$.

Функция предпочтения для представленного на рис. 3.12, б) варианта сравниваемых вопросов.

Цена обхода вопросника $Q(q_{T1}q_{T2})$:

$$\begin{aligned}
C_{Q(q_{T1}q_{T2})} &= 1 \cdot c(q_{T1}) + c(X_{q_{T1}}^2) + c(X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^2) + \\
&+ c(X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^1) + c(X_{q_{T1}}^0 \setminus X_{q_{T2}}^1) + c(X_{q_{T1}}^0 \setminus X_{q_{T2}}^0) + \\
&+ c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^1)} p_i + \\
&+ c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^0 \setminus X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T1}}^0 \setminus X_{q_{T2}}^0)} p_i.
\end{aligned} \tag{3.28}$$

Цена обхода вопросника $Q(q_{T2}q_{T1})$:

$$\begin{aligned}
C_{Q(q_{T2}q_{T1})} &= 1 \cdot c(q_{T2}) + c(X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^2) + c(X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^1) + \\
&+ c(X_{q_{T2}}^1 \setminus X_{q_{T1}}^1) + c(X_{q_{T2}}^1 \setminus X_{q_{T1}}^0) + c(X_{q_{T2}}^0) + \\
&+ c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^1)} p_j + \\
&+ c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^1 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T2}}^1 \setminus X_{q_{T1}}^0)} p_j.
\end{aligned} \tag{3.29}$$

Определим разницу цен вопросников $Q(q_{T1}q_{T2})$ и $Q(q_{T2}q_{T1})$:

$$\begin{aligned}
\Delta C &= C_{Q(q_{T1}q_{T2})} - C_{Q(q_{T2}q_{T1})} = \\
&= \left(\begin{aligned} &c(q_{T1}) + c(X_{q_{T1}}^2) + c(X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^2) + c(X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^1) + \\ &+ c(X_{q_{T1}}^0 \setminus X_{q_{T2}}^1) + c(X_{q_{T1}}^0 \setminus X_{q_{T2}}^0) + \\ &+ c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^1)} p_i + \\ &+ c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^0 \setminus X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T1}}^0 \setminus X_{q_{T2}}^0)} p_i \end{aligned} \right) - \\
&- \left(\begin{aligned} &c(q_{T2}) + c(X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^2) + c(X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^1) + c(X_{q_{T2}}^1 \setminus X_{q_{T1}}^1) + \\ &+ c(X_{q_{T2}}^1 \setminus X_{q_{T1}}^0) + c(X_{q_{T2}}^0) + \\ &+ c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^1)} p_j + \\ &+ c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^1 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T2}}^1 \setminus X_{q_{T1}}^0)} p_j \end{aligned} \right) = \\
&= c(q_{T1}) + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^1)} p_i + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^0 \setminus X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T1}}^0 \setminus X_{q_{T2}}^0)} p_i - \\
&- c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^1)} p_j - c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^1 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T2}}^1 \setminus X_{q_{T1}}^0)} p_j.
\end{aligned} \tag{3.30}$$

При условии $\Delta C < 0$ вопрос q_{T1} будет предпочтительнее вопроса q_{T2} . Это условие может быть записано в виде:

$$\begin{aligned}
& c(q_{T1}) + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^1)} p_i + \\
& + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^0 \setminus X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T1}}^0 \setminus X_{q_{T2}}^0)} p_i < \\
& < c(q_{T2}) + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^1)} p_j + \\
& + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^1 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T2}}^1 \setminus X_{q_{T1}}^0)} p_j.
\end{aligned} \tag{3.31}$$

Функция предпочтения для сравниваемых вопросов на рис. 3.10 б):

$$\Phi(q_{T1}, q_{T2}) = \frac{c(q_{T1}) + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^2 \cup X_{q_{T1}}^1 \setminus X_{q_{T2}}^1)} p_i + c(q_{T2}) \sum_{p_i \in (X_{q_{T1}}^0 \setminus X_{q_{T2}}^1 \cup X_{q_{T1}}^0 \setminus X_{q_{T2}}^0)} p_i}{c(q_{T2}) + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^2 \cup X_{q_{T2}}^2 \setminus X_{q_{T1}}^1)} p_j + c(q_{T1}) \sum_{p_j \in (X_{q_{T2}}^1 \setminus X_{q_{T1}}^1 \cup X_{q_{T2}}^1 \setminus X_{q_{T1}}^0)} p_j}. \tag{3.32}$$

Отношения сравнения между тернарным и бинарным вопросом

Определим все возможные отношения сравнения между тернарным q_T и бинарным q_B вопросом.

Утверждение 3.3. Между вопросами бинарного и тернарного вида можно установить три варианта отношения сравнения. Другие варианты отношений сравнения, учитывая возможности равнозначной замены номеров исходов, совпадают.

Для начала рассмотрим вариант равенства одного подмножества каждого из вопросов – $X_{q_T}^2 = X_{q_B}^1$. Так при $X_{q_T}^2 = X_{q_B}^1$ установлен следующий вид отношений, при котором $(X_{q_T}^1 \cup X_{q_T}^0) = X_{q_B}^0$. Графическое представление отношения изображено на рис. 3.17. В данном случае не принципиально, между какими именно исходами вопросов устанавливается отношение сравнения, важна лишь «конфигурация подмножеств».

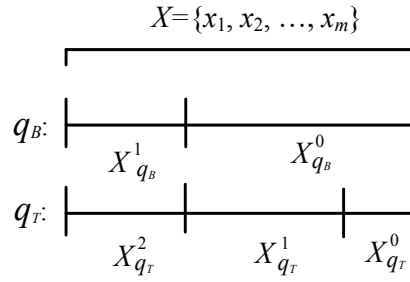


Рисунок 3.17. Отношения сравнения для вопросов q_T и q_B , при $X_{q_T}^2 = X_{q_B}^1$

Рассмотрим вариант отношений сравнений, когда отсутствуют равные подмножества у вопросов q_T и q_B . Перечислим варианты подобных сравнений:

$$X_{q_T}^2 \subset X_{q_B}^1, X_{q_T}^0 \subset X_{q_B}^0, \text{ когда } X_{q_T}^1 = ((X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^1) \cup (X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^0)); \quad (3.33)$$

$$(X_{q_T}^2 \cup X_{q_B}^1) \subset X_{q_B}^1, X_{q_B}^0 \subset X_{q_T}^0,$$

$$\text{когда } ((X_{q_T}^2) \cup (X_{q_T}^1) \cup (X_{q_B}^1 \setminus X_{q_T}^0)) = X_{q_B}^1, \quad (3.34)$$

$$((X_{q_T}^0 \setminus X_{q_B}^1) \cup (X_{q_B}^0)) = X_{q_T}^0.$$

На рис. 3.18 изображены варианты отношений сравнения для тернарного и бинарного вопросов.

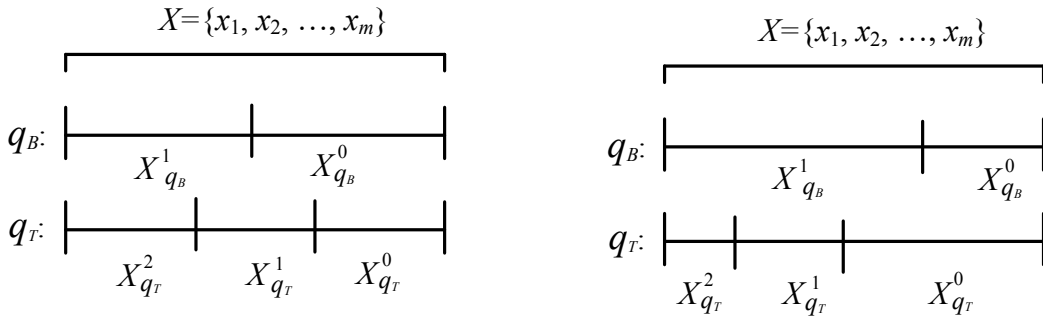


Рисунок 3.18. Отношения сравнения между вопросами

а) при $X_{q_T}^2 \subset X_{q_B}^1, X_{q_T}^0 \subset X_{q_B}^0$; б) при $(X_{q_T}^2 \cup X_{q_B}^1) \subset X_{q_B}^1, X_{q_B}^0 \subset X_{q_T}^0$

Других отношений сравнения логически быть не может. В иных же вариантах сравнений подмножеств исходов вопросов установить отношения сравнения не удаётся. При наличии таких вопросов следует выбирать иной метод оптимизации вопросника.

**Функция предпочтения для отношения сравнения
тернарного и бинарного вопросов**

Для каждого из полученного варианта отношения сравнения бинарного и тернарного вопроса получим выражение, описывающее функцию предпочтения.

Найдём функцию предпочтения для представленного на рис. 3.19 варианта сравниваемых вопросов.

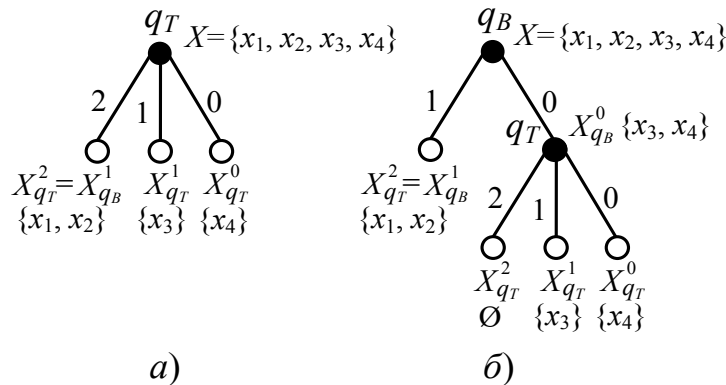


Рисунок. 3.19. Пример отношения сравнения вопросов при $X_{q_T}^1 = X_{q_B}^2$

Введём обозначение цены обхода для каждого из разбиений исходного множества событий вопросами q_T и q_B : $c(X_{q_T}^r)$, где $r \in \{0,1,2\}$ и $c(X_{q_B}^h)$, где $h \in \{0,1\}$.

Цена обхода вопросника $Q(q_T q_B)$:

$$C_{Q(q_T q_B)} = 1 \cdot c(q_T) + c(X_{q_T}^2) + c(X_{q_T}^1) + c(X_{q_T}^0). \quad (3.35)$$

Цена обхода вопросника $Q(q_B q_T)$:

$$C_{Q(q_B q_T)} = 1 \cdot c(q_B) + c(X_{q_B}^1) + c(X_{q_T}^1) + c(X_{q_T}^0) + c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_T}^1 \cup X_{q_T}^0)} p_j. \quad (3.36)$$

Определим разницу цен вопросников $Q(q_T q_B)$ и $Q(q_B q_T)$:

$$\begin{aligned} \Delta C &= C_{Q(q_T q_B)} - C_{Q(q_B q_T)} = \left(c(q_T) + c(X_{q_T}^2) + c(X_{q_T}^1) + c(X_{q_T}^0) \right) - \\ &- \left(c(q_B) + c(X_{q_B}^1) + c(X_{q_T}^1) + c(X_{q_T}^0) + c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_T}^1 \cup X_{q_T}^0)} p_j \right) = \\ &= c(q_T) + c(X_{q_T}^2) + c(X_{q_T}^1) + c(X_{q_T}^0) - c(q_B) - \end{aligned} \quad (3.37)$$

$$-c(X_{q_B}^1) - c(X_{q_T}^1) - c(X_{q_T}^0) - c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_T}^1 \cup X_{q_T}^0)} p_j.$$

Упростим полученное выражение с учётом того, что $X_{q_T}^2 = X_{q_B}^2$:

$$\Delta C = c(q_T) - c(q_B) - c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_T}^1 \cup X_{q_T}^0)} p_j. \tag{3.38}$$

При условии $\Delta C < 0$ вопрос q_T будет предпочтительнее вопроса q_B . Это условие может быть записано в виде:

$$c(q_T) < c(q_B) + c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_T}^1 \cup X_{q_T}^0)} p_j. \tag{3.39}$$

Пользуясь выражением (3.39), введём функцию предпочтения, характеризующую предпочтительность одного вопроса перед другим.

Функция предпочтения для примера вопросников на рис. 3.18 выглядит следующим образом:

$$\Phi(q_T, q_B) = \frac{c(q_T)}{c(q_B) + c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_T}^1 \cup X_{q_T}^0)} p_j}. \tag{3.40}$$

Рассмотрим варианты отношений сравнения вопросов при отсутствии равных подмножеств.

Следующий пример – одно из отношений вида $(X_{q_T}^2 \subset X_{q_B}^1, X_{q_T}^0 \subset X_{q_B}^0)$, когда $X_{q_T}^1 = ((X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^1) \cup (X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^0))$ между бинарным (q_B) и тернарным (q_T) вопросом (рис. 3.14). Номер исхода каждого вопроса подписан у соответствующей дуги, исходящей из вершины графа.

Пример, показывающий отношения сравнения изображён на рис. 3.20.

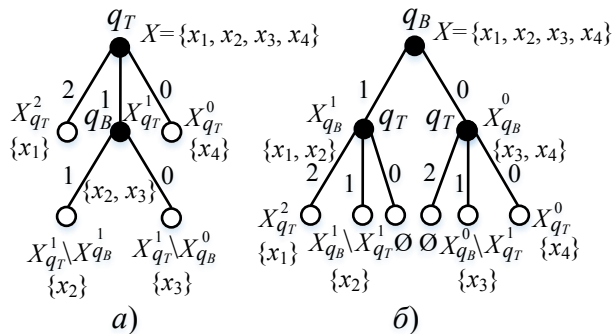


Рисунок 3.20. Пример отношения вопросов

при $X_{q_T}^2 \subset X_{q_B}^1, X_{q_T}^0 \subset X_{q_B}^0$, когда $X_{q_T}^1 = ((X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^1) \cup (X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^0))$

Из приведённого примера на рис. 3.20 можно увидеть некоторые особенности при постановке вопросов. Из примера можно сделать следующие утверждения:

Утверждение 3.4. В случае постановки бинарного вопроса в качестве корневого и постановки тернарного вопроса на оставшемся подмножестве исходов бинарного, возможно формирование исхода тернарного вопроса, соответствующего пустому множеству идентифицируемых событий.

Данное умозаключение справедливо в силу того, что при выборе в качестве корневого бинарного вопроса q_B дальнейшее разбиение подмножества оставшегося исхода бинарного вопроса тернарным вопросом q_T будет осуществлено на два непустых подмножества $X_{q_T}^2$ и $X_{q_B}^1 \setminus X_{q_T}^1$. Исход «0» тернарного вопроса в этом случае окажется пустым, что видно из рис. 3.20 б). На основе полученных результатов дадим определение фиктивного тернарного исхода, в дальнейшем обозначение которого будет \emptyset :

Определение 3.3. Исход тернарного вопроса назовём фиктивным в том случае, если ему соответствует пустое множество идентифицируемых событий.

Определим функцию предпочтения вопросов, сопоставив цены обхода каждого вопросника, представленного на рис. 3.20.

Обозначение цены обхода для каждого из разбиений исходного множества событий вопросами q_T и q_B остается прежним.

Цена обхода вопросника $Q(q_T q_B)$:

$$C_{Q(q_T q_B)} = 1 \cdot c(q_T) + c(X_{q_T}^2) + c(X_{q_T}^0) + c(X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^1) + c(X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^0) + c(q_B) \sum_{p_i \in (X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^1 \cup X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^0)} p_i. \quad (3.41)$$

Цена обхода вопросника $Q(q_B q_T)$:

$$C_{Q(q_B q_T)} = 1 \cdot c(q_B) + c(X_{q_T}^2) + c(X_{q_B}^1 \setminus X_{q_T}^1) + c(X_{q_B}^0 \setminus X_{q_T}^1) + c(X_{q_T}^0) + c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_T}^2 \cup X_{q_B}^1 \setminus X_{q_T}^1)} p_j + c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_B}^0 \setminus X_{q_T}^1 \cup X_{q_T}^0)} p_j. \quad (3.42)$$

Определим разницу цен вопросников $Q(q_T q_B)$ и $Q(q_B q_T)$:

$$\begin{aligned}
\Delta C &= C_{Q(q_T q_B)} - C_{Q(q_B q_T)} = \\
&= \left(c(q_T) + c(X_{q_T}^2) + c(X_{q_T}^0) + c(X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^1) + c(X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^0) + \right. \\
&\quad \left. + c(q_B) \sum_{p_i \in (X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^1 \cup X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^0)} p_i \right) - \\
&- \left(c(q_B) + c(X_{q_T}^2) + c(X_{q_B}^1 \setminus X_{q_T}^1) + c(X_{q_B}^0 \setminus X_{q_T}^1) + c(X_{q_T}^0) + \right. \\
&\quad \left. + c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_T}^2 \cup X_{q_B}^1 \setminus X_{q_T}^1)} p_j + c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_B}^0 \setminus X_{q_T}^1 \cup X_{q_T}^0)} p_j \right) = \\
&= c(q_T) + c(X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^1) + c(X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^0) + \\
&\quad + c(q_B) \sum_{p_i \in (X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^1 \cup X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^0)} p_i - \\
&\quad - c(q_B) - c(X_{q_B}^1 \setminus X_{q_T}^1) - c(X_{q_B}^0 \setminus X_{q_T}^1) - \\
&\quad - c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_T}^2 \cup X_{q_B}^1 \setminus X_{q_T}^1)} p_j - c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_B}^0 \setminus X_{q_T}^1 \cup X_{q_T}^0)} p_j.
\end{aligned} \tag{3.43}$$

Упростим полученное выражение:

$$\begin{aligned}
\Delta C &= c(q_T) + c(q_B) \sum_{p_i \in (X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^1 \cup X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^0)} p_i - c(q_B) - \\
&- c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_T}^2 \cup X_{q_B}^1 \setminus X_{q_T}^1)} p_j - c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_B}^0 \setminus X_{q_T}^1 \cup X_{q_T}^0)} p_j.
\end{aligned} \tag{3.44}$$

При условии $\Delta C < 0$ вопрос q_T будет предпочтительнее вопроса q_B . Это условие может быть записано в виде:

$$\begin{aligned}
&c(q_T) + c(q_B) \sum_{p_i \in (X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^1 \cup X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^0)} p_i < \\
&< c(q_B) + c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_T}^2 \cup X_{q_B}^1 \setminus X_{q_T}^1)} p_j + c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_B}^0 \setminus X_{q_T}^1 \cup X_{q_T}^0)} p_j.
\end{aligned} \tag{3.45}$$

Пользуясь выражением (3.45), сформируем функцию предпочтения, которая показывает, какой вопрос из двух сравниваемых предпочтительнее задавать.

Функция предпочтения для примера вопросников на рис. 3.20 выглядит следующим образом:

$$\Phi(q_T, q_B) = \frac{c(q_T) + c(q_B) \sum_{p_i \in (X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^1 \cup X_{q_T}^1 \setminus X_{q_B}^0)} p_i}{c(q_B) + c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_T}^2 \cup X_{q_B}^1 \setminus X_{q_T}^1)} p_j + c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_B}^0 \setminus X_{q_T}^1 \cup X_{q_T}^0)} p_j}. \tag{3.46}$$

Найдём функцию предпочтения для представленного на рис. 3.21 варианта сравниваемых вопросов.

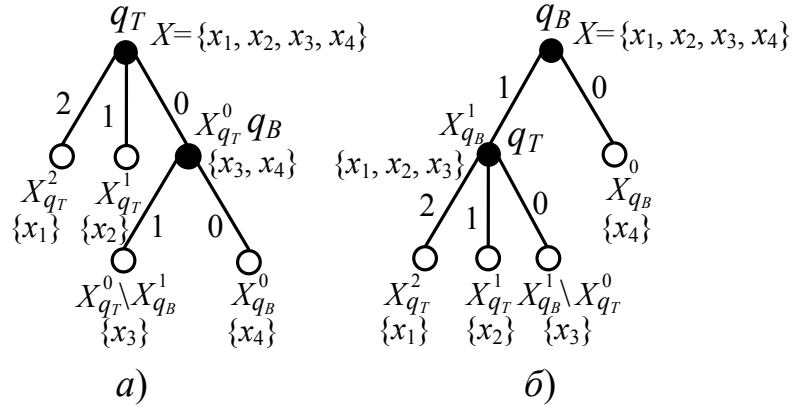


Рисунок 3.21. Отношения вопросов при $(X_{q_T}^2 \cup X_{q_B}^1) \subset X_{q_B}^1$, $X_{q_B}^0 \subset X_{q_T}^0$,
когда $((X_{q_T}^0 \setminus X_{q_B}^1) \cup (X_{q_B}^0)) = X_{q_T}^0$, $((X_{q_T}^2) \cup (X_{q_T}^1) \cup (X_{q_B}^1 \setminus X_{q_T}^0)) = X_{q_B}^1$

Цена обхода вопросника $Q(q_T q_B)$:

$$C_{Q(q_T q_B)} = 1 \cdot c(q_T) + c(X_{q_T}^2) + c(X_{q_T}^1) + c(X_{q_T}^0 \setminus X_{q_B}^1) + c(X_{q_B}^0) + \\ + c(q_B) \sum_{p_i \in (X_{q_T}^0 \setminus X_{q_B}^1 \cup X_{q_B}^0)} p_i. \quad (3.47)$$

Цена обхода вопросника $Q(q_B q_T)$:

$$C_{Q(q_B q_T)} = 1 \cdot c(q_B) + c(X_{q_T}^2) + c(X_{q_T}^1) + c(X_{q_B}^1 \setminus X_{q_T}^0) + c(X_{q_B}^0) + \\ + c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_T}^2 \cup X_{q_T}^1 \cup X_{q_B}^1 \setminus X_{q_T}^0)} p_j. \quad (3.48)$$

Определим разницу цен вопросников $Q(q_T q_B)$ и $Q(q_B q_T)$:

$$\Delta C = C_{Q(q_T q_B)} - C_{Q(q_B q_T)} = \\ = \left(c(q_T) + c(X_{q_T}^2) + c(X_{q_T}^1) + c(X_{q_T}^0 \setminus X_{q_B}^1) + c(X_{q_B}^0) + \right. \\ \left. + c(q_B) \sum_{p_i \in (X_{q_T}^0 \setminus X_{q_B}^1 \cup X_{q_B}^0)} p_i \right) - \\ - \left(c(q_B) + c(X_{q_T}^2) + c(X_{q_T}^1) + c(X_{q_B}^1 \setminus X_{q_T}^0) + c(X_{q_B}^0) + \right. \\ \left. + c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_T}^2 \cup X_{q_T}^1 \cup X_{q_B}^1 \setminus X_{q_T}^0)} p_j \right) = \\ = c(q_T) + c(q_B) \sum_{p_i \in (X_{q_T}^0 \setminus X_{q_B}^1 \cup X_{q_B}^0)} p_i - \\ - c(q_B) - c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_T}^2 \cup X_{q_T}^1 \cup X_{q_B}^1 \setminus X_{q_T}^0)} p_j. \quad (3.49)$$

При условии $\Delta C < 0$ вопрос q_T будет предпочтительнее вопроса q_B .
Это условие может быть записано в виде:

$$\begin{aligned}
c(q_T) + c(q_B) \sum_{p_i \in (X_{q_T}^0 \setminus X_{q_B}^1 \cup X_{q_B}^0)} p_i < c(q_B) + \\
+c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_T}^2 \cup X_{q_T}^1 \cup X_{q_B}^1 \setminus X_{q_T}^0)} p_j.
\end{aligned} \tag{3.50}$$

Пользуясь выражением (3.50), введём функцию предпочтения, характеризующую предпочтительность одного вопроса перед другим.

Функция предпочтения для примера вопросников на рис. 3.21 выглядит следующим образом:

$$\Phi(q_T, q_B) = \frac{c(q_T) + c(q_B) \sum_{p_i \in (X_{q_T}^0 \setminus X_{q_B}^1 \cup X_{q_B}^0)} p_i}{c(q_B) + c(q_T) \sum_{p_j \in (X_{q_T}^2 \cup X_{q_T}^1 \cup X_{q_B}^1 \setminus X_{q_T}^0)} p_j}. \tag{3.51}$$

Далее рассмотрим пример оптимизации бинарно-тернарного вопросника методом корневого вопроса.

3.4. Алгоритм выбора корневого вопроса

Для использования метода корневого вопроса для оптимизации бинарно-тернарного вопросника необходимо следовать представленному на рис. 3.22 алгоритму.

Отдельным вопросом стоит оценка трудоёмкости предложенного метода. Так как в основе метода лежит использование операций сравнения вопросов для некоторого заданного множества событий, то в «наихудшем» случае это множество может быть разбито на одноэлементные подмножества с помощью n бинарных вопросов. Если использовать хотя бы один тернарный вопрос, то число вопросов для идентификации полного множества событий уменьшается на единицу. С увеличением числа тернарных вопросов уменьшается необходимое число для идентификации всех событий. Таким образом, «наихудший» случай является некоторым ориентиром для оценки трудоёмкости метода корневого вопроса. Для бинарных вопросников такая оценка дана в [8]. Оптимальная последовательность вопросов получается за полиномиальное время.

В отличие от известных методов оптимизации таких как метод динамического программирования и метод ветвей и границ, метод корневого вопроса не

является методом направленного перебора. На первых шагах применения методов динамического программирования и метода ветвей и границ число подмножеств, которые необходимо рассматривать значительно превышает число элементов множества идентифицируемых событий X , что значительно увеличивает количество вычислительных процедур. В следующем разделе диссертации рассмотрен пример использования метода корневого вопроса для заданной анкеты неисправностей. Для сравнения в приложении А даны выкладки по оптимизации той же анкеты методом динамического программирования.

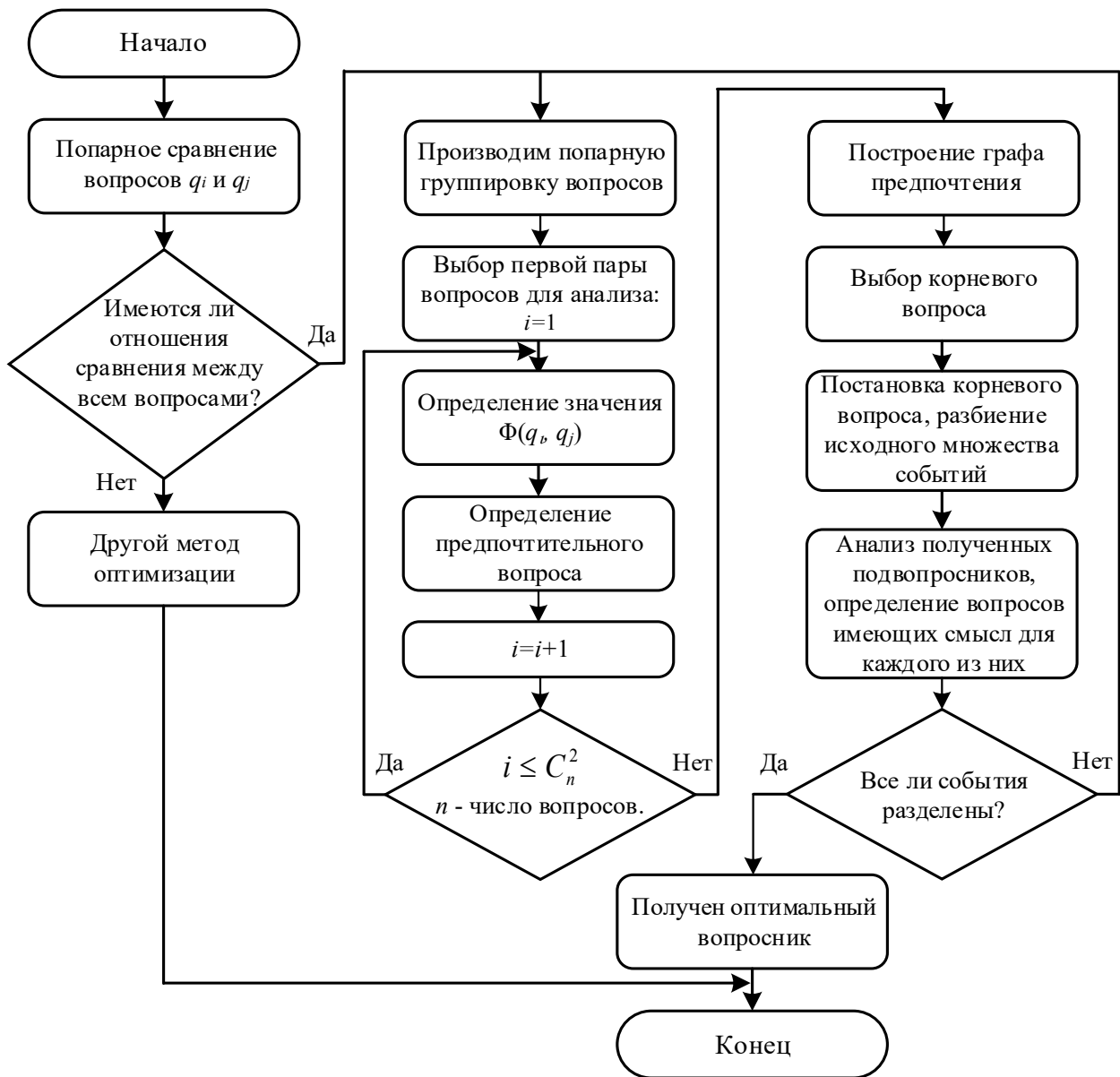


Рисунок 3.22. Блочная диаграмма алгоритма

3.5. Пример оптимизации бинарно-тернарного вопросника

Задано конечное множество вопросов $Q = \{q_{T_1}, q_{T_2}, q_{T_3}, q_{T_4}, q_{B_5}, q_{B_6}\}$, позволяющее разделить девять событий $X = \{x_1, x_2, \dots, x_9\}$. Исходные данные, включая значения весовых коэффициентов идентифицируемых событий и цены вопросов, приведены в матричной форме в таблице 3.1. Требуется решить задачу построения оптимального вопросника.

Таблица 3.1. Анкета бинарно-тернарного вопросника

q_i	$c(q_i)$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
q_{T_1}	2	0	0	0	0	1	2	2	2	2
q_{T_2}	3	0	0	0	1	1	1	2	2	2
q_{T_3}	4	0	0	1	1	1	1	1	2	2
q_{T_4}	5	0	1	1	1	1	1	1	1	2
q_{B_5}	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
q_{B_6}	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
$p(x_i)$		0,01	0,01	0,05	0,20	0,40	0,30	0,01	0,01	0,01

Следуя алгоритму оптимизации, построим граф сравнений (рис. 3.23).

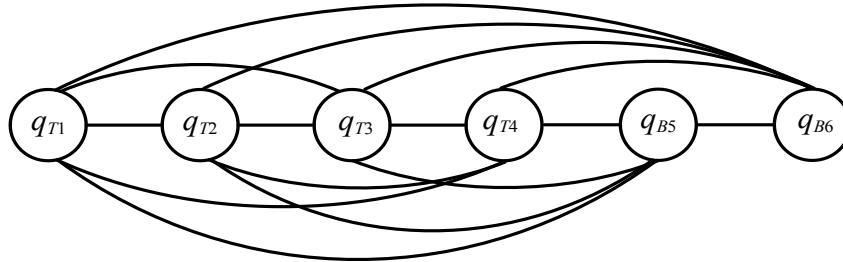


Рисунок 3.23. Граф сравнений для рассматриваемого примера

Подсчитаем неравенства для каждой пары сравнимых вопросов таблицы 3.1. Определим значение функций предпочтения для вопросов:

$$\Phi(q_{T_1}, q_{T_2}) = \frac{c(q_{T_1}) + c(q_{T_2}) \sum_{p_i \in X(q_{T_1m})} p_i}{c(q_{T_2}) + c(q_{T_1}) \sum_{p_j \in X(q_{T_2k})} p_j} = \frac{2 + 3 \cdot 0,60}{3 + 2 \cdot 0,90} = 0,79,$$

$$\Phi(q_{T_1}, q_{T_3}) = \frac{c(q_{T_1}) + c(q_{T_3}) \sum_{p_i \in X(q_{T_1m})} p_i}{c(q_{T_3}) + c(q_{T_1}) \sum_{p_j \in X(q_{T_3k})} p_j} = \frac{2 + 4 \cdot 0,60}{4 + 2 \cdot 0,96} = 0,74,$$

$$\Phi(q_{T_1}, q_{T_4}) = \frac{c(q_{T_1}) + c(q_{T_4}) \sum_{p_i \in X(q_{T_1m})} p_i}{c(q_{T_4}) + c(q_{T_1}) \sum_{p_j \in X(q_{T_4k})} p_j} = \frac{2 + 5 \cdot 0,60}{5 + 2 \cdot 0,97} = 0,72,$$

$$\Phi(q_{T_1}, q_{B_5}) = \frac{c(q_{T_1}) + c(q_{B_5}) \sum_{p_i \in X(q_{T_1m})} p_i}{c(q_{B_5}) + c(q_{T_1}) \sum_{p_j \in X(q_{B_5k})} p_j} = \frac{2 + 1 \cdot 0,60}{1 + 2 \cdot 0,93} = 0,90,$$

$$\Phi(q_{T_1}, q_{B_6}) = \frac{c(q_{T_1}) + c(q_{B_6}) \sum_{p_i \in X(q_{T_1m})} p_i}{c(q_{B_6}) + c(q_{T_1}) \sum_{p_j \in X(q_{B_6k})} p_j} = \frac{2 + 1 \cdot 0,33}{1 + 2 \cdot 0,97} = 0,79,$$

$$\Phi(q_{T_2}, q_{T_3}) = \frac{c(q_{T_2}) + c(q_{T_3}) \sum_{p_i \in X(q_{T_2m})} p_i}{c(q_{T_3}) + c(q_{T_2}) \sum_{p_j \in X(q_{T_3k})} p_j} = \frac{3 + 4 \cdot 0,10}{4 + 3 \cdot 0,96} = 0,49,$$

$$\Phi(q_{T_2}, q_{T_4}) = \frac{c(q_{T_2}) + c(q_{T_4}) \sum_{p_i \in X(q_{T_2m})} p_i}{c(q_{T_4}) + c(q_{T_2}) \sum_{p_j \in X(q_{T_4k})} p_j} = \frac{3 + 5 \cdot 0,10}{5 + 3 \cdot 0,98} = 0,44,$$

$$\Phi(q_{T_2}, q_{B_5}) = \frac{c(q_{T_2})}{c(q_{B_5}) + c(q_{T_2}) \sum_{p_j \in X(q_{B_5k})} p_j} = \frac{3}{1 + 3 \cdot 0,93} = 0,79,$$

$$\Phi(q_{T_2}, q_{B_6}) = \frac{c(q_{T_2})}{c(q_{B_6}) + c(q_{T_2}) \sum_{p_j \in X(q_{B_6k})} p_j} = \frac{3}{1 + 3 \cdot 0,97} = 0,76,$$

$$\Phi(q_{T_3}, q_{T_4}) = \frac{c(q_{T_3}) + c(q_{T_4}) \sum_{p_i \in X(q_{T_3m})} p_i}{c(q_{T_4}) + c(q_{T_3}) \sum_{p_j \in X(q_{T_4k})} p_j} = \frac{4 + 5 \cdot 0,96}{5 + 4 \cdot 0,98} = 0,98,$$

$$\Phi(q_{T_3}, q_{B_5}) = \frac{c(q_{T_3}) + c(q_{B_5}) \sum_{p_i \in X(q_{T_3m})} p_i}{c(q_{B_5}) + c(q_{T_3}) \sum_{p_j \in X(q_{B_5k})} p_j} = \frac{4 + 1 \cdot 0,96}{1 + 4 \cdot 1} = 0,99,$$

$$\Phi(q_{T_3}, q_{B_6}) = \frac{c(q_{T_3}) + c(y_6) \sum_{p_i \in X(q_{T_3m})} p_i}{c(q_{B_6}) + c(q_{T_3}) \sum_{p_j \in X(q_{B_6k})} p_j} = \frac{4 + 1 \cdot 0,96}{1 + 4 \cdot 1} = 0,99,$$

$$\Phi(q_{T_4}, q_{B_5}) = \frac{c(q_{T_4}) + c(q_{B_5}) \sum_{p_i \in X(q_{T_4m})} p_i}{c(q_{B_5}) + c(q_{T_4}) \sum_{p_j \in X(q_{B_5k})} p_j} = \frac{5 + 1 \cdot 0,98}{1 + 5 \cdot 1} = 0,99,$$

$$\Phi(q_{T_4}, q_{B_6}) = \frac{c(q_{T_4}) + c(q_{B_6}) \sum_{p_i \in X(q_{T_4m})} p_i}{c(q_{B_6}) + c(q_{T_4}) \sum_{p_j \in X(q_{B_6k})} p_j} = \frac{5 + 1 \cdot 0,98}{1 + 5 \cdot 1} = 0,99,$$

$$\Phi(q_{B_5}, q_{B_6}) = 1.$$

Так как значение $\Phi(q_{T_1}, q_{T_2}) < 1$, вопрос q_{T_1} предпочтительнее вопроса q_{T_2} : $q_{T_1} \succ q_{T_2}$.

Аналогично заключаем следующее: $q_{T_1} \succ q_{T_3}$, $q_{T_1} \succ q_{T_4}$, $q_{T_1} \succ q_{B_5}$, $q_{T_1} \succ y_6$, $q_{T_2} \succ q_{T_3}$, $q_{T_2} \succ q_{T_4}$, $q_{T_2} \succ q_{B_5}$, $q_{T_2} \succ q_{B_6}$, $q_{T_3} \succ q_{T_4}$, $q_{T_3} \succ q_{B_5}$, $q_{T_3} \succ q_{B_6}$, $q_{T_4} \succ q_{B_5}$, $q_{T_4} \succ q_{B_6}$, $q_{B_5} \succ q_{B_6}$.

Все вопросы, находящиеся в отношениях сравнения, могут быть сведены в один граф предпочтений (рис. 3.24). Дуги в графе указывают на сравнение вопросов попарно, причём, дуга входит в вершину вопроса q_i , являющегося предпочтительнее вопроса q_j . Из графа предпочтений следует, что в качестве корневого вопроса целесообразно выбрать вопрос q_i .

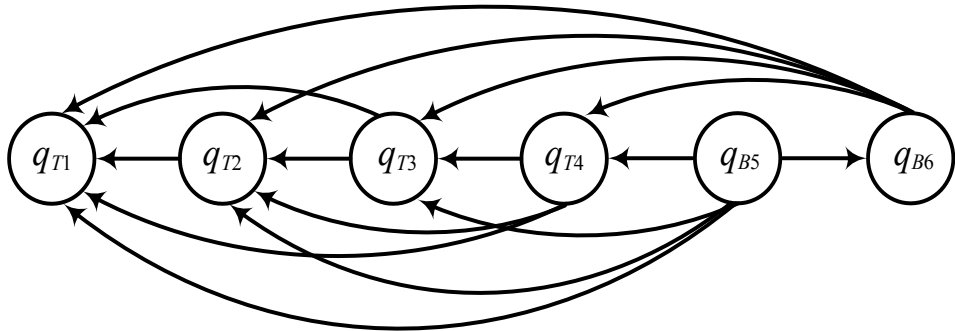


Рисунок 3.24. Граф предпочтений

Произведём первое разбиение исходного множества событий (рис. 3.25).

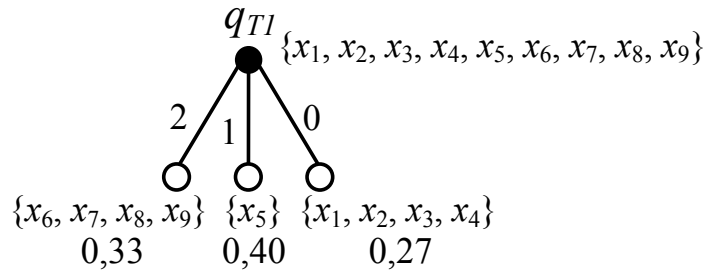


Рисунок 3.25. Корневой вопрос для «строящегося» вопросника

Рассмотрим получившиеся подмножества $\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ и $\{x_6, x_7, x_8, x_9\}$. Определим корневой вопрос для каждого из них.

На подмножестве $\{x_6, x_7, x_8, x_9\}$ имеет смысл задавать вопросы q_{T_2} , q_{T_3} , q_{T_4} , q_{B_6} . Вопрос q_{B_5} нет смысла задавать, так как он не дает разбиений на рассматриваемом подмножестве событий. Анализируя данное подмножество, можно установить, что вопросы q_{T_2} и q_{B_6} являются эквивалентными и имеют одинаковые подмножества исходов. Выгоднее будет выбрать вопрос с наименьшей ценой.

Функции предпочтения вопросов на подмножестве $\{x_6, x_7, x_8, x_9\}$ равны:

$$\Phi(q_{T_2}, q_{T_3}) = \frac{c(q_{T_2}) + c(q_{T_3}) \sum_{p_i \in X(q_{T_2m})} p_i}{c(q_{T_3}) + c(q_{T_2}) \sum_{p_j \in X(q_{T_3k})} p_j} = \frac{3 + 4 \cdot 0,03}{4 + 3 \cdot 0,31} = 0,63,$$

$$\Phi(q_{T_2}, q_{T_4}) = \frac{c(q_{T_2}) + c(q_{T_4}) \sum_{p_i \in X(q_{T_2m})} p_i}{c(q_{T_4}) + c(q_{T_2}) \sum_{p_j \in X(q_{T_4k})} p_j} = \frac{3 + 5 \cdot 0,03}{5 + 3 \cdot 0,32} = 0,53,$$

$$\Phi(q_{T_3}, q_{T_4}) = \frac{c(q_{T_3}) + c(q_{T_4}) \sum_{p_i \in X(q_{T_3m})} p_i}{c(q_{T_4}) + c(q_{T_3}) \sum_{p_j \in X(q_{T_4k})} p_j} = \frac{4 + 5 \cdot 0,02}{5 + 4 \cdot 0,32} = 0,64,$$

$$\Phi(q_{T_3}, q_{B_6}) = \frac{c(q_{T_3})}{c(y_6) + c(q_{T_3}) \sum_{p_j \in X(y_{6k})} p_j} = \frac{4}{1 + 4 \cdot 0,03} = 3,57,$$

$$\Phi(q_{T_4}, q_{B_6}) = \frac{c(q_{T_4})}{c(q_{B_6}) + c(q_{T_4}) \sum_{p_j \in X(q_{B_6k})} p_j} = \frac{4}{1 + 4 \cdot 0,03} = 3,57.$$

Закключаем следующее: $q_{T_2} \succ q_{T_3}$, $q_{T_2} \succ q_{T_4}$, $q_{B_6} \succ q_{T_2}$, $q_{T_3} \succ q_{T_4}$, $q_{B_6} \succ q_{T_3}$, $q_{B_6} \succ q_{T_4}$.

Граф предпочтений представлен на рис. 3.26 для вопросов из подмножества $\{x_6, x_7, x_8, x_9\}$. Из графа предпочтений видно, что корневым вопросом следует выбрать вопрос q_{B_6} .

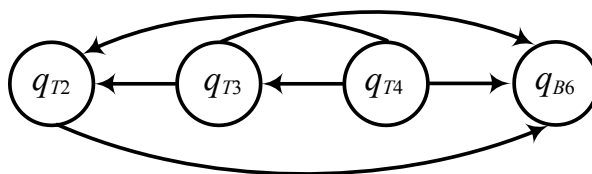


Рисунок 3.26. Граф предпочтений

На подмножестве $\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ имеет смысл задавать вопросы q_{T_2} , q_{T_3} , q_{T_4} , q_{B_5} . Вопрос q_{B_6} смысла не имеет. Анализируя данное подмножество, устанавливаем, что вопросы q_{T_2} и q_{B_5} являются эквивалентными. Соответственно выгоднее будет задавать следующий вопрос с меньшей ценой. Функции предпочтения вопросов на подмножестве $\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ для оставшихся вопросов такие:

$$\Phi(q_{T_2}, q_{T_3}) = \frac{c(q_{T_2}) + c(q_{T_3}) \sum_{p_i \in X(q_{T_2m})} p_i}{c(q_{T_3}) + c(q_{T_2}) \sum_{p_j \in X(q_{T_3k})} p_j} = \frac{3 + 4 \cdot 0,07}{4 + 3 \cdot 0,25} = 0,69,$$

$$\Phi(q_{T_2}, q_{T_4}) = \frac{c(q_{T_2}) + c(q_{T_4}) \sum_{p_i \in X(q_{T_2m})} p_i}{c(q_{T_4}) + c(q_{T_2}) \sum_{p_j \in X(q_{T_4k})} p_j} = \frac{3 + 5 \cdot 0,07}{5 + 3 \cdot 0,26} = 0,58,$$

$$\Phi(q_{T_3}, q_{T_4}) = \frac{c(q_{T_3}) + c(q_{T_4}) \sum_{p_i \in X(q_{T_3m})} p_i}{c(q_{T_4}) + c(q_{T_3}) \sum_{p_j \in X(q_{T_4k})} p_j} = \frac{4 + 5 \cdot 0,02}{5 + 4 \cdot 0,26} = 0,67,$$

$$\Phi(q_{T_3}, q_{B_5}) = \frac{c(q_{T_3})}{c(q_{B_5}) + c(q_{T_3}) \sum_{p_j \in X(q_{B_5k})} p_j} = \frac{4}{1 + 4 \cdot 0,07} = 3,125,$$

$$\Phi(q_{T_4}, q_{B_5}) = \frac{c(q_{T_4})}{c(q_{B_5}) + c(q_{T_4}) \sum_{p_j \in X(q_{B_5k})} p_j} = \frac{5}{1 + 5 \cdot 0,07} = 3,60.$$

Имеем: $q_{T_2} \succ q_{T_3}$, $q_{T_2} \succ q_{T_4}$, $q_{B_5} \succ q_{T_2}$, $q_{T_3} \succ q_{T_4}$, $q_{B_5} \succ q_{T_3}$, $q_{B_5} \succ q_{T_4}$.

Граф предпочтений представлен на рис. 3.27 для вопросов из подмножества $\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$. Путем анализа графа предпочтений получаем, что надо выбрать в качестве корневого вопрос q_{B_5} .

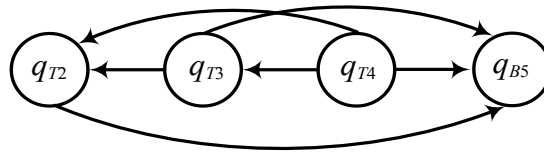


Рисунок 3.27. Граф предпочтений

Рассматривая подмножества $\{x_1, x_2, x_3\}$ и $\{x_7, x_8, x_9\}$, отмечаем, что они разбиваются вопросами q_{T_3} или q_{T_4} . В обоих случаях предпочтительнее оказывается вопрос q_{T_3} . Полученные двухэлементные подмножества на следующем этапе разбиваются единственным оставшимся вопросом q_{T_4} . Результат оптимизации представлен на рис. 3.28.

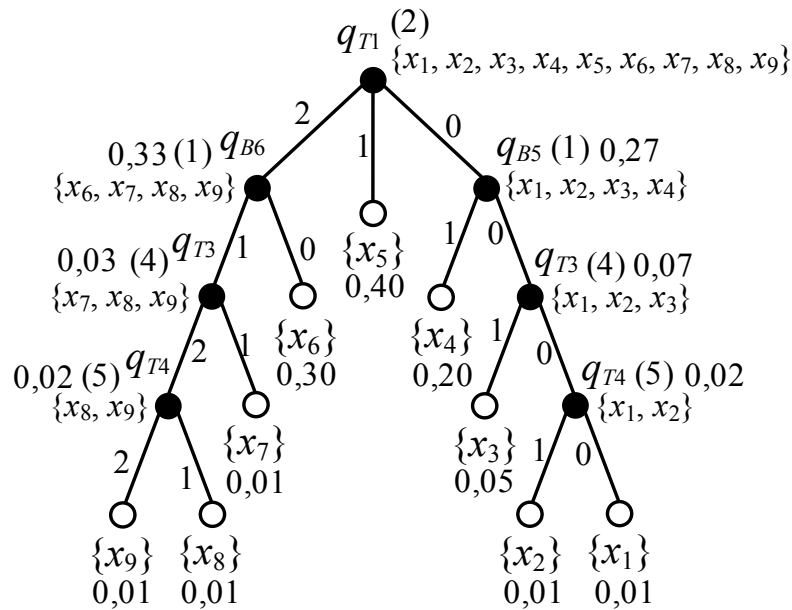


Рисунок 3.28. Оптимальный вопросник

Цена обхода полученного оптимального вопросника равна:

$$C_{opt} = \sum_{i=1}^n p(q_i)c(q_i) = 2 \cdot 1,00 + 1 \cdot 0,27 + 1 \cdot 0,33 + 4 \cdot 0,07 + 4 \cdot 0,03 + 5 \cdot 0,02 + 5 \cdot 0,02 = 3,20.$$

На основании полученных функций предпочтения был получен оптимальный вопросник, основанный на выборе наилучшего вопроса. Для оценки эффективности работы метода оптимизации произведём сравнение цен обхода вопросников. Сравним вопросник построенный с применением метода оптимизации (рис. 3.28) и вопросника без применения метода оптимизации. Изобразим на рис. 3.29 вопросник построенный методом перебора случайных вопросов так, чтобы разделить всё заданное множество X . Вопросник строится по той же анкете по табл. 3.1.

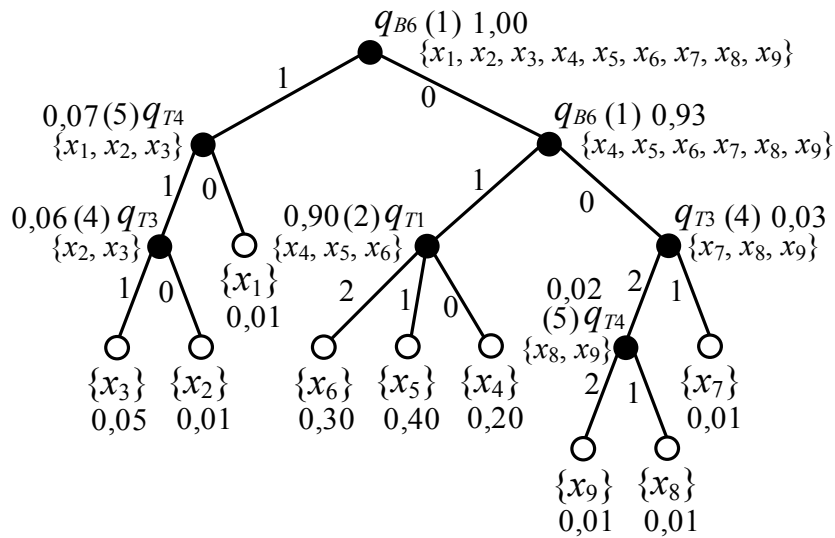


Рисунок 3.29. Вопросник построенный без применения метода оптимизации

Цена обхода полученного оптимального вопросника равна:

$$C = \sum_{i=1}^n p(q_i)c(q_i) = 1 \cdot 1,00 + 4 \cdot 0,06 + 5 \cdot 0,07 + 5 \cdot 0,02 + 4 \cdot 0,03 + 2 \cdot 0,90 + 1 \cdot 0,93 = 4,54.$$

Из сравнения цен обхода вопросников видно, что вопросник построенный с применением метода оптимизации методом корневого вопроса позволяет синтезировать вопросник с меньшей ценой обхода, что и требовалось для решения поставленной задачи оптимизации вопросников. По полученным аналитическим данным сокращение времени затрачиваемого на обход всего вопросника снизилось приблизительно на 29,5 %.

Кроме того, для доказательства правильности работы метода корневого вопроса в Приложении А для сравнения представлена оптимизация методом динамического программирования. Результатом оптимизации методом динамического программирования и методом корневого вопроса является одинаковый оптимальный вопросник, что позволяет заключить, что метод корневого вопроса как и метод динамического программирования можно использовать при построении оптимальной последовательности вопросов в вопроснике по критерию минимуму цены обхода или иначе для получения оптимального вопросника.

3.5. Обобщение функции предпочтения вопросов

Анализируя все полученные функции предпочтения BQ – (3.6), TQ – (3.12), (3.22), (3.27), (3.32), BTQ – (3.40), (3.46), (3.51), можно заметить одинаковую конструкцию выражений, описывающих функцию предпочтения. Отсюда следует, что существует общая функция предпочтения вопросов, которая может быть применима для сравнения двух вопросов любого вида. Основываясь на всех полученных функциях предпочтения, обобщённая функция предпочтения двух сравниваемых вопросов имеет вид [95]:

Теорема 3.1. Обобщённая функция предпочтения $\Phi(q_1, q_2)$ для двух сравниваемых вопросов с различными основаниями $a \in \{2, 3, \dots, (n - 1)\}$ вычисляется по формуле:

$$\Phi(q_1, q_2) = \frac{c(q_1) + c(q_2) \sum_{p_i \in (X_{q_1} \setminus X_{q_2})} p_i}{c(q_2) + c(q_1) \sum_{p_j \in (X_{q_2} \setminus X_{q_1})} p_j} \quad (3.52)$$

где $p_{j,i}$ – это весовые коэффициенты событий входящих в подмножества $X_{q_1} \setminus X_{q_2}$ и $X_{q_2} \setminus X_{q_1}$.

Функция 3.52 позволяет работать как с бинарными вопросами, так и с вопросами, имеющими большие значения оснований. Данная функция будет полезна при применении метода корневого вопроса для оптимизации гетерогенных и гомогенных вопросников, состоящих из вопросов с большими основаниями.

Выбор наиболее предпочтительного вопроса для множества, состоящего из более чем двух вопросов, осуществляется путём разбиения их на пар сравниваемых вопросов и построения графа предпочтений по методике, изложенной в [38]. Последующий анализ графа предпочтения с учётом его особенностей даёт возможность выбора наиболее предпочтительного вопроса. Также задача может быть решена путём использования матриц парных сравнений [67].

3.6. Выводы по разделу

Основываясь на результатах, полученных в данной главе, можно сделать следующие выводы:

1. Для уменьшения цены обхода вопросника эффективным может оказаться увеличение оснований вопросов и использование вместо вопросников бинарного типа бинарно-тернарных вопросников.
2. Существует несколько типов отношений сравнений между бинарными и тернарными вопросами, установление которых позволяет адаптировать метод корневого вопроса для оптимизации бинарно-тернарных вопросников.
3. Несмотря на наличие большого числа отношений сравнений между вопросами в бинарно-тернарном вопроснике функция предпочтения при попарном сравнении вопросов имеет общую запись.
4. Метод корневого вопроса позволяет строить оптимальные бинарно-тернарные вопросники за полиномиальное время.

ГЛАВА 4. ВОПРОСНИКИ ОСОБЫХ ВИДОВ

4.1. Вопросники особых видов в технической диагностике

В теории вопросников, описанной К. Ф. Пикаром и П. П. Пархоменко, идёт речь о детерминированных ответах, тогда, когда вопрос разбивает множество ответов на непересекающиеся подмножества. При техническом диагностировании возможны ситуации, когда ответ на вопрос может содержать ошибку или может являться неопределённым. Рассмотрение таких видов вопросников необходимо по причине того, что на практике, при диагностировании объекта, так или иначе, могут случаться ошибки в контролирующем оборудовании, или трактовка результатов диагностирования может быть неоднозначной. Ситуации, в которых возможны недетерминированные ответы, многочисленны: от недостоверных измерений, поступивших от неисправного измерительного контроллера до ошибки в сети передачи данных. При таких ошибках исходы вопросника становятся покрытием множества состояний, а не разбиением. Если физическая постановка задачи, математической моделью которой является анкета, допускает произвольный детерминированный ответ, то он считается неопределённым. В следующем разделе подробнее будет рассмотрено определение недетерминированности ответов на вопросы. Для построения модели разбиения всех возможных состояний объекта диагностирования с учётом ошибок её необходимо расширить. Для этого прибегают к анализу полноты анкеты неисправностей.

Исследование поставленных вопросов и вопросников позволит разработать математическую модель диагностирования, более приближённую к реальным условиям. Интеграция данных решений в программное обеспечение СТДМ позволяет автоматизировать анализ полноты данных, поступающих от измерительных контроллеров. При обнаружении недостатка данных или при поступающих данных с неисправного контроллера алгоритм диагностирования для объекта будет построен и скорректирован с учётом ошибки измерительного и контрольного оборудования. В [8] впервые были предложены данные виды бинарных вопросников. Модернизируем данные методы и приведём пример тернарных вопросни-

ков, с вопросами допускающими ошибки и неопределённости. Множество бинарных и тернарных вопросов с ошибками и неопределённостями позволяют распространить теорию вопросников особых видов на бинарно-тернарные вопросники.

4.2. Постановка задачи оптимизации вопросников особого вида

Для данной задачи дано конечное множество X событий из n элементов – ($X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$) и конечное множество Q из m вопросов, имеющих смысл на заданном множестве – ($Q = \{q_{a_1}, q_{a_2}, \dots, q_{a_m}\}$). При разбиении множества X множеством Q вопросов возникает подмножество исходов некоторого вопроса q_i являющееся покрытием множества событий. Вопросы q_{T_i} имеют $a(q_i) = 3$. Каждое событие $x_j \in X$ характеризуется вероятностью возникновения $p(x_j)$. Каждый вопрос $q_i \in Q$ характеризуется неотрицательной весовой функцией называемой ценой вопроса $c(q_i)$, которая обозначает время, затраченное на их реализацию. Отличием от ранее сформулированной задачи в вопроснике $G(Y, \Gamma)$ допустимо возникновение ошибок, т. е.:

$$\bigcup_{j=0}^{a-1} X_j(q_i) = X; X_k(q_i) \cap X_p(q_i) |_{k \neq p} \neq \emptyset.$$

где $X_{k,j,p}(q_i)$ – подмножества образованные вопросом q_i .

4.3. Вопросники с вопросами, допускающими ошибки

Ранее в исследовании теории вопросников было принято, что вопрос разбивает множество событий на непересекающиеся подмножества (детерминированные подмножества). На практике множество ответов на вопрос, может оказаться покрытием множества событий, то есть содержать недетерминированный ответ. Дадим определение вопроса, допускающего ошибку в одном из ответов.

Определение 4.1. Вопросом, допускающим ошибки, называется вопрос, для которого:

$$\bigcup_{j=0}^{a-1} X_j(q_i) = X; X_k(q_i) \cap X_p(q_i) |_{k \neq p} \neq \emptyset. \quad (4.1)$$

где $X_{k,j,p}(q_i)$ – подмножества образованные вопросом q_i .

В работах [6, 8] описывается пример бинарного вопросника, содержащий вопросы с недетерминированными ответами, у которого $X_0(q_i) \cup X_1(q_i) = X; X_0(q_i) \cap X_1(q_i) = X^*(q_i) \neq \emptyset$. При пересечении подмножеств образованных вопросом q_i образуется некоторое непустое множество $X^*(q_i)$, у которого $x_j \in X^*(q_i)$. В анкете для таких вопросов с недетерминированными ответами ставится «X» в ячейке b_{ij} , где i – это обозначение номера строки, а j – столбца. Далее формируется анкета, бинарный вопрос разбивается на два подмножества $X_0^*(q_i)$ и $X_1^*(q_i)$, при этом, $\forall x_j \in X_0^*(q_i)$ ответом будет «0», $\forall x_j \in X_1^*(q_i)$ ответом будет «1», а $\forall x_j \in X^*(q_i)$ будет недетерминированный ответ («0» или «1»). При этом X_0^* и X_1^* – детерминированные ответы. Следовательно, получаем:

$$\begin{aligned} X_0(q_i) &= X_0^*(q_i) \cup X^*(q_i); X_1(q_i) = X_1^*(q_i) \cup X^*(q_i); \\ X_0^*(q_i) &= X_0(q_i) \setminus X^*(q_i); X_1^*(q_i) = X_1(q_i) \setminus X^*(q_i). \end{aligned} \quad (4.2)$$

Для дальнейшей работы необходимо определить логическую полноту анкеты.

Определение 4.2. Анкета называется логически полной, если существует хотя бы один вопрос q_i для любой пары событий (x_j, x_p) , такой, что события (x_j, x_p) принадлежат различным детерминированным исходам этого же вопроса:

$$\forall x_j, x_p \in X |_{j \neq p}: \exists q_i: (x_j \in X_S^*(q_i)) \& (x_p \in X_{\bar{S}}^*(q_i)). \quad (4.3)$$

Для доопределение анкеты вопросника с вопросами, содержащими ошибки, необходимо воспользоваться матрицей различий [8, 75].

Определение 4.3. Матрицей различий D называют булеву матрицу размерностью $R \times C_N^2$, элементы которой равны 1 только в случае различия пары (x_j, x_p) вопросом q_i , или:

$$d_{ijk} = 1 \Leftrightarrow (x_j \in X_S^*(q_i)) \& (x_k \in X_{\bar{S}}^*(q_i)). \quad (4.4)$$

где, i – номер вопроса, j и p – номера событий, образующих рассматриваемую пару.

Далее строится матрица различий для анкеты с вопросами, допускающими ошибки по правилу:

$$d_{ijk} = b_{ij} \oplus b_{ik}. \quad (4.5)$$

Для полного доопределения анкеты доопределяют операции сложения по модулю 2 следующим образом [6]:

$$\begin{aligned} a \oplus b &= b \oplus a; \\ a \oplus (b \oplus c) &= (a \oplus b) \oplus c; \\ 0 \oplus 0 &= 0; \\ 1 \oplus 1 &= 0; \\ 0 \oplus 1 &= 1; \\ a \oplus \times &= 0. \end{aligned} \quad (4.6)$$

После анализа полноты анкеты, и её доопределения, приступают к построению вопросника по алгоритмам, описанным в [6, 8].

Исследуем вышеуказанный метод при постановке тернарных вопросников, которые содержат вопросы с ошибками. Множество событий $X = \{x_j | j = \overline{1, m}\}$ разобьем на подмножества $X_{q_i}^2$, $X_{q_i}^1$ и $X_{q_i}^0$ так, что хотя бы одно из равенств в следующем выражении становится неверным:

$$X_{q_i}^2 \cap X_{q_i}^1 = X_{q_i}^{12}, X_{q_i}^2 \cap X_{q_i}^0 = X_{q_i}^{20}, X_{q_i}^1 \cap X_{q_i}^0 = X_{q_i}^{10}. \quad (4.7)$$

Одно из вышеописанных подмножество должно остаться не пустым:

$$W_{q_i} = X_{q_i}^{12} \cup X_{q_i}^{20} \cup X_{q_i}^{10} = \emptyset. \quad (4.8)$$

Условие (4.8) подразумевает, что для любого события $x_j \in W_{q_i}$ исход вопроса q_i является неоднозначным. В зависимости от того, какие из подмножеств $X_{q_i}^{12}$, $X_{q_i}^{20}$ и $X_{q_i}^{10}$ являются непустыми, находится и то, между какими исходами эта неоднозначность возникла. Если нет оговорки о том, между какими исходами вопроса возможны ошибки, а речь идёт об ошибках в общем, то для обозначения событий, входящих в пересечения подмножеств $X_{q_i}^{12}$, $X_{q_i}^{20}$ и $X_{q_i}^{10}$ можно ввести обозначение « \times ». Таким образом, элемент анкеты $b_{ij} = \times$, если $x_j \in W_{q_i}$.

Пример анкеты, включающей в себя вопросы, допускающие ошибки, дан в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Анкета вопросника с вопросами, допускающими ошибки

q_i	$c(q_i)$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
q_{T_1}	1	2	2	\times	1	0	0	0
q_{T_2}	2	2	1	0	\times	\times	1	1
q_{T_3}	4	\times	1	0	2	1	0	\times
q_{T_4}	3	2	\times	0	0	1	2	0
q_{T_5}	2	\times	\times	0	2	1	0	2
q_{T_6}	2	0	1	1	0	2	2	2
$p(x_i)$		0,1	0,2	0,3	0,15	0,05	0,05	0,15

Произведём оценку полноты анкеты и воспользуемся матрицей различий. Как было описано ранее, для доопределения бинарной анкеты необходимо использовать троичную логику. Для применения матрицы различий в тернарных вопросниках необходимо доопределить четвёртый вариант, который соответствует ошибочному ответу. В таблице 4.2 представлена матрица различий без учёта варианта с ошибкой. Так бы выглядела матрица различий для анкеты тернарного вопросника без ошибок.

Таблица 4.2. Функция алгебры логики для построения матрицы различий

a	b		
	2	1	0
2	0	1	1
1	1	0	1
0	1	1	0

В таблице 4.2 функция выполняет операцию сравнения:

$$f = a\Delta_{\neq} b. \quad (4.9)$$

Доопределим операцию сравнения так, чтобы выполнялось условие:

$$f = a\Delta_{\neq} \times = 0. \quad (4.10)$$

Итак, произведём анализ логической полноты анкеты (табл. 4.1).

Пользуясь вышеописанными функциями, представим результат анализа в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Анкета с проведённой коррекцией ошибок

$x_i \backslash q_i$	q_{T_1}	q_{T_2}	q_{T_3}	q_{T_4}	q_{T_5}	q_{T_6}
$x_1 - x_2$	0	1	0	0	0	1
$x_1 - x_3$	0	1	0	1	0	1
$x_1 - x_4$	1	0	0	1	0	0
$x_1 - x_5$	1	0	0	1	0	1
$x_1 - x_6$	1	1	0	0	0	1
$x_1 - x_7$	1	1	0	1	0	1
$x_2 - x_3$	0	1	1	0	0	1
$x_2 - x_4$	1	0	1	0	0	1
$x_2 - x_5$	1	0	0	0	0	1
$x_2 - x_6$	1	0	1	0	0	1
$x_2 - x_7$	1	0	0	0	0	1
$x_3 - x_4$	0	0	1	0	1	1
$x_3 - x_5$	0	0	1	1	1	1
$x_3 - x_6$	0	1	0	1	0	1
$x_3 - x_7$	0	1	0	0	1	1
$x_4 - x_5$	1	0	1	1	1	1
$x_4 - x_6$	1	0	1	1	1	1
$x_4 - x_7$	1	0	0	0	0	1
$x_5 - x_6$	0	0	1	1	1	0
$x_5 - x_7$	0	0	0	1	1	0
$x_6 - x_7$	0	0	0	1	1	0

Итак, анализ анкеты показал, что анкета является логически полной. Далее произведём построение вопросника по анкете (табл. 4.3.) и изобразим его на рис. 4.1. В качестве корневого вопроса будем задавать вопрос q_2 . Данный вопрос разбивает множество событий $X = \{x_j | j = \overline{1,7}\}$ на три подмножества $X_{q_2}^2 = \{x_1, x_4, x_5\}$, $X_{q_2}^1 = \{x_2, x_4, x_5, x_6, x_7\}$ и $X_{q_2}^0 = \{x_3, x_4, x_5\}$. Как можно видеть,

события, которые считаются ошибочными входят во все три подмножества – $W_{q_2} = \{x_4, x_5\}$. Следом необходимо провести разбиение подмножеств другими вопросами. Так, подмножества $X_{q_2}^2$ и $X_{q_2}^0$ разбиваются вопросами q_4 и q_3 , а подмножество $X_{q_2}^1$ вопросом q_5 . Далее процедура разбиения продолжается до тех пор, пока не будут получены разбиения всех возможных событий.

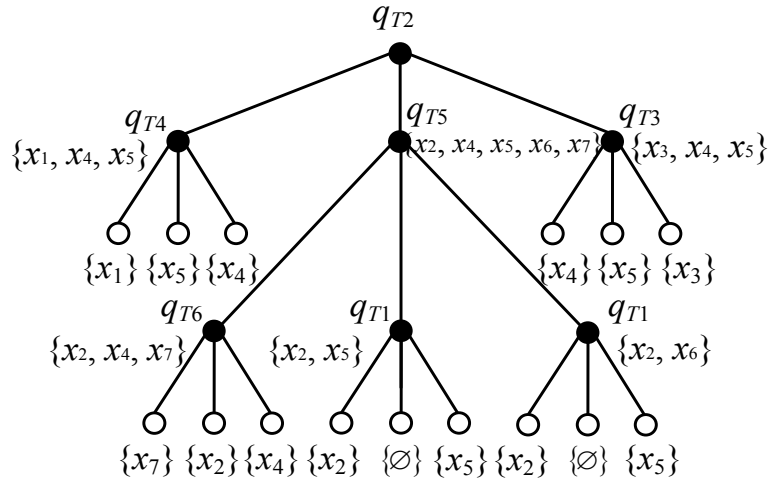


Рисунок 4.1. Вопросник с вопросами, допускающие ошибки

Как видно из вопросника на рис. 4.1, одно и то же событие идентифицируется по нескольким маршрутам. Данный аспект накладывает необходимость в адаптации способа расчёта цены обхода вопросника.

Введём дополнительную весовую функцию для каждого события $x_j \in W_{y_i}$:

$$\delta_{j,i}^k, k = 2,1,0, \text{ такая, что: } \delta_{j,i}^k \in [0; 1]; \sum_k \delta_{j,i}^k = 1. \tag{4.11}$$

В (4.11) функция $\delta_{j,i}^k$ даёт информацию о вероятности ответа « k » на вопрос q_i в состоянии x_j .

Если ответы на вопросы не имеют вероятностного содержания, то предполагается, что исходы таких вопросов являются нечёткими множествами. Для решения таких задач необходимо провести расчёт детерминированности исходов вопроса q_i , по следующей формуле:

$$\lambda_{j,i}^k = \frac{W_{q_i}}{X_{q_i}^k}, k = 2, 1, 0. \tag{4.12}$$

Значение функции $\delta_{j,i}^k$ — это вероятность того, что в состоянии x_j на вопрос q_i будет ответ k .

Введя дополнительные весовые функции для подмножества событий $x_j \in W_{q_i}$, заменим выражение для подсчета цены идентификации события x_j :

$$C(x_j) = \sum q_r(x_j) c_r(x_j). \quad (4.13)$$

где $c_r(x_j)$ — цена идентификации события x_j по маршруту r в вопроснике, а $q_r(x_j)$ — вероятность идентификации события x_j по маршруту r в вопроснике.

Значение величины $q_r(x_j)$ в выражении (4.13) определяется по формуле:

$$q_r(x_j) = \prod_{q_r} \delta_{j,i}^k. \quad (4.14)$$

Если же ответ на вопрос (исход k) является детерминированным, то $\delta_{j,i}^k = 1$. Цену вопросника в этом случае можно определить по формуле:

$$C = \sum_{j=1}^m p(x_j) C(x_j). \quad (4.15)$$

Отдельно необходимо отметить оптимизацию таких видов вопросников. Если произвести оптимизацию вопросника, выполнив только приведённые шаги, то построенный вопросник будет оптимальным и будет разделять все введённые события $x_j^{k,i}$, $k = 2, 1, 0$, но он может оказаться не оптимальным для исходной анкеты с вопросами, допускающими ошибки. При этом в полученном вопроснике могут оказаться и вопросы, которые разделяют пару вновь введённых событий-копий некоторого события x_j . Такие вопросы смысла иметь не будут. Для получения оптимального решения для исходной анкеты требуется расширить множество вопросов $Q = \{q_i | i = \overline{1, n}\}$, введя в него множество мнимых вопросов Q^φ , число которых $|Q^\varphi|$ определяется числом событий во множестве $X = \{x_j | j = \overline{1, m}\}$, для каждого из которых существует хотя бы один вопрос, допускающий ошибку. Такие вопросы не будут тернарными, а будут иметь основание $3^k + 1$. Значение элемента b_{ij} в расширяемой анкете определяется числом j в событии $x_j^{k,i}$. Пример построения расширенной анкеты для анкеты таблицы 4.1 представлен в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Расширенная анкета вопросника для анкеты таблицы 4.1

q_i	$c(q_i)$	x_{1-1}	x_{1-2}	x_{1-3}	x_{1-4}	x_{1-5}	x_{1-6}	x_{1-7}	x_{1-8}	x_{1-9}	x_{2-1}	x_{2-2}	x_{2-3}	x_{2-4}	x_{2-5}	x_{2-6}	x_{2-7}	x_{2-8}	x_{2-9}	x_{3-1}	x_{3-2}	x_{3-3}	x_{4-1}	x_{4-2}	x_{4-3}	x_{5-1}	x_{5-2}	x_{5-3}	x_6	x_{7-1}	x_{7-2}	x_{7-3}	
q_{T_1}	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
q_{T_2}	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	3	2	1	3	2	1	1	1	1	1	
q_{T_3}	4	2	2	2	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	2	2	2	1	1	1	0	2	1	0	
q_{T_4}	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	0	0	0	
q_{T_5}	2	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	0	0	0	2	2	2	1	1	1	0	2	2	2	
q_{T_6}	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	
q_{T_7}	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
q_{T_8}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
q_{T_9}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$q_{T_{10}}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0
$q_{T_{11}}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	0
$q_{T_{12}}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3
$p(x_i)$		0,0110	0,0110	0,0110	0,0110	0,0110	0,0110	0,0110	0,0110	0,0110	0,0220	0,0220	0,0220	0,0220	0,0220	0,0220	0,0220	0,0220	0,0220	0,0220	0,1000	0,1000	0,1000	0,0500	0,0500	0,0500	0,0167	0,0167	0,0167	0,0500	0,0500	0,0500	0,0500

Для мнимых вопросов из множества Q^φ цену определим равной нулю и условимся, что вопрос $q_i \in Q^\varphi$ можно задавать только в том случае, если нулевой исход мнимого вопроса не содержит ни одного события:

$$C_{q_i}^0 = \emptyset, q_i \in Q^\varphi. \quad (4.16)$$

Далее оптимизацию по полученной анкете с коррекцией ошибок проводят известными методами [6, 8], в том числе, предложенным в диссертации, с той лишь разницей, что на каждом этапе для мнимых вопросов необходима проверка условия (4.16). После завершения процедуры оптимизации все мнимые вопросы $q_i \in Q^\varphi$ отбрасываются.

4.5. Вопросники с неопределённостями в ответах

В задачах дискретного поиска возникают ситуации, когда значение какого-либо условия не существенны для выполнения какой-либо последовательности, например, когда речь идёт о бинарных таблицах решения. В таких математических моделях, когда допускается в вопроснике детерминированный ответ и этот ответ существенно не влияет на решение, то такой ответ считается неопределённым и в анкете отмечается знаком «—». Пример анкеты дан в таблице 4.5.

Таблица 4.5. Анкета вопросника с неопределённостями в ответах

q_i	$c(q_i)$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
q_{T_1}	$c(q_{T_1})$	2	2	—	1	0	0	0
q_{T_2}	$c(q_{T_2})$	2	1	0	—	—	1	1
q_{T_3}	$c(q_{T_3})$	-	1	0	2	1	0	—
q_{T_4}	$c(q_{T_4})$	2	—	0	0	1	2	0
q_{T_5}	$c(q_{T_5})$	—	—	0	2	1	0	2
q_{T_6}	$c(q_{T_6})$	0	1	1	0	2	2	2
$p(x_i)$		$p(x_1)$	$p(x_2)$	$p(x_3)$	$p(x_4)$	$p(x_5)$	$p(x_6)$	$p(x_7)$

Далее необходимо провести проверку логической полноты анкеты и определить необходимые строки, в которых поставлен знак «—», таким образом, чтобы существовал хотя бы один вопрос q_i , разделяющий соответствующую столбцу матрицы различий пару событий (x_j, x_e) .

Метод доопределения ответов отличается от вопросников, содержащих ошибочные ответы с той лишь разницей, что в (4.10) для доопределения ответ заполняют как «0», а в вопросниках с неопределёнными анкетами как «—».

Если для одного вопроса существует несколько вариантов дополнения (несколько пар событий), то при доопределении анкеты стараются разделить пару событий с максимальной суммарной вероятностью $p_{j,e} = p_j + p_e$. Указанный подход рассмотрен в [8] для бинарных вопросников, а для тернарных вопросников описан соискателем в [39]. Там же отмечено, что представленный метод позволяет получать решения с быстрым доопределением ответов на вопросы и обеспечивать при этом построение вопросника с ценой, близкой к минимальной.

4.5. Вопросники, допускающие ошибки и неопределённости в ответах

В задачах технической диагностики вопросники гомогенного вида более вероятны и такие вопросники при ограничении на время и количество процедур разбиения могут, оказываются выгоднее гетерогенных. По этой причине важной задачей является исследование свойств гомогенных вопросников. Любой вопросник можно преобразовать в бинарный. Однако такая процедура требует увеличения количества вопросов и соответственно ведёт к росту средней цены обхода. Исследование особенностей гомогенных вопросников даёт возможность расширить применение вопросников и строить эффективные алгоритмы диагностирования. Изучение анкет вопросников с включёнными в них неисправностями и неопределённостями даёт возможность парирования ошибочных результатов диагностирования при неисправности измерительного оборудования. Методы построения вопросников, содержащих в себе ошибочные ответы и ответы с неопределённостями, возможно использовать в программном обеспечении СТДМ совместно.

4.6. Выводы по разделу

На основании полученных результатов в данном разделе диссертационного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Если в бинарно-тернарном вопроснике существуют вопросы, допускающие ошибки и неопределённости в ответах, то прямое применение метода корневого вопроса можно только после доопределения и расширения вопросника.
2. Бинарно-тернарные вопросники с ошибками и неопределённостями в ответах допускают идентификацию событий по различным ветвям древо-видного графа, что делает невозможным применение известной формулы подсчёта цены обхода.
3. Для определения цены обхода вопросника подсчёт должен быть осуществлён с учётом вероятности идентификация событий по различным маршрутам в вопроснике.
4. С увеличением числа ошибок и неопределённостей в бинарно-тернарном вопроснике существенно возрастает сложность процесса оптимизации, что накладывает ограничение на процедуры их оптимизации.

ГЛАВА 5. ПОДСИСТЕМЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ, ПОЛУЧАЕМЫХ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

5.1. Системы мониторинга устройств железнодорожной автоматики

Особым классом систем критического действия на железнодорожном транспорте являются системы автоматики и телемеханики. Для контроля технического состояния различных систем железнодорожной автоматики были спроектированы и внедрены СТДМ [1-4, 19, 32, 35, 39, 91, 96, 110, 115, 126, 136, 145, 148, 152, 162]. В некоторых системах диагностика и мониторинг являются встроенными функциями, а в каких-то – дополнительной системной надстройкой. Принцип действия же всех систем одинаковый. Так, имеется определенное количество объектов автоматики, для которых требуется организовать систему диагностирования и мониторинга. К примеру, такие объекты как железнодорожные светофоры, стрелочные электроприводы, рельсовые цепи, горочные замедлители, горочные датчики измерения скорости и так далее. Таких устройств много и каждый тип устройства бывает разного вида. К примеру, видов светофоров много: входные, проходные, мачтовые, карликовые, и т. д. Стрелочные электроприводы бывают горочными СПГБ-4М или магистральными СП-6М (самый распространённый вид), а магистральные электроприводы бывают и винтовыми (ВСП-220Н/К, к примеру) и так далее. Для каждого вида и типа устройства имеются множества как индивидуальных, так и общих рабочих параметров, которые должны соответствовать нормам, представленным в документации к устройствам, которые характеризуют их исправную работу. К общим параметрам можно отнести рабочие токи и напряжения (данные физические параметры имеются практически у всех устройств), а к индивидуальным – такие параметры как время перевода стрелки или раствор шин на горочном замедлителе.

Сформулируем общую модель работы устройств автоматики и телемеханики на железных дорогах [47]. Каждый объект диагностирования (рис. 5.1) имеет свою внутреннюю структуру, режимы работы, рабочие и диагностические параметры. При эксплуатации систем железнодорожной автоматики осуществляется переход между состояниями: исправное работоспособное, неработоспособное, предельное. Множество отказных состояний $F = \{f_i \mid i = \overline{1, n}\}$. Множество предотказных состояний $F_{pr} = \{f_{pr_i} \mid i = \overline{1, m}\}$. Совокупность множества отказных и предотказных состояний определяет множество нештатных ситуаций $X = F \cup F_{pr}$, которые могут возникнуть на объекте диагностирования. И наконец, у каждого объекта имеется свой набор рабочих параметров $V = \{v_i \mid i = \overline{1, k}\}$.

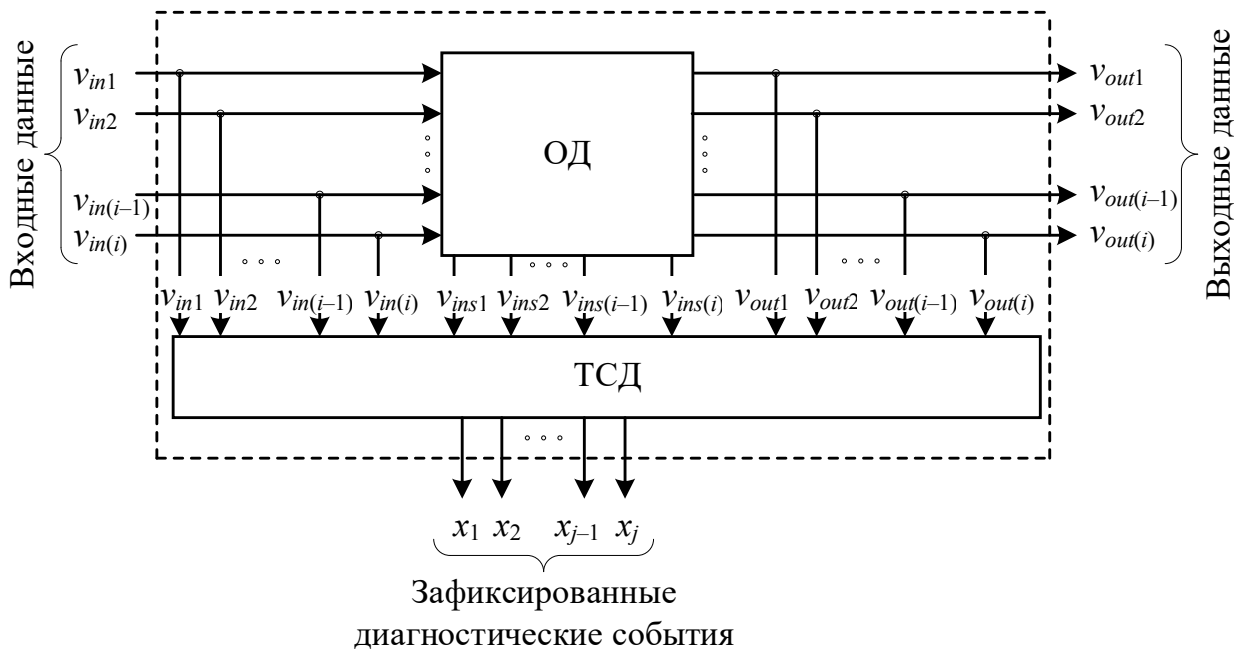


Рисунок 5.1. Модель объекта диагностирования

На железнодорожном транспорте используется регламентное техническое обслуживание. При этом имеется набор проверок, соответствующий каждому устройству, которые необходимо произвести в соответствии с технологическими картами. Технологические карты по техническому обслуживанию устройств сигнализации, централизации и блокировки – это специальный свод правил, по которым обслуживающий персонал обязан проводить все работы. Каждая проверка проводится с чёткой периодичностью. Все проверки имеют свою норму трудоза-

трат. Выполнение всех проверок со строгим соблюдением технических карт должно способствовать продлению жизненного цикла устройств автоматики и телемеханики, но у данного метода обслуживания имеется множество недостатков. Самым весомым недостатком является производство проверок человеком, что часто приводит к некачественному техническому обслуживанию, пропуску отказов, внесению предостережений и неисправностей самим обслуживающим персоналом. Ещё одно отрицательное воздействие приносит постоянное вмешательство в работу контролируемых объектов, без которого выполнение проверок невозможно. Вышеуказанные негативные воздействия от периодического обслуживания возможно уменьшить. Для достижения данной цели ввели обслуживание по состоянию [105, 106, 111, 113 – 116, 121, 129, 130, 132, 137]. Благодаря частичной автоматизации измерений некоторых параметров устройств, получается сократить количество проверок, которые производит человек. Начали появляться измерительные приборы, сконструированные для этих целей. Существует множество видов измерительных контроллеров способных производить в автоматическом режиме, удалённо, измерения различных параметров устройств автоматики без вмешательства человека [16, 30, 36, 39, 40, 44, 71, 74, 94, 99, 125, 126, 134, 137, 139 – 144, 146, 147, 150, 160, 161]. Со временем после внедрения на железнодорожном транспорте подобных измерительных контроллеров стали образовываться системы технического диагностирования и мониторинга [16, 30, 53, 69, 152, 158]. Информация с измерительных контроллеров поступает в концентратор данных, которые используются для анализа обслуживающим персоналом. По средствам АРМ происходит визуализация данных из концентратора в понятный для человека вид.

Достоинствами существующих систем являются:

- дистанционное измерение параметров объекта;
- архивирование и создание истории «жизни» контролируемого объекта.

Системы технического диагностирования и мониторинга железнодорожной автоматики и телемеханики возникли ещё в 90-е годы прошлого столетия. По этой причине многие из технических решений «унаследовали» устаревшие прин-

ципы реализации, несовершенные технологии обработки данных и требуют совершенствования [37, 43, 45 – 47, 82, 92, 93, 97]. В современных системах автоматики и телемеханики имеется возможность фиксации с помощью СТДМ множества рабочих параметров, не всего, а только некоторого его подмножества $V^* = \{v_i \mid i = \overline{1, k-1}\}$, $V^* \subset V$. В связи с этим нет и возможности определить все элементы множества состояний объекта диагностирования, а только некоторые из них – $X^* \subset X$. Следовательно, можно различить лишь подмножества предотказных $F_{pr}^* \subset F_{pr}$ и отказных $F^* \subset F$ состояний, а не полное их множество. Все события и состояния имеют оценочный параметр, такой как: вероятность нахождения объекта в каком-либо состоянии $p(x_i)$, вероятность нахождения объекта в предотказном состоянии $p(f_{pr_i})$, вероятность нахождения объекта в отказном состоянии $p(f_i)$. Эти параметры определяются из расчёта времени эксплуатации по реально случившимся событиям. Остальные состояния необходимо доопределять вручную.

Главными недостатками современных систем мониторинга являются:

- низкая полнота и глубина диагностирования;
- отсутствие интеллектуальной обработки измеренных данных или же отсутствие интеллектуального программного обеспечения;
- отсутствие подсистем помощи принятия решения;
- большой объем пересылаемой по информационным каналам информации;
- отсутствие стабильных протоколов беспроводной передачи данных, так как не всегда бывает возможность подключить по физическому каналу измерительное устройство.

Из вышеописанного становится ясным, что интеграция алгоритмов диагностирования позволяет сократить количество ошибок первого и второго рода. Ошибки первого рода – ложный дефект, ошибка второго рода – ложная исправность контролируемого объекта. Подобные ошибки можно парировать при учёте объёма поступающих данных от нескольких источников или систем, а также о не-

прерывном во времени анализе поступающих данных можно коррелировать измеряемые величины тем самым снижать воздействие ошибочных данных возникающих в результате помех или неправильной работы устройств съёма информации.

Обратим внимание на программное обеспечение СТДМ устройств автоматизации и телемеханики на железнодорожном транспорте.

5.2. Особенности диагностического обеспечения систем мониторинга

Программное обеспечение СТДМ позволяет отображать в доступном для пользователя виде данные, полученные с измерительных контроллеров. Если говорить об интегрированной в систему управления системе мониторинга, то данные с измерительных контроллеров помещают на сервер. С данными производят действия по архивированию, отправке на более высокий уровень иерархии системы мониторинга, трансляции в интерфейс автоматизированного рабочего места (АРМ). Имеется два варианта работы с данными на сервере, это – обработка на сервере дистанционно или обработка «на месте».

Пример такой иерархии представлен на рис. 5.2. На посту управления происходит хранение и анализ данных для дальнейшей оценки работы объекта диагностирования в пределах вверенного объекта или нескольких объектов, а в ситуационный центр уже отправляется информация об инцидентах. Представленная схема (рис. 5.2) СТДМ предназначена для системы распределённых объектов, таких как устройства железнодорожной автоматизации и телемеханики на различных станциях. Подобные системы можно применять и в метрополитене, и на промышленном транспорте, где объекты диагностирования также распределены на большие расстояния.

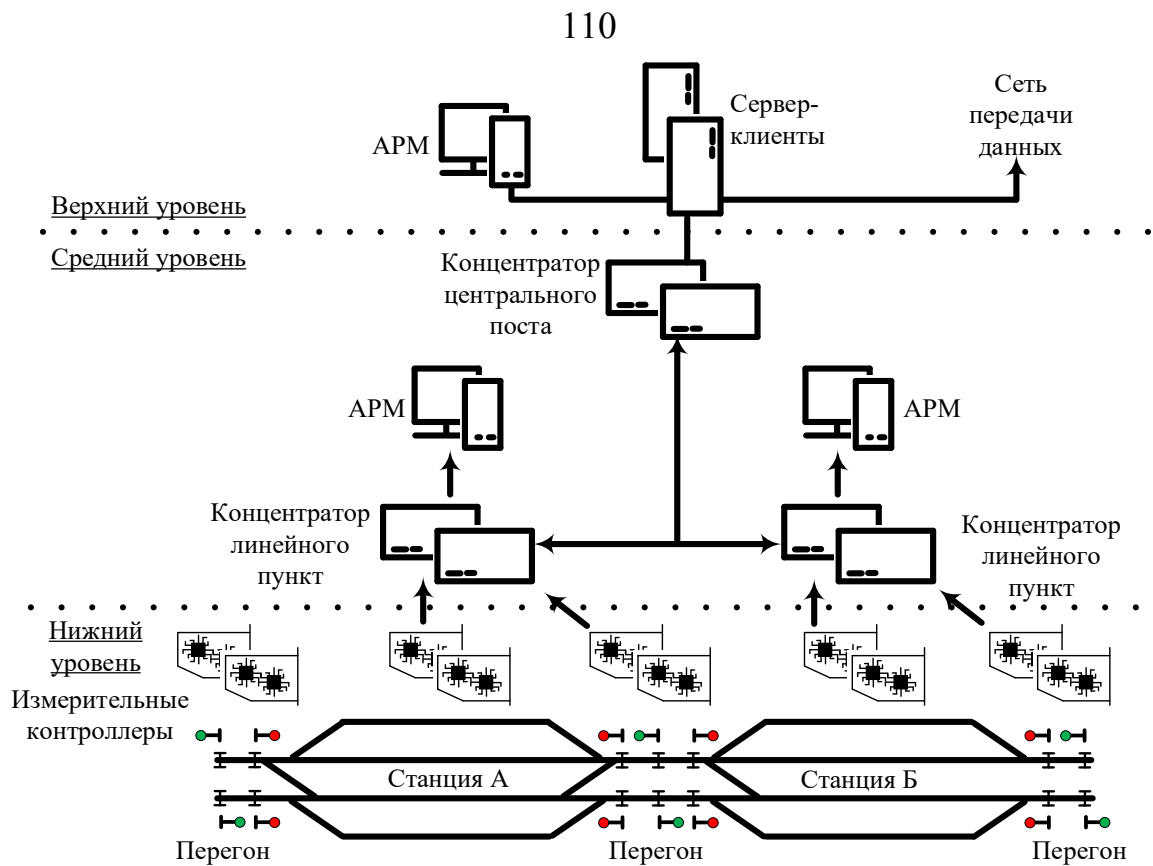


Рисунок 5.2. Иерархия современных систем технического диагностирования и мониторинга железнодорожной автоматики

На рис. 5.2 представлена трёхуровневая система. В такой системе на нижнем уровне происходит измерение параметров контролируемых устройств по средствам измерительных контроллеров. Далее средний уровень, образованный концентратором линейного пункта, который производит сбор информации от нижнего уровня, обеспечивает обработку, хранение и передачу информацию концентраторам данных верхнего уровня. В свою очередь, верхний уровень образован их техническими средствами: АРМ диспетчера, АРМ работников отделения дороги, сервер-клиентами и сетью передачи данных.

Для наглядного примера трансляции в ПО СТДМ информации от измерительных контроллеров приведём на рис. 5.3 интерфейс ПО АРМ системы КСАУ СП, эксплуатируемой на железнодорожных сортировочных горках для контроля устройств автоматики и телемеханики. Система КСАУ СП предназначена для автоматизации управления процессом расформирования составов на сортировочных

горках и в её функции входит контроль и протоколирование событий, происходящих во время роспуска.

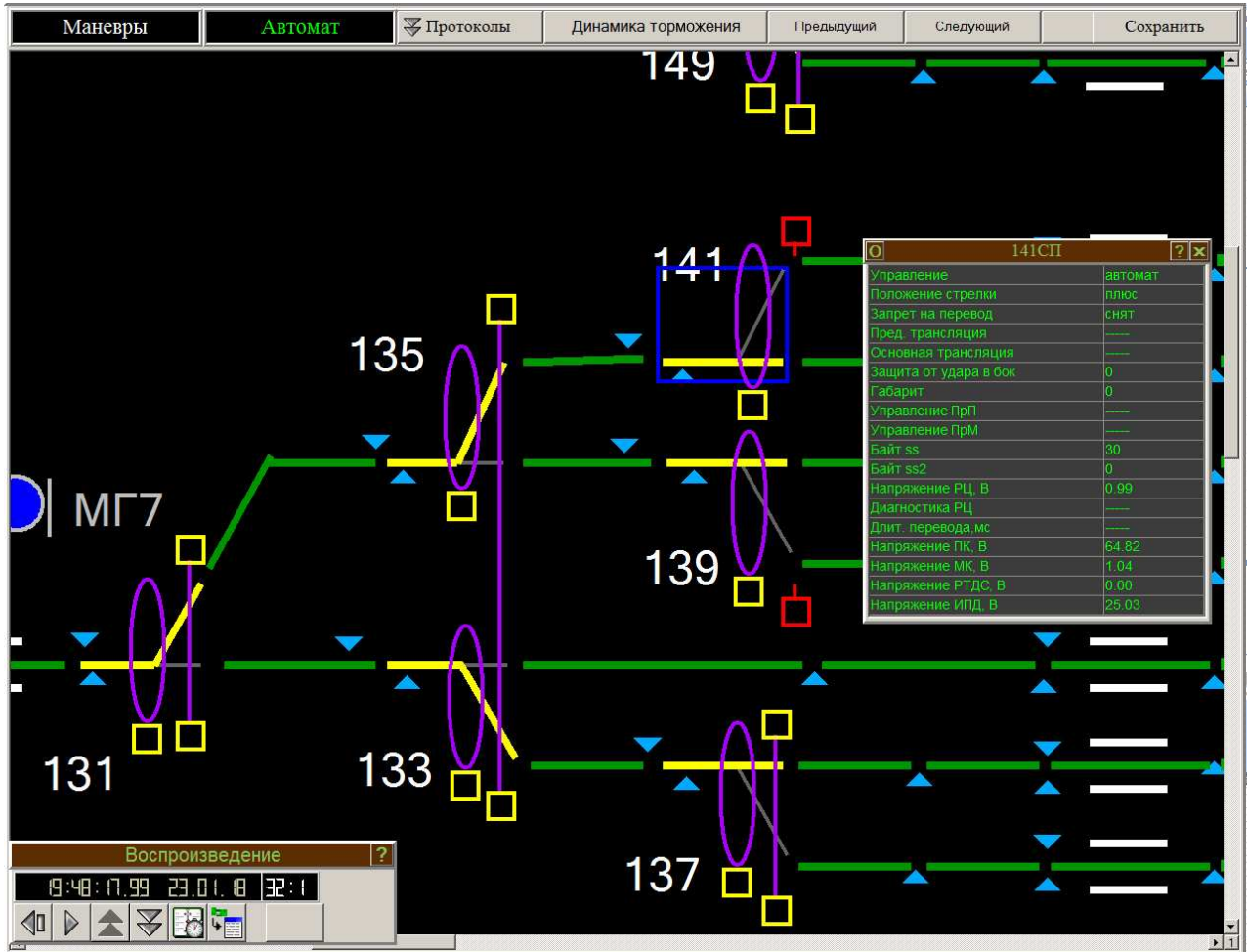


Рисунок 5.3. Пример интерфейса ПО АРМ системы КСАУ СП

На данном примере видно, как происходит отображение измеренных данных. Так, если навести курсор мыши на интересующий объект автоматики в интерфейсе, то появится дополнительное окно с информацией по объекту диагностирования. Кроме отображения в числовом виде, встроенные в АРМ функции позволяют построить графики изменения параметров объекта. На рис. 5.4 отображается график изменения тока на электродвигателе стрелочного перевода. По такой токовой кривой можно судить о возможных отклонениях в работе стрелочного электропривода (СЭП). На рис. 5.4 выделены цветом области графика, по которым можно сказать, что происходило со стрелкой во время перевода. Области 1 и 4 соответствуют началу движения острия стрелки, область 6 показывает

окончание перевода, области 2, 3 и 5 соответствуют движению остряков и по данным областям можно сказать о том, насколько плавно осуществляется перевод. По всей диаграмме видно, что произошло событие «автовозврат», то есть перевод стрелки не был завершён в нормальное время по некоторой причине и произошёл возврат остряков в исходное положение, и в большинстве случаев по области 3 можно судить о природе причины не доведения остряков.



Рисунок 5.4. График изменения тока на электродвигателе в СЭП

Если говорить об СТДМ, программное обеспечение которых является дополнением к системам управления и контроля, то в интерфейсе такой программы зачастую отображаются в виде списка все объекты диагностирования и база измеренных параметров каждого из этих объектов. На рис. 5.5 показан пример такого программного решения для железнодорожной станции Обухово, находящейся в Санкт-Петербурге, когда в эксплуатацию были введены контроллеры, измеряющие мощность работы СЭП при переводе стрелки. ПО запускается отдельным ярлыком на рабочем столе и позволяет выбрать из списка стрелку и посмотреть по ней архив с диаграммами переводов стрелки.

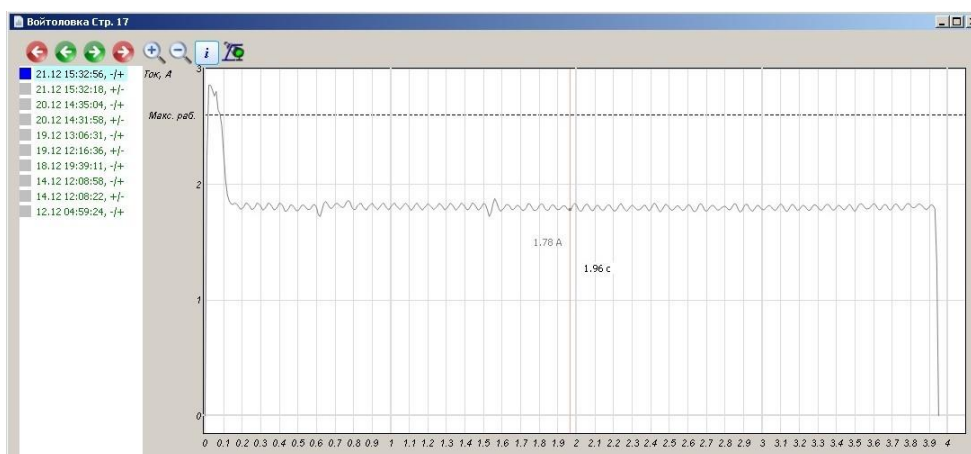


Рисунок 5.5. Интерфейс ПО мониторинга стрелочных приводов

На момент написания диссертационного исследования на сети железных дорог России в эксплуатации находились системы мониторинга позволяющие производить оценку изменения рабочих параметров объектов диагностирования с последующей выдачей рекомендаций о возможном отказе, но глубина диагностирования крайне низка. Все эксплуатируемые системы работают по пороговым значениям. Если в программе установлен уровень напряжения питания объекта диагностирования, то при достижении или занижения данного параметра в условиях эксплуатации происходит формирование сообщения о данном инциденте. Если производится непрерывный контроль параметра, то запись с завышенным напряжением будет выделяться дополнительной индикацией. Помимо простого информирования эксплуатируемые системы не дают рекомендаций обслуживающему персоналу по месту поиска неисправности в самом объекте диагностирования, что, в свою очередь, не позволяет минимизировать время устранения неисправности.

В данном диссертационном исследовании предлагается решение задачи интеллектуализации программного обеспечения СТДМ за счёт внедрения математического аппарата теории вопросников для обработки измеряемых данных. Подобные алгоритмы диагностирования позволяют создавать аналитическое программное обеспечение для модернизации как уже эксплуатируемых СТДМ, так и для разрабатываемых систем.

Главная задача, которую позволяет решить внедрение интеллектуального ПО в СТДМ объектов критического действия на железных дорогах – это автоматический анализ измеренных параметров с прогнозированием развивающихся предотказов или отказов [45].

Таким образом, при учёте подмножества диагностических параметров $V^* = \{v_t \mid t = \overline{1, k-1}\}$, $V^* \subset V$, событий $X^* \subset X$, которые система может зафиксировать и статистических данных об объектах становится возможным построение эффективной последовательности проверок на объекте диагностирования. В свою очередь, это позволяет увеличивать полноту и глубину диагностирования.

С использованием математического аппарата теории вопросников такой алгоритм будет формироваться в программном обеспечении СТДМ.

Для возможности корректировки работы СТДМ необходимо сформировать условия идентификации технического состояния.

Утверждение 5.1. Для того чтобы система технического диагностирования и мониторинга однозначно интерпретировала полученное множество значений диагностических признаков с каким-либо конкретным состоянием объекта диагностирования требуется, чтобы это множество не являлось собственным подмножеством диагностических признаков, соответствующим другому техническому состоянию:

$$\forall x_a: \Delta_{x_a} \not\subset \Delta_{x_b}, a \in \{1, 2, \dots, r\}, b \in \{1, 2, \dots, r\} \setminus \{a\}. \quad (5.1)$$

Если хотя бы для одной пары технических состояний не выполняется данное условие (5.1), то в автоматическом режиме система диагностирования и мониторинга не определит состояние объекта диагностирования. В таком случае потребуется производить ручные измерения для доопределения состояния, в котором система находится в действительности [4, 70].

Несмотря на то, что формулировка утверждения 5.1 представляется тривиальной, необходимо в ПО СТДМ ЖАТ чётко установить критерии принадлежности значений признаков состояний. Поясним её на небольшом примере [47]. На рис. 5.6 приведено множество диагностических признаков некоторого объекта диагностирования.

Некоторый объект диагностирования имеет восемь технических состояний, в которых он может находиться – $\Delta_{x_a}, \Delta_{x_b}, \dots, \Delta_{x_h}$. Одновременно объект может пребывать только в одном состоянии. У объекта имеется набор диагностических признаков – x_a, x_b, \dots, x_h . СТДМ способна в автоматическом режиме определить состояния x_a, x_b, x_c без привлечения дополнительных ручных проверок при попадании значений диагностических параметров в не заштрихованной зоны, так что:

$$\Delta_{x_a} \not\subset \Delta_{x_b}, \Delta_{x_b} \not\subset \Delta_{x_a}, \Delta_{x_a} \not\subset \Delta_{x_c}, \Delta_{x_c} \not\subset \Delta_{x_a}, \Delta_{x_b} \not\subset \Delta_{x_c}, \Delta_{x_c} \not\subset \Delta_{x_b}.$$

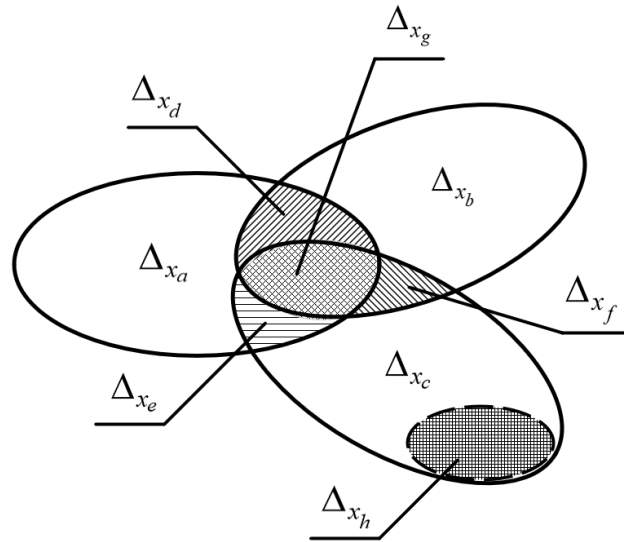


Рисунок 5.6. Множество диагностических признаков

Заштрихованные области на рис. 5.6 не определяются системой диагностирования и мониторинга обозначим их как группы (x_a, x_b, x_d) , (x_a, x_c, x_e) , (x_b, x_c, x_f) , (x_a, x_b, x_c, x_g) и (x_c, x_h) . У этих групп:

$$\begin{aligned} \Delta_{x_d} &\subset \Delta_{x_a}, \Delta_{x_d} \subset \Delta_{x_b}; \\ \Delta_{x_e} &\subset \Delta_{x_a}, \Delta_{x_e} \subset \Delta_{x_c}; \\ \Delta_{x_f} &\subset \Delta_{x_b}, \Delta_{x_f} \subset \Delta_{x_c}; \\ \Delta_{x_g} &\subset \Delta_{x_a}, \Delta_{x_g} \subset \Delta_{x_b}, \Delta_{x_g} \subset \Delta_{x_c}; \\ \Delta_{x_h} &\subset \Delta_{x_c}. \end{aligned}$$

Для определения этих групп состояний необходимо производить дополнительные ручные проверки для доопределения дополнительных параметров, которые не может автоматически измерить СТДМ. Такие ручные проверки необходимо проводить по определенному алгоритму, для чего и необходима СППР.

Утверждение 5.2. Множество состояний X разделимо в случае:

$$\forall x_i, i \in \{1, 2, \dots, r\} \exists q_i \in Q, j \in \{1, 2, \dots, r\}, \quad (5.2)$$

где q_j – результативная проверка.

Для обоснования утверждения 5.2 обратимся к термину «результативная проверка» [45], такие проверки могут производиться как в автоматическом режи-

ме, так и в ручном. СТДМ должна снабжаться системой поддержки принятия решений, которая сможет давать советы обслуживающему персоналу о необходимости проводить ту или иную проверку с учётом исторических данных [45]. Такая система генерирует подсказки персоналу для проведения различных проверок, указывает порядок и опирается на множество информации, куда включаются, например, исторические факторы, вероятности нахождения объекта диагностирования в конкретном состоянии, конкретная информация об условиях эксплуатации устройства и так далее.

Данная задача является очень важной. На основе построенных в ПО алгоритмов диагностирования формируются и выдаются пользователю информационные сообщения о необходимых последовательностях действия для обслуживающего персонала. Рассмотрим далее подробнее данный вопрос на примере реализации СППР ЖАТ.

5.3. Пример реализации системы поддержки принятия решения в железнодорожной отрасли

Современные СТДМ не определяют автоматически всех параметров и возникающих событий на объекте диагностирования. Остальные же значения параметров необходимо получать вручную. При этом затраты времени на ручное диагностирование сильно зависят от опыта обслуживающего персонала, так как возможно проведение большего количества измерений, чем необходимо. На данном этапе развития СТДМ неинтеллектуальны. В программном обеспечении формируются только сообщения о том, что произошло достижение установленной нормы какого-то параметра устройства. Примерами таких сообщений можно привести отказы тональных рельсовых цепей (ТРЦ) [100]. Основными устройствами ТРЦ являются: путевой генератор, путевой приёмник, путевой фильтр, путевое реле и рельсовая линия. В автоматическом режиме в современных СТДМ измеряются только напряжения на выводах путевого генератора, входах и выходах путевого приёмника, к этому ещё добавляется информация о сопротивлении изоля-

ции жил кабеля, дискретные данные о состоянии устройств и информации от средств самодиагностирования. Подробнее все отказы и принципы диагностирования ТРЦ описаны в [40, 100, 120]. Вернёмся к тому, что в СТДМ всплывает только сообщение об отклонении выше указанных параметров от нормы (достижение или превышение / занижение нормали), которая внесена в ПО. Далее эксплуатационный персонал начинает на основе экспертной оценки анализировать работу устройства ТРЦ в целом для определения первопричины возникшего события.

Для решения вопроса доопределения параметров объекта диагностирования за счёт проведения ручных проверок необходимо снабдить эксплуатационный персонал встроенной системой поддержки принятия решения. Система предлагает алгоритм действия с учётом реальной технической обстановки. Структурная схема системы изображена на рис. 5.7.

Рассмотрим пример вопросника, построенного по экспертной оценке, который учитывает все возможные события и специфику объекта диагностирования. Множество состояний, в которых может находиться аппаратура ТРЦ, обозначим через $X = \{x_j \mid j = \overline{1,6}\}$.

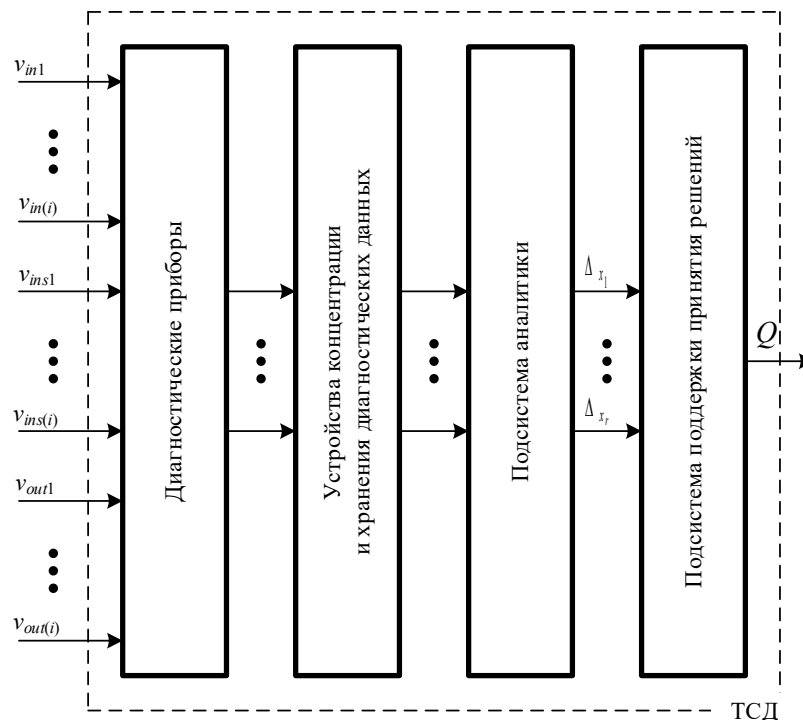


Рисунок 5.7. Структура системы технического диагностирования и мониторинга

Подмножество определяемых автоматически параметров обозначим через $V^* = \{v_t \mid t = \overline{1, k-1}\}$, а множество идентифицируемых событий – через $X^* \subset X$. Допустим, был зафиксирован случай нарушения работы рельсовой цепи, при этом на выходе генератора напряжение было в норме, напряжения на путевом фильтре и путевом реле – отсутствовали. Это может говорить о возможном дефекте путевого приёмника, нарушении в области путевой части оборудования и т. д.

На программном уровне для автоматизации такой оценки строится вопросник в виде графа, который представлен на рис. 5.8.

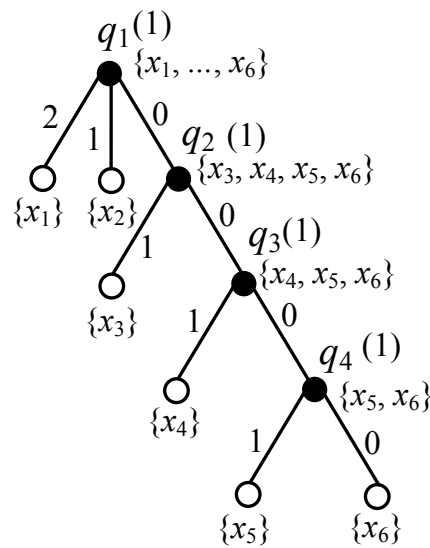


Рисунок 5.8. Вопросник для СППР при поиске дефектов в устройствах ТРЦ

Сформулируем вопросы и ответы на них так, как это представлено в табл. 5.1.

Таблица 5.1 Формулировки вопросов и ответов для вопросника ТРЦ

Вопрос, q_i	Ответ, x_i
q_1 – Напряжение на путевом приёмнике находится в пределах $0 \leq U_{пп} \leq U_{мин}$ или $U_{ост} \leq U_{пп} \leq U_{мин}$?	2) $0 \leq U_{пп} \leq U_{мин}$; 1) $U_{ост} \leq U_{пп} \leq U_{мин}$; 0) нет.
q_2 – Напряжение на путевом приемнике находится в пределах $U_{мин} \leq U_{пп} \leq U_{крит}$?	1) Да; 0) Нет.
q_3 – Напряжение на путевом приёмнике находится в пределах $U_{крит} \leq U_{пп} \leq U_{макс}$?	1) Да; 0) Нет.
q_4 – Напряжение на путевом приёмнике находится в пределах $U_{макс} \leq U_{пп} \leq \infty$?	1) Да; 0) Нет.

Для увеличения глубины и полноты диагностирования систему необходимо дооснастить: выбрать дополнительные контрольные точки, внести учёт историче-

ских и статистических данных (весах событий), использовать методы оптимизации, расщепления или склеивания вопросов для всего объекта диагностирования в целом. Все это влияет и на время идентификации события. Благодаря такой автоматизации анализа полученных данных от измерительных устройств случится переход от пороговой фиксации отдельных параметров к полной системе помощи принятия решения для обслуживающего персонала. С внедрением технологии нейросетей станет возможным и прогнозирование отказов, и система будет предлагать алгоритм действия персоналу для устранения возникшего предотказа или отказа. Проблема неопытности обслуживающего персонала также будет парирована. Такой подход повысит качество функционирования систем технического диагностирования и мониторинга.

Ещё одним немаловажным фактором эффективного функционирования систем СТДМ является получение «качественных» данных обо всех объектах диагностирования от всех участников технологического процесса. А пользователи СТДМ должен получать информацию об объектах, которые входят в зону их компетенций. Структурная схема взаимодействия представлена на рис. 5.9 [45].

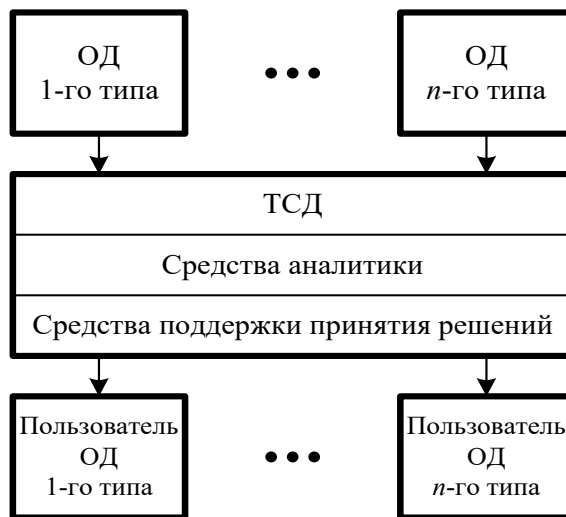


Рисунок 5.9. Источники диагностической информации и пользователи в системах мониторинга объектов железнодорожного транспорта

5.4. Прикладная теория вопросников устройств и систем железнодорожной автоматики и телемеханики

5.4.1. Классификация вопросников в технической диагностике

Ранее уже проводились исследования по построению оптимальных алгоритмов диагностирования для устройств автоматики и телемеханики. В работах [33, 39, 40, 46, 50, 52, 53, 81, 122, 123], приводятся оптимальные алгоритмы диагностирования, построенные на основе экспертной оценки и производства ручных проверок, использование которых подразумевается при организации систем обучения (например, АОС-ШЧ [27, 28]). Полученные алгоритмы учитывают только обобщённые данные о статистике работы устройств автоматики.

Определение 5.1. Статическим вопросником (Q_S) назовём такой вопросник, который имеет единожды заданные параметры числа вопросов, их оснований и цен, а также постоянные значения весов событий.

С помощью таких вопросников возможно проведение обучения персонала поиску отказов. Такой вопросник закладывается в программное обеспечение обучающих программ, как обобщённый для всех устройств автоматики одного типа. Для повышения качества функционирования СТДМ подобных алгоритмов недостаточно. Это следует из того, что устройства автоматики и телемеханики имеют индивидуальные свойства, а на момент написания диссертационного исследования, существующие системы мониторинга не учитывают для каждого объекта ни физические параметры, ни индивидуальные данные.

Первым этапом модернизации алгоритма диагностирования на основе теории вопросников для устройств автоматики и телемеханики является учёт изменений базовых параметров, таких как цена вопроса и вероятность появления события [127]. Эти параметры изменяются во времени на всех устройствах и при их изменении происходит изменение цены обхода вопросника, а при оптимизации вопросника возможно иное построение последовательности вопросов. Так как устройства ЖАТ имеют свойства индивидуальности, то для совершенствования

СТДМ необходимо строить алгоритмы диагностирования, которые будут учитывать все изменения параметров и на основе всех изменений строить и перестраивать вопросник так, чтобы каждый раз получать оптимальный.

Определение 5.2. Динамическим вопросником (Q_D) назовём такой вопросник, у которого во времени меняются параметры числа вопросов, их оснований и цен, а также значения весов событий.

В динамических вопросниках вероятности событий будут изменяться во времени из-за непрерывной эксплуатации, возможны периодические замены внутренних частей объекта диагностирования, что, в свою очередь, приводит к изменению вероятности отказов и предотказов в различных его частях. Помимо этого, могут меняться и цены вопросов, что в технической диагностике интерпретируется как время, потраченное на реализацию проверки. Здесь необходимо упомянуть о том, что устройства расположены на разном удалении от поста централизации и для производства ручных проверок это сильно влияет на цену вопроса.

На данном этапе развития СТДМ можно классифицировать динамические вопросники следующим способом [34, 127]:

Типовой динамический вопросник (Q_D^T) – данный вопросник перестраивается, основываясь на обобщённых данных по типам устройств. То есть один динамический вопросник будет строиться для всех устройств одного типа (стрелка, светофор и т. д.).

Индивидуальный динамический вопросник (Q_D^I) – формируется в программном обеспечении для каждого устройства автоматики с учётом его специфики и свойств.

В свою очередь, индивидуальные вопросники можно разделить ещё на два класса – это вопросники для действующих устройств (Q_D^{I0}) (вопросники, которые используют параметры устройств, которые измеряются на данном этапе развития систем мониторинга) и модернизированные (Q_D^{I1}) (вопросники, учитывающие дополнительные параметры за счёт добавления измерительных точек в систему).

Такие динамические вопросники интегрируются в программное обеспечение СТДМ, что позволяет синтезировать алгоритм диагностирования для каждого устройства индивидуально. Все вышеперечисленные алгоритмы оптимизируются в ПО автоматически с учётом всей необходимой информации об объекте. В работе [43], приводится пример оптимизации ручным способом, легко автоматизируемым для использования в программных средствах. Моделируются и перестраиваются вопросники в зависимости от того, где устройство находится, сколько по времени эксплуатируется, из каких его составных частей состоит, когда были заменены и так далее.

Сведём все вышесказанное в схему (рис. 5.10), показывающую виды вопросников, реализация которых возможна в ПО СТДМ.

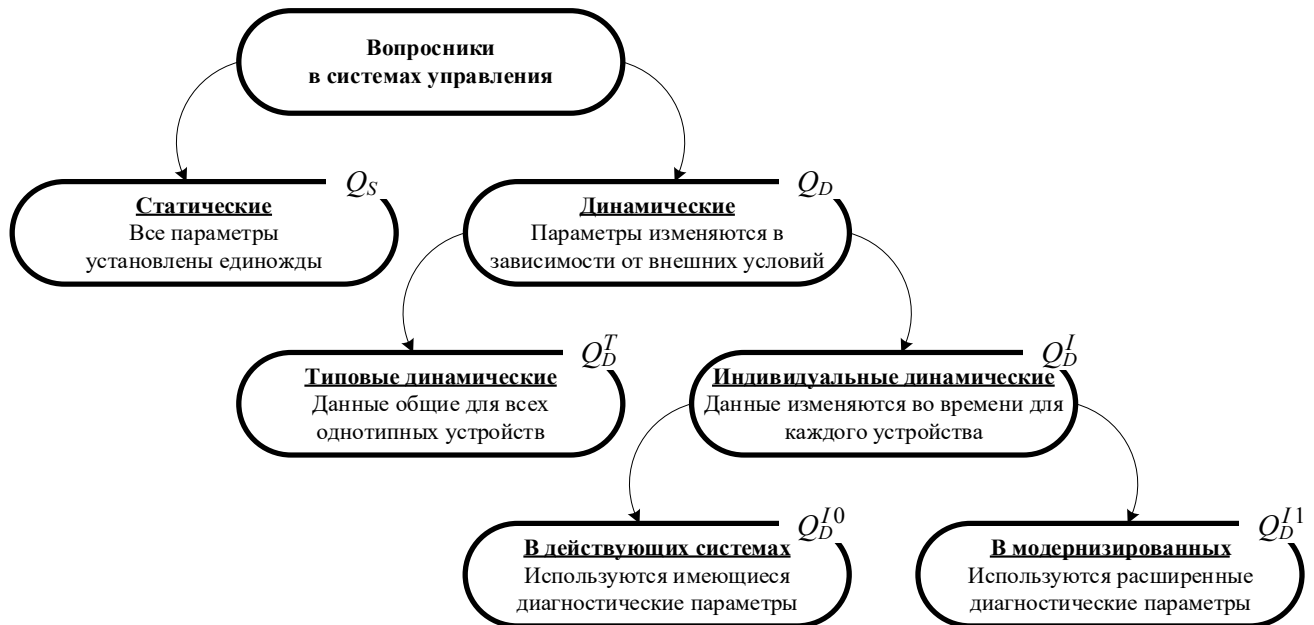


Рисунок 5.10. Качественная классификация вопросников в приложении к диагностированию устройств и систем ЖАТ

Необходимо осветить вопрос информационного снабжения для синтеза алгоритмов диагностирования. Во-первых, информацию по эксплуатации объекта диагностирования можно подгружать из систем ДЦ, ДК, СПД. Это позволит рассчитывать наработку на отказ каждого элемента объекта диагностирования. Во-вторых, информацию о трудозатратах на проверку можно подгружать из автоматизированных программ по обслуживанию. В таких программах производится

планирование и загрузка сотрудников, занятых обслуживанием. Там же имеется информация по проверкам и затратам на них. Дополнительно информация по замене оборудования или деталей объекта диагностирования может быть заполнена вручную или из тех же автоматизированных систем по планированию работ. Для синтеза динамических вопросников для диагностирования и мониторинга устройств автоматики и телемеханики информация имеется, и уже все готово для внедрения. Однако для обработки большого объёма данных может потребоваться модернизация технологии и использование технологии больших данных [160].

Рассмотрим на примерах построение алгоритмов диагностирования для типовых устройств железнодорожной автоматики и телемеханики, проанализируем технико-экономические аспекты и подробнее осветим применение теории вопросников для построения СППР [34, 127].

5.4.2. Особенности базовых устройств железнодорожной автоматики

Самыми распространёнными устройствами автоматики и телемеханики на железных дорогах являются стрелочные электроприводы (СЭП), рельсовые цепи (РЦ) и светофоры (Св) [78]. Все эти устройства эксплуатируются не только на сети железных дорог России, но и в метро, и на частных железных дорогах (заводы, предприятия и т. д.). От работы данных устройств напрямую зависит безопасность перевозочного процесса, по этой причине контроль технического состояния является ключевым мероприятием по снижению затрат на эксплуатацию железнодорожного комплекса. СТДМ в автоматическом режиме производят измерения некоторых параметров данных устройств. Рассмотрим эти параметры для каждого типа устройства автоматики. В качестве СЭП для анализа берётся тип СП-6, тип рельсовой цепи – тональная рельсовая цепь, светофор мачтовый входной.

Сведём в таблицу 5.2 параметры, которые необходимо измерять по требованию нормативных документов, параметры, которые на момент написания диссертационного исследования измеряются в автоматическом режиме, а также на основе проведённых исследований и экспертной оценки внесём параметры, автомати-

ческое измерение которых способствует получению более полной диагностической картины объектов диагностирования.

Учёт дополнительных параметров, представленных в таблице 5.2, таких как температура и влажность в СЭП, позволяет делать выводы о возможности индентации или коррозии контактов внутри СЭП. Температура и уровень масла в фрикционной муфте дают информацию по наличию масла и его вязкости. Все данные получают путём установки специализированных датчиков.

Вибрационные воздействия на шибер дают информацию по люфтам на стрелочном переводе и по плавности перевода стрелки. Эти параметры можно получить, установив на торец шибера акселерометр. Для ТРЦ дополнительные контрольные точки позволят более детально строить СППР персоналом, а также повышают точность поиска неисправности.

Для светофора выходное напряжение на сигнальном трансформаторе позволит в точности сказать о его исправности, не прибегая к дополнительным проверкам. Далее приведём список возможных ситуаций отказов и предотказов которые свойственны рассматриваемым объектам автоматики (таблица 5.3).

Все перечисленные предотказы и отказы сформированы на основе экспертной оценки и исторических данных по работе данных устройств.

Информация из таблиц 5.2 и 5.3 позволяет создавать алгоритмы диагностирования на основе теории вопросников. Первый этап реализации основан на экспертной оценке. Формулируются вопросы в той последовательности, в которой логично проводить проверки эксплуатационным персоналом. Далее при совершенствовании диагностического ПО возможна актуализация данных вопросников по критерию минимума цены обхода. На третьем этапе производится интеграция динамических вопросников в программные средства СТДМ для синтеза индивидуальных алгоритмов диагностирования. Приведём примеры таких алгоритмов диагностирования и опишем перспективы внедрения и модернизации. В реальных системах управления и контроля на железнодорожном транспорте можно разделить устройства на два подкласса – непрерывно функционирующие и функционирующие в определенные моменты времени при поступлении команды.

Таблица 5.2. Диагностические параметры базовых устройств автоматики

Диагностические параметры	Диагностические параметры, фиксируемые в СТДМ	Дополнительные диагностические параметры, которые необходимы
1	2	3
СЭП		
<ul style="list-style-type: none"> – U_p – рабочее напряжение на электродвигателе СЭП; – I_p – рабочий ток электродвигателя при переводе стрелки; – $R_{из}$ – сопротивление изоляции кабеля; – $t_{пер}$ – время перевода стрелки; – зазор между острием и рамным рельсом; – I_ϕ – ток электродвигателя при работе СЭП на фрикцию; – $U_{питК}$ – напряжение питания контрольной цепи. 	<ul style="list-style-type: none"> – U_p – рабочее напряжение на электродвигателе СЭП; – I_p – рабочий ток электродвигателя при переводе стрелки – $R_{из}$ – сопротивление изоляции кабеля; – $t_{пер}$ – время перевода стрелки; – I_ϕ – ток электродвигателя при работе СЭП на фрикцию; – $U_{питК}$ – напряжение питания контрольной цепи. 	<ul style="list-style-type: none"> – Температура и влажность внутри СЭП; – Уровень масла во фрикционной муфте; – Температура масла во фрикционной муфте; – вибрационные воздействия на шиббер; – зазор между острием и рамным рельсом.
ТРЦ		
<ul style="list-style-type: none"> – $U_{питПГ}$ – напряжение питания генератора; – $U_{выхПГ}$ – выходное напряжение генератора; – $f_{выхПФ}$ – частота тока на выходе путевого фильтра; – $U_{питПП}$ – напряжение питания приёмника; – $f_{вхПП}$ – частота тока на входе генератора; – $R_{Бал}$ – сопротивление балласта; – $R_{из}$ – сопротивление изоляции жил кабеля. 	<ul style="list-style-type: none"> – $U_{выхПГ}$ – выходное напряжение генератора; – $U_{питПП}$ – напряжение питания приёмника; – $R_{из}$ – сопротивление изоляции жил кабеля. 	<ul style="list-style-type: none"> – $f_{выхПФ}$ – частота тока на выходе путевого фильтра; – $f_{вхПП}$ – частота тока на входе генератора; – $U_{питПГ}$ – напряжение питания генератора; – $U_{питПП}$ – напряжение питания путевого приёмника; – $R_{Бал}$ – сопротивление балласта.
Светофор		
<ul style="list-style-type: none"> – U_l – напряжение на лампе светофора; – $U_{питСТ}$ – напряжение питания сигнального трансформатора; – $U_{выхСТ}$ – выходное напряжение сигнального трансформатора на лампу; – $R_{из}$ – сопротивление изоляции жил кабеля. 	<ul style="list-style-type: none"> – U_l – напряжение на лампе светофора; – $U_{питСТ}$ – напряжение питания сигнального трансформатора; – $R_{из}$ – сопротивление изоляции жил кабеля. 	<ul style="list-style-type: none"> – $U_{выхСТ}$ – выходное напряжение сигнального трансформатора на лампу; – угол наклона мачты; – вибрационные воздействия; – температура в трансформаторном ящике.

В остальное время они находятся в статическом режиме. К непрерывно функционирующим можно отнести такие устройства как, контроль занятости рельсовой линии – рельсовые цепи. Примером устройства, функционирующего в определенные моменты времени, может быть стрелочный электропривод, контрольная цепь которого функционирует всегда для того, чтобы гарантировать наличие контроля крайнего положения стрелки.

Таблица 5.3. Типовые отказы и предотказы базовых устройств автоматики

Предотказы	Отказы
1	2
СЭП	
<ul style="list-style-type: none"> – увеличение времени перевода стрелки; – посторонние звуки в двигателе; – посторонние звуки в фрикционной муфте; – искрение при замыкании/размыкании ножевых контактов автопереключателя; – нарушение плавности перевода; – неработающий обогрев; – раскрепление монтажа; – раскрепление внутренних частей СЭП; – наличие влаги в СЭП, – завышенное/заниженное значение питающего напряжения; – завышенное/заниженное значение рабочего тока при переводе стрелки; – понижение сопротивления изоляции кабеля; – завышение остряков над рамным рельсом; – наличие ненормативных люфтов на стрелке; – затянутые корни остряков. 	<p>Автопереключатель:</p> <ul style="list-style-type: none"> – x_1 разрегулировка контактов; – x_2 излом контактных колодок; – x_3 излом ножевых колодок; – x_4 излом рычагов; – x_5 излом пружин автопереключателя; – x_6 излом контактной рессорной пружины; – x_7 индеевание контактов; <p>Фрикционное сцепление:</p> <ul style="list-style-type: none"> – x_8 разрегулировка; <p>Контрольные линейки:</p> <ul style="list-style-type: none"> – x_9 излом; – x_{10} ослабление крепления; <p>Шибер:</p> <ul style="list-style-type: none"> – x_{11} попадание постороннего предмета; – x_{12} ослабление крепления; <p>Монтаж:</p> <ul style="list-style-type: none"> – x_{13} обрыв; – x_{14} нарушение изоляции; – x_{15} неисправность клеммной колодки; <p>Курбельный контакт:</p> <ul style="list-style-type: none"> – x_{16} Неисправность курбельного контакта; <p>Электродвигатель DC:</p> <ul style="list-style-type: none"> – x_{17} обрыв обмотки статора; – x_{18} обрыв обмотки якоря; – x_{19} неисправность щеточного узла; – x_{20} понижение изоляции; – x_{21} неисправность коллектора; – x_{22} обрыв внутреннего монтажа; <p>Редуктор:</p> <ul style="list-style-type: none"> – x_{23} неисправность редуктора.

1	2
ТРС	
<p>Предотказы ПГ: – медленное падение напряжения на выходе ПГ;</p> <p>Предотказы ПП: – пульсация напряжения;</p> <p>Предотказы ПФ; – увеличение напряжения на выходе ПГ при этом снижении напряжения до минимума на ПП;</p> <p>Предотказы в РЦ; – рост переходных сопротивлений в тросовых и стыковых соединителях; – асимметрия тягового тока; – рост переходных сопротивлений в путевых коробках и дросселях; – понижение сопротивления балласта; – завышенная асимметрия тягового тока; – короткие замыкания в рельсовых цепях.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – x_1 – неисправность ПГ; – x_2 – сторонняя подпитка ПП; – x_3 – плохой шунт; – x_4 – низкое сопротивление балласта; – x_5 – кз ПП; – x_6 – отсутствие питающего полюса ПГ; – x_7 – неисправность ПФ; – x_8 – обрыв между ПП и ПФ; – x_9 – рост переходных сопротивлений и обрывы в тросовых и стыковых соединителях.
Светофор	
<ul style="list-style-type: none"> – переключение на менее разрешающее показание; – плохой контакт в ламподержателе; – загрязнение линзы; – включение резервной нити лампы. 	<ul style="list-style-type: none"> – x_1 – вышел из строя СТ; – x_2 – обрыв жилы коммутации; – x_3 – плохой контакт в ламподержателе; – x_4 – повреждение коммутации; – x_5 – неисправна лампа; – x_6 – понижение изоляции кабеля; – x_7 – нет питания со релейного шкафа.

Такие части стрелочного перевода как двигатель, фрикционная муфта, редуктор и прочие находятся под нагрузкой только во время перевода. Таким образом, нет необходимости проверять сразу все компоненты стрелочного привода.

При построении алгоритмов диагностирования, основанных на математическом аппарате теории вопросников, стремятся сократить время, затрачиваемое на поиск неисправности. Для таких систем, часть которых постоянно функционирует, а часть работает определённое время можно применить особый вид вопросника – динамический.

5.4.3. Синтез динамических вопросников для стрелочных электроприводов

Постановка задачи: имеется некий набор устройств железнодорожной автоматики и телемеханики (далее в тексте – объект диагностирования или объект) над которыми проводится процедуры диагностирования. Каждый объект характеризуется своим набором рабочих параметров, по которым можно определить состояние, в котором он находится на момент выполнения процедуры диагностирования. У каждого объекта имеется набор состояний, в которых они могут находиться, при этом одновременно объект может находиться только в одном состоянии. Под техническим состоянием объекта диагностирования в данной диссертации понимаются состояния, характеризующие совокупностью установленных в документации параметров, описывающих его способность выполнять требуемые функции в рассматриваемых условиях. В представленной работе речь пойдёт о предотказных и отказных состояниях объекта. Под предотказным состоянием понимается состояние объекта, характеризующее повышенным риском его отказа.

Установим следующее ограничение: одновременно в объекте возможно наличие только одной неисправности или одного предотказа. Структура объекта рассматривается как блочная. Если идёт речь об отказном состоянии объекта, то во всем объекте, на сколько бы внутренних функциональных блоков он не был поделён, подразумевается, что существует одновременно только один отказ во всём объекте или в одном из функциональных блоков объекта. Можно повысить глубину диагностирования, но для этого необходимо внедрение новых точек мониторинга и технические средства для получения диагностической информации. Для проведения процедуры диагностирования у каждого объекта имеется карта технологического обслуживания, в которой собраны проверки необходимые для различения того или иного отказавшего блока, указана последовательность выполнения проверок. Каждая проверка характеризуется затратами времени на их выполнение. В представленной работе не берётся в рассмотрение что выполнение проверок возможно с привлечением нескольких человек, что в свою очередь делит трудозатра-

ты на выполнение проверки или всей процедуры диагностирования. По причине того, что возникновение отказа возможно в любом функциональном блоке объекта, вся процедура диагностирования требует затрат времени пропорционально количеству прodelываемых проверок на объекте. От этого зависит то, в течение какого времени будет обнаружен отказ и приняты меры по его устранению и восстановлению работоспособного состояния объекта. Для железнодорожного транспорта время восстановления работоспособного состояния объекта экономит деньги за счёт сокращения времени простоя железнодорожного транспорта по причине возникновения отказа на объекте железнодорожной автоматики, а если удалось обнаружить предотказ, до того, как он перейдёт в отказ, то и вовсе удастся предупредить ситуации нарушения движения поездов. Таким образом возникает задача построения оптимальной последовательности выполнения проверок на объекте диагностирования по критерию минимума затрат времени на обнаружение возникшего отказа, с учётом возможных измеряемых параметров и дополнительных данных из автоматизированных систем железнодорожной автоматики.

Входными данными являются: конечное множество возможных проверок на объекте, конечное множество отказов в объекте которые переводят его в предотказное или отказное состояние, время реализации каждой отдельной проверки, условная вероятность возникновения конкретного отказа при возникновении предотказного или отказного состояния объекта.

Выходные данные: последовательность выполнения проверок на устройстве которая требует минимум затрат времени для обнаружения неисправности в объекте.

Для решения данной задачи предлагается использование математического аппарата теории вопросников. Данный математический аппарат позволяет решать задачу поиска и учесть такие параметры как цена реализации проверки и вероятность возникновения того или иного отказа. Используя предложенный математический аппарат можно реализовать систему поддержки принятия решения для обслуживающего персонала и в автоматическом режиме, в программной среде си-

стем диагностики и мониторинга технических систем, реализовать обработку поступающей от измерительного оборудования информации о параметрах объекта.

Ожидаемый эффект: сокращение времени на поиск отказа в объекте, сокращение воздействия человеческого фактора при анализе измеренных параметров объекта диагностирования, сокращение времени на восстановление работоспособности объекта за счёт сокращения времени на поиск отказа, полная автоматизация анализа поступающей информации с измерительного оборудования, автоматизация обнаружения отказа с указанием точного местоположения отказа, тем самым сокращение участия человека в расследовании отказа, сокращение времени простоя поездов при случившемся отказе.

Необходимо отдельно отметить, что задача данного диссертационного исследования показать возможность использования математического аппарата теории вопросников для решения прикладных задач синтеза алгоритмов диагностирования для устройств железнодорожной автоматики и телемеханики и в представленной диссертационной работе ниже синтезированы алгоритмы диагностирования с применением рассмотренных в диссертации методов оптимизации.

Простым примером для построения динамического вопросника является стрелочный привод. Представим блочную схему СЭП на рис. 5.11.

В схеме управления стрелочным приводом присутствуют рабочая и контрольная цепи. В соответствии с этим выделяются рабочий и контрольный режимы работы стрелочного электропривода. В то время, когда привод находится в рабочем режиме, осуществляется перевод остряков. В рабочем режиме под нагрузкой находятся все внутренние функциональные блоки стрелочного электропривода. Рассмотрим далее синтез алгоритма диагностирования для данного устройства. Данный вид устройств имеет некоторое число отказов и находится в эксплуатации не один десяток лет, что позволило собрать информацию о вероятностях возникновения каждого отказа [40]. В данном разделе проведём теоретический эксперимент.

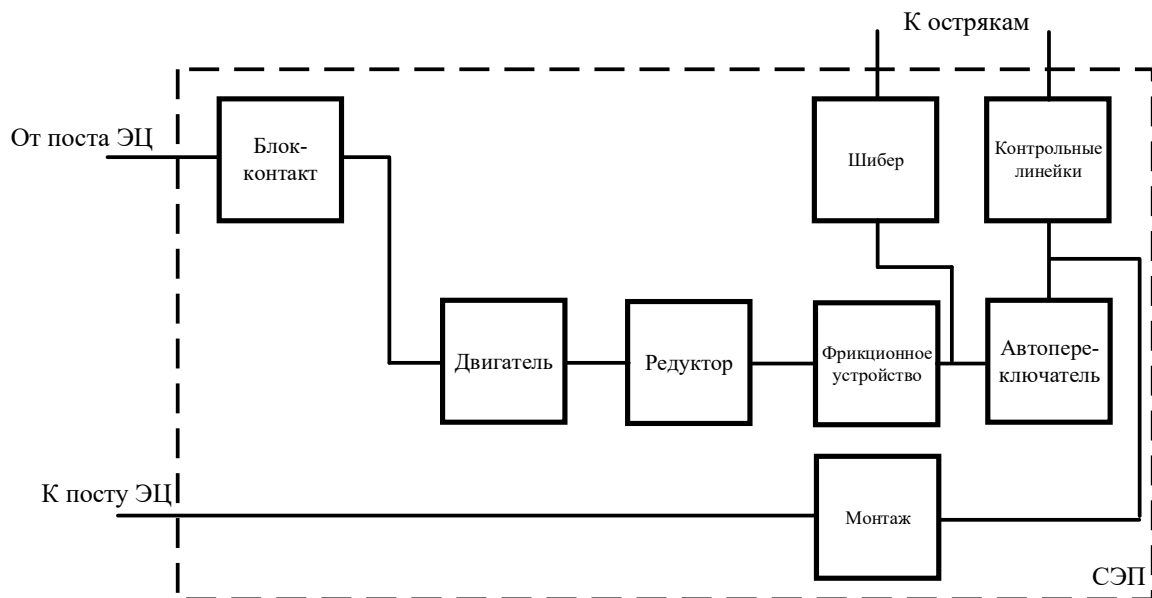


Рисунок 5.11. Блочная схема работы СЭП

Поставим задачу построения алгоритма диагностирования стрелочного электропривода без использования методов оптимизации вопросников: имеются два стрелочных электропривода одной марки (СП-6) с разными эксплуатационными и физическими характеристиками, необходимо синтезировать алгоритмы диагностирования на основе математического аппарата теории вопросников и показать на примере разницу между объектами диагностирования. Представленные СЭП, как и в реальных условиях, имеют различные условия эксплуатации, что, в свою очередь, влияет на устанавливаемые вероятности отказов и на время устранения отказа. Данные по числу отказов были взяты из статьи [40] в которой указано, что условные вероятности возникновения отказов в СЭП были получены по информации из автоматизированной системы учёта отказов АСУ-Ш-2. Установим исходные данные эксперимента:

Имеется два стрелочных привода СЭП1 и СЭП2, у которых следующие параметры:

СЭП 1: (тип: СП-6М)

- место установки: горловина станции, стрелка с маркой крестовина 1/9, расстояние от стрелки до поста электрической централизации (ЭЦ) 750 метров;

- нормальное положение стрелки: прямо с 1-го главного пути на участок удаления со станции;
- переведённое положение: с 3-го пути на участок удаления со станции;
- в среднем число переводов за сутки: 120;
- число поездов в сутки: 25 пассажирских, 10 грузовых, 15 пригородных, 25 маневровых.
- двигатель был заменён 23 дня назад по причине периодической замены;
- срок установки СЭП 12 июня 2017 года – 770 суток как находится в работе;
- последнее техническое обслуживание (ТО) производилось 4 дня назад.

Особенности работы СЭП1:

- располагается стрелка на болотистой местности, плохой водоотвод;
- 2 дня назад работники ПЧ производили затяжку корней остряков и затянули болты более нормативных значений.

СЭП 2: (тип: СП-6М)

- место установки: стрелка на технологических путях завода удобрений, стрелка с маркой крестовина 1/6, расстояние от стрелки до поста ЭЦ 150 метров;
- нормальное положение стрелки: прямо по технологическому пути;
- переведение положение: ведёт в тупик;
- в среднем число переводов за сутки: 1;
- число поездов в сутки: 5 грузовых, 15 маневровых.
- двигатель был заменён 62 дня назад по причине периодической замены;
- срок установки СЭП 28 апрель 2012 года – 2650 суток как находится в работе;
- последнее ТО производилось 2 дня назад.

Особенности работы СЭП2:

- по стрелке в основном перевозят вагоны с удобрениями и производят манёвры;

– стрелка переводится редко.

В связи с особенностями СЭП распределение отказов за 5 прошлых лет выглядит следующим образом (табл. 5.4). В таблице убраны численные данные, включающие в себя абсолютные величины («количество отказов»), однако подсчитаны относительные величины числа отказов от общего их числа, что принято за вероятность отказа [40].

Данные вероятности отказов были получены следующим образом:

- 1) за основные данные по отказам в СЭП были взяты данные из программы АСУ-Ш-2;
- 2) эти данные были приняты за усреднённые значения по всем СЭП в ОАО «РЖД»;
- 3) основываясь на известных данных об установке и работе СЭП1 и СЭП2, делаются выводы об увеличении вероятности некоторых отказов и в соответствии с этим уменьшении остальных вероятностей отказов (для примера: СЭП1 установлен в болотистом месте, что, в свою очередь, говорит о повышенной вероятности индевения контактов или понижении изоляции в кабеле; известно, что корни остряков затянуты ту же необходимого, в связи с чем можно сделать вывод об увеличении вероятности возникновения отказа во фрикционной муфте, шибере или деталях автопереключателя и т. д.).

По такому же принципу производился расчёт вероятностей для вопросников в контрольном режиме. Помимо этого, из-за неполного множества отказов, вероятности «пересчитаны» с учётом того, что $\sum_{i=1}^n p_i = 1$. Итак, для примера, суммарная вероятность возникновения неисправности в таблице 5.8 – 0,672. Теперь необходимо высчитать коэффициент k из формулы (5.1) и умножить этот коэффициент на значение каждой вероятности события.

$$kp(x_1) + kp(x_2) + \dots + kp(x_{15}) + kp(x_{16}) = 1. \quad (5.1)$$

$$k \approx 1,48.$$

Таблица 5.4. Типовые отказы СЭП

Отказ	Вероятность отказа	
	СЭП1	СЭП2
Автопереключатель		
x_1 – разрегулировка контактов	0,310	0,320
x_2 – излом контактных колодок	0,028	0,033
x_3 – излом ножевых колодок	0,015	0,015
x_4 – излом рычагов	0,001	0,001
x_5 – излом пружин автопереключателя	0,003	0,003
x_6 – излом контактной рессорной пружины	0,007	0,007
x_7 – индеевание контактов	0,080	0,050
Фрикционное сцепление		
x_8 – разрегулировка	0,090	0,070
Контрольные линейки		
x_9 – излом	0,006	0,006
x_{10} – ослабление крепления	0,004	0,004
Шибер		
x_{11} – попадание постороннего предмета	0,001	0,001
x_{12} – ослабление крепления детали	0,001	0,001
Монтаж		
x_{13} – обрыв	0,052	0,072
x_{14} – нарушение изоляции	0,003	0,003
x_{15} – неисправность клеммной колодки	0,010	0,004
Курбельный контакт		
x_{16} – неисправность курбельного контакта	0,156	0,176
Электродвигатель постоянного тока		
x_{17} – обрыв обмотки статора	0,012	0,009
x_{18} – обрыв обмотки якоря	0,035	0,055
x_{19} – неисправность щёточного узла	0,090	0,083
x_{20} – понижение изоляции	0,017	0,017
x_{21} – неисправность коллектора	0,050	0,041
x_{22} – обрыв внутреннего монтажа	0,011	0,011
Редуктор		
x_{23} – неисправность редуктора	0,018	0,018
$\sum x_{i_{сэпj}} =$	1	1

В таблице 5.8 даны результаты пересчёта вероятностей.

Сформулируем вопросы (проверки) для каждого режима работы СЭП (таблица 5.5, 5.7) и сформируем анкету вопросника (таблица 5.6, 5.8) (цены вопросов варьируются в соответствии с проделываемой проверкой и дальностью расположения СЭП):

СЭП1: рабочий режим.

Таблица 5.5. Вопросы и ответ для вопросника СЭП

Вопрос, q_i	Ответ, x_i
q_0 – Каково показание амперметра?	2) Сначала стрелка амперметра делает бросок до 5А, а в течении перевода показание 2А; 1) Сначала стрелка амперметра делает бросок, а в течении перевода стрелки значение тока перевода значительно меньше 2А; 0) Стрелка неподвижна;
q_1 – Обнаруживается ли неисправность стрелочного электропривода после визуального осмотра всех частей автопереключателя и контрольных линеек на наличие излома, а также обнаружена ли неисправность шибера типа «попадание постороннего предмета»?	1) Да; 0) Нет.
q_2 – Обнаруживается ли неисправность привода после механической проверки следующих устройств: ослабление крепление контрольных линеек или шибера, неисправность редуктора?	1) Да; 0) Нет.
q_3 – В норме ли сопротивление изоляции монтажа?	1) Да; 0) Нет.
q_4 – Обнаруживается ли неисправность привода после визуального осмотра курбельного контакта?	1) Да; 0) Нет.
q_5 – Обнаруживается ли неисправность при измерении в электродвигателе?	1) Да; 0) Нет.

Таблица 5.6. СЭП1: рабочий режим – анкета вопросника

q_i	$c(q_i)$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	
q_0	1	2	2	2	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2/1	2/1	2/1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
q_1	23	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
q_2	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
q_3	40	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
q_4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
q_5	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$p(x_i)$		0,310	0,028	0,015	0,001	0,003	0,007	0,080	0,090	0,006	0,004	0,001	0,001	0,052	0,003	0,010	0,156	0,012	0,035	0,090	0,017	0,050	0,011	0,018	

По полученной анкете (табл. 5.6) построим вопросник для рабочего режима СЭП1:

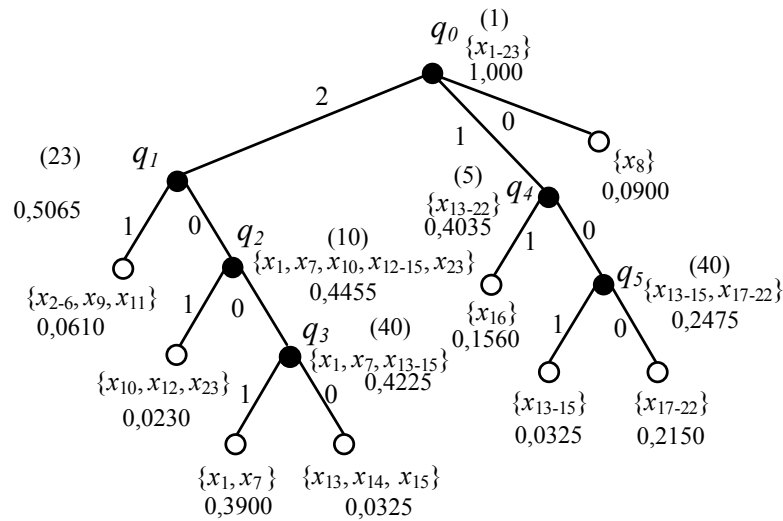


Рисунок 5.9. Вопросник для рабочего режима СЭП1

Найдём цену обхода для вопросника на рис. 5.9:

$$C_{\text{СЭП1,pp}} = 1,00 \cdot 1,00 + 40,00 \cdot 0,422 + 10,00 \cdot 0,455 + 23,00 \cdot 0,506 + \\ + 40,00 \cdot 0,247 + 5,00 \cdot 0,403 = 45,960.$$

Теперь проанализируем работу СЭП1 в контрольном режиме. В данном режиме работы привод не производит никакой работы, кроме осуществления контроля положения стрелки. Соответственно работают не все узлы устройства. Проанализируем оставшиеся узлы, сформулируем вопросы (табл. 5.7), составим для них анкету неисправностей (табл. 5.8).

СЭП1: контрольный режим:

Таблица 5.7. Вопросы и ответы для вопросника СЭП1 в контрольном режиме

Вопрос, q_i	Ответ, x_i
q_0 – Отказ устройства произошёл на посту ЭЦ? (Время на проверку 2 мин.)?	1) Да; 0) Нет.
q_1 – Обнаруживается ли неисправность после осмотра всех частей автопереключателя и контрольных линеек. (Время на проверку 20 мин.)	1) Да; 0) Нет.
q_2 – Обнаруживается ли неисправность привода после механической проверки, ослабление крепление контрольных линеек? (Время на проверку 5 мин.)	1) Да; 0) Нет.
q_3 – Обнаруживается ли отказ в устройстве при измерении сопротивления изоляции и токов в монтаже контрольной цепи? (Время на проверку 1 мин.)	1) Да; 0) Нет.

Таблица 5.8. СЭП1: контрольный режим – анкета вопросника

q_i	$c(q_i)$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_9	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}
q_0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
q_1	20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1
q_2	5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
q_3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
$p(x_i)$		0,4580	0,0412	0,0220	0,0014	0,0056	0,0159	0,1186	0,0088	0,0014	0,0769	0,0044	0,0148	0,2308

Динамический вопросник для контрольного режима СЭП1 представлен на рис. 5.10.

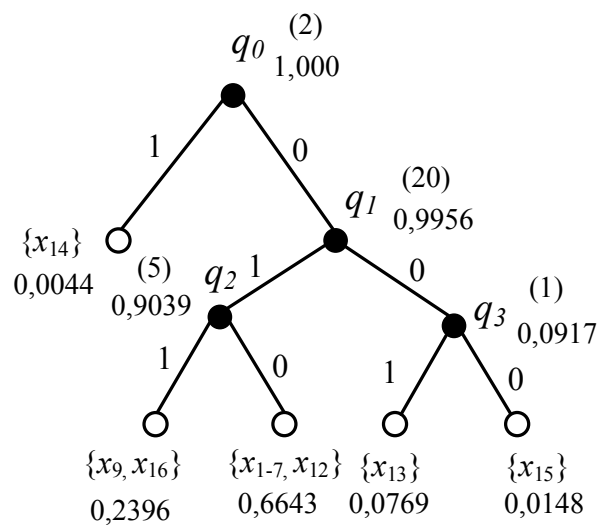


Рисунок 5.10. Вопросник для контрольного режима СЭП1

Определим цену обхода вопросника представленного на рис. 5.10:

$$C_{\text{СЭП1}_{\text{кр}}} = 2,00 \cdot 1,00 + 5,00 \cdot 0,90 + 1,00 \cdot 0,09 + 20,00 \cdot 0,99 = 26,52.$$

Анализируя полученные вопросники и их цены обхода, можно сделать вывод, что динамические вопросники дают положительный эффект при диагностировании сложных объектов, которые функционируют в различных режимах.

Далее произведём те же самые действия и получим динамический вопросник для СЭП2. Составим анкеты вопросников (таблица 5.9, 5.10) и по полученным анкетам построим вопросники (таблица 5.11, 5.12).

Таблица 5.9. СЭП2: рабочий режим – анкета вопросника

q_i	$c(q_i)$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	
q_0	1	2	2	2	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2/1	2/1	2/1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
q_1	23	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
q_2	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
q_3	40	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
q_4	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
q_5	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$p(x_i)$		0,320	0,033	0,015	0,001	0,003	0,007	0,050	0,070	0,006	0,004	0,001	0,001	0,072	0,003	0,004	0,176	0,009	0,055	0,083	0,017	0,041	0,011	0,018	

Динамический вопросник для рабочего режима СЭП2 представлен на рис.

5.11.

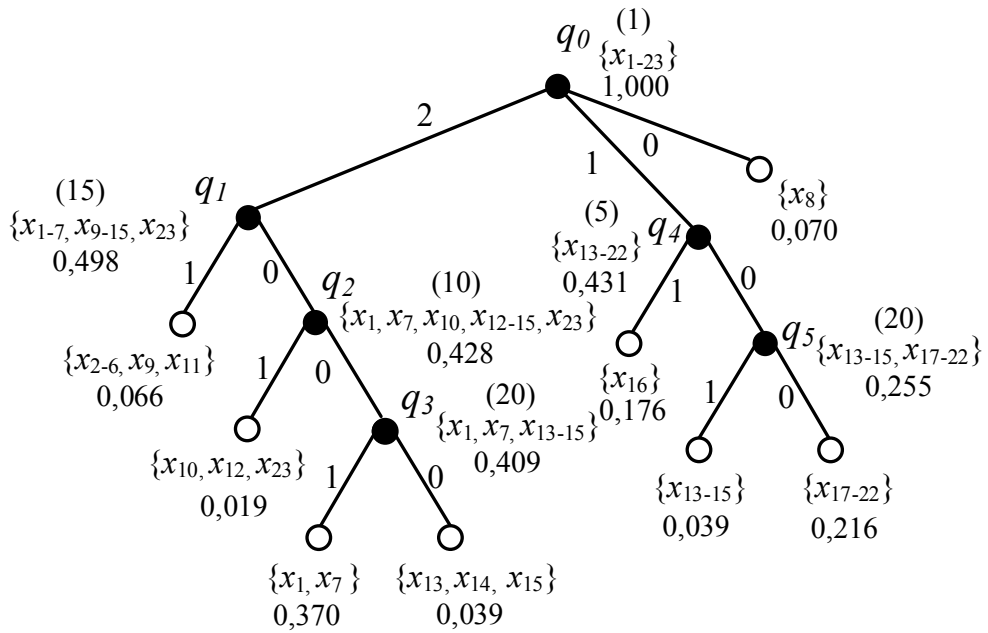


Рисунок 5.11. Вопросник для рабочего режима СЭП2

Найдём цену обхода для вопросника на рис. 5.11:

$$C_{\text{СЭП2,pp}} = 1,00 \cdot 1,00 + 20,00 \cdot 0,41 + 10,00 \cdot 0,43 + 15,00 \cdot 0,49 + \\ + 20,00 \cdot 0,26 + 5,00 \cdot 0,43 = 28,19.$$

Таблица 5.10. СЭП2: контрольный режим – анкета вопросника

q_i	$c(q_i)$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_9	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}
q_0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
q_1	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1
q_2	5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
q_3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
$p(x_i)$		0,465	0,049	0,023	0,0014	0,0043	0,01	0,076	0,0087	0,0014	0,104	0,005	0,0058	0,2464

Динамический вопросник для контрольного режима СЭП2 представлен на рис. 5.12.

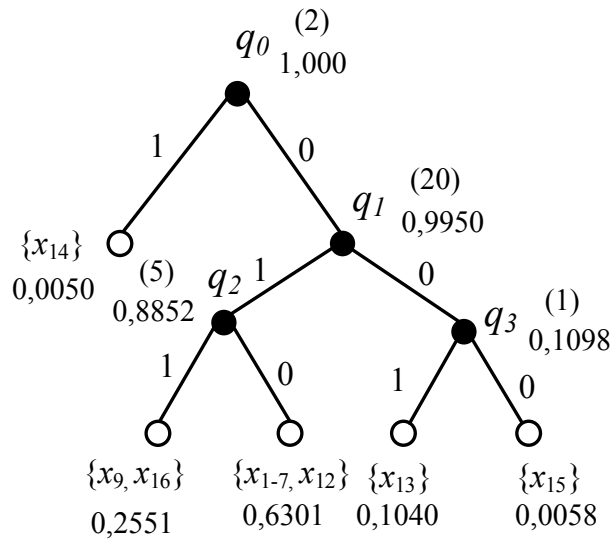


Рисунок 5.12. Вопросник для контрольного режима СЭП2

Найдём цену обхода для вопросника на рис. 5.12:

$$C_{\text{СЭП2}_{\text{кр}}} = 2,00 \cdot 1 + 5,00 \cdot 0,89 + 1,00 \cdot 0,11 + 20,00 \cdot 0,99 = 26,44.$$

Подобные вопросники можно строить для различных объектов диагностирования, работающих в различных режимах. Как оговаривалось ранее, построение оптимального вопросника зависит от значений вероятностей возникновения событий и от цен вопросов. Подобный эксперимент с указанием подробной картины эксплуатации и особенностей каждого электропривода позволяет наглядно показать, что все устройства критического действия уникальны, и оптимальный алгоритм диагностирования для одного устройства не обязательно будет оптимальным для такого же однотипного устройства, но эксплуатируемого в иных условиях. В данном примере приведены алгоритмы диагностирования, основанные на экспертной оценке и уже на данных примерах видно, как разнится время на реализацию алгоритма в зависимости от особенностей объектов мониторинга.

5.4.4. Примеры алгоритмов диагностирования базовых устройств железнодорожной автоматики и телемеханики

Приведём примеры вопросников для технического диагностирования устройств ЖАТ в таблице 5.11 с указанием проверок и затраченного времени на них. Далее в таблице 5.12 приведём подробную трактовку вопросов и параметров для вопросников из таблицы 5.11.

Представим диагностические модели для основных напольных устройств железнодорожной автоматики и дадим краткое описание (рис. 5.13–5.15). На моделях белым и серым цветом обозначена работа внутренних частей в том или ином режиме. Для примера на рис. 5.13 изображена диагностическая модель стрелочного электропривода марки СП-6. Привод имеет два режима работы: перевода и контроля. При работе стрелочного привода в режиме перевода задействованы все составные части – это показано белым цветом. При режиме контроля задействованы блоки серого цвета. На модели показаны: y_1 – блок-контакт; y_2 – электродвигатель; y_3 – редуктор; y_4 – фрикционное устройство; y_5 – автопереключатель; y_6 – контрольные линейки; y_7 – шиббер; y_8 – монтаж.

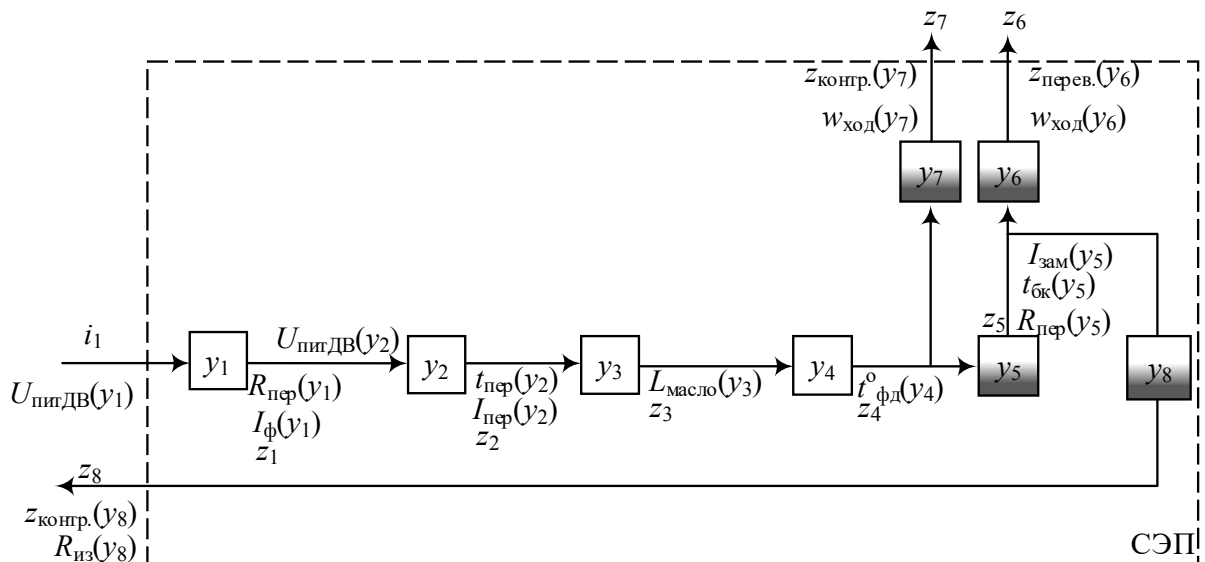


Рисунок 5.13. Диагностическая модель стрелочного электропривода

На рис. 5.14 изображена диагностическая модель тональной рельсовой цепи которая содержит: y_1 – путевого генератора; y_2 – путевого фильтра; y_3 – путевого трансформатора питающего конца; y_4 – путевой переключатель питающего конца; y_5 – рельсовая линия; y_6 – путевой переключатель приёмного конца; y_7 – путевого трансформатора приёмного конца; y_8 – путевого приёмника; y_9 – путевого реле.

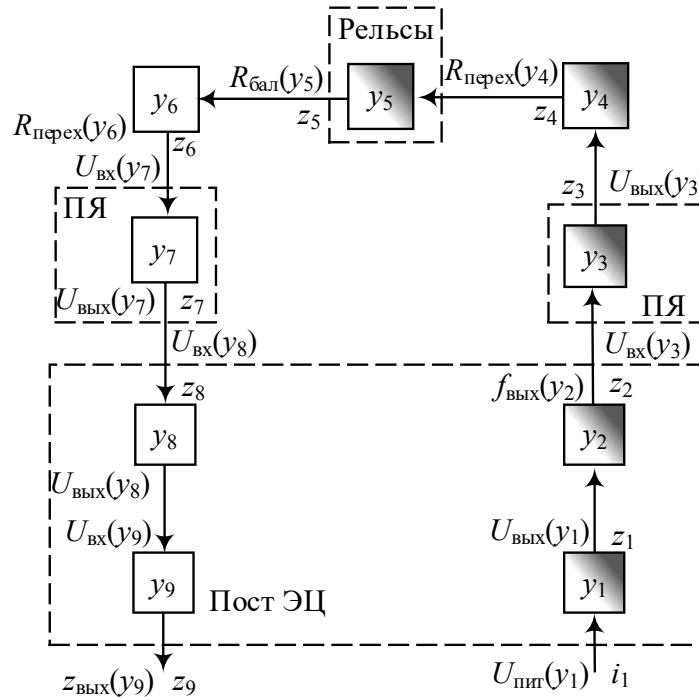


Рисунок 5.14. Диагностическая модель тональной рельсовой цепи

На рис. 5.15 изображена диагностическая модель входного светофора которая содержит: $y_1, y_5, y_9, y_{13}, y_{17}$ – сигнальные трансформаторы (на схеме – на каждое сигнальное показание по одному, для двухнитевых ламп – по два); $y_2, y_6, y_{10}, y_{14}, y_{18}$ – монтаж; $y_3, y_7, y_{11}, y_{15}, y_{19}$ – ламподержатель; $y_4, y_8, y_{12}, y_{16}, y_{20}$ – лампы светофора (соответственно лампы жёлтого верхнего огня, зелёного, красного, жёлтого нижнего огня и белого огня).

Анализируя подобные диагностические модели, параметры устройств и их режимы работы представляется возможным строить алгоритмы диагностирования на базе математического аппарата теории вопросников. Каждый вид вопросника полезен для различных ситуаций.

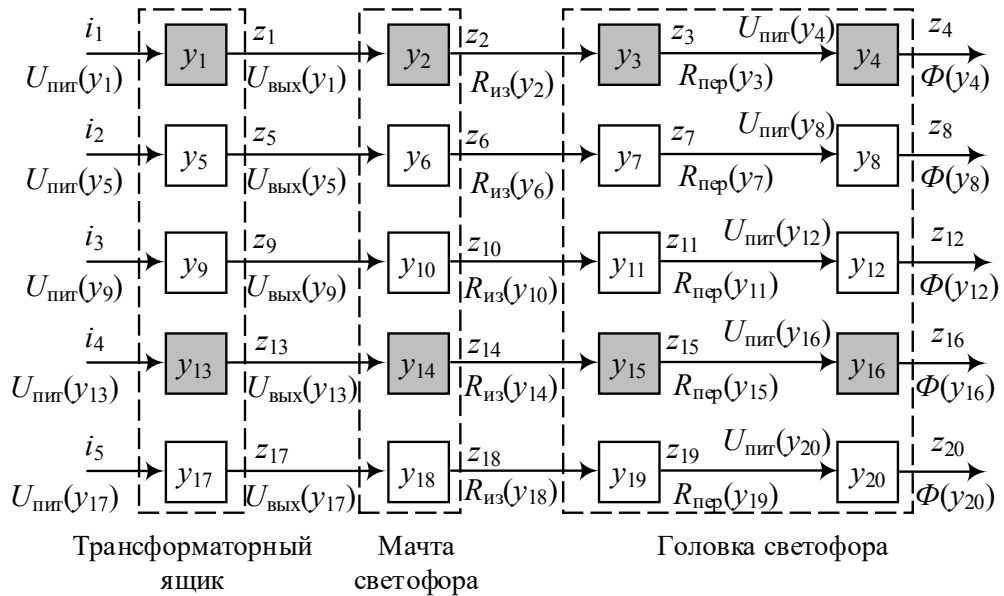
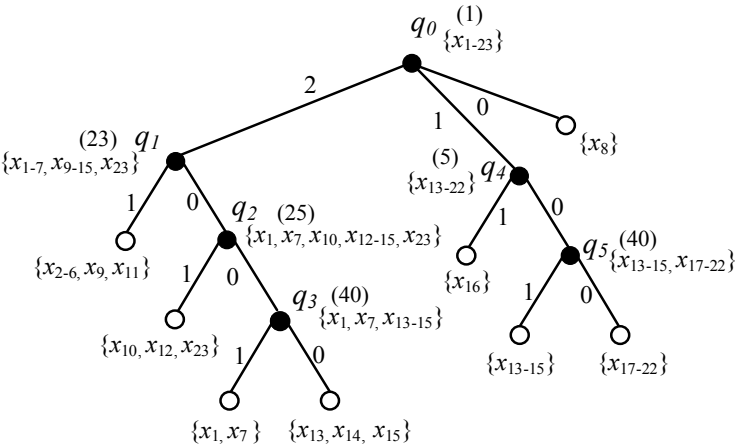
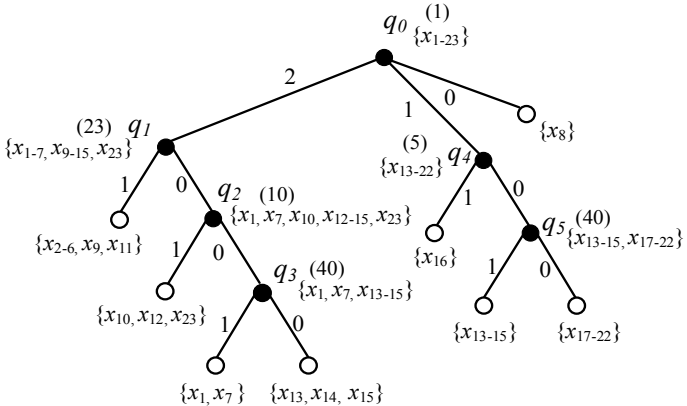
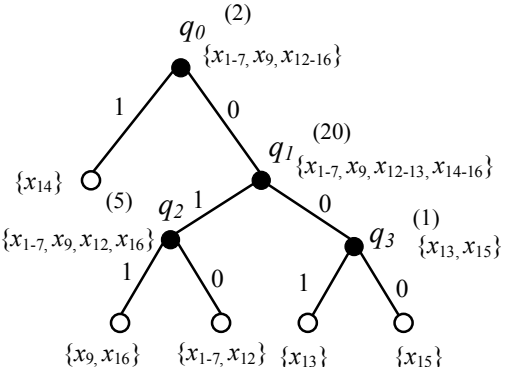


Рисунок 5.15. Диагностическая модель входного светофора

Для достижения цели совершенствования алгоритмического обеспечения СТДМ ЖАТ служат динамические вопросники. Построение динамических вопросников позволяет экономить время за счёт уменьшения средней цены обхода и позволяет за меньшее время предоставлять результат по локализации неисправностей.

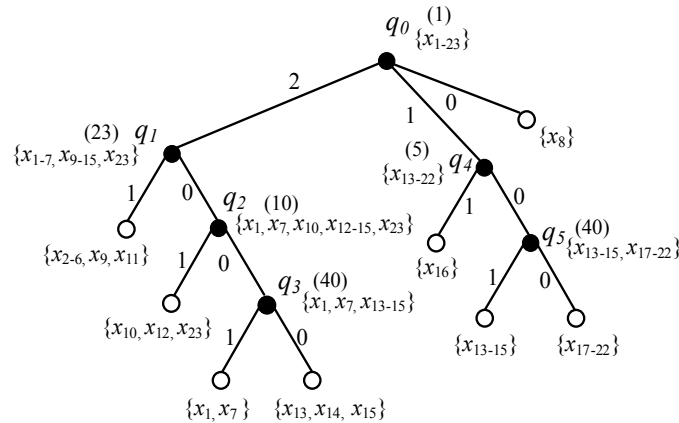
Для интеграции математического аппарата теории вопросников в программное обеспечение СТДМ необходимо написание программного кода на выбранном языке программирования. В программном коде закладываются правила построения вопросника и переменные для расчёта и оптимизации. Для обозначенных переменных необходимо предоставить доступ к измеряемым параметрам с датчиков измерительных контроллеров. Для реализации динамических вопросников необходим доступ к информации по эксплуатации объектов диагностирования (количество переводов, включений/выключений, датам замены оборудования и т. д.). На основании всех предоставленных данных в программной среде строится вопросник с использованием метода оптимизации представленного в данном диссертационном исследовании [4, 39, 75, 79, 127].

Таблица 5.11. Виды и примеры алгоритмов диагностирования

Устр-во	Виды и примеры алгоритмов диагностирования	
СЭП	<p>Q_S Ручные проверки.</p> 	<p>Q_D^T Режим перевода стрелки: (В режиме перевода стрелки вопросник будет полным, так как все составляющие участвуют в работе).</p>  <p>Контрольный режим стрелки:</p> 

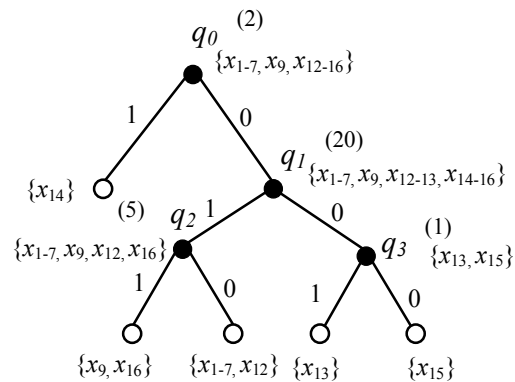
Q_D^{I0}

Режим перевода стрелки: (В режиме перевода стрелки вопросник будет полным, так как все составляющие участвуют в работе, с той лишь разницей, что вероятности возникновения события и цены вопросов рассчитываются индивидуально для каждого объекта).



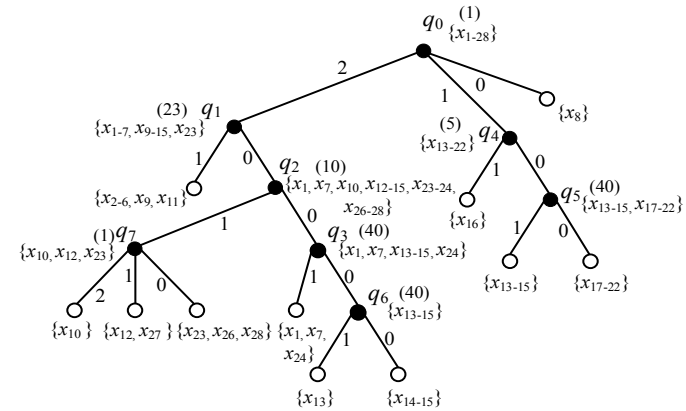
СЭП

Контрольный режим стрелки: (отличие от Q_D^T заключается в том, что вероятности возникновения события и цены вопросов рассчитываются для каждого объекта индивидуально)

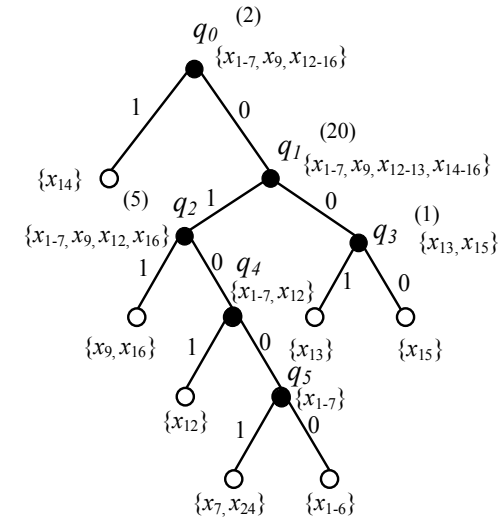


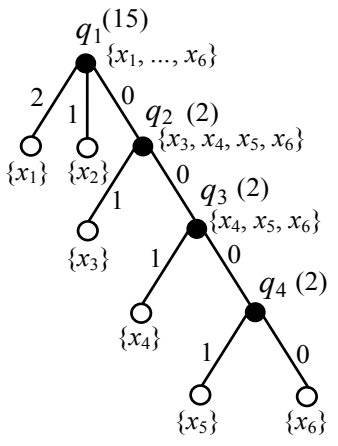
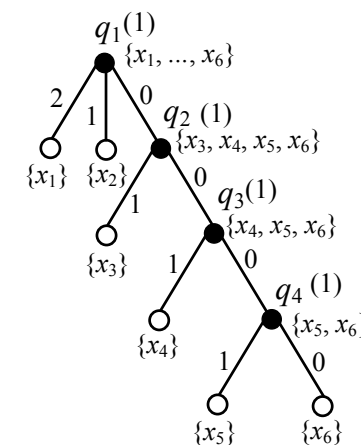
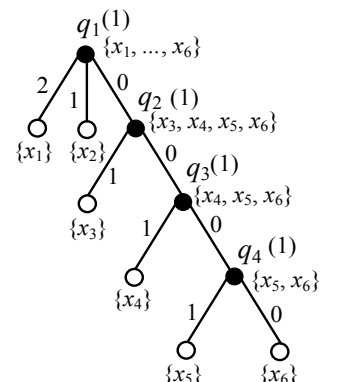
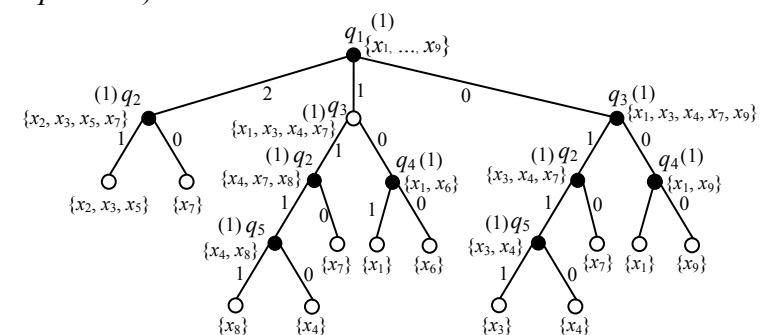
Q_D^{I1}

(В данном вопроснике, основываясь на дополнительной информации, получаемой о дополнительных параметрах (которые указаны в графе ниже) для режима перевода будет следующий вопросник).



Для контрольного режима:



<p>ТРЦ</p>	<p>Q_S Ручные проверки.</p> 	<p>Q_D^T (Отличие от в цене вопросов и использовании информации от СТДМ)</p> 
	<p>Q_D^{I0} (Отличие от Q_D^T в вероятностях событий, так же используется СТДМ).</p> 	<p>Q_D^{I1} (В данном вопроснике, основываясь на дополнительной информации, получаемой о дополнительных параметрах (которые указаны в графе ниже) будет следующий вопросник.)</p> 

<p>Свет.</p>	<p>Q_S</p>	<p>Q_D^T</p>
<p>Q_D^{I0} Ручные проверки.</p>		<p>Q_D^{I1} (В данном вопроснике, основываясь на дополнительной информации, получаемой о дополнительных параметрах (которые указаны в графе ниже) будет следующий вопросник).</p>

Таблица 5.12. Параметры алгоритмов диагностирования из таблицы 5.11

1	2	3	4	5
Устройство	Q_S	Q_D^T	Q_D^{I0}	Q_D^{I1}
СЭП	<i>Статический вопросник</i>	<i>Динамический типовой вопросник</i>	<i>Индивидуальный динамический вопросник</i>	<i>Расширенный динамический вопросник</i>
Диагностические параметры	<p>Стандартные параметры:</p> <ul style="list-style-type: none"> – U_p – рабочее напряжение на электродвигателе СЭП; – I_p – рабочий ток электродвигателя при переводе стрелки; – $R_{из}$ – сопротивление изоляции кабеля; – $t_{пер}$ – время перевода стрелки; – зазор между острием и рамным рельсом; – I_ϕ – ток электродвигателя при работе СЭП на фрикцию; – $U_{питК}$ – напряжение питания контрольной цепи. 	<p>Параметры контр. СТДМ:</p> <ul style="list-style-type: none"> – U_p – рабочее напряжение на электродвигателе СЭП; – I_p – рабочий ток электродвигателя при переводе стрелки – $R_{из}$ – сопротивление изоляции кабеля; – $t_{пер}$ – время перевода стрелки; – I_ϕ – ток электродвигателя при работе СЭП на фрикцию; – $U_{питК}$ – напряжение питания контрольной цепи. 	<p>Параметры, которые необходимо контролировать дополнительно:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Температура и влажность внутри СЭП; – Уровень масла во фрикционной муфте; – Температура масла во фрикционной муфте; – вибрационные воздействия на шибер; 	

1	2	3	4	5
Диагностические события	<p>Полное множество события СЭП:</p> <p>Автопереключатель:</p> <ul style="list-style-type: none"> – x_1 разрегулировка контактов; – x_2 излом контактных колодок; – x_3 излом ножевых колодок; – x_4 излом рычагов; – x_5 излом пружин автопереключателя; – x_6 излом контактной рессорной пружины; – x_7 индевание контактов; <p>Фрикционное сцепление:</p> <ul style="list-style-type: none"> – x_8 разрегулировка; <p>Контрольные линейки:</p> <ul style="list-style-type: none"> – x_9 излом; – x_{10} ослабление крепления; <p>Шибер:</p> <ul style="list-style-type: none"> – x_{11} попадание постороннего предмета; – x_{12} ослабление крепления; <p>Монтаж:</p> <ul style="list-style-type: none"> – x_{13} обрыв; – x_{14} нарушение изоляции; – x_{15} неисправность клеммной колодки; Курбельный контакт: 	<p>В рабочем режиме, события аналогичны полному множеству.</p> <p>В контрольном режиме:</p> <ul style="list-style-type: none"> x_1 – разрегулировка контактов; x_2 – излом контактных колодок; x_3 – излом ножевых колодок; x_4 – излом рычагов; x_5 – излом пружин автопереключателя; x_6 – излом контактной рессорной пружины; x_7 – индевание контактов; x_9 – излом контрольной линейки; x_{10} – ослабление крепления контрольной линейки; x_{12} – ослабление крепления детали; x_{13} – обрыв монтажа; x_{14} – нарушение изоляции; x_{15} – неисправность клеммной колодки; 	<p>В рабочем режиме, события аналогичны полному множеству.</p> <p>В контрольном режиме:</p> <ul style="list-style-type: none"> x_1 – разрегулировка контактов; x_2 – излом контактных колодок; x_3 – излом ножевых колодок; x_4 – излом рычагов; x_5 – излом пружин автопереключателя; x_6 – излом контактной рессорной пружины; x_7 – индевание контактов; x_9 – излом контрольной линейки; x_{10} – ослабление крепления контрольной линейки; x_{12} – ослабление крепления детали; x_{13} – обрыв монтажа; x_{14} – нарушение изоляции; x_{15} – неисправность клеммной колодки; 	<p>Помимо полного множества событий СЭП, при внедрении дополнительной информации из графы выше, можно идентифицировать дополнительные события, такие как:</p> <ul style="list-style-type: none"> x_{24} – наличие влаги; x_{25} – низкий уровень масла в редукторе; x_{26} – неплавный ход острияков; x_{27} – увеличенный/уменьшенный зазор между остриком и рамным рельсом; x_{28} – возможное загрязнение башмаков;

1	2	3	4	5
Диагностические события	– x_{16} Неисправность курбельного контакта; – x_{19} неисправность щётчного узла; – x_{20} понижение изоляции; Электродвигатель DC: – x_{17} обрыв обмотки статора; – x_{18} обрыв обмотки якоря; – x_{21} неисправность коллектора; – x_{22} обрыв внутреннего монтажа; x_{23} неисправность редуктора.			

1	2	3	4	5
Трактовка вопросов	<p>Полное множество вопросов для идентификации события СЭП:</p> <p>q_0 – Каково показание амперметра? (Время на проверку 1 мин.)</p> <p>2) Сначала стрелка амперметра делает бросок до 5А, в течении перевода 2А;</p> <p>1) Стрелка амперметра делает бросок, далее значение тока < 2А;</p> <p>0) Стрелка неподвижна.</p> <p>q_1 – Обнаруживается ли неисправность стрелочного электропривода после визуального осмотра всех частей автопереключателя и контрольных линеек на наличие излома, а также обнаружена ли неисправность шибера типа «попадание постороннего предмета»? (23 мин.)</p> <p>О: 1) Да. 0) Нет.</p>	<p>В рабочем режиме множество вопросов будет соответствовать полному множеству вопросов для идентификации событий СЭП.</p> <p>Для контрольного режима вопросы:</p> <p>q_0 – Отказ устройства произошел на посту ЭЦ? (так как элементы контрольной цепи имеются как на поле, так и в релейном помещении.) (Время на проверку 7 мин.)</p> <p>О: 1) Да. 0) Нет.</p> <p>q_1 – Обнаруживается ли неисправность после осмотра всех частей автопереключателя и контрольных линеек. (Время на проверку 25 мин.)</p> <p>О: 1) Да. 0) Нет.</p>	<p>В рабочем режиме множество вопросов будет соответствовать полному множеству вопросов для идентификации событий СЭП.</p> <p>Для контрольного режима вопросы:</p> <p>q_0 – Отказ устройства произошел на посту ЭЦ? (так как элементы контрольной цепи имеются как на поле, так и в релейном помещении.) (Время на проверку 2 мин.)</p> <p>О: 1) Да. 0) Нет.</p> <p>q_1 – Обнаруживается ли неисправность после осмотра всех частей автопереключателя и контрольных линеек. (Время на проверку 20 мин.)</p> <p>О: 1) Да. 0) Нет.</p>	<p>Вопросы для рабочего режима СЭП основываясь и на дополнительно получаемой информации о дополнительных измерениях следующие:</p> <p>q_0 – Каково показание амперметра? (Время на проверку 1 мин.)</p> <p>2) Сначала стрелка амперметра делает бросок до 5А, в течении перевода 2А;</p> <p>1) Стрелка амперметра делает бросок, далее значение тока < 2А;</p> <p>0) Стрелка неподвижна.</p>

1	2	3	4	5
Тракторка вопросов	<p>q_2 – Обнаруживается ли неисправность привода после механической проверки следующих устройств: ослабление крепление контрольных линеек или шибера, неисправность редуктора? (25 мин.)</p> <p>О: 1) Да. 0) Нет.</p> <p>q_3 – В норме ли сопротивление изоляции монтажа? (40 мин.)</p> <p>О: 1) Да. 0) Нет.</p> <p>q_4 – Обнаруживается ли неисправность привода после визуального осмотра курбельного контакта? (5 мин.)</p> <p>О: 1) Да. 0) Нет.</p> <p>q_5 – В норме ли коммутация и двигатель по отдельности? (40 мин.)</p> <p>О: 1) Да. 0) Нет.</p>	<p>q_2 – Обнаруживается ли неисправность привода после механической проверки ослабление крепление контрольных линеек? (Время на проверку 5 мин.)</p> <p>О: 1) Да. 0) Нет.</p> <p>q_3 – Обнаруживается отказ в устройстве при измерении сопротивления изоляции и токов в монтаже контрольной цепи? (Время на проверку 30 мин.)</p> <p>О: 1) Да. 0) Нет.</p>	<p>q_2 – Обнаруживается ли неисправность привода после механической проверки ослабление крепление контрольных линеек? (Время на проверку 5 мин.)</p> <p>О: 1) Да. 0) Нет.</p> <p>q_3 – Обнаруживается отказ в устройстве при измерении сопротивления изоляции и токов в монтаже контрольной цепи? (Время на проверку 1 мин.)</p> <p>О: 1) Да. 0) Нет.</p>	<p>q_1 – Обнаруживается ли неисправность стрелочного электропривода после визуального осмотра всех частей автопереключателя и контрольных линеек на наличие излома, а также обнаружена ли неисправность шибера типа «попадание постороннего предмета»? (23 мин.)</p> <p>О: 1) Да. 0) Нет.</p> <p>q_2 – Посторонние ударно-вибрационные воздействия? (1 мин.)</p> <p>О: 1) Да. 0) Нет.</p> <p>q_3 – В норме ли сопротивление изоляции монтажа?(40 мин.)</p> <p>О: 1) Да. 0) Нет.</p>

Продолжение таблицы 5.12

1	2	3	4	5
Трактовка вопросов				<p>q_4 – Обнаруживается ли неисправность привода после визуального осмотра курбельного контакта? (5 мин.) О: 1) Да. 0) Нет.</p> <p>q_5 – В норме ли коммутация и двигатель по отдельности? (40 мин.) О: 1) Да. 0) Нет.</p> <p>q_6 – Сопротивление изоляции кабеля в норме? (40 мин.) О: 1) Да. 0) Нет.</p> <p>q_7 – Отказы, выявленные по токовой диаграмме перевода и данным с акселерометра? (40 мин.) О: 2) Ослабление крепления контрольных линеек. 1) Ослабление крепления шибера. 0) Неисправность редуктора.</p>

Продолжение таблицы 5.12

1	2	3	4	5
Трактовка вопросов				<p>Вопросы для контрольного режима:</p> <p>q_0 – Отказ устройства произошёл на посту ЭЦ? (так как элементы контрольной цепи имеются как на поле, так и в релейном помещении.) (Время на проверку 2 мин.) О: 1) Да. 2) Нет.</p> <p>q_1 – Обнаруживается ли неисправность после осмотра всех частей автопереключателя и контрольных линеек. (Время на проверку 20 мин.) О: 1) Да. 2) Нет.</p> <p>q_2 – Обнаруживается ли неисправность привода после механической проверки ослабление крепление контрольных линеек? (Время на проверку 5 мин.) О: 1) Да. 2) Нет.</p>

Продолжение таблицы 5.12

1	2	3	4	5
Трактовка вопросов				<p>q_3 – Обнаруживается отказ в устройстве при измерении сопротивления изоляции и токов в монтаже контрольной цепи? (Время на проверку 1 мин.) О: 1) Да. 2) Нет.</p> <p>q_4 – Имеется ли ударно-вибрационные воздействия на шиббер при прохождении поезда? (Время на проверку 1 мин.) О: 1) Да. 2) Нет.</p> <p>q_5 – Влажность и температура в приводе в норме? (Время на проверку 1 мин.) О: 1) Нет. 2) Да.</p>

1	2	3	4	5
ТРЦ				
Диагностические параметры	<ul style="list-style-type: none"> – $U_{\text{ПитПГ}}$ – напряжение питания генератора; – $U_{\text{ВыхПГ}}$ – выходное напряжение генератора; – $f_{\text{ВыхПГ}}$ – частота тока на выходе генератора; – $U_{\text{ПитПП}}$ – напряжение питания приёмника; – $f_{\text{ВхПП}}$ – частота тока на входе генератора; – $R_{\text{Бал}}$ – сопротивление балласта; – $R_{\text{Из}}$ – сопротивление изоляции жил кабеля. 	<ul style="list-style-type: none"> – $U_{\text{ВыхПГ}}$ – выходное напряжение генератора; – $U_{\text{ПитПП}}$ – напряжение питания приёмника; – $R_{\text{Из}}$ – сопротивление изоляции жил кабеля. 		<ul style="list-style-type: none"> – $f_{\text{ВыхПГ}}$ – частота тока на выходе генератора; – $U_{\text{ПитПГ}}$ – напряжение питания генератора; – $U_{\text{ПитПП}}$ – напряжение питания путевого приёмника; – $R_{\text{Бал}}$ – сопротивление балласта.

Продолжение таблицы 5.12

1	2	3	4	5
Диагностические события	<p>Отказы, получаемые ручными измерениями:</p> <p>x_1 – логическая занятость;</p> <p>x_2 – напряжение $U_{ост}$ выше нормы;</p> <p>x_3 – предотказное состояние рельсовой цепи;</p> <p>x_4 – параметры рельсовой цепи в норме;</p> <p>x_5 – логическая свобода рельсовой цепи;</p> <p>x_6 – дефект в другом устройстве рельсовой цепи.</p>	<p>Применя дополнительные измерения с использованием СТДМ:</p> <p>x_1 – логическая занятость;</p> <p>x_2 – напряжение $U_{ост}$ выше нормы;</p> <p>x_3 – предотказное состояние рельсовой цепи;</p> <p>x_4 – параметры рельсовой цепи в норме;</p> <p>x_5 – логическая свобода рельсовой цепи;</p> <p>x_6 – дефект в другом устройстве рельсовой цепи.</p>	<p>Применя дополнительные измерения с использованием СТДМ:</p> <p>x_1 – логическая занятость;</p> <p>x_2 – напряжение $U_{ост}$ выше нормы;</p> <p>x_3 – предотказное состояние рельсовой цепи;</p> <p>x_4 – параметры рельсовой цепи в норме;</p> <p>x_5 – логическая свобода рельсовой цепи;</p> <p>x_6 – дефект в другом устройстве рельсовой цепи.</p>	<p>Основываясь на дополнительных контролируемых параметров ТРЦ, получается расширенный список неисправностей:</p> <p>x_1 – неисправность ПГ;</p> <p>x_2 – сторонняя подпитка ПП;</p> <p>x_3 – плохой шунт;</p> <p>x_4 – низкое сопротивление балласта;</p> <p>x_5 – кз ПП;</p> <p>x_6 – отсутствие питающего полюса ПГ;</p> <p>x_7 – неисправность ПФ;</p> <p>x_8 – обрыв между ПП и ПФ;</p> <p>x_9 – ненормативная частота тока на выходе путевого генератора (предотказ ПГ).</p>

1	2	3	4	5
Трактовка вопросов	<p>q_1 – Напряжение на путевом приемнике находится в пределах $0 \leq U_{пп} \leq U_{мин}$ или $U_{ост} \leq U_{пп} \leq U_{мин}$?</p> <p>2) $0 \leq U_{пп} \leq U_{мин}$;</p> <p>1) $U_{ост} \leq U_{пп} \leq U_{мин}$;</p> <p>0) нет.</p> <p>$q_2$ – Напряжение на путевом приемнике находится в пределах $U_{мин} \leq U_{пп} \leq U_{крит}$?</p> <p>О: 1) Да. 2) Нет.</p> <p>q_3 – Напряжение на путевом приемнике находится в пределах $U_{крит} \leq U_{пп} \leq U_{макс}$?</p> <p>О: 1) Да. 2) Нет.</p> <p>q_4 – Напряжение на путевом приемнике находится в пределах $U_{макс} \leq U_{пп} \leq \infty$?</p> <p>О: 1) Да. 2) Нет.</p>	<p>q_1 – Напряжение на путевом приемнике находится в пределах $0 \leq U_{пп} \leq U_{мин}$ или $U_{ост} \leq U_{пп} \leq U_{мин}$?</p> <p>2) $0 \leq U_{пп} \leq U_{мин}$;</p> <p>1) $U_{ост} \leq U_{пп} \leq U_{мин}$;</p> <p>0) нет.</p> <p>$q_2$ – Напряжение на путевом приемнике находится в пределах $U_{мин} \leq U_{пп} \leq U_{крит}$?</p> <p>О: 1) Да. 2) Нет.</p> <p>q_3 – Напряжение на путевом приемнике находится в пределах $U_{крит} \leq U_{пп} \leq U_{макс}$?</p> <p>О: 1) Да. 2) Нет.</p> <p>q_4 – Напряжение на путевом приемнике находится в пределах $U_{макс} \leq U_{пп} \leq \infty$?</p> <p>О: 1) Да. 2) Нет.</p>	<p>q_1 – Напряжение на путевом приемнике находится в пределах $0 \leq U_{пп} \leq U_{мин}$ или $U_{ост} \leq U_{пп} \leq U_{мин}$?</p> <p>2) $0 \leq U_{пп} \leq U_{мин}$;</p> <p>1) $U_{ост} \leq U_{пп} \leq U_{мин}$;</p> <p>0) нет.</p> <p>$q_2$ – Напряжение на путевом приемнике находится в пределах $U_{мин} \leq U_{пп} \leq U_{крит}$?</p> <p>О: 1) Да. 2) Нет.</p> <p>q_3 – Напряжение на путевом приемнике находится в пределах $U_{крит} \leq U_{пп} \leq U_{макс}$?</p> <p>О: 1) Да. 2) Нет.</p> <p>q_4 – Напряжение на путевом приемнике находится в пределах $U_{макс} \leq U_{пп} \leq \infty$?</p> <p>О: 1) Да. 2) Нет.</p>	<p>q_1 – Какого типа отказ?</p> <p>2) Ложная свобода;</p> <p>1) Ложная занятость;</p> <p>0) Частое промаргивание.</p> <p>q_2 – Напряжение на выходе ПФ в норме?</p> <p>О: 1) Да. 2) Нет.</p> <p>q_3 – Напряжение на выходе ПГ в норме?</p> <p>О: 1) Да. 2) Нет.</p> <p>q_4 – Напряжение питания генератора в норме?</p> <p>О: 1) Да. 2) Нет.</p> <p>q_5 – Сопротивление балласта в норме?</p> <p>О: 1) Да. 2) Нет.</p> <p>q_6 – Выходная частота ПГ в норме?</p> <p>О: 1) Да. 2) Нет.</p>

1	2	3	4	5
Светофор				
Диагностические параметры	<ul style="list-style-type: none"> – $U_{л}$ – напряжение на лампе светофора; – $U_{ПитСТ}$ – напряжение питания сигнального трансформатора; – $U_{ВыхСТ}$ – выходное напряжение сигнального трансформатора на лампу; – $R_{из}$ – сопротивление изоляции жил кабеля. 	<ul style="list-style-type: none"> – $U_{л}$ – напряжение на лампе светофора; – $U_{ПитСТ}$ – напряжение питания сигнального трансформатора; – $R_{из}$ – сопротивление изоляции жил кабеля. 		<ul style="list-style-type: none"> – $U_{ВыхСТ}$ – выходное напряжение сигнального трансформатора на лампу. – Отклонение мачты от нормативных значений – Вибрационные воздействия; – Температура в трансформаторном ящике.
Диагностические события	<ul style="list-style-type: none"> x_1 – вышел из строя СТ; x_2 – обрыв жилы коммутации; x_3 – плохой контакт в ламподержателе; x_4 – повреждение коммутации; x_5 – неисправна лампа; x_6 – понижение изоляции кабеля; x_7 – нет питания из релейного шкафа. 	<ul style="list-style-type: none"> x_1 – вышел из строя СТ; x_2 – обрыв жилы коммутации; x_3 – плохой контакт в ламподержателе; x_4 – повреждение коммутации; x_5 – неисправна лампа; x_6 – понижение изоляции кабеля; x_7 – нет питания из релейного шкафа. 	<ul style="list-style-type: none"> x_1 – вышел из строя СТ; x_2 – обрыв жилы коммутации; x_3 – плохой контакт в ламподержателе; x_4 – повреждение коммутации; x_5 – неисправна лампа; x_6 – понижение изоляции кабеля; x_7 – нет питания из релейного шкафа. 	<ul style="list-style-type: none"> x_1 – вышел из строя СТ; x_2 – обрыв жилы коммутации; x_3 – плохой контакт в ламподержателе; x_4 – повреждение коммутации; x_5 – неисправна лампа; x_6 – понижение изоляции кабеля; x_7 – нет питания из релейного шкафа. x_8 – ненормативные отклонения мачты.

1	2	3	4	5
Трактовка вопросов	<p>q_1 – Приходит ли напряжение питания в ТЯ? (7 минут)</p> <p>2) Да, нормативное; 1) Пониженное; 0) Нет.</p> <p>q_2 – Имеется ли на выходе с СТ нормативное напряжение? (1 минута)</p> <p>1) Да; 0) Нет.</p> <p>q_3 – Какое напряжение на ламподержателе? (15 минут)</p> <p>2) Нормативное; 1) Пониженное; 0) Отсутствует.</p> <p>q_4 – После чистки ламподержателя напряжение восстановилось? (7 минут)</p> <p>1) Да; 0) Нет.</p>	<p>q_1 – Тип отказа? (1 минут)</p> <p>1) Переключение на менее разрешающее показание; 0) Нет никакого;</p> <p>q_2 – Приходит ли напряжение питания в СТ? (15 минут)</p> <p>0) Да, нормативное; 1) Нет.</p> <p>q_3 – Имеется ли на выходе с ТЯ нормативное напряжение? (15 минута)</p> <p>1) Да; 0) Нет.</p>	<p>q_1 – Тип отказа? (1 минут)</p> <p>1) Переключение на менее разрешающее показание; 0) Нет никакого;</p> <p>q_2 – Приходит ли напряжение питания в СТ? (15 минут)</p> <p>0) Да, нормативное; 1) Нет.</p> <p>q_3 – Имеется ли на выходе с ТЯ нормативное напряжение? (15 минута)</p> <p>1) Да; 0) Нет.</p>	<p>q_1 – Тип отказа? (1 минут)</p> <p>2) Ненормативное отклонение мачты светофора. 1) Переключение на менее разрешающее показание; 0) Нет никакого;</p> <p>q_2 – Приходит ли напряжение питания в СТ? (1 минут)</p> <p>0) Да, нормативное; 1) Нет.</p> <p>q_3 – Имеется ли на выходе с ТЯ нормативное напряжение? (1 минута)</p> <p>1) Да; 0) Нет.</p>

После тестирования полученного программного продукта на реальной станции следует добавить к правилам построения вопросника и правила по построению вопросника, содержащего ошибки и неопределённости (см. 4 главу). Помимо интеграции математического аппарата требуется внести изменения в программное обеспечение АРМ добавив дополнительные сообщения для реализации системы поддержки принятия решения.

Представим схему работы системы СТДМ с интегрированными алгоритмами диагностирования (рис. 5.16).

Из рис. 5.16 видно, как происходит работа СТДМ с встроенными алгоритмами диагностирования. В концентратор линейного пункта стекается информация от измерительных датчиков, которая в ПО используется для построения алгоритма диагностирования для каждого устройства. Помимо информации с измерительных контроллеров в ПО поступает информация с серверов хранения информации о эксплуатации устройств (количества переключений, отключений и т. д.) и о ремонтах (что и когда было заменено и по какой причине).

Представленная в диссертационном исследовании технология для совершенствования СТДМ принята к использованию в ПО подсистемы диагностирования в микропроцессорной системе централизации стрелок и сигналов на основе программируемых логических контроллеров (подсистеме СДМ-Ш) разработки ООО «ЛокоТех-Сигнал», планируемой к внедрению на предприятиях промышленного транспорта компании ОАО «Уральская горно-металлургическая компания» (УГМК) (первый объект внедрения – станция «Угольная» АО «Кузбассразрезуголь»), а также на станциях Казахстанских железных дорог (КТЖ). Кроме того, ведутся работы по адаптации подхода к использованию в составе системы структурированного мониторинга (СМИС) для совершенствования программных средств анализа данных о состоянии искусственных сооружений (конкретное приложение – мостовой переход через Керченский пролив). В приложении Б представлены соответствующие акты о внедрении.

Пример дорожной карты внедрения алгоритмов диагностирования представлен на рис. 5.17.

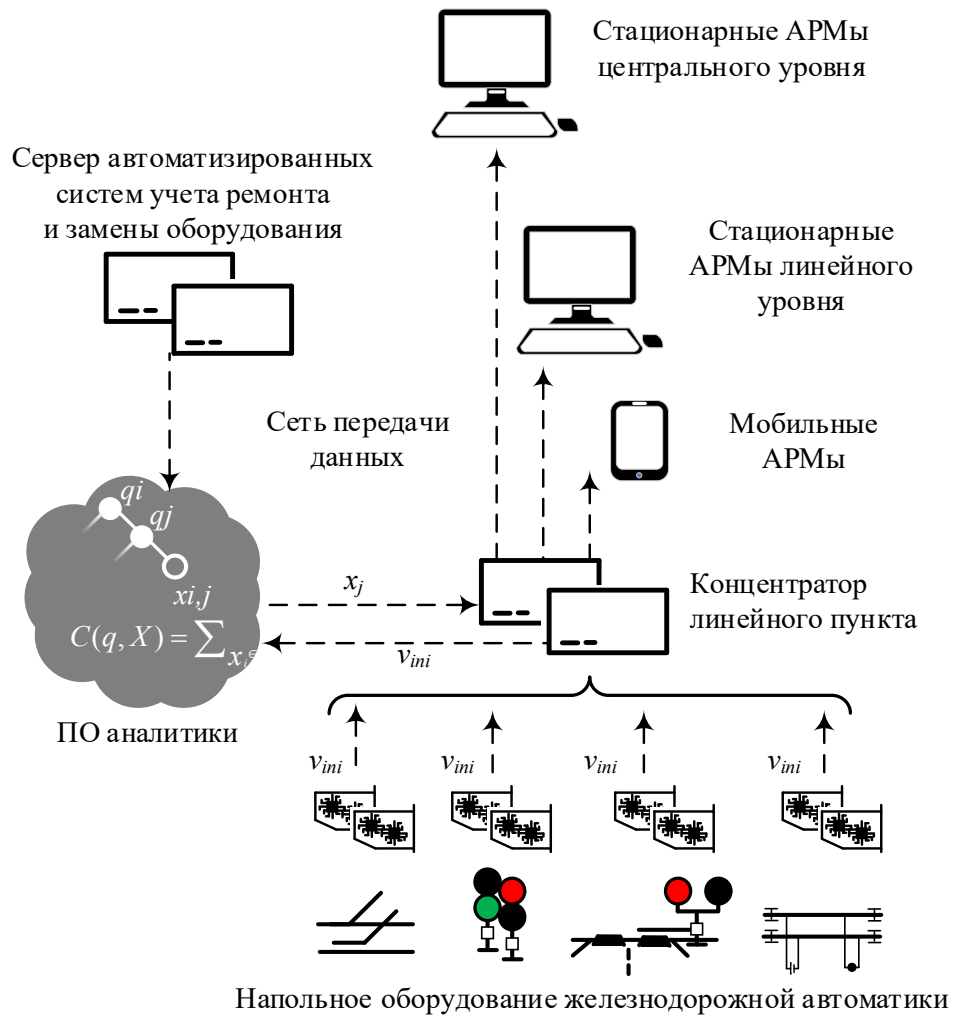


Рисунок 5.16. Архитектура системы мониторинга

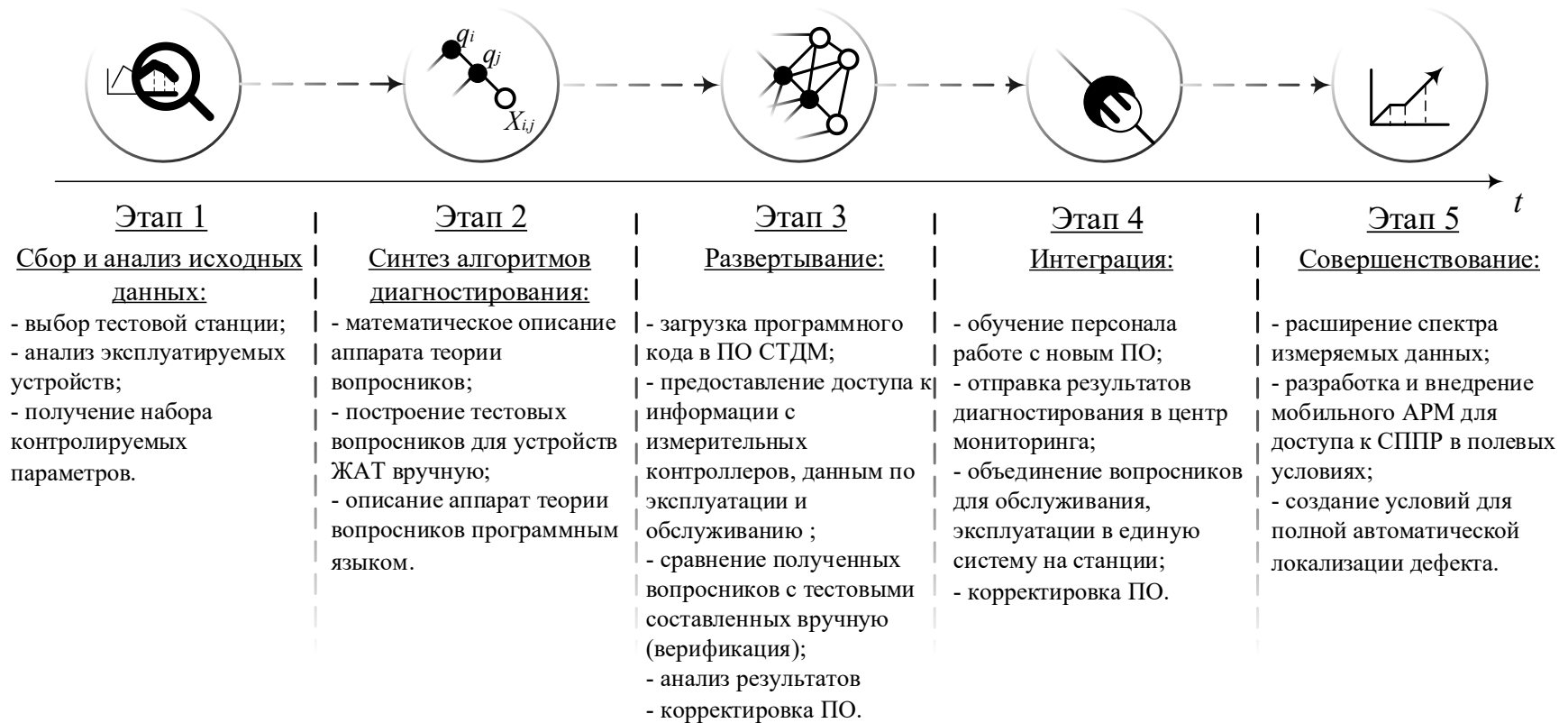


Рисунок 5.17. Этапы внедрения алгоритмов диагностирования

5.5. Пример внедрения технологии на реальной станции

Для наглядного примера представим реализацию алгоритмов диагностирования на примере станции Обухово относящейся к Санкт-Петербург-Московской-Сортировочной дистанции сигнализации, централизации и блокировки.

Представим мнемосхему станции из АРМ на рис. 5.18.

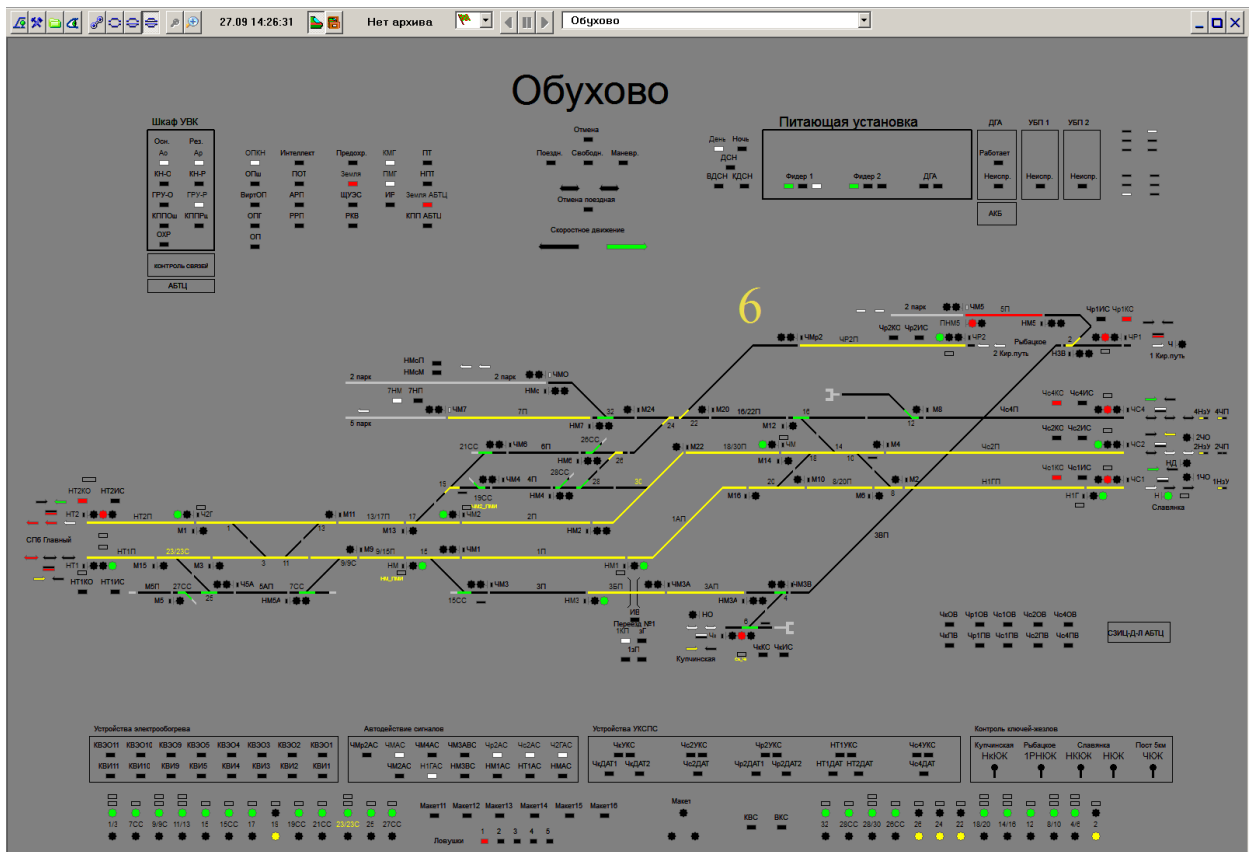


Рисунок 5.18. Мнемосхема станции Обухово из АРМ

Согласно плану станции, в эксплуатации находятся следующие устройства автоматики. Всего на станции имеется 31 централизованная стрелка. Все стрелки имеют марку крестовины 1/11, тип рельса – Р65. Две стрелки с подвижным сердечником – 9/9С, 23/23С. На станции эксплуатируются стрелочные приводы марки СП-6М. На станции уложено три главных пути 1П, 2П и 4П. На станции имеются направления по главным путям на станцию Славянка и Санкт-Петербург-Товарный-Московский, где на перегонах эксплуатируется двухпутная четырёх-значная автоблокировка с тональными рельсовыми цепями и централизованным

размещением оборудования автоматическая блокировка с использованием токовых рельсовых цепей, с централизованным размещением аппаратуры (АБТЦ). Имеются ответвления путей в сторону 2-го и 5-го парков. Кроме того, имеется ответвление в сторону станции Рыбацкое, где эксплуатируется на перегоне односторонняя четырёхзначная автоблокировка. Через станцию осуществляется пассажирское, скоростное и грузовое движение. В среднем через станцию за сутки проходит 150–170 поездов.

На станции эксплуатируется система технического диагностирования и мониторинга АПК-ДК и дополнительно программа контроля перевода стрелок. При интеграции на станции программного обеспечения для построения алгоритмов диагностирования на основе математического аппарата теории вопросников позволит подгружать информацию по качеству переводов стрелок, а также информацию по датам замены оборудования. Дополнительно вносится информация по ординатам положения устройств автоматики. Основываясь на полученных данных в программном обеспечении, система строит вопросник для каждого вида устройства. Рассматривая пример со стрелочными приводами в разделе 5.2, можно проанализировать станции и сделать выводы о загруженности каждого стрелочного перевода, состоянии аппаратуры, расстоянии от поста централизации и представить некоторый анализ для наглядного отображения эффективности внедрения алгоритмов диагностирования.

Проанализируем для примера две стрелки 32 и 1. Согласно плану станции, ордината стрелки 32 – 2273, а ордината стрелки 1 – 962. Соответственно от поста централизации стрелка 1 находится дальше. По стрелке 32 преимущественно осуществляется движение грузовых поездов, а по стрелке 1 большая часть движения составляет пассажирское и пригородное. Из этого следует, что стрелка 32 испытывает больше нагрузки от тяжеловесных поездов. Судя по данным о количестве переводов стрелка 32 (порядка 18 раз за сутки), также переводится за сутки больше, нежели спаренные стрелки 1 и 3 (примерно 6 раз за сутки). Условно стрелка 32 испытывает бóльшие эксплуатационные нагрузки, нежели стрелка 1. Замена двигателей и стрелочных приводов происходит с одинаковым периодом,

но наработка на отказ из-за разницы в эксплуатации разная. Помимо этого, из-за нагрузки грузовым движением происходит сильный износ стрелочного перевода, появляются люфты, вытачиваются острия и постоянно меняется зазор между острием и рамным рельсом.

Дополнив вышеуказанные данные данными по обслуживанию и историческими данными по оборудованию (дата проверки, время наработки и т. д.) синтезируется алгоритм диагностирования под определенный объект диагностирования. Пример эффекта таких алгоритмов представлен в разделе 5.4.3. Итак, зная все данные о стрелках, не сложно сделать следующие выводы:

- в связи с нагрузкой условные вероятности возникновения отказов на стрелочном переводе 32 будут смещены в сторону износа металлических частей и агрегатов стрелочного привода, в то время как на стрелке один больше вероятность отказа будут смещены в сторону электрического монтажа, стрелочного двигателя и контактов автопереключателя;
- в силу того, что от поста централизации находится стрелка 1 дальше, то время проведения ручных проверок и устранение отказов на ней будет больше.

Подобные выводы справедливы для всех видов устройств автоматики и телемеханики на станции. Главными факторами сокращения времени устранения отказа являются его предупреждение на этапе предотказа, сокращение ручных проверок и оптимальный алгоритм проведения ручных проверок персоналом. Когда алгоритм диагностирования фиксирует постепенное ухудшение состояние одного из параметров объекта диагностирования и затем поступает сообщение о возможном отказе элемента, у персонала есть время для принятия мер и недопущения отказа. Сокращение ручных проверок и замена их автоматизированными проверками требует выбора новых точек мониторинга и дополнительного измерительного оборудования. Но благодаря данному шагу появляется возможность непрерывного контроля расширенного числа параметров, что способствует более точному определению места возможного отказа. Правильный алгоритм действия

персонала при устранении уже возникшего отказа позволяет сократить время путём устранения ненужных неэффективных проверок.

Интеграция алгоритмов диагностирования на основе теории вопросников позволяет на начальном этапе повышения эффективности СТДМ не вкладывать финансы в расширение диагностических параметров, а ограничиться написанием одного варианта программы, которая будет тиражироваться на все станции, так как работает по одному и тому же принципу. Благодаря построению алгоритмов диагностирования и системе поддержки принятия решения при возникновении отказов или предотказов у работников, занятых обслуживанием, будет в наличии программа анализа, поиска отказов и вывода рекомендуемых проверок. Основываясь на алгоритме действия и уже автоматически полученных данных мониторинга, работник будет иметь последовательность производства проверок для локализации неисправности, а также информацию о необходимом для работ инструменте.

На следующем этапе при расширении автоматически измеряемых параметров работнику будет доступен более глубокий анализ возникновения предотказов вплоть до точной автоматической локализации места возникновения. Таким образом, можно на программном уровне индивидуально для каждого устройства строить вопросник на основе всей вышеуказанной информации, что повысит полноту и глубину диагностирования.

Подобные мероприятия необходимо проводить для всех видов устройств автоматики и телемеханики. Примерами являются эксперименты по построению вопросников для диагностирования устройств стрелочного перевода, ТРЦ и светофоров в пунктах 5.3 и 5.4. Пользуясь теорией вопросников, можно строить оптимальные маршруты для обслуживания оборудования на станциях. В зависимости от расположения, набора работ и данных об износе, можно построить оптимальный вопросник, в котором будет указана последовательность выполнения работ на конкретных устройствах. Это позволит сократить время за счёт сокращения лишних передвижений от устройства к устройству и позволит высвободить время для дополнительной работы.

Внедряя подобное ПО в СТДМ удастся достичь высокого уровня осведомлённости о функционировании устройств автоматики в целом. Используя информацию от различных средств диагностирования и мониторинга разных устройств железнодорожной автоматики, можно осуществлять комплексную обработку диагностических данных для цифровых копий всего железнодорожного комплекса. Само по себе это приводит к повышению достоверности результатов мониторинга, так как позволяет снижать вероятность неверной трактовки измеренных данных, а также фиксации неопределённого состояния (не «заведённого» в СТДМ). Следует отметить, что снижается как вероятность ложного восприятия ситуации, так и вероятность недооценки ситуации. Описанные в данной главе методы повышения уровня функционирования СТДМ позволят повысить достоверность контроля устройств систем критического действия [79]. Они должны использоваться наравне с методами повышения достоверности получения диагностических данных на самих измерительных контроллерах и при передаче их по каналам связи.

5.5. Технико-экономические вопросы

Проведённое исследование методов повышения качества функционирования СТДМ устройств железнодорожной автоматики и телемеханики имеет как технический эффект, так и экономический.

Основные эффекты от внедрения СТДМ ЖАТ следующие:

- повышение информативности за счёт расширения множества автоматически измеряемых параметров;
- уменьшение времени поиска отказов относительно ручных процедур поиска, выполняемых персоналом;
- увеличение количества распознаваемых событий или отказов в автоматическом режиме;
- синтез алгоритмов диагностирования индивидуально для каждого устройства производимый в ПО СТДМ автоматически без участия чело-

века, но с использованием дополнительной информации из автоматизированных систем обслуживания и эксплуатации;

- совершенствование методов автоматического анализа данных с использованием алгоритмов диагностирования на основе математического аппарата теории вопросников;
- совершенствование систем поддержки принятия решения для обслуживающего персонала систем железнодорожной автоматики и телемеханики;
- обеспечение своевременного обнаружения отказов устройств железнодорожной автоматики на этапе предотказа, тем самым позволяя сократить время простоя железнодорожных составов по причине возникновения отказов систем автоматики;
- отслеживание развития отказов на продолжительном времени.

Эффект для перевозочного процесса также велик, он достигается за счёт автоматической фиксации развивающегося предотказа в системе автоматики и в совершенствовании систем СППР. Железнодорожный комплекс работает непрерывно, и каждое нарушение технологического процесса несёт за собой экономические потери. Так, при возникшем отказе систем автоматики и телемеханики возможны ситуации от краткосрочной задержки движения поездов, что повлечёт за собой сдвиг графика движения поездов, до катастрофы, за которой может последовать экологическая катастрофа или жертвы людей. По этой причине важно предупредить отказ на этапе возникновения предотказа.

Системы непрерывного мониторинга позволяют фиксировать отклонения рабочих параметров от допущенных норм, а с внедрением предлагаемого подхода для автоматизации анализа данных появляется возможность за короткое время определить, где произошёл отказ. Например, если в стрелочном переводе имелся отказ вида «односторонний пробой», то этот отказ со временем без ТО может привести к ложной занятости стрелочного участка, что, в свою очередь, не позволит перевести стрелку тогда, когда это будет необходимо.

Интеграция СППР позволит давать подсказки не только обслуживающему персоналу, но и персоналу, занятому эксплуатацией устройств автоматики и те-

лемеханики. В таком случае, если случился отказ на станции, СППР подскажет дежурному по станции варианты построения маршрута поезда в обход неисправных объектов и подскажет, сколько времени займёт перестройка маршрута. Таким образом, завершение логистических задач пройдёт без экономических потерь. Данное исследование направлено на сокращение времени простоя железнодорожного транспорта и заключено в модернизации программного обеспечения существующих систем мониторинга, что не несёт больших финансовых затрат на внедрение. Необходима только разработка и адаптация программного обеспечения.

Затрачивая даже небольшие деньги на модернизацию ПО, можно получить возможность фиксации предотказных состояний и уменьшить время поиска неисправностей. При развитии СТДМ в области обнаружения большего числа состояний устройств в автоматическом режиме необходимо будет дооснастить системы СТДМ дополнительными датчиками, что в свою очередь потребует некоторых затрат на аппаратные средства. Данные затраты повысят точность обнаружения предотказа и поспособствует расширению спектра состояний объекта, которые могут быть обнаружены в автоматическом режиме системой СТДМ.

5.7. Выводы по разделу

На основании исследования, результаты которого приведены в данном разделе, можно сделать следующие выводы:

1. Вопросники могут быть классифицированы не только по параметрам оснований, весов событий и цен вопросов, а также по признакам возможности накопления статистических данных и их обновления на статические и динамические.
2. Статические вопросники обладают неизменными и единственными параметрами и эффективны только для обобщённых случаев, например, в качестве основы систем обучения персонала.

3. В динамических вопросниках могут изменяться исходные веса, цены и основания вопросов, а также их количество, что позволяет наиболее точно описывать реальные объекты автоматизации в ПО СТДМ.
4. Внедрение динамических вопросников в ПО СТДМ ЖАТ позволяет совершенствовать систему информирования технического персонала дистанций СЦБ, сокращать время на поиск неисправности, а также оптимизировать процедуры технического обслуживания и ремонтов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование методов теории вопросников позволяет совершенствовать программные средства аналитики в составе СТДМ и повышать их технологическую эффективность, достоверность диагностирования и, как следствие, сокращать и оптимизировать время обслуживания и ремонтов устройств автоматизации. Эффективность внедрения математического аппарата теории вопросников можно разделить на три составляющие. Первая часть заключается в сокращении количества трудозатрат на обслуживание регламентным методом и переход на обслуживание по состоянию. Для примера подсчитаем трудозатраты на производство регламентных работ по внутреннему осмотру СЭП. Работа выполняется в два лица с периодичностью 1 раз в 8 дней на одну стрелку, норма времени 0,5 часа. Итак, на одну стрелку в месяц приходится 3 – 4 часа трудозатрат, которые можно оптимизировать. Вторая часть эффекта заключается в сокращении времени на поиск отказа при его возникновении. В данном случае имеется возможность предупредить возникновение отказа определив его на этапе предотказа и тем самым на 100% сократить время на поиск и устранение, то есть полностью исключить возможность его возникновения. В таком случае при обнаружении отказа на стадии предотказа можно построить план по его устранению в отдельно отведённое время. В случае невозможности прогнозирования отказа, можно отследить его место при его возникновении, в данном случае сокращается только время на поиск отказа, но не на его устранение, а это в среднем 60-70% от времени устранения отказа при ручном поиске без использования аналитического программного обеспечения и СППР. Третья часть эффекта от внедрения является стратегической или накопительной. Заложив единовременно финансы на интеграцию в ПО СТДМ математического аппарата автоматизации анализа диагностических данных со временем проявляется эффект от не свершившихся отказов, то есть от тех отказов которые могли бы случиться и принести финансовые потери, но не случились. Внедрение такого математического аппарата на примере СТДМ для устройств железнодорожной автоматики позволяет сократить как время устранения возникшего отказа

так и стоимость содержания на 30 – 40% по сравнению с используемыми, на момент написания диссертации, методами диагностики, при которых исследование и поиск отказа производит человек опираясь на свой опыт и неполное множество данных об ответственных параметрах объекта диагностирования. Сокращение времени на устранение отказа происходит за счёт того, что при интеграции математического аппарата теории вопросников, полностью или частично исключается из процедуры поиска затраты на проведение проверок человеком. Эффект от внедрения исключает перемещение между устройствами, которые могут находиться на дальнем расстоянии и на процедуры измерения ответственных параметров устройств. Вместо этого система диагностики и мониторинга в автоматическом режиме на основе данных, полученных от измерительных датчиков и систем учёта эксплуатации устройств, обнаружит место возникновения отказа и «подскажет» что необходимо для устранения неисправности. При неполном исключении человека из процедуры поиска неисправности, рассматривается построение системы поддержки принятия решения, которая способна на основании полученных данных подсказать необходимые шаги и их последовательность при поиске неисправности. Точную оценку эффективности внедрения теории вопросников произвести сложно по той причине, что происходит сравнение между автоматической системой обнаружения отказа и человеком, выполняющим процедуру поиска, да и в случае построения системы поддержки принятия решения сокращается деятельность человека в процедуре поиска отказа и тем самым сокращается и время обнаружения. При этом технологии, описанные в диссертации, являются универсальными, разрабатываются единожды и адаптируются для каждого объекта диагностирования с учётом возможности самообучения. Поставленные в диссертации задачи решены, а цель достигнута, при этом получены следующие результаты:

1. Обобщены ранее полученные результаты в области теории вопросников и показано, что в практических задачах часто используются неоднородные, а не только бинарные вопросники, а использование неоднородных во-

просников в области технической диагностики зачастую является более эффективным, чем бинарных вопросников.

2. Разработаны основные аспекты метода корневого вопроса для оптимизации вопросников, включающих в себя вопросы с основаниями, равными двум и трём.
3. Установлено, что метод корневого вопроса может применяться для оптимизации как однородных, так и неоднородных вопросников, выражение для функций предпочтения является общим вне зависимости от вида вопросника, а возможность использования метода ограничивается только установлением отношений сравнения между вопросами.
4. Предложен способ построения и оптимизации бинарно-тернарных вопросников, в которых возможны ошибки и неопределённости в ответах.
5. Введены в рассмотрение динамические вопросники для устройств и систем ЖАТ, обладающие возможностью изменения структур, количества вопросов, параметров цен, оснований вопросов и весов событий.
6. Разработаны основные виды динамических вопросников для напольных технологических объектов ЖАТ, использование которых позволяет совершенствовать технологию мониторинга.
7. Предложена технология адаптации вопросников в ПО СТДМ ЖАТ, основной технико-экономический эффект от которой состоит в снижении времени на поиск неисправностей, а также оперативное установление предотказных состояний устройств, что позволяет оптимизировать процедуры технического обслуживания и ремонтов.

Перспектива дальнейших исследований включает в себя поиск методов склейки или разделения вопросников на основе расширенных данных об ответственных параметрах объекта диагностирования, что позволит сократить количества использованной памяти для проведения процедуры поиска отказа, исследование процедур поиска перемежающихся отказов, исследование применения теории вопросников при проведении процедур поиска отказов в объектах диагностирования при условии одновременного возникновения более чем одного отказа.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$a(q_i)$	–	основание вопроса;
BQ	–	бинарный вопросник;
BTQ	–	бинарно-тернарный вопросник;
$\ b_{ij}\ $	–	матрица неисправностей;
b_{ij}	–	элемент матрицы неисправностей;
$C(\pi_i, X)$	–	длина алгоритма;
$c(\pi_i, x_j)$	–	цена вопроса π_i для обнаружения состояния x_j ;
$G(Y, \Gamma)$	–	древовидный нагруженный граф;
k	–	исход вопроса;
$p(x_j)$	–	вероятность события x_j ;
TQ	–	тернарный вопросник;
T	–	порядок ситуации при оптимизации методом динамического программирования;
Q	–	вопросник;
Q_D	–	динамический вопросник;
Q_S	–	статический вопросник;
Q^T_D	–	динамический типовой вопросник;
Q^I_D	–	динамический индивидуальный вопросник;
Q^{I0}_D	–	динамический индивидуальный вопросник на основе используемых параметров;
Q^{II}_D	–	динамический индивидуальный расширенный вопросник.
q_i	–	вопрос в вопроснике;
q_{Bi}	–	бинарный вопрос;
q_{Ti}	–	тернарный вопрос;
q_{ri}	–	вопрос с основанием r ;
$w(x_j)$	–	весовой коэффициент события x_j ;
X	–	множество различных состояний или ответов;

m	–	число событий;
n	–	число вопросов;
$X_{q_i}^k$	–	подмножество ответов исхода k вопроса q_i ;
x_j	–	событие;
Π	–	множество проверок производимых для различия всех состояний объекта диагностирования;
π_i	–	элементарная проверка;
$\Phi(q_i, q_j)$	–	функция предпочтения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АБТЦ	–	Автоматическая блокировка с использованием тональных рельсовых цепей, с централизованным размещением аппаратуры;
АРМ	–	Автоматизированное рабочее место;
АПК-ДК	–	Аппаратно-программный комплекс диспетчерского контроля;
АСДК	–	Автоматизированная система диспетчерского контроля;
АСУ ТП	–	Автоматизированная система управления технологическим процессом;
АС ТПП	–	Автоматизированная система технологической подготовки производства техники;
АСУП	–	Автоматизированная система управления предприятием;
АЭС	–	Атомная электростанция;
ГДП	–	График движения поездов;
ДК	–	Диспетчерский контроль;
ЛСА	–	Логические схемы алгоритмов;
МСА	–	Матричные схемы алгоритмов;
ОД	–	Объект диагностирования;
ПО	–	Программное обеспечение;
РЦ	–	Рельсовая цепь;
Св	–	Светофор;
СЖАТ	–	Система железнодорожной автоматики и телемеханики;
СППР	–	Система поддержки принятия решения;
СТДМ	–	Система технического диагностирования и мониторинга;
СЦБ	–	Сигнализация, централизация и блокировка;
СЭП	–	Стрелочный электропривод;
ТО	–	Техническое обслуживание;

- ТСД – Технические средства диагностирования;
- ТРЦ – Рельсовая цепь тональной частоты;
- ЭЦ – Электрическая централизация.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Алексеев, В. М.* Информационно-диагностическая система контроля технического состояния инфраструктуры и подвижного состава метрополитена / В. М. Алексеев // Электротехника и электрооборудование транспорта.– 2017.– №6.– С. 46–48.
2. *Алексеев, В. М.* Модель измерения параметров электромагнитных реле в системе диагностики / В. М. Алексеев // Электротехника.– 2018.– 9.– С. 28–30.
3. *Алексеев, В. М.* Система мониторинга информационной безопасности для высокоскоростного транспорта / В. М. Алексеев // Наука и техника транспорта.– 2016. – № 4. – С. 71–79.
4. *Алексеев, В. М.* Техническая диагностика и автоконтроль работоспособности устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / В. М. Алексеев, И. Е. Дмитренко. – М.: РГОТУПС, 2003. – 143 с.
5. *Аржененко, А. Ю.* Алгоритм выбора оптимальной структуры избыточного компактного вопросника / А. Ю. Аржененко, А. В. Бондаренко // Автоматика и телемеханика. – 1991. – №5. – С. 163-169.
6. *Аржененко, А. Ю.* Дискретный поиск. Теория вопросников / А. Ю. Аржененко, В. А. Вестяк. – М.: Издательство МАИ, 2012. – 159 с.
7. *Аржененко, А. Ю.* Модификация метода толерантных перестановок в почти равномерных компактных анкетах / А. Ю. Аржененко, В. А. Вестяк // Автоматика и телемеханика. – 2012. – №7. – С. 109-118.
8. *Аржененко, А. Ю.* Оптимизация бинарных вопросников / А. Ю. Аржененко, Б. Н. Чугаев. – М.: Энергоатомиздат, 1989, 128 с.
9. *Аржененко, А. Ю.* Оптимизация бинарных вопросников методом толерантной замены / А. Ю. Аржененко, А. В. Бондаренко // Электронное моделирование. – 1990. – №3. – С. 53-57.

10. *Аржененко, А. Ю.* Оптимизация бинарных вопросников, содержащих вопросы с переменной ценой / А. Ю. Аржененко, О. Г. Казакова, В. А. Неясов // Автоматика и телемеханика. – 1989. – №6. – С. 139-149.
11. *Аржененко, А. Ю.* Оптимизация компактных вопросников / А. Ю. Аржененко, Б. Н. Чугаев // Электронное моделирование. – 1984. – №4. – С. 59-64.
12. *Аржененко, А. Ю.* Оптимизация транзитивных бинарных вопросников / А. Ю. Аржененко, Б. Н. Чугаев // Автоматика и телемеханика. – 1985. – №2. – С. 159-164.
13. *Банюк, Г. Ф.* Возможности системы коррозионно-усталостного мониторинга в управлении ресурсом парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000М / Г. Ф. Банюк, О. П. Архипов, С. И. Брыков, Ю. В. Харитонов, В. Г. Крицкий, И. Г. Березина, М. В. Софьин // Теплоэнергетика. – 2007. – №2. – С. 13-16.
14. *Бахметьев, А. М.* Система мониторинга надежности насосного оборудования при эксплуатации АЭС / А. М. Бахметьев, М. И. Давиденко, А. С. Смирнов // Теплоэнергетика. – 2006. – №9. – С. 63-67.
15. *Белоусов, С. В.* Проявление неисправностей стрелочных переводных устройств с электродвигателями переменного тока на графике мощности перевода / С. В. Белоусов // Автоматика на транспорте. – 2018. – № 4. – С. 632-654.
16. *Белый, А. А.* Проектирование и организация системы мониторинга мостовых сооружений на высокоскоростных железнодорожных магистралях / А. А. Белый, А. А. Барановский, Д. Е. Воробьев, К. Ю. Долинский, Л. К. Дьяченко, Г. В. Осадчий // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – Т. 14. – №2. – С. 211-222.
17. *Биргер, И. А.* Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978, 240 с.
18. *Болдырев, Г. Г.* Динамический мониторинг конструкций машинного зала Балаковской АЭС / Г. Г. Болдырев, А. А. Живаев // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – №5-2 (38). – С. 100-105.

19. *Бочкарев, С. В.* Совершенствование методов диагностирования стрелочного переводного устройства / С. В. Бочкарев, А. А. Лыков, Д. С. Марков // Автоматика на транспорте. – 2015. – № 1. – С. 40-50.
20. *Воронин, В. В.* Деградиционное представление объекта диагностирования в концептуальной модели / В. В. Воронин // Информатика и системы управления. – 2019. – №2 (60). – С. 77-86.
21. *Гавзов, Д. В.* Методы обеспечения безопасности дискретных систем / Д. В. Гавзов, В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников // Автоматика и телемеханика. – 1994. – №8. – С. 3-50.
22. *Гальперин, Д. М.* Мониторинг технического состояния самолетов / Д. М. Гальперин, Н. Н. Суркина // Труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли», г. Казань, 10-11 августа. – 2016. – С. 42-46.
23. *Гальперин, Д. М.* Система мониторинга технического состояния самолетов: учебное пособие / Д. М. Гальперин. – Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2017. – 160 с.
24. *Гаркавенко, С. И.* О диагностике неисправностей в непрерывных объектах / С. И. Гаркавенко, В. И. Сагунов // Автоматика и телемеханика. – 1976. – №9. – С. 177-185.
25. *Гордеев, В. Ф.* Электромагнитный мониторинг технического состояния бетонных конструкций, мостовых переходов и других искусственных сооружений / В. Ф. Гордеев, Ю. П. Малышков, С. Ю. Малышков, В. И. Поливач, С. Г. Шталин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – Том 17 – №12. – С. 225-229.
26. *ГОСТ 20911-89.* Техническая диагностика. Термины и определения. – Введ. 01.01.1991. – М.: Издательство стандартов. – 1989. – 34 с.
27. *Гриненко, А. В.* Автоматизированная обучающая система для дистанции сигнализации и связи / А. В. Гриненко, В. В. Нестеров, В. Л. Лабецкий // Автоматика, связь, информатика. – 1990. – №12. – С. 25-28.

28. *Гриненко, А. В.* Поиск отказов в устройствах СЦБ / А. В. Гриненко, В. Л. Лабецкий // Автоматика, связь, информатика. – 1990. – № 12. – С. 25-28.
29. *Давиденко, Н. Н.* Применение систем диагностики для контроля состояния тепломеханического оборудования АЭС / Н. Н. Давиденко, А. А. Березанин, А. И. Усанин // Теплоэнергетика. – 2009. – №5. – С. 7-12.
30. *Долинский, К. Ю.* Система удаленного мониторинга состояния железнодорожной контактной подвески / К. Ю. Долинский, А. А. Лыков, В. А. Соколов, В. Б. Соколов, Г. В. Осадчий // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – №5(30). – С. 12-15.
31. *Дрозд, А. В.* Рабочее диагностирование безопасных информационно-управляющих систем / А. В. Дрозд, В. С. Харченко, С. Г. Антошук, Ю. В. Дрозд, М. А. Дрозд, Ю. Ю. Сулима. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2012. – 614 с.
32. *Ефанов, Д. В.* Автоматизация контроля на стрелках / Д. В. Ефанов, Н. А. Богданов // Мир транспорта. – 2011. – №2. – С. 55-59.
33. *Ефанов, Д. В.* Бинарно-тернарные вопросники / Д. В. Ефанов, В. В. Хорошев // Автоматика на транспорте. – 2019. – Том 5. – №3. – 391-422. – DOI: 10.20295/2412-9186-2019-3-391-422.
34. *Ефанов, Д. В.* Динамические вопросники для организации систем поддержки принятия решений, интегрированных в программные средства диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики / Д. В. Ефанов, В. В. Хорошев // Автоматика на транспорте. – 2021. – Том 7. – №1. – 101–136.
35. *Ефанов, Д. В.* Интеграция систем непрерывного мониторинга и управления движением на железнодорожном транспорте / Д. В. Ефанов // Транспорт Российской Федерации. – 2017. – №4. – С. 62-65.
36. *Ефанов, Д. В.* Интеллектуальный транспорт: интеграция средств мониторинга и управления / Д. В. Ефанов // Автоматика, связь, информатика. – 2019. – №7. – С. 40-41.
37. *Ефанов, Д. В.* Комплексный учёт параметров объектов инфраструктуры железной дороги, железнодорожного подвижного состава и автомобильного

транспорта для обеспечения безопасности движения на переездах / Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий, Д. Г. Плотников, В. В. Хорошев // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4. – №2. – С. 167-194.

38. *Ефанов, Д. В.* Метод корневого вопроса для оптимизации полихотомичных вопросников / Д. В. Ефанов, А. Н. Павлов // Интеллектуальные системы на транспорте: сб. материалов II МНПК «ИнтеллектТранс-2012». – СПб., 2012. – №2. – С. 226-236.

39. *Ефанов, Д. В.* Метод упорядочения процедур разбиения состояний процедурами с двумя и тремя исходами с учётом их стоимости и весов состояний / Д. В. Ефанов, В. В. Хорошев // Труды СПИИРАН. – 2020. – №1. – 218-243. – DOI: 10.15622/sp.2020.19.1.8.

40. *Ефанов, Д. В.* Мониторинг параметров рельсовых цепей тональной частоты / Д. В. Ефанов, Н. А. Богданов // Транспорт Урала. – 2013. – № 1(36). – С. 36-42.

41. *Ефанов, Д. В.* Построение оптимальных алгоритмов поиска неисправностей в стрелочных электроприводах с использованием теории вопросников / Д. В. Ефанов, А. Н. Павлов // Интеллектуальные системы на транспорте: сб. материалов II МНПК «ИнтеллектТранс-2012». – СПб., 2011. – №1. – С. 25-40.

42. *Ефанов, Д. В.* О некоторых свойствах гомогенных вопросников / Д. В. Ефанов, А. Н. Павлов // Бюллетень результатов научных исследований. – 2012. – №2. – С. 8-15.

43. *Ефанов, Д. В.* Оптимизация алгоритмов диагностирования железнодорожных стрелочных электроприводов с учётом статистических данных об отказах / Д. В. Ефанов, В. В. Хорошев // Транспорт Урала. – 2018. – №1. – С. 19-25. – DOI: 10.20291/1815-9400-2018-1-19-25.

44. *Ефанов, Д. В.* Оптимизация полихотомичных вопросников методом корневого вопроса / Д. В. Ефанов, А. Н. Павлов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2012. – №4. – С. 125-134.

45. *Ефанов, Д. В.* Особенности функционирования систем технического диагностирования и мониторинга объектов железнодорожной инфраструктуры / Д. В. Ефанов // Автоматика на транспорте. – 2018. – Том 4. – №3. – С. 333-354.
46. *Ефанов, Д. В.* Применение оптических датчиков в системах управления движением поездов / Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий, В. В. Хорошев // Известия вузов. Приборостроение. – 2019. – Т. 62. – №4. – С. 364-372. – DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-4-364-372.
47. *Ефанов, Д. В.* Принципы совершенствования информационного обеспечения систем технического диагностирования и непрерывного мониторинга / Д. В. Ефанов, В. В. Хорошев // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. – 2019. – Т. 13. – №5. – С. 41-48. – DOI: 10.24411/2072-8735-2018-10270.
48. *Ефанов, Д. В.* Проблемы непрерывного мониторинга устройств автоматики на сортировочных горках / Д. В. Ефанов, В. В. Хорошев // Автоматика, связь, информатика. – 2018. – №8. – С. 30-35.
49. *Ефанов, Д. В.* Развитие технологий мониторинга устройств автоматики с созданием цифровой инфраструктуры / Д. В. Ефанов, В. В. Хорошев // Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов: материалы IV международной научно-практической конференции: в 2 ч., Ч. 1 / Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, Белорусская ж.д., Белорусский государственный университет транспорта; под общей редакцией Ю. И. Кулаженко. – Гомель: БелГУТ, 2018. – С. 139-141. – ISBN 978-985-554-766-3 (ч. 1).
50. *Ефанов, Д. В.* Синтез алгоритмов поиска дефектов устройств железнодорожной автоматики и телемеханики с применением теории вопросников / Д. В. Ефанов, А. Н. Павлов // Сборник материалов IV ежегодной МНПК «Перспективы развития информационных технологий». – Новосибирск, 2011. – №1. – С. 30-32.
51. *Ефанов, Д. В.* Система обучения нового поколения OSA / Д. В. Ефанов, В. В. Хорошев, Г. В. Осадчий // Автоматика, связь, информатика. – 2018. – № 6. – С. 6-10.

52. *Ефанов, Д. В.* Тернарные вопросники с ошибками и неопределённостями в ответах / Д. В. Ефанов, В. В. Хорошев // Известия вузов. Приборостроение. – 2019. – Т. 62. – №10. – С. 875-885. – DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-10-875-885.
53. *Ефанов, Д. В.* Функциональный контроль и мониторинг устройств железнодорожной автоматики и телемеханики: монография / Д. В. Ефанов. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2016. – 171 с.
54. *Калявин, В. П.* Надёжность и диагностика автотранспортных средств: монография / В. П. Калявин, Н. А. Давыдов. – СПб.: Элмор, 2014. – 480 с.
55. *Карпенко, А. П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновлённые природой: учебное пособие / А. П. Карпенко. – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 446 с.
56. *Копкин, Е. В.* Алгоритм построения гибкой программы диагностирования технического объекта по критерию ценности получаемой информации / Е. В. Копкин, В. А. Чикуров, В. В. Алейник, О. Г. Лазутин // Труды СПИИРАН. – 2015. – № 4(41). – С. 106-130.
57. *Копкин, Е. В.* Алгоритм построения квазиоптимальной гибкой программы анализа технического состояния объекта / Е. В. Копкин, Д. Н. Бородько, К. Е. Пастухова // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 1. – С. 31-39.
58. *Копкин, Е. В.* Выбор дискретных диагностических признаков с учетом их ценности для распознавания технического состояния объекта / Е. В. Копкин, А. Н. Кравцов, О. Г. Лазутин // Информация и космос. – 2015. – №2. – С. 111-117.
59. *Кушик, Н. Г.* Проверяющие эксперименты с ненаблюдаемыми древо-видными автоматами / Н. Г. Кушик // Труды ИСП РАН. – 2015. – Том 27. – №6. – С. 441-450.
60. *Лазарев, В. Г.* Синтез управляющих автоматов / В. Г. Лазарев, Е. И. Пийль. — 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1989.—328 с.
61. *Липа, К. В.* Мониторинг технического состояния и режимов эксплуатации локомотивов в ТМХ-Сервис: Теория и практика / К. В. Липа,

А. А. Белинский, В. Н. Пустовой, С. Л. Лянгасов, И. К. Лакин, А. А. Аболмасов, В. А. Мельников, И. И. Лакин, А. А. Баркунова, И. В. Пустовой. – М.: ООО «Локомотивные Технологии», 2015. – 212 с.

62. *Ломакина, Л. С.* Оптимизация глубины диагностирования непрерывных объектов / Л. С. Ломакина, В. И. Сагунов // Автоматика и телемеханика. – 1986. – № 3. – С. 146-152.

63. *Лыков, А. А.* Проблемы повышения надежности работы устройств АБТЦ-2000 при организации высокоскоростного движения / А. А. Лыков, Д. В. Ефанов, В. А. Кузнецов // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – №3 (34). – С. 40-43.

64. *Лыков, А. А.* Техническое диагностирование и мониторинг состояния устройств ЖАТ / А. А. Лыков, Д. В. Ефанов, С. В. Власенко // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – №5 (42). – С. 67-72.

65. *Мерков, А. Б.* Распознавание образов. Введение в методы статистического обучения / А. Б. Мерков. – М.: Едиториал УРСС, 2011. – 256 с.

66. *Микони, С. В.* Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография / С. В. Микони, Р. М. Юсупов. – М.: РАН, 2018. – 314 с.

67. *Микони, С. В.* Теория принятия управленческих решений: Учебное пособие / С. В. Микони. – СПб.: Издательство «Лань», 2015. – 448 с.

68. *Миндров, А. Е.* Построение проверяющих тестов дискретных систем на основе непрерывных расширений булевых функций / А. Е. Миндров, Н. И. Кащеев, Н. С. Путихин, О. П. Тимофеева // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. – 2015. – №4(111). – С. 9-18.

69. *Модин, Н. К.* Безопасность функционирования горочных устройств / Н. К. Модин. – М.: Транспорт, 1994. – 173 с.

70. *Нестеров, В. В.* Поиск неисправностей в устройствах ЖАТ / В. В. Нестеров // Автоматика, связь, информатика. – 2005. – № 4. – С. 34-35.

71. *Осадчий, Г. В.* Система диагностики и удаленного мониторинга состояния железнодорожного пути / Г. В. Осадчий, А. А. Лыков // Открытое образование. – 2011. – №2. – С. 221-224.
72. *Пархоменко, П. П.* Вопросники и организационные иерархии / П. П. Пархоменко // Автоматика и телемеханика. – 2010. – №6. – С. 163-174.
73. *Пархоменко, П. П.* Оптимальные вопросники с неравными ценами вопросов / П. П. Пархоменко // Доклады АН СССР. – 1969. – Том 184. – №1. – С. 51-54.
74. *Пархоменко, П. П.* Основные положения и рекомендации по организации диагностического обеспечения сложного объекта / П. П. Пархоменко, В. В. Карибский, Е. С. Согомоян // Информатика и системы управления. – 2019. – № 2(60). – С. 77-86.
75. *Пархоменко, П. П.* Основы теории диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства) / П. П. Пархоменко, Е. С. Согомоян. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 320 с.
76. *Пархоменко, П. П.* Теория вопросников / П. П. Пархоменко // Автоматика и телемеханика. – 1970. – № 4. – С. 140-159.
77. *Прокофьев, А. А.* Теоретические основы синтеза систем контроля и диагностики сложных технических объектов / А. А. Прокофьев // Автоматизация процессов управления. – 2010. – №1(19). – С. 17-21.
78. *Сапожников, В. В.* Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: учеб. пособие / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, В. И. Шаманов. – Под ред. Вл. В. Сапожникова. – М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. – 318 с.
79. *Сапожников, В. В.* Основы теории надежности и технической диагностики / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов. – Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 2019. – 588 с.

80. Сапожников, Вл. В. Классификация вопросников / Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, А. Н. Павлов // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2012. – №4. – С. 125-134.

81. Сапожников, Вл. В. Теория вопросников и поиск неисправностей в УКСПС / Вл. В. Сапожников, Д. В. Ефанов, А. Н. Павлов // Автоматика, связь, информатика. – 2012. – №1. – С. 30-33.

82. Сапожников, Вл. В. Эффективность систем технической диагностики и мониторинга состояния устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / Вл. В. Сапожников, А. А. Лыков, Д. В. Ефанов, Н. А. Богданов // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – №4(29). – С. 47-49.

83. Сеньченков, В. И. Выбор минимального множества контролируемых признаков для определения технического состояния системы / В. И. Сеньченков, Д. Р. Абсалямов // Известия вузов. Приборостроение. – 2011. – Т. 54. – №3. – С. 5-10.

84. Сеньченков, В. И. Математический аппарат диагностирования сложных технических систем / В. И. Сеньченков // Известия вузов. Приборостроение. – 2016. – Т. 59. – №7. – С. 547-557.

85. Сеньченков, В. И. Ограничения в задачах построения оптимальных алгоритмов определения технического состояния системы / В. И. Сеньченков, И. Н. Некрасов // Известия вузов. Приборостроение. – 2014. – Т. 57. – №10. – С. 5-11.

86. Сеньченков, В. И. Построение оптимальных алгоритмов диагностирования с ограничениями методом динамического программирования / В. И. Сеньченков, В. М. Моторин, П. А. Грушковский // Известия вузов. Приборостроение. – 2015. – Т. 58. – №10. – С. 783-791.

87. Сеньченков, В. И. Процедура обучения при разработке моделей контроля технического состояния сложных систем / В. И. Сеньченков // Известия вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53. – №1. – С. 3-8.

88. *Сеньченков, В. И.* Решающие правила в алгоритмах определения технического состояния системы / В. И. Сеньченков // Известия вузов. Приборостроение. – 2013. – Т.56. – №3. – С. 5-11.

89. *Скляр, В. В.* Отказоустойчивые компьютерные системы управления с версионно-пороговой адаптацией: способы адаптации, оценка надежности, набор архитектур / В. В. Скляр, В. С. Харченко // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 6. – С. 131-145.

90. *Смагин, Ю. С.* Первая цифровая система централизации в Германии / Ю. С. Смагин, А. Ю. Ефремов // Железные дороги мира. – 2018. – №8. – С. 63-67.

91. *Технические решения 419716-СЦБ.* Включение устройств контроля схода и волочения деталей подвижного состава (УКСПС) на подходах к станциям. – 1998. – 20 с.

92. *Хорошев, В. В.* Концепция полностью связанного мониторинга инфраструктуры переездов / В. В. Хорошев, Д. В. Ефанов, Г. В. Осадчий // Транспорт Российской Федерации. – 2018. – № 1. – С. 47-52.

93. *Хорошев, В. В.* Модернизация методов безопасного производства работ на железнодорожных путях / В. В. Хорошев // Мир транспорта. – 2017. – Т. 5. – № 2. – С. 166-177.

94. *Хорошев, В. В.* Непрерывный контроль механических параметров подвижных элементов стрелочных переводов / В. В. Хорошев // Автоматика на транспорте. – 2017. – Том 3. – №1. – С. 69-87.

95. *Хорошев, В. В.* Обобщенная функция предпочтения для оптимизации вопросников методом корневого вопроса / В. В. Хорошев // Проблемы безопасности на транспорте: материалы IX международной научно-практической конференции: в 2 ч., Ч. 1 / Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, Белорусская ж.д., Белорусский государственный университет транспорта; под общей редакцией Ю. И. Кулаженко. – Гомель: БелГУТ, 2019. – С. 248-249. – ISBN 978-985-554-878-3 (ч. 1).

96. *Хорошев, В. В.* Повышение отказоустойчивости устройств автоматического роспуска составов на железнодорожных сортировочных горках с помо-

щью непрерывного мониторинга / В. В. Хорошев // Автоматика на транспорте. – 2018. – Т. 4. – №3. – С. 355-379.

97. *Хорошев, В. В.* Электронная система контроля безопасности работника на железнодорожных путях / В. В. Хорошев // Транспортные интеллектуальные системы: сборник материалов I международной научно-практической конференции «Транспортные интеллектуальные системы – 2017» (TIS-2017), Санкт-Петербург, 16-17 февраля 2017 г. – СПб: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017, с. 285-292.

98. *Чугаев, Б. Н.* Оптимальная идентификация случайных событий / Б. Н. Чугаев, А. Ю. Аржененко // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. – 2013. – №2. – С. 188-190.

99. *Чухонин, В. М.* Нормирование активной мощности двигателей переменного тока при переводе стрелки / В. М. Чухонин, Б. Л. Горбунов, Е. В. Басалаев // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. – 2013. – №2. – С. 188-190.

100. *Шаманов, В. И.* Формирование информации о состоянии рельсовых линий для систем автоматического контроля и удалённого мониторинга / В. И. Шаманов // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов. Выпуск 5. СПб: СПОИСУ, 2018. – С. 290-293.

101. *Щербаков, Н. С.* Достоверность работы цифровых устройств / Н. С. Щербаков. – М.: Машиностроение. – 1989. – 224 с.

102. *Щербаков, Н. С.* Самокорректирующиеся дискретные устройства / Н. С. Щербаков. – М.: Машиностроение. – 1975. – 217 с.

103. *Яблонский, С. В.* Некоторые вопросы надёжности и контроля управляющих систем / С. В. Яблонский // Математические вопросы кибернетики: Вып. 1. – Под ред. С. В. Яблонского, М.: Главная редакция физико-математической литературы, 1988, С. 5-25.

104. *Ярмолик, В. Н.* Контроль и диагностика цифровых узлов ЭВМ / В. Н. Ярмолик. – Минск: «Наука и техника», 1988, 240 с.

105. *Alessi, A.* Health Assessment of Railway Turnouts: A Case Study / A. Alessi, P. La-Cascia, B. Lamoureux, M. Pugnaroni, P. Dersin // Third European Con-

ference of the Prognostics and Health Management Society, 2016, Bilbao, Spain, pp. 1-8.

106. *Arend, L.* ETCS Level 2 without GSM-R / L. Arend, L. Pott, N. Hoffmann, R. Schanck // *Signal+Draht*, 2018, (110), 10, pp. 18-28.

107. *Atamuradov, V.* Prognostics and health management for maintenance practitioners—Review, implementation and tools evaluation / V. Atamuradov, K. Medjaher, P. Dersin, B. Lamoureux, N. Zerhouni // *Int. J. Prognostics Health Manag.* – 2017. – Vol. 8. – Iss. 3. – Pp. 1-31.

108. *Baruah, P.* HMMs for diagnostics and prognostics in machining processes / P. Baruah, P. B. Chinnam, R. B. Chinnam // *International Journal of Production Research.* – 2005. – Vol. 43. – Iss. 6. – Pp. 1275-1293.

109. *Bellman, R. E.* *Dynamic Programming* / R. E. Bellman. – Princeton University Press, Princeton NJ, 1957, 392 p.

110. *Belyi, A. A.* Structural health and geotechnical monitoring during transport objects construction and maintenance (Saint-Petersburg example) / A. A. Belyi, E. S. Karapetov, Yu. I. Efimenko // *Procedia Engineering.* Vol. 189, 2017. – pp. 145-151. – DOI:10.1016/j.proeng.2017.05.024.

111. *Cerrada, M.* A review on data-driven fault severity assessment in rolling bearings / M. Cerrada // *Mech. Syst. Signal Process.* – 2019. – Vol. 99. – Pp. 169-196.

112. *Chesari, Y.* *Questionnaire, Codageettris* / Y. Chesari. – Institute Blasé Pascal, Paris, 1968, 164 p.

113. *Chinnam, R. B.* Autonomous diagnostics and prognostics in machining processes through competitive learning-driven HMM-based clustering / R. B. Chinnam, P. Baruah, / *International Journal of Production Research.* – 2009. – Vol. 47. – Iss. 23. – pp. 6739-6758.

114. *Ciabattoni, L.* Statistical spectral analysis for fault diagnosis of rotating machines / L. Ciabattoni, F. Ferracuti, A. Freddi, A. Monteriu // *IEEE Trans. Ind. Electron.* – 2017. – Vol. 65. – Issue 5. – Pp. 4301-4310.

115. *D'Angelo* Incipient Fault Detection in Induction Machine Stator-Winding Using a Fuzzy-Bayesian Change Point Detection Approach / D'Angelo, Marcos F. S. V. // *Applied Soft Computing Journal*. – 2011. – Vol. 11. – Issue 1. – Pp. 179-92.
116. *Dong, M.* A segmental hidden semi-Markov model (HSMM) -based diagnostics and prognostics framework and methodology / M. Dong, D. He // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2007. – Vol. 21. – Pp. 2248-2266.
117. *Drozd, A.* Objects and Methods of On-Line Testing: Main Requirements and Perspectives of Development / A. Drozd, J. Drozd, S. Antoshchuk, V. Nikul, M. Al-Dhabi // *Proceedings of 14th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016)*, Yerevan, Armenia, October 14-17, 2016, pp. 72-76.
118. *Dubail, F.* Algorithmes de Questionnaires Realisable, Optimaux an Sens se Different Criteres / F. Dubail. – These presentee a l'Universite de Lyon. 1967, 56 p.
119. *Duncan, G.* Heterogeneous Questionnaire Theory / G. Duncan // *SIAM Journal on Applied Mathematics*. – 1974. – Vol. 27. – Issue 1. – Pp. 59-71. – DOI: 10.1137/0127005.
120. *Eduardo P. de Aguiar* Set-Membership Type-1 Fuzzy Logic System Applied to Fault Classification in a Switch Machine / Eduardo P. de Aguiar, Fernando M. de A. Nogueira, Marley M. B. R. Vellasco, Moises Vidal Ribeiro // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. – 2017. – Vol. 18. – Iss. 10. – Pp. 2703 – 2712. DOI: 10.1109/TITS.2017.2659620.
121. *Efanov, D. V.* Diagnostics of Audio-Frequency Track Circuits in Continuous Monitoring Systems for Remote Control Devices: Some Aspects / D. V. Efanov, G. V. Osadchy, V. V. Khóroshev, D. A. Shestovitskiy // *Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2019)*, Batumi, Georgia, September 13-16, 2019, pp. 162-170, doi: 10.1109/EWDTS.2019.8884416.
122. *Efanov, D. V.* New Architecture of Monitoring Systems of Train Traffic Control Devices at Wayside Stations / D. V. Efanov // *Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2018)*, Kazan, Russia, September 14-17, 2018, pp. 276-280, doi: 10.1109/EWDTS.2018.8524788.

123. *Efanov, D. V.* Optimization of Conditional Diagnostics Algorithms for Railway Electric Switch Mechanism Using the Theory of Questionnaires with Failure Statistics / D. V. Efanov, V. V. Khoroshev, G. V. Osadchy, A. A. Belyi // Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS`2018), Kazan, Russia, September 14-17, 2018, pp. 237-245, doi: 10.1109/EWDTS.2018.8524620.

124. *Efanov, D. V.* Ternary Questionnaires / D. V. Efanov, V. V. Khóroshev // Proceedings of 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS`2019), Batumi, Georgia, September 13-16, 2019, pp. 289-300, doi: 10.1109/EWDTS.2019.8884404.

125. *Efanov, D. V.* Testing of Optical Sensors in Measuring Systems on Railway Marshalling Yard / D. V. Efanov, G. V. Osadchy, V. V. Khoroshev // Proceedings of 16th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS`2018), Kazan, Russia, September 14-17, 2018, pp. 225-230, doi: 10.1109/EWDTS.2018.8524798.

126. *Efanov, D. V.* The New Stage in the Safety Traffic Control Technologies Development: Digital Railroad Crossing / D. V. Efanov, G. V. Osadchii, V. V. Khóroshev // Proceedings of 2nd International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia, September 8-14, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867700.

127. *Efanov D.V.* Improving the Monitoring Systems Algorithmic Support for Railway Automation Equipment's Based on Dynamic Questionnaires / D. V. Efanov, V. V. Khóroshev // Proceedings of 18th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS`2020), Varna, Bulgaria, September 4-7, 2020, pp. 147-158, doi: 10.1109/EWDTS.2019.8884416.

128. *Forrest Ch.* Landing Gear Structural Monitoring (SHM) / Ch. Forrest, Cl. Forrest, D. Wiser // 2nd International Conference on Structural Integrity, ICSI 2017, 4-7 September 2017, Funchal, Madeira, Portugal, pp. 1153 – 1159.

129. *Gebraeel, N.* Residual Life Predictions in the Absence of Prior Degradation Knowledge / N. Gebraeel, A. Elwany, J. Pan // IEEE Transactions on Reliability. – 2009. – Vol. 58. – Iss. 1. – Pp. 106-116.

130. *Gerasimenko, K.* Method for Functional Testing Critical Control Systems / K. Gerasimenko, V. Hahanov, T. Bani Amer, A. Pryimak // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 26-29 September 2015, Batumi, Georgia, pp. 149-153, doi: 10.1109/EWDTS.2015.7493181.

131. *Hahanov, V.* Cyber Physical Computing for IoT-driven Services / V. Hahanov. – New York: Springer International Publishing AG, 2018, 279 p., doi: 10.1007/978-3-319-54825-8.

132. *Hajiabady, S.* Efficient diagnostic condition monitoring for industrial wind turbines / S. Hajiabady, S. Kerkyras, S. Hillmansen, P. Tricoli, M. Papaalias // 3rd Renewable Power Generation Conference (RPG 2014), Napoli, Italy, September 2014, pp. 1-5. DOI: 10.1049/cp.2014.0932.

133. *Harris, D. M.* Digital Design and Computer Architecture / D. M. Harris, S. L. Harris. – Morgan Kaufman, 2012, 561 p.

134. *Heidmann, L.* Smart Point Machines: Paving the Way for Predictive Maintenance / L. Heidmann // Signal+Draht. – 2018, (110). – Issue 9. – pp. 70-75.

135. *Hodge J. V.* Wireless Sensor Networks for Condition Monitoring in the Railway Industry: A Survey / J. V. Hodge, O’Keefe Simon, M. Weeks, A. Moulds // IEEE Transactions on intelligent transportation systems. – 2015. – Vol. 16. – Iss. 3. – Pp. 1088-1106.

136. *Hossein Davari Ardakani* PHM for railway system — A case study on the health assessment of the point machines / Hossein Davari Ardakani, C. Lucas, D. Siegel, Shuo Chang, P. Dersin, Benjamin Bonnet Jay Lee // 2012 IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM), 2012. DOI: 10.1109/ICPHM.2012.6299533.

137. *Huang, X.* Research on Transformer Fault Diagnosis Method based on GWO Optimized Hybrid Kernel Extreme Learning Machine / X. Huang, X. Wang, Y. Tian // 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Perth, WA, Australia, 23-26 September 2018, doi: 10.1109/CMD.2018.8535862.

138. *Kharchenko, V.* Green IT Engineering: Concepts, Models, Complex Systems Architectures / V. Kharchenko, Yu. Kondratenko, J. Kacprzyk // Springer Book

series "Studies in Systems, Decision and Control". – 2017. – Vol. 74. – 305p.
Doi: 10.1007/978-3-319-44162-7.

139. *Khoroshev, V. V.* Actual State Monitoring of Railway Switch Point Blades Based on RFID Technology / V. V. Khoroshev, G. V. Osadchy, D. V. Efanov, V. L. Ivanov, H. N. Vadgama // Proceedings of 15th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS`2017), Novi Sad, Serbia, September 29 – October 2, 2017, pp. 283-288, doi: 10.1109/EWDTS.2017.8110084.

140. *Khóroshev, V. V.* Ways of Development of Periodical and Continuous Monitoring Means for Automatic Devices on Marshaling Yards / V. V. Khóroshev, D. V. Efanov, G. V. Osadchii // Proceedings of 1th International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia, September 9-16, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501720.

141. *Krummenacher G.* Wheel Defect Detection with Machine Learning / G. Krummenacher, Cheng Soon Ong, S. Koller, Seijin Kobayashi, J. M. Buhmann // IEEE Transactions on intelligent transportation systems. – 2018. – Vol. 19. – Iss. 4. – Pp. 1176-1187.

142. *Land, A. H.* An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems / A. H. Land, A. G. Doig // *Econometrica*. – 1960. – Vol. 28. – No. 3. – pp. 497-520.

143. *Liu, Junqiang* 2014 Remaining Useful Life Prognostics for Aeroengine Based on Superstatistics and Information Fusion / Liu, Junqiang, Malan Zhang, Hongfu Zuo, Jiwei Xie // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2014. – Vol. 27. – Issue 5. – Pp. 1086-1096.

144. *Lu, B.* An Novel Testing Sequence Optimization Method under Dynamic Environments / B. Lu, W. Mei, J. Zhou, H. Zhou, L. Du, Z. Liu // 2018 10th International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS) 22-24 December 2018, Chengdu, China, doi: 10.1109/ICCCAS.2018.8768976.

145. *Marquez, F. P. G.* A Digital Filter Based Approach to the Remote Condition Monitoring of Railway Turnouts / F. P. G. Marquez, F. Schmid // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2007. – Vol. 92. – Pp. 830-840.

146. *Marquez, F. P. G.* A Reliability centered approach to remote condition monitoring: A railway points case study / F. P. G. Marquez, F. Schmid, J. C. Collado // Reliability Engineering and System Safety. – 2003. – Vol. 80. – Pp. 33-40.

147. *Marquez, F. P. G.* Railway point Mechanisms: condition monitoring and fault detection / F. P. G. Marquez, C. Roberts, A. M. Tobias // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F / Journal of Rail and Rapid Transit. – 2010. – Pp. 35-44.doi: 10.1243/09544097JRRT289.

148. *Marquez, F. P. G.* Unobserved component models applied to the assessment of wear in railway points: A case study. / F. P. G. Marquez, D. J. P. Tercero, F. Schmid // European Journal of Operation Research. – 2007. – Vol. 176. – Pp. 1703-1712.

149. *Navabi, Z.* Digital System Test and Testable Design: Using HDL Models and Architectures / Z. Navabi. – Springer Science+Business Media, LLC, 2011, 435 p.

150. *Obruch, I.* (2019) On Intelligent Automatic Train Control of Railway Moving Automatic Block Systems Based on Multi-Agent Systems / I. Obruch, S. Buriakovskiy, V. Smirnov, L. Asmolova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Vol. 6. – Iss. 2. – Pp. 58-69.

151. *Palanichamy, M.* Selective Algorithms for Built-In Self-Test and Self-Diagnosis in Embedded SRAMS / M. Palanichamy, A. Mohammad, B. B. Larsen, V. Hahanov // Journal of Low Power Electronics. – 2015. – Vol. 11. – Iss. 4. – Pp. 541-551. – DOI: <https://doi.org/10.1166/jolpe.2015.1412>.

152. *Pan, D.* (2010) On Intelligent Automatic Train Control of Railway Moving Automatic Block Systems Based on Multi-Agent Systems / D. Pan, Y. Zheng, C. Zhang // Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, Beijing, China, 29-31 July 2010, pp. 4471-4476.

153. *Petrone, G.* An Innovative Health Monitoring System for Aircraft Landing Gears / G. Petrone, M. Bruno, F. Bocchetto, G. Breglio, M. Pugliese, A. Caldara, A. Nocella, A. Cavallari, S. Schiano lo Moriello, G. Capuano, D. Rossetti // 8th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2016), 5-8 July 2016, Spain, Bilbao.

154. *Picard, C. F.* Graphs and Questionnaires / C. F. Picard. – Netherlands: North-Holland Publishing Company, 1980, 431 p.
155. *Picard, C. F.* Théorie des Questionnaires / C. F. Picard. – Paris: Gauthier-Villars, 1965, 127 p.
156. *Retolla, S.* Extension de l'algorithme d'Huffman à Uneclasse de Questionnaire Saves Counts / S. Retolla. – These présentée à l'Universite de Lyon, 1969, 64 p.
157. *Roberts, C.* Distributed quantitative and qualitative fault diagnosis: Railway junction case study / C. Roberts, H. P. B. Dassanayake, N. Lehrasab, C. J. Goodman // Control Engineering Practice. – 2002. – Vol. 10. – Issue 4. – Pp. 419-429.
158. *Theeg, G.* Railway Signalling & Interlocking: 3ed Edition // G. Theeg, S. Vlasenko. – Germany, Leverkusen PMC Media House GmbH, 2020, 552 p.
159. *Ubar, R.* Test Synthesis with Alternative Graphs / R. Ubar // IEEE Design & Test of Computers. – 1996. – Vol. 13. – Iss. 1. – Pp. 48-57. – DOI: 10.1109/54.485782.
160. *Yilboga, H.* Failure Prediction on Railway Turnouts Using Time Delay Neural Networks / H. Yilboga, Ömer Faruk Eker, Adem Güçlü, F. Camci / 2010 IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications, 28 October 2010, Taranto, Italy, pp. 134-137. DOI: 10.1109/CIMSA.2010.5611756.
161. *Zheng, H.* Integrated Railway Remote Condition Monitoring: A thesis for the degree of doctor of philosophy / H. Zheng // The University of Birmingham. – 2016. – Pp. 227.
162. *Zhou, F.* Remote condition monitoring and validation of railway points / F. Zhou, N. Archer, J. Bowles, M. Duta, M. Henry, M. Tombs, M. Zamora, S. Baker, C. Burton // Computing & Control Engineering Journal. – 2002. – Vol. 13. – Iss. 5. – Pp. 221-230. DOI: 10.1049/cce:20020501.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Пример оптимизации бинарно-тернарного вопросника методом динамического программирования

Произведём оптимизацию методом динамического программирования и сравним результаты. Согласно алгоритму метода динамического программирования, который описан в пункте 2.5.3 произведём оптимизацию по заданной таблице 3.1 анкете.

Для начала опишем все возможные классы событий, получаемые при пересечении всех вопросов:

$$q_{T1}: \{x_1, x_2, x_3, x_4\}, \{x_5\}, \{x_6, x_7, x_8, x_9\};$$

$$q_{T2}: \{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8, x_9\};$$

$$q_{T3}: \{x_1, x_2\}, \{x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}, \{x_8, x_9\};$$

$$q_{T4}: \{x_1\}, \{x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{B5}: \{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9\};$$

$$q_{B6}: \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8, x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T2}: \{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7, x_8, x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T3}: \{x_1, x_2\}, \{x_3, x_4\}, \{x_5\}, \{x_6, x_7\}, \{x_8, x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T4}: \{x_1\}, \{x_2, x_3, x_4\}, \{x_5\}, \{x_6, x_7, x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{B5}: \{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6, x_7, x_8, x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{B6}: \{x_1, x_2, x_3, x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7, x_8, x_9\};$$

$$q_{T2} \cap q_{T3}: \{x_1, x_2\}, \{x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7\}, \{x_8, x_9\};$$

$$q_{T2} \cap q_{T4}: \{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T2} \cap q_{B5}: \{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8, x_9\};$$

$$q_{T2} \cap q_{B6}: \{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8, x_9\};$$

$$q_{T3} \cap q_{T4}: \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T3} \cap q_{B5}: \{x_1, x_2\}, \{x_3\}, \{x_4, x_5, x_6, x_7\}, \{x_8, x_9\};$$

$$q_{T3} \cap q_{B6}: \{x_1, x_2\}, \{x_3, x_4, x_5, x_6\}, \{x_7\}, \{x_8, x_9\};$$

$$q_{T4} \cap q_{B5}: \{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6, x_7, x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T4} \cap q_{B6}: \{x_1\}, \{x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{B5} \cap q_{B6}: \{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8, x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T2} \cap q_{T3}: \{x_1, x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7\}, \{x_8, x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T2} \cap q_{T4}: \{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7, x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T2} \cap q_{B5}: \{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7, x_8, x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T2} \cap q_{B6}: \{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7, x_8, x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T3} \cap q_{T4}: \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3, x_4\}, \{x_5\}, \{x_6, x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T3} \cap q_{B5}: \{x_1, x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6, x_7\}, \{x_8, x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T3} \cap q_{B6}: \{x_1, x_2\}, \{x_3, x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7\}, \{x_8, x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T4} \cap q_{B5}: \{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6, x_7, x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T4} \cap q_{B6}: \{x_1\}, \{x_2, x_3, x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7, x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{B5} \cap q_{B6}: \{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7, x_8, x_9\};$$

$$q_{T2} \cap q_{T3} \cap q_{T4}: \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T2} \cap q_{T3} \cap q_{B5}: \{x_1, x_2\}, \{x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7\}, \{x_8, x_9\};$$

$$q_{T2} \cap q_{T3} \cap q_{B6}: \{x_1, x_2\}, \{x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7\}, \{x_8, x_9\};$$

$$q_{T2} \cap q_{T4} \cap q_{B5}: \{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T2} \cap q_{T4} \cap q_{B6}: \{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T2} \cap q_{B5} \cap q_{B6}: \{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8, x_9\};$$

$$q_{T3} \cap q_{T4} \cap q_{B5}: \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4, x_5, x_6, x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T3} \cap q_{T4} \cap q_{B6}: \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3, x_4, x_5, x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T3} \cap q_{B5} \cap q_{B6}: \{x_1, x_2\}, \{x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7\}, \{x_8, x_9\};$$

$$q_{T4} \cap q_{B5} \cap q_{B6}: \{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T2} \cap q_{T3} \cap q_{T4}: \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T2} \cap q_{T3} \cap q_{B5}: \{x_1, x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7\}, \{x_8, x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T2} \cap q_{T3} \cap q_{B6}: \{x_1, x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7\}, \{x_8, x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T2} \cap q_{T4} \cap q_{B5}: \{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7, x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T2} \cap q_{T4} \cap q_{B6}: \{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7, x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T2} \cap q_{B5} \cap q_{B6}: \{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7, x_8, x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T3} \cap q_{T4} \cap q_{B5}: \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6, x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T3} \cap q_{T4} \cap q_{B6}: \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3, x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T3} \cap q_{B5} \cap q_{B6}: \{x_1, x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7\}, \{x_8, x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T4} \cap q_{B5} \cap q_{B6}: \{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7, x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T2} \cap q_{T3} \cap q_{T4} \cap q_{B5}: \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T2} \cap q_{T3} \cap q_{T4} \cap q_{B6}: \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T2} \cap q_{T3} \cap q_{B5} \cap q_{B6}: \{x_1, x_2\}, \{x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7\}, \{x_8, x_9\};$$

$$q_{T2} \cap q_{T4} \cap q_{B5} \cap q_{B6}: \{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T3} \cap q_{T4} \cap q_{B5} \cap q_{B6}: \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T2} \cap q_{T3} \cap q_{T4} \cap q_{B5}: \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T2} \cap q_{T3} \cap q_{T4} \cap q_{B6}: \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T2} \cap q_{T3} \cap q_{B5} \cap q_{B6}: \{x_1, x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7\}, \{x_8, x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T2} \cap q_{T4} \cap q_{B5} \cap q_{B6}: \{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7, x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T3} \cap q_{T4} \cap q_{B5} \cap q_{B6}: \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T2} \cap q_{T3} \cap q_{T4} \cap q_{B5} \cap q_{B6}: \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\};$$

$$q_{T1} \cap q_{T2} \cap q_{T3} \cap q_{T4} \cap q_{B5} \cap q_{B6}: \{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}, \{x_9\};$$

Далее, согласно алгоритму, поэтапно производим поиск оптимального по цене подвопросника согласно уравнению оптимальности Беллмана (2.6). Для каждой ситуации определенного порядка строится таблица, в которую заносятся разделяемые события, определяются вопросы их разделяющие и ищется оптимальный вопрос. Для ситуации 2-го порядка составлена таблица П.А.1:

Таблица П.А.1. Ситуации 2-го порядка

L^2	q_i	L_N	C_{opt}	$q_{i_{opt}}$
$\{x_1, x_2\}$	q_{T4}	$\{x_1\}, \{x_2\}$	5	q_{T4}
$\{x_2, x_3\}$	q_{T3}	$\{x_2\}, \{x_3\}$	4	q_{T3}
$\{x_3, x_4\}$	q_{T2}, q_{B5}	$\{x_3\}, \{x_4\}$	1	q_{B5}
$\{x_6, x_7\}$	q_{T2}, q_{B6}	$\{x_6\}, \{x_7\}$	1	q_{B6}
$\{x_7, x_8\}$	q_{T3}	$\{x_7\}, \{x_8\}$	4	q_{T3}
$\{x_8, x_9\}$	q_{T4}	$\{x_8\}, \{x_9\}$	5	q_{T4}

После составления таблицы 2-го порядка изображаем графы всех вопросов:

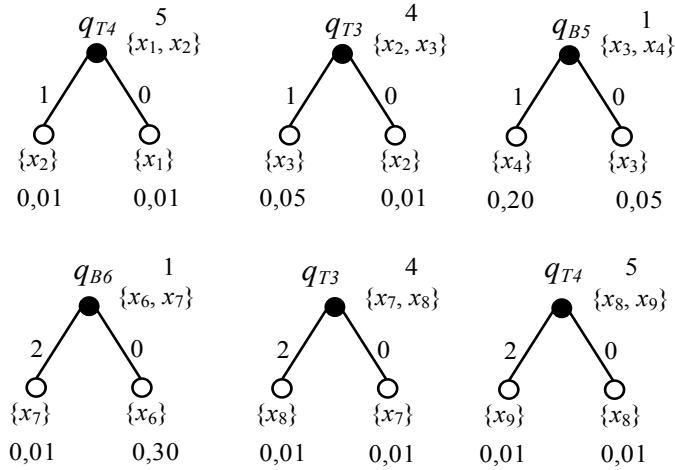


Рисунок П.А.1 Оптимальные графы для идентификации ситуаций 2-го порядка

И так далее по аналогии рассматривается каждый порядок пока не будет получен окончательный оптимальный вопросник.

Таблица П.А.2. Ситуации 3-го порядка

L^3	q_i	L_N	C	C_{opt}	$q_{i_{opt}}$
$\{x_1, x_2, x_3\}$	q_{T3}	$\{x_1, x_2\}, \{x_3\}$	5,42	5,42	q_{T3}
	q_{T4}	$\{x_1\}, \{x_2, x_3\}$	8,42		
$\{x_2, x_3, x_4\}$	q_{T2}	$\{x_2, x_3\}, \{x_4\}$	3,92	1,92	q_{B5}
	q_{T3}	$\{x_2\}, \{x_3, x_4\}$	4,96		
	q_{B5}	$\{x_2, x_3\}, \{x_4\}$	1,92		
$\{x_4, x_5, x_6\}$	q_{T1}	$\{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}$	2,00	2,00	q_{T1}
$\{x_6, x_7, x_8\}$	q_{T2}	$\{x_6\}, \{x_7, x_8\}$	3,25	1,10	q_{B6}
	q_{T3}	$\{x_6, x_7\}, \{x_8\}$	4,96		
	q_{B6}	$\{x_6\}, \{x_7, x_8\}$	1,10		
$\{x_7, x_8, x_9\}$	q_{T3}	$\{x_7\}, \{x_8, x_9\}$	7,33	7,33	q_{T3}
	q_{T4}	$\{x_7, x_8\}, \{x_9\}$	7,66		

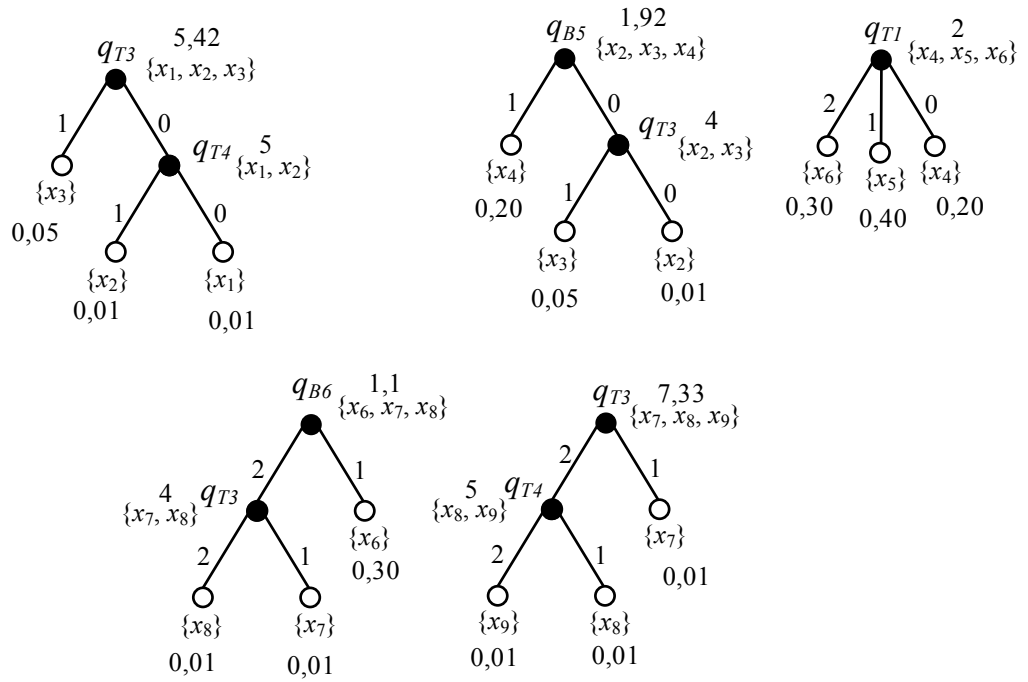


Рисунок П.А.2 Оптимальные графы для идентификации ситуаций 3-го порядка

Таблица П.А.3. Ситуации 4-го порядка

L^4	q_i	L_N	C	C_{opt}	$q_{i_{opt}}$
$\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$	q_{T2}	$\{x_1, x_2, x_3, \{x_4\}\}$	4,40	2,40	q_{B5}
	q_{T3}	$\{x_1, x_2, \{x_3, x_4\}\}$	5,29		
	q_{T4}	$\{x_1, \{x_2, x_3, x_4\}\}$	6,85		
	q_{B5}	$\{x_1, x_2, x_3, \{x_4\}\}$	2,40		
$\{x_3, x_4, x_5, x_6\}$	q_{T1}	$\{x_3, x_4, \{x_5, \{x_6\}\}\}$	2,26	2,26	q_{T1}
	q_{T2}	$\{x_3, \{x_4, x_5, x_6\}\}$	4,89		
	q_{B5}	$\{x_3, \{x_4, x_5, x_6\}\}$	2,89		
$\{x_4, x_5, x_6, x_7\}$	q_{T1}	$\{x_4, \{x_5, \{x_6, x_7\}\}\}$	2,34	2,34	q_{T1}
	q_{T2}	$\{x_4, x_5, x_6, \{x_7\}\}$	4,97		
	q_{B6}	$\{x_4, x_5, x_6, \{x_7\}\}$	2,98		
$\{x_6, x_7, x_8, x_9\}$	q_{T2}	$\{x_6, \{x_7, x_8, x_9\}\}$	3,66	1,66	q_{B6}
	q_{T3}	$\{x_6, x_7, \{x_8, x_9\}\}$	5,24		
	q_{T4}	$\{x_6, x_7, x_8, \{x_9\}\}$	6,06		
	q_{B6}	$\{x_6, \{x_7, x_8, x_9\}\}$	1,66		

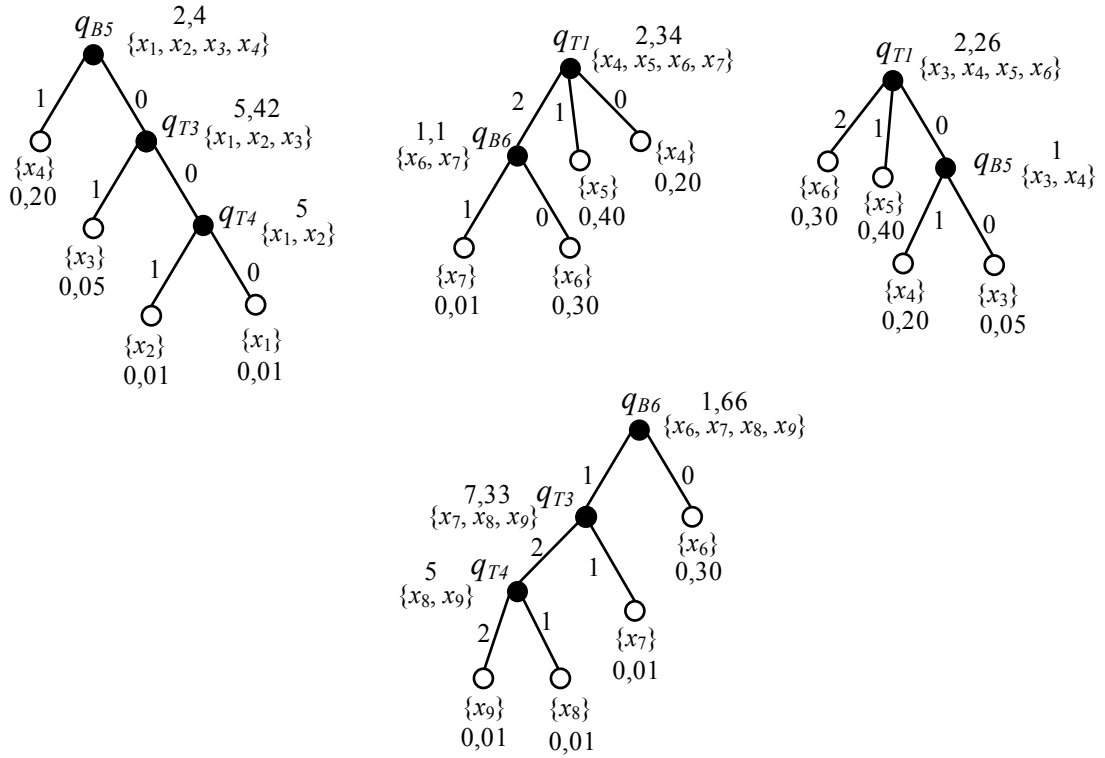


Рисунок П.А.3 Оптимальные графы для идентификации ситуаций 4-го порядка

Таблица П.А.4. Ситуации 5-го порядка

L^5	q_i	L_N	C	C_{opt}	$q_{i\,opt}$
$\{x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$	q_{T1}	$\{x_2, x_3, x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}$	2,52	2,52	q_{T1}
	q_{T2}	$\{x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}$	5,12		
	q_{T3}	$\{x_2\}, \{x_3, x_4, x_5, x_6\}$	6,24		
	q_{B5}	$\{x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}$	3,12		
$\{x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}$	q_{T1}	$\{x_3, x_4\}, \{x_5\}, \{x_6, x_7\}$	2,58	2,58	q_{T1}
	q_{T2}	$\{x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7\}$	4,87		
	q_{B5}	$\{x_3\}, \{x_4, x_5, x_6, x_7\}$	3,21		
	q_{B6}	$\{x_3, x_4, x_5, x_6\}, \{x_7\}$	2,23		
$\{x_4, x_5, x_6, x_7, x_8\}$	q_{T1}	$\{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6, x_7, x_8\}$	2,38	2,38	q_{T1}
	q_{T2}	$\{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8\}$	5,04		
	q_{T3}	$\{x_4, x_5, x_6, x_7\}, \{x_8\}$	6,31		
	q_{B6}	$\{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8\}$	3,04		

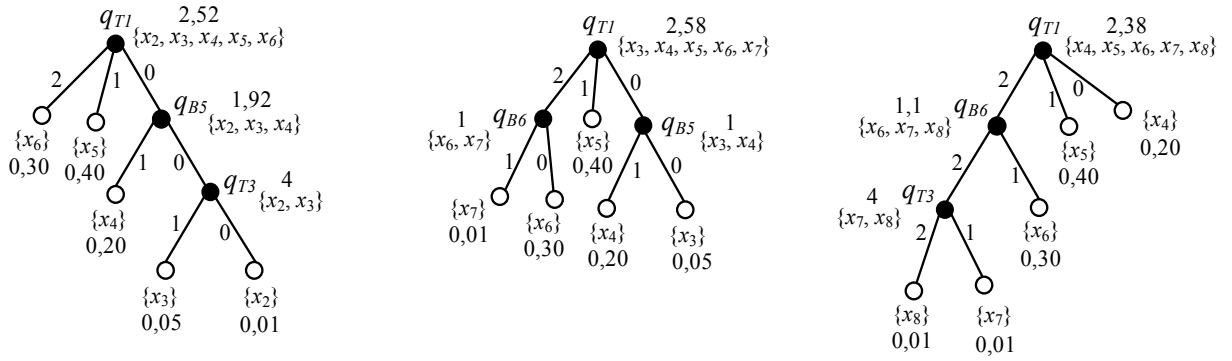


Рисунок П.А.4 Оптимальные графы для идентификации ситуаций 5-го порядка

Таблица П.А.5. Ситуации 6-го порядка

L^6	q_i	L_N	C	C_{opt}	$q_{i_{opt}}$
$\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$	q_{T1}	$\{x_1, x_2, x_3, x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}$	2,66	2,6	q_{T1}
	q_{T2}	$\{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}$	5,24		
	q_{T3}	$\{x_1, x_2\}, \{x_3, x_4, x_5, x_6\}$	6,21		
	q_{T4}	$\{x_1\}, \{x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$	7,49		
	q_{B6}	$\{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}$	3,24		
$\{x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9\}$	q_{T1}	$\{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6, x_7, x_8, x_9\}$	2,58	2,58	q_{T1}
	q_{T2}	$\{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8, x_9\}$	5,17		
	q_{T3}	$\{x_4, x_5, x_6, x_7\}, \{x_8, x_9\}$	6,39		
	q_{T4}	$\{x_4, x_5, x_6, x_7, x_8\}, \{x_9\}$	7,35		
	q_{B6}	$\{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8, x_9\}$	3,17		

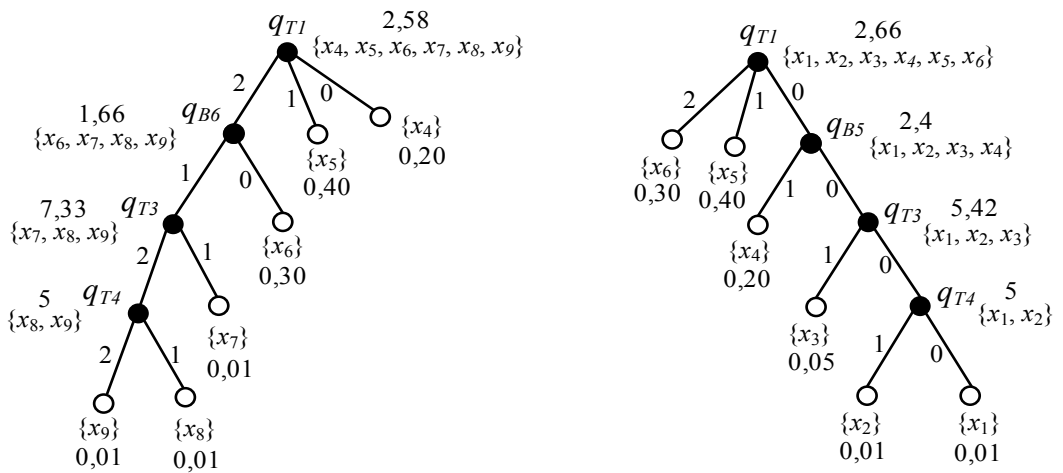


Рисунок П.А.5 Оптимальные графы для идентификации ситуаций 6-го порядка

Таблица П.А.6. Ситуации 7-го порядка

L^7	q_i	L_N	C	C_{opt}	$q_{i_{opt}}$
$\{x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8\}$	q_{T1}	$\{x_2, x_3, x_4\}, \{x_5\}, \{x_6, x_7, x_8\}$	2,86	2,86	q_{T1}
	q_{T2}	$\{x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8\}$	5,16		
	q_{T3}	$\{x_2\}, \{x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}, \{x_8\}$	6,91		
	q_{B5}	$\{x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6, x_7, x_8\}$	3,47		
	q_{B6}	$\{x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8\}$	3,55		

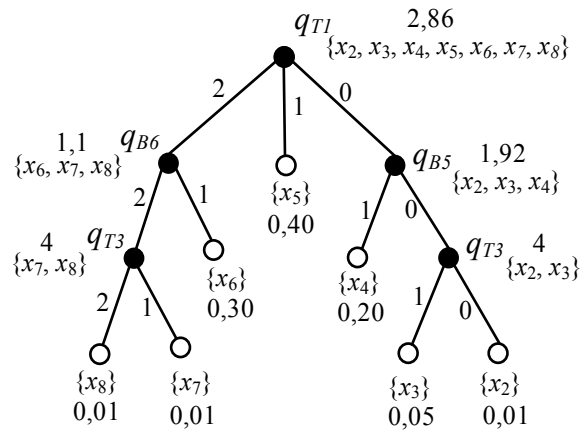


Рисунок П.А.6 Оптимальные графы для идентификации ситуаций 7-го порядка

Таблица П.А.7. Ситуации 9-го порядка

L^9	q_i	L_N	C	C_{opt}	$q_{i_{opt}}$
$\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9\}$	q_{T1}	$\{x_1, x_2, x_3, x_4\}, \{x_5\}, \{x_6, x_7, x_8, x_9\}$	3,20	3,20	q_{T1}
	q_{T2}	$\{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8, x_9\}$	5,39		
	q_{T3}	$\{x_1, x_2\}, \{x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}, \{x_8, x_9\}$	6,67		
	q_{T4}	$\{x_1\}, \{x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8\}, \{x_9\}$	7,80		
	q_{B5}	$\{x_1, x_2, x_3\}, \{x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9\}$	3,77		
	q_{B6}	$\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}, \{x_7, x_8, x_9\}$	3,80		

Согласно таблице П.А.7 первый вопрос оптимального вопросника является q_{T1} . Изобразим оптимальный вопросник на рис. П.А.7.

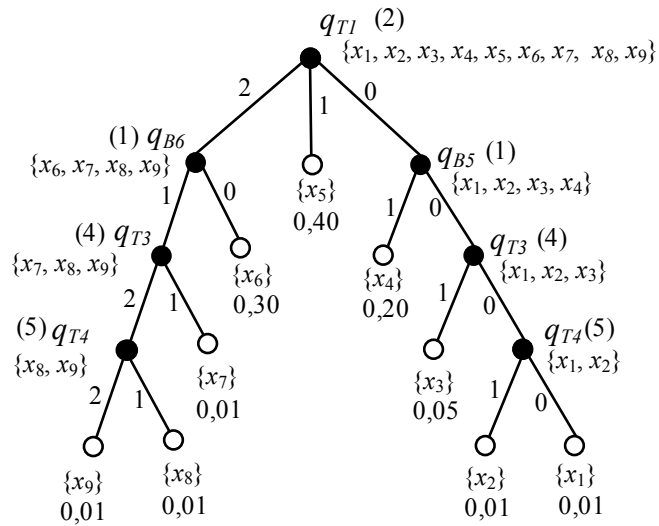


Рисунок П.А.7 Оптимальный вопросник, соответствующий анкете П.А.1.

Как видно, при оптимизации вопросника методом корневого вопроса и методом динамического программирования получаются одинаковые вопросники с одинаковой ценой обхода. Из данного факта можно заключить, что методы работают и с бинарно-тернарными вопросами с некоторой модернизацией.

**Приложение Б. Справки об использовании результатов
диссертационного исследования**

ООО «ЛокоТех-Сигнал»

г. Москва, ул. Рыбинская 3-я, д. 18, стр. 22

Почтовый адрес: 107113, г. Москва а/я 11

+7 (495) 899 01 95

www.locotech-signal.ru

info@locotech-signal.ru

СПРАВКА

об использовании результатов

диссертационного исследования Хорошева Валерия Вячеславовича

на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

05.22.08 – «Управление процессами перевозок» на тему: «Совершенствование алгоритмического обеспечения систем технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики на основе теории вопросников»

В работе В. В. Хорошева основной упор сделан на исследование синтеза оптимальных алгоритмов диагностирования на основе математического аппарата теории вопросников. Предложенные решения по повышению качества автоматизации обработки измеряемой информации об объектах диагностирования могут эффективно использоваться как при внедрении в уже эксплуатируемые системы технического диагностирования и мониторинга, так и при разработке программных средств аналитики.

Методы оптимизации алгоритмов диагностирования, предложенные и исследованные в диссертационной работе, при их адаптации в программные средства систем технического диагностирования и мониторинга позволяют производить в автоматическом режиме фиксацию ухудшения характеристик объектов диагностирования, а также локализовывать неисправности (отказы и предотказные состояния) за меньшее время по сравнению с ручными проверками. При этом обработка данных может вестись с учетом исторических данных об объектах диагностирования и конкретных физических параметров и условиях их эксплуатации, что позволяет существенно влиять на качество процесса мониторинга.

Предложенная технология для совершенствования алгоритмического обеспечения систем технического диагностирования и мониторинга принята к использованию в программных средствах подсистемы диагностирования и мониторинга микропроцессорной системы централизации стрелок и сигналов на основе программируемых логических контроллеров разработки ООО «ЛокоТех-Сигнал». Данная система в настоящее время запроектирована на станции «Угольная» АО «Кузбассразрезуголь», планируется ее внедрение на промышленных предприятиях компании ОАО «Уральская горно-металлургическая компания», а также ряде промышленных предприятий Казахстана и Узбекистана.

**Генеральный директор
ООО «ЛокоТех-Сигнал»****А. М. Романчиков**



Общество с ограниченной ответственностью Научно-Технический Центр
«Комплексные системы мониторинга», ИНН/КПП 7842123084/781601001
Адрес: ул. Фучика, д.4, лит. К, Санкт-Петербург, Россия, 192102
Тел: 8 (812) 775-10-82, E-mail: office@ntc-ksm.ru

СПРАВКА

**об использовании результатов диссертационного исследования
Хорошева Валерия Вячеславовича на соискание ученой степени кандидата
технических наук по специальности 05.22.08 – «Управление процессами перевозок»
на тему: «Совершенствование алгоритмического обеспечения систем технического
диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики
на основе теории вопросников»**

«9» апреля 2020 г.

Диссертационное исследование В. В. Хорошева посвящено совершенствованию подсистем поддержки принятия решений в программном обеспечении систем технического диагностирования и мониторинга за счет внедрения алгоритмического обеспечения на базе математического аппарата теории вопросников. Предложенные им способы синтеза и оптимизации алгоритмов диагностирования позволяют автоматизировать обработку измеряемых параметров и создать базу для подсистемы поддержки принятия решения для служб занимающихся эксплуатацией объектов диагностирования, чего ранее не применялось в подобных системах. Важным фактором является то, что предложенный соискателем метод совершенствования программного обеспечения систем мониторинга позволяет подходить индивидуально как к разнородным, так и к однородным объектам диагностирования с учетом их физических параметров, расположения от центрального поста и внешних условий функционирования.

Представленные в диссертационной работе результаты исследования проходят адаптацию к использованию в составе системы структурированного мониторинга мостового перехода через Керченский пролив. Алгоритмы на базе математического аппарата теории вопросников эффективно использовать для совершенствования программных средств анализа данных о состоянии искусственных сооружений и поиска неисправностей их элементов.

Технический директор
ООО НТЦ «КСМ»



Г. В. Осадчий

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»
РУТ (МИИТ)

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор,

д.т.н., профессор



В.В. Виноградов

2020 г.

С П Р А В К А

об использовании результатов диссертационного исследования

Хорошева Валерия Вячеславовича

на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.22.08 – Управление процессами перевозок

на тему: «Совершенствование алгоритмического обеспечения систем технического
диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики
на основе теории вопросников»

Основные результаты, полученные автором диссертации в области синтеза алгоритмов диагностирования с применением аппарата теории вопросников, используются при проведении лекционных, практических занятий и курсовых работ по дисциплинам «Теория дискретных устройств» и «Основы технической диагностики». Результаты в области совершенствования алгоритмического обеспечения систем технического диагностирования и мониторинга используются при проведении лекционных, практических занятий и курсовых работ по дисциплине «Информационные системы».

Заведующий кафедрой

«Автоматика, телемеханика и связь
на железнодорожном транспорте»

А.А. Антонов

«УТВЕРЖДАЮ»

**Проректор по учебной работе
Ташкентского государственного
транспортного университета**



Д.э.н., доцент

А.А. Гулямов

С П Р А В К А

**об использовании результатов диссертационного исследования
Хорошева Валерия Вячеславовича
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.22.08 – Управление процессами перевозок
на тему: «Совершенствование алгоритмического обеспечения систем
технического диагностирования и мониторинга устройств
железнодорожной автоматики на основе теории вопросников»**

Диссертационное исследование Валерия Вячеславовича Хорошева посвящено развитию математического аппарата теории вопросников и решению прикладных задач с его использованием. На основе полученных в диссертации результатов автоматизируются обработка диагностической информации и процедуры синтеза алгоритмов диагностирования в программном обеспечении систем технического диагностирования и мониторинга устройств железнодорожной автоматики.

Основные результаты, полученные автором диссертации в области синтеза алгоритмов диагностирования с применением аппарата теории вопросников, используются при проведении лекционных, практических занятий и курсовых работ по дисциплинам «Теория дискретных устройств» и «Специальные измерения и диагностики на ж.д. транспорте». Результаты в области совершенствования алгоритмического обеспечения систем технического диагностирования и мониторинга используются при проведении лекционных, практических занятий и курсовых работ по дисциплине «Микропроцессорные устройства и системы управления железной дороги».

**Заведующий кафедрой
«Автоматика и телемеханика»
Ташкентского государственного
транспортного университета
доктор технических наук, доцент**

Ж.Ф. Курбанов

**Приложение В. Апробация результатов на семинаре
при научном совете информатизации Санкт-Петербурга**

Участие в городском семинаре при Научном совете по информатизации Санкт-Петербурга "Информатика и автоматизация".

Соискатель представлял доклад по теме диссертационного исследования в рамках проведения городского семинара «Информатика и компьютерные технологии» при Научном совете по информатизации Санкт-Петербурга «Информатика и автоматизация» 14.05.2021 года в конференц-зале Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской Академии наук (СПИИРАН): ссылка на интернет ресурс http://conference.spiiras.nw.ru/seminar_ICT/r2021.htm. После представления доклада было проведено обсуждение работы и были получены ценные замечания и положительные оценки членов совета семинара и приглашённых специалистов.

Целью семинара является решение фундаментальных и прикладных проблем в сфере информатики, автоматизации и информатизации общества, интеграция вузовской и академической науки, выявление и поддержка талантливых молодых учёных, содействие профессиональному росту участников семинара.

Руководители семинара – научный руководитель СПИИРАН, член-корреспондент Российской академии наук, заслуженный деятель науки и техники РФ, д.т.н., профессор Рафаэль Мидхатович Юсупов и заведующий лабораторией информационно-вычислительных систем и технологий программирования, д.т.н. профессор Осипов Василий Юрьевич.