

Министерство образования и науки, молодежи и спорта Украины
Днепропетровский национальный университет железнодорожного
транспорта имени академика В. Лазаряна

На правах рукописи

ИВАНОВ АЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ

УДК 629.4.016.12

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕЖИМОВ ТЯГИ ПОЕЗДОВ
ПО СТОИМОСТНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ
ТАРИФАХ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

05.22.07 - подвижной состав железных дорог и тяга поездов

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
Скалозуб Владислав Васильевич
доктор технических наук, профессор

Днепропетровск - 2013

Содержание

<u>ВВЕДЕНИЕ</u>	6
<u>РАЗДЕЛ 1 Развитие методов энергетической и стоимостной оптимизации режимов ведения поездов на электрифицированных участках . Актуальные задачи управления тягой грузовых поездов по критерию минимума стоимости электроэнергии.....</u>	13
<u>1.1 Анализ направлений совершенствования методов выбора энергетически оптимальных режимов ведения поездов на электрифицированных участках</u>	13
<u>1.1.1 Методы расчета управления движением поезда на основе вариационного исчисления</u>	26
<u>1.1.2 Методы расчета управления движением поезда на основе принципа максимума Понтрягина</u>	28
<u>1.1.3 Методы расчета управления движением поезда на основе динамического программирования</u>	31
<u>1.1.4 Выбор режимов тяги с учетом переменных тарифов на электроэнергию и стохастических нагрузок</u>	36
<u>1.1.5..... Методы теории нечеткого управления на основе баз правил</u>	43
<u>1.1.6..... Метод динамического программирования в нечеткой форме</u>	48
<u>1.2..... Выводы</u>	51
<u>РАЗДЕЛ 2 Исследования режимов тяги грузовых поездов при переменных тарифах на электроэнергию.....</u>	52
<u>2.1 Методики экспериментальных исследований режимов тяги грузовых поездов</u>	52
<u>2.2 Исследование режимов ведения поездов с учетом ОРЭ и дифференцированных тарифов</u>	54
<u>2.3 Режимы ведения поездов оптимальные по стоимости с учетом активной и реактивной мощности</u>	61
<u>2.4 Исследования с учетом $\cos(\phi)$, характеристики тяговых двигателей для моделирования управления режимов тяги поездов.....</u>	65
<u>2.4.1..... Учет переменных тарифов для расчета режимов ведения грузовых поездов</u>	65
<u>2.4.2 Учет влияния активной и реактивной составляющих мощности на оптимальные режимы ведения поездов</u>	72
<u>2.5 Проблемы достоверности данных для моделирования движения поезда. Идентификация параметров поездов.....</u>	73
<u>2.6..... Выводы</u>	78
<u>РАЗДЕЛ 3 Разработка усовершенствованных моделей и методов расчета режимов тяги по критерию минимума стоимости потребленной электроэнергии</u>	79

<u>3.1 Развитие метода расчета оптимальных режимов ведения поездов с использованием</u>	<u>79</u>
<u>3.2.....Активная и реактивная составляющие мощности</u>	<u>92</u>
<u>3.3 Критерий эффективности применения переменных тарифов с учетом активной</u>	<u>97</u>
<u>3.4 Управления тягой грузовых поездов в условиях ОРЭ для поездопотока</u>	<u>106</u>
<u>3.5 Разработка нечеткой системы управления тягой поезда на основе использования</u>	<u>108</u>
<u>3.6..... Выводы</u>	<u>118</u>
<u>РАЗДЕЛ 4 Задачи моделирования и автоматизации расчетов</u>	
<u>оптимальных по стоимости электроэнергии режимов управления тягой</u>	
<u>грузовых поездов в условиях переменных тарифов.....</u>	<u>120</u>
<u>4.1. Процедуры реализации основных задач моделирования процессов управления</u>	
<u>стоимости потребленной электроэнергии.....</u>	<u>120</u>
<u>4.2. Вопросы автоматизации процедур формирования оптимальных по стоимости</u>	
<u>логическая структура системы.....</u>	<u>124</u>
<u>4.1..... Выводы</u>	<u>139</u>
<u>ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ.....</u>	<u>141</u>
<u>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</u>	<u>144</u>
<u>Приложение А Сведения о внедрении результатов.....</u>	<u>155</u>
<u>Приложение Б Автоматизированная система выбора оптимальных по</u>	
<u>стоимости режимов тяги поездов.....</u>	<u>157</u>
<u>Приложение В Исследование нечетких моделей управления тягой</u>	
<u>поездов по данным опытных поездок.....</u>	<u>165</u>
<u>Приложение Г Использование результатов опытных поездок для</u>	
<u>формирования базы знаний по рациональному движению поездов по</u>	
<u>электрифицированному участку.....</u>	<u>171</u>

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

АРМ	автоматизированное рабочее место
АСУГП	автоматизированная система управления грузовыми перевозками
БП	база правил
ВМД	вагонная информационная модель дороги
ДП	динамическое программирование
ДТ	дифференцированные тарифы
ЗВРП	задача рационально ведения поездов
ЗСОУ	задача стохастического оптимального управления
КВН	критической весовой нормой
ЛП	- лингвистическая переменная
НДП	непрерывное динамическое программирование
ОСЖД	организация сотрудничества железных дорог
ОРЭ	оптовый рынок электроэнергии
ПТР	правила тяговых расчетов
РП	решающее правило
ТЭД	тяговый электродвигатель
УЗ	Укрзализныця
ЭВМ	электронная вычислительная машина
ЭДС	электродвижущая сила
ЭС	экспертная система
ЭПС	электроподвижной состав

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Железнодорожный транспорт Украины один из наибольших в стране потребителей топливно-энергетических ресурсов. За один год им расходуется только на тягу поездов более четырех миллиардов кВт·ч электроэнергии. Поэтому сокращение эксплуатационных расходов – важнейшее направление повышения эффективности работы железных дорог.

Одним из эффективных путей экономии энергоресурсов является внедрение энергетически оптимальных графиков движений поездов (перегонных времен хода) и оптимальных режимных карт на основных направлениях железных дорог Украины.

В связи с вхождением большинства железных дорог Украины в Оптовый Рынок Электроэнергии новейшей и актуальной задачей является вождение поездов по критерию минимума стоимости электроэнергии при переменных по периодам суток тарифах. По оценкам Укрзалізничної економічної комісії эффект от работы железных дорог Украины в рамках Оптового Рынка Электроэнергии составит около 50 млн. долларов в год.

Сложность задачи оптимального ведения поезда в первую очередь определяется полнотой учета совокупности факторов характеризующих расчетный участок, модель поезда, разнообразные факторы и условия процесса движения поезда по переменному профилю пути, возникающие при этом силы, др. В зависимости от целей управления, полноты имеющихся данных для расчета оптимальных режимов тяги применяются различные методы, основанные на моделях непрерывного, дискретного оптимального управления, а также смешанных – дискретно-непрерывных.

Учет условий ОРЭ является новым и значимым фактором задач управления режимами тяги поездов.

Актуальность данной работы вытекает из положений "Комплексной государственной программы энергосбережения Украины на 2005-2020 г.г.", Закона Украины "Об энергосбережении" № 75/94-ВС от 01.07.1994 г., Указа Президента Украины № 603/2000 от 20.04.2000 г. "О состоянии железнодорожного транспорта Украины и меры по обеспечению его эффективного функционирования". В связи с указанным выше, усовершенствование режимов тяги грузовых поездов по стоимостным критериям эффективности с учетом переменных тарифов на электроэнергию является актуальной научно-практической задачей.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнена в русле главных направлений развития науки и техники, «Стратегии развития железнодорожного транспорта на период до 2020 года» (одобрена распоряжением Кабинета Министров Украины от 16 декабря 2009 г. № 1555-у). Выбранное направление исследований связано с выполнением научно-исследовательских работ в Днепропетровском национальном университете железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна и Восточном научном центре Транспортной академии Украины:

1. "Разработка и опытные испытания устройства для организации оптимального ведения поезда машинистом" номер госрегистрации 0105U001796).

2. "Оборудование электровоза серии ВЛ8 устройством для обучения машинистов рациональным режимам ведения поездов", номер госрегистрации 0106U006498).

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является уменьшение стоимости потребленной на тягу грузовых поездов электроэнергии за счет выбора рациональных режимов ведения поездов в условиях переменных тарифов.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие задачи:

- анализ современных математических моделей и методов оптимизации режимов ведения грузовых поездов;
- формирование уточненных математических моделей расчета рациональных режимов ведения поездов с учетом переменных по периодам суток тарифов на потребленную электроэнергию;
- разработка математических моделей, которые учитывают изменяемость тарифов на потребленную активную и реактивную электроэнергию;
- создание моделей на базе нечетких множеств для воспроизведения изменяемости и неопределенности факторов, которые влияют на режимы ведения поездов;
- создание алгоритмов формирования базы нечетких правил, на основе характеристик движения поездов, определенных в фактических поездках, которые позволяют определять рациональные режимы тяги средствами нечеткого управления;
- разработка комплекса алгоритмов и программного обеспечения для расчета рациональных режимов ведения поездов по стоимостным показателям.

Объект исследования - процессы управления тягой поездов на электрифицированных участках железных дорог.

Предмет исследования - режимы ведения грузовых поездов, рациональные по показателю стоимости потребленной на тягу электроэнергии в условиях переменных тарифов.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использованы: модели и методы оптимального управления тягой поездов, методы динамического и стохастического программирования - при реализации алгоритмов расчета рациональных режимных карт управления локомотивом, модели и методы теории нечетких множеств и нечеткого управления, которые были использованы для реализации задачи воспроизведения фактических режимов ведения с учетом факторов неопределенности; методы экспертных систем, а также математической статистики и сравнительного анализа.

Информационной базой исследования были: результаты опытных поездок, сформированные во время выполнения научно-исследовательских работ. Законодательные, правовые и нормативные акты Украины, научные публикации и разработки.

Научная новизна полученных результатов состоит в развитии и совершенствовании методик расчета рациональных режимов ведения грузовых поездов, когда учитываются стоимостные показатели потребленной на тягу электроэнергии в условиях оптового рынка электроэнергии, переменных тарифов, в частности:

впервые:

- исследованы оптимальные по стоимости потребленной на тягу электроэнергии режимы ведения грузовых поездов, в условиях стохастических тарифов, свойственных ОРЭ, установлено их существенное отличие от режимов, оптимальных по показателям потребления электроэнергии, а также установлена необходимость разработки пакетов режимных карт ведения поездов, которые могут быть использованы в разные периоды суток;

- разработан адаптивный метод расчета рациональных режимов ведения поездов, основанный на нечеткой продукционной модели, который позволяет использовать результаты опытных поездок для формирования режимов тяги, и обеспечивает достаточную для практики точность управления движением поезда без задания детального описания параметров математических моделей;

- построена кусочно-линейная аппроксимация тарифа на электроэнергию ОРЭ, содержащая четыре интервала и позволяющая с необходимой для практики точностью рассчитать режимы тяги поездов, оптимальные по стоимости потребленной электроэнергии;

усовершенствовано:

- критерии оценки эффективности переменных тарифов на электроэнергию для заданных графиков движения поездов, учитывающие стохастические свойства тарифов в условиях ОРЭ, а также разную стоимость активной и реактивной энергии;

- на основе экспериментальных данных получена зависимость коэффициента мощности от тока, которая позволяет получить уточненные режимы тяги поездов, учитывающие разную стоимость реактивной и активной электроэнергии;

получили дальнейшее развитие:

- модели расчета рациональных режимов ведения поездов с учетом переменных тарифов на потребленную электроэнергию, которые также учитывают разность тарифа активной и реактивной энергии.

Практическое значение работы определяется применением полученных результатов для усовершенствования средств автоматизации расчетов рациональных режимов тяги поездов по стоимостным показателями потребленной электрической энергии в условиях переменных тарифов и ОРЭ. При этом разработанный программный

комплекс обеспечивает следующее:

- решает проблему расчета режимов тяги поездов рациональных по стоимости потребленной электроэнергии при переменных тарифах;
- рассчитывает компромиссно-оптимальные режимы тяги поездов;
- выполняет автоматическое формирование базы нечетких правил на основе фактических поездок, для формирования нечеткой модели,
- выдача рекомендаций относительно изменения управления поездом во время движения по критериям минимума электропотребления и стоимости электроэнергии.

По результатам работы получено авторское свидетельство на компьютерную программу «Аппаратно-программный комплекс для расчета рациональных режимов ведения грузового поезда электровозами».

Результаты диссертационных исследований внедрены, а также использованы в научно-исследовательских работах и учебном процессе университета.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались, обсуждались и были одобрены на:

- международных научных конференциях «Проблемы экономики транспорта» г. Днепропетровск в 2010, 2009, 2008, 2007, 2006, 2005, 2003, 2002 гг., "Компьютерное моделирование" (2007-2003 гг., г. Днепропетровск),
- международных научно-практических конференциях «Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании» г. Днепропетровск 2012, 2011, 2010, 2009, 2008 гг.
- международная научно-техническая конференция «Энергоефективність» 2004 г. Одесса.
- международных научно-практических конференциях «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» г. Днепропетровск 2008, 2006, 2005 гг.
- заседании межкафедрального научного семинара кафедр «Автоматика, телемеханика и связь», «Электродвижущий состав железных дорог», «Станции и узлы», «Управление эксплуатационной работой», «Электронные вычислительные машины», «Компьютерные информационные технологии» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна от 21 июля 2012 года.

Личный вклад соискателя. Все результаты теоретических и экспериментальных исследований, приведенные в работе, получены автором лично или непосредственно с его участием.

В статьях, опубликованных в специализированных изданиях с соавторами [29, 33, 36, 59, 86, 89, 90], соискателю принадлежит следующее:

- Оптимизация режимов тяги поездов при переменных тарифах на электроэнергию [29];

- Исследование режимов ведения поездов с учетом стоимостей активной и реактивной электроэнергии [33];
 - Управление движением поезда на основе нечеткого описания состояний системы [89];
 - Выбор режимов управления движением поезда на основе нечеткой продукционной модели [89, 90];
- Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались, обсуждались и были одобрены на международных конференциях:
- "Компьютерное моделирование" (2007, 2006, 2005, 2004, 2003 г., г. Днепродзержинск),
 - Международная конференция "Проблемы экономики транспорта" (2007 – 2012 г., г. Днепропетровск);
 - Международная научно-техническая конференция „Енергоефективність’2004” г. Одесса;
 - Международная конференция “Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту України” (2005, 2006 г., г. Днепропетровск);
 - Международная конференция “Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании” (2007, 2008 г., г. Днепропетровск).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 20 научных работах, в том числе 7 статей в профессиональных сборниках научных работ (5 в соавторстве) и в 13 тезисах докладов научных конференций (в том числе 7 в соавторстве).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из вступления, четырех разделов, выводов, списка использованных источников и приложений. Полный объем работы составляет 180 страниц; объем основного текста - 130 страниц, в том числе 14 таблицы, 53 рисунков. Кроме того, вступление на 7 страницах, выводы на 2 страницах, список использованных источников, который включает 102 наименование, и приложения на 35 страницах.

РАЗДЕЛ 1

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И СТОИМОСТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ВЕДЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ УЧАСТКАХ. АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОЙ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА СТОИМОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

1.1 Анализ направлений совершенствования методов выбора энергетически оптимальных режимов тяги

Для железнодорожного транспорта Украины, который является одним из значительных потребителей топливно-энергетических ресурсов в стране, проблема выбора и реализации на практике экономически рациональных режимов ведения поездов – является одной из ключевых. В условиях постоянного роста цен на энергоресурсы ее актуальность все возрастает. Поэтому сокращение эксплуатационных расходов – важнейшее направление повышения эффективности работы железных дорог. Разработка и внедрение на главных направлениях железных дорог Украины энергетически оптимальных графиков движений, а также соответствующих режимных карт, по прежнему остается одним из основных путей экономии энергоресурсов.

Проблематика совершенствования тяговых расчетов имеет большую историю. Различные аспекты развития теории и методов тяговых расчетов зависят от полноты учитываемых параметров процесса перевозки на некотором участке, от профиля пути, ограничений скорости [67 - 69], от способа учета стохастических и других свойств напряжений электротяговой сети [48, 67, 73, 74, 94], а также других факторов. Большой научный и практический вклад в разработку тяговых расчетов внесли: Айзинбуд К.С., Блохин Е.П., Босов А.А., Боднар Б.Е., Васильев И.И., Воскресенский Б.Д., Гетьман Г.К., Евдомах Г.В., Ерофеев Е.В., Костромин А.М., Лазарян В.А., Марквардт К.Г., Мирошниченко Р.И., Никифоров Б.Д., Навиков А.П., Палей Д.А., Петров Ю.П., Почаевец Э.С., Плакс П.В., Пузанов Н.Я., Розенфельд В.Е., Савич Я.Е., Сидельников В.М., Скалозуб В.В., Тартаковский Э.Д. и другие ученые.

Проблема расчета оптимальных режимов ведения поездов и разработки и внедрения соответствующих режимных карт движения обсуждается во внушительном числе работ [14 - 16, 47]. Одним из основных при этом является выбор показателей эффективности и критериев, позволяющих определить оптимальные режимы вождения поездов при электрической тяге. В работах по оптимальным тяговым расчетам [67, 74, 80], а также ряде других, предложен набор показателей эффективности: потребление энергии на тягу поезда, время хода, приведенные затраты. В [30] вводится изопериметрическое ограничение по времени движения по участку, выполнено исследование влияния на оптимальные режимы движения основного сопротивления

поступательному движению, массы поезда, уровня напряжений в контактной сети. В качестве критерия эффективности управления принимается минимум потребления электроэнергии; для электрифицированных линий железных дорог в основном критерием является минимум электрической энергии, потребленной на тягу поезда.

По-прежнему важным направлением исследований в области тяговых расчетов является разработка методик, учитывающих переменное напряжение на токоприемнике движущегося электровоза [8, 48, 49, 52, 53, 60, 61, 73, 74, 93]. Здесь один из важных результатов получен путем учета падения напряжения от тока рассматриваемого электровоза и сопутствующего поездопотока [66 - 69]. Важный теоретический и практический вопрос о возможности замены переменного напряжения в тяговой сети его математическим ожиданием исследован в [81], где утверждается, что такая замена в общем случае не правомерна.

Работы [1, 58] рассматривают поезд как материальную точку, в то же время в [2, 46] и многочисленных других моделью поезда является нерастяжимая гибкая нить заданной длины, а в качестве методов оптимизации режимов ведения поездов используются: принцип максимума Понтрягина, дискретное динамическое программирование, итерационные методы теории математического программирования. В работах в [9, 10] исследованы математические аспекты задачи тяговых расчетов. В [11, 16, 27] рассмотрены задачи тягового расчета во взаимосвязи с вопросами продольной динамики, энергетических затраты на перемещение поезда, устойчивости экипажей в колее. В качестве основного результата этого подхода получено более точное решение задачи рационального управления движением поездов.

Развитие моделей и методов реализации задач оптимизации тяговых расчетов ведется, исходя из возможности получения необходимых данных, обеспечения требований к точности и времени получения решения [44, 62, 63, 66]. В [44] разработан подход к задаче оптимизации режимов как к многоуровневой задаче стохастического программирования, что обусловлено ее высокой сложностью, наличием множества случайных и неопределенных факторов с зависимостью от организации потоков вагонов и др. В модели выделяются уровни: – 1) потоки поездов, – 2) электротяговая сеть, – 3) режимы ведения поездов. Для них определены и характеристики эффективности, которыми для уровней 2) – 3) являются: потребление электроэнергии на тягу поездов, стоимость потребленной на тягу электроэнергии, потери в тяговой сети, связанные с выбранными режимами ведения поездов, средний уровень напряжения на токоприемнике, время хода по участку, температура двигателей ЭПС, оценка безопасности при выбранных режимах ведения поезда.

Как отмечено в [23, 72] в связи с переходом Укрзализныци на работу в оптовом рынке электроэнергии (ОРЭ) все большую актуальность приобретает проблема создания энергетически и оптимальных по стоимости технологий реализации процесса перевозок. Здесь в качестве

критериев используются минимум потребления электроэнергии, а также минимум стоимости электроэнергии, потребленной на тягу поездов. Применение стоимостных показателей эффективности ведения поездов приводит к необходимости рассмотрения вопроса об использовании переменных тарифов оплаты за потребленную электроэнергию, изменяющимся по периодам суток тарифам ОРЭ, как нового компонента задач оптимального ведения поездов [14, 15, 24].

Значительные различия тарифа на электроэнергию в различные периоды суток (до 7 раз в пиковые и ночные часы), необходимость корректировки режимов ведения поезда в разные периоды суток, необходимость разработки пакета режимных карт движения, учета различий в стоимости активной и реактивной энергии и др., делают актуальными такие аспекты как требование более точного расчета электропотребления на тягу поездов, разделяя энергию на активную и реактивную. Существенное влияние на режимные карты ведения пассажирских поездов в условиях применения дифференцированных тарифов и тарифов ОРЭ впервые установлено в работах [81, 83]. Здесь наглядно показана существенно различная эффективность одной и той же траектория движения поезда, которая размещается в различных временных зонах, имеющих различные тарифы на электроэнергию. В качестве одного из выводов отмечена потребность в нескольких режимных картах вождения поездов в различные периоды суток.

При анализе режимов рационального вождения поездов с учетом переменных тарифов на электроэнергию проявляется важная новая пространственно-временная взаимосвязь стоимостно -энергетических показателей с задачами организации грузовых железнодорожных перевозок на электрифицированных участках в целом.

В литературе для расчетов оптимальных режимов вождения поезда предложены различные формы представления уравнений движения [20, 21, 44, 47, 63], которые были проверены и использованы на практике. При этом учитываются различные аспекты движения поездов. В работе [64] предложено преобразование профиля пути для выполнения тяговых расчетов с учетом длины поезда и соответствующего распределения массы. Далее в работе принята, в качестве исходной, одна из наиболее известных и полных моделей уравнений движения поезда. Она учитывает параметры длины поезда, изменения температуры тягового двигателя и другие факторы [14, 16], такая модель поезда оказалась достаточной для разработки оптимальных по стоимости режимов вождения грузовых поездов, оптимальных с точки зрения критерия минимума стоимости потребленной на тягу электроэнергии.

Представим движущийся поезд как гибкую нить длины l с погонной массой m , динамика которого описывается системой дифференциальных уравнений (1.1) при начальных условиях (1.2) [44]

(1.1)

(1.2)

где:

- координаты пути и времени;
- управление (номер позиции контроллера);
- скорость центра масс поезда;
- массы локомотива и поезда;
- сила тяги локомотива;
- напряжение контактной сети;
- сопротивление поступательному движению поезда;
- тормозная сила, действующая на поезд;
- коэффициент инерции вращающихся масс;
- ускорение силы тяжести;
- температура нагрева тяговых электродвигателей;
- t_{∞} , тепловые характеристики и токи тягового электродвигателя;
-
- суммарная сила нажатия тормозных колодок;
- случайные и неопределенные факторы задачи.

В уравнения GOTOBUTTON ZEqnNum201537 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum201537 * Charformat \! * MERGEFORMAT (1.1) – GOTOBUTTON ZEqnNum355140 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum355140 * Charformat \! * MERGEFORMAT (1.2) временная координата введена для обеспечения возможности выбора управлений в зависимости от периода суток, что соответствует условиям применения дифференцированных тарифов (ДТ) и оптового рынка – ОРЭ. Кроме того, в модели движения учитывается случайный характер переменного напряжения на токоприемнике, которое имеет место при движении электровоза

Соппротивление поступательному движению поезда в GOTOBUTTON
 ZEqnNum201537 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum201537 * Charformat
 \! * MERGEFORMAT (1.1) – (a) вычисляется согласно уравнения;

где

– сопротивление движению поезда от
 продольного профиля пути, – величина уклона;

– сопротивление движению поезда от
 кривых в плане пути; – удельное сопротивление от кривых;
 Область допустимых фазовых траекторий определяется
 следующими ограничениями

$$\text{где} \quad (1.3)$$

, – соответственно начальная и конечная координаты пути
 участка между остановками поезда;

– максимально допустимая температура перегрева ТЭД;

– максимально допустимая скорость движения поезда.

Ограничения, накладываемые на управления в соответствии с
 правилами технической эксплуатации [70] имеют вид:

$$\text{где} \quad (1.4)$$

– область допустимых управлений;

– максимально допустимый ток ТЭД;

– нагрузка на ось экипажа;

- коэффициент сцепления колеса с рельсом;
- сила нажатия тормозных колодок колесной пары;
- коэффициент трения тормозной колодки о колесо.

Изопериметрическое ограничение по времени хода поезда по участку представляется следующим образом:

$$\text{где } \dots, \quad (1.5)$$

- заданное время движения на участке между остановками поезда.
- В задачах выбора энергетически оптимальных режимов тяги

критерием оценки качества закона управления на участке является минимум функционала, представляющего расход электроэнергии на тягу поезда

$$\text{где } \dots, \quad (1.6)$$

- активный ток электровоза.

Задача выбора оптимального режима ведения поезда состоит в

следующем: требуется рассчитать такой закон управления, чтобы соответствующее ему решение системы уравнений $\text{GOTOBUTTON ZEqnNum201537} \setminus * \text{MERGEFORMAT REF ZEqnNum201537} \setminus * \text{Charformat} \setminus ! \setminus * \text{MERGEFORMAT (1.1)} - \text{GOTOBUTTON ZEqnNum355140} \setminus * \text{MERGEFORMAT REF ZEqnNum355140} \setminus * \text{Charformat} \setminus ! \setminus *$

MERGEFORMAT (1.2) принадлежало области, выполнялись ограничения (1.3) – (1.4), целевой функционал оптимальности (1.6) принимал минимальное значение, а начальная и конечная точки траектории принадлежали соответственно множествам начальных

и конечных значений.

Согласно работы [78], переменное напряжение на токоприемнике движущегося электровоза может оценивается как разность ЭДС тяговой подстанции и потерь напряжения в тяговой сети относительно начала координат

(1.7)

Для потерь напряжения первое слагаемое (1.7) оценивает падение напряжений от сопутствующего потока поездов, а вторая – падение напряжений от собственного тока электровоза. Заметим, что токопотребление расчетного поезда может отличаться от параметров средневзвешенного поезда, (1.7).

В GOTOBUTTON ZEqnNum204843 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum204843 * Charformat \! * MERGEFORMAT (1.7) обозначено:

- , погонное сопротивление тяговой сети;
- коэффициенты влияния, когда - это коэффициент распределения токов в точке тяговой сети, при размещении электровоза в точке, а коэффициент задает влияние ЭДС тяговой подстанции в сечении тяговой сети, а – номер участка. Напряжение на токоприемнике ЭПС в точке вычисляется как:

(1.8)

где

ЭДС тяговой подстанции,

потери напряжения на внутреннем сопротивлении рассматриваемой подстанции.

Исследованию влияние уровня напряжений в тяговой сети на работу ЭПС посвящены работы [47, 48, 74], и ряд других. В [81] отмечается, что априорное фиксирование случайных и неопределенных факторов, по сути, означает изоляцию задачи расчета режимов вождения поезда от ее существенных связей, как с сопутствующим поездопотоком, так и с тяговой сетью. Установленные без учета факторов неопределенности режимы управления движением поезда могут претерпевать существенные изменения при реализации.

В работе [14] показано, что точное управление локомотивом при ведении поезда позволяет существенно и в краткие сроки снизить расход энергоресурсов. Разработана математическая и информационная модель для исследования возможности реализации автоматического ведения поездов с учетом фактически измеренного напряжения на токоприемнике электровоза, а также ряда других параметров. Для этого разработаны алгоритмы выполнения тягового расчета, учитывающие информацию,

поступающую от датчиков скорости, уровня напряжения в тяговой сети, тока, позиции контроллера выставленной машинистом электровоза. В процессе математических и экспериментальных исследований было установлено, что разработанная система оптимального ведения поезда позволяла уменьшить удельный расход электроэнергии на тягу до 8% за счет использования рекомендаций, поступающих от системы ведения к машинисту.

Среди рассматриваемых в [14] задач оптимального управления движением локомотива выделены следующие цели и соответствующие критерии. Одним из критериев является минимум времени хода до пункта назначения. Управление, оптимальное по этому критерию есть оптимальным по быстродействию, оно обеспечивает наибольшую пропускную способность на электрифицированном участке. По этому критерию производят тяговые расчеты в вычислительных центрах железных дорог Укрзализныци [13]. Другим критерием является минимизация общих расходов на перевозки, когда установлено расписание движения поездов. Суммарные расходы складываются из потерь на отвлечение груза из оборота на время его транспортировки, расходов на амортизацию подвижного состава, зарплаты и расходов электроэнергии на тягу. Если время движения задано, то оно определяет составляющие всех расходов, кроме расхода энергоресурсов на тягу, который зависит не только от времени движения, но и от способа регулирования скорости на участках движения поезда. Таким образом, организация оптимального ведения поезда машинистом минимизирует тем самым и суммарные расходы.

Математическое моделирование оптимального движения поезда выполняется с заданным шагом пути, который можно произвольно фиксировать. В модели [14] определен набор управляющих параметров, с помощью которых определяется закон движения поезда. Список этих параметров зависит от типа локомотива и соответствует его реальным элементам управления. Для электровозов постоянного тока это – режимы тяги (тяги, выбег, рекуперативное или пневматическое торможение); схема соединения тяговых двигателей (С, СП, П); позиция пусковых реостатов; позиция ослабления поля в режиме тяги; позиция ослабления поля в режиме рекуперации. Для электровозов переменного тока без рекуперативного торможения – режимы тяги (тяги, выбег, пневматическое торможение); схема соединения вторичных обмоток тягового трансформатора; позиция ослабления поля в режиме тяги.

Кроме управляющих, существуют параметры, определяющие траекторию движения поезда, прямое изменение значений которых невыполнимо, но их можно проверять в процессе расчета траектории. Параметрами траектории движения являются следующие – скорость движения поезда, сила тяги локомотива, ток двигателя, напряжение на токоприемнике локомотива, реактивная ЭДС на коллекторе двигателя. В моделях автоматического ведения используют такие ограничения на значения параметров траектории по: скорости движения по пути

следования, току двигателя относительно номинального, сцеплению отдельно для режимов тяги и торможения относительно максимально допустимой силы тяги, определяемой по приведенным в ПТР выражениям в зависимости от типа локомотива [11], ограничение по реактивной ЭДС относительно максимально допустимой реактивной ЭДС, зависящей от скорости движения.

В процессе оптимизации закона движения задаются такие параметры, которым соответствует минимальное время хода, но максимальное потребление энергии. Процедура оптимизации оканчивается, когда скорость приблизится к заданной конечной скорости.

Приведенный анализ показывает, что и в рассмотренной модели оптимального движения поезда на основе непосредственного измерения напряжения на токоприемнике не учитывается (более в такой форме не может быть учтена) переменность тарифов на электроэнергию по периодам суток, что не предусмотрено и в [11].

Правила тяговых расчетов [11] и большинство ранее выполненных исследований не принимают во внимание изменения стоимости энергии во времени. Вместе с тем, как показано в работах [81, 83], задача синтеза режимов ведения поезда в условиях применения переменных тарифов оплаты электроэнергии имеют значительную специфику, ее дальнейшему исследованию и посвящена диссертационная работа.

Как указано в [81, 83, 59] проблема энергетической оптимальности процесса железнодорожных перевозок является комплексной и носит организационно-экономическое содержание. В то же время большая сложность задачи по организации оптимального ведения поезда, как основного звена, в первую очередь определяется полнотой учета множества факторов характеризующих профиль участка, силы, модель поезда и другие факторы. В зависимости от полноты имеющейся совокупности данных для решения задачи расчета оптимальных режимов тяги, применяются различные методы, основанные на моделях непрерывного и дискретного оптимального управления, а также комбинированные методы, обеспечивающие более высокие вычислительные свойства расчетных процедур [81].

Рассмотрим некоторые основные проблемы теории выбора оптимальных управлений движением поезда по участку, соответствующие модели GOTOBUTTON ZEqnNum201537 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum201537 * Charformat \! * MERGEFORMAT (1.1) – (1.6). Для расчетов оптимальных по расходу электрической энергии (топлива) траекторий ведения поездов применяются математические методы теории оптимального управления [81]. Выделим следующие основные методы теории оптимального управления, которые применяются для решения задач расчета рациональных режимов тяги при движении поезда по участку:

- 1) вариационное исчисление [55];
- 2) принцип максимума Л. С. Понтрягина [51].

3) динамическое программирование и его непрерывные и дискретные разновидности (многошаговые методы):

4) нелинейное и стохастическое программирование [96];

векторная оптимизация [19];

методы теории нечеткого управления [REF_Ref241182425 \n \h 7, 25, 77] и др.

В рамках каждого из основных подходов имеется их дальнейшая детализация. Методы поиска решений в пространствах состояний разделяются на:

а) градиентные – градиентного спуска, покоординатного спуска (Гаусса-Зейделя), наискорейшего спуска и др.;

б) случайные – статистические, в том числе с адаптацией и самообучением, представляющие различные модификации и гибриды с регулярными методами, Монте-Карло;

в) генетические алгоритмы и эволюционные вычисления [REF_Ref241185140 \n \h 77].

В свою очередь разработаны многочисленные формы метода динамического программирования [6]:

а) метод «киевский веник» [51];

б) метод «блуждающей трубки» [56];

в) метод локальных вариаций [18];

г) метод «бегущей волны» и др.

Рассмотрим содержание методов более подробно.

1.1.1 Методы расчета управления движением поезда на основе вариационного исчисления

Вариационное исчисление позволяет определять функции, доставляющие экстремум (максимум или минимум) различным функционалам, оценивающим качество оптимизируемого процесса [26]. Основным объектом изучения в вариационном исчислении является функционал вида

$$J[y] = \int_a^b F(x, y, y') dx, \quad (1.9)$$

то есть определенный интеграл, зависящий от независимой переменной x , искомой функции $y(x)$ и ее производной $y'(x)$.

Центральная теорема вариационного исчисления – теорема Эйлера, дающая необходимое условие того, что функция $y(x)$ доставляет экстремум функционалу (1.9) с граничными условиями $y(a) = y_a, y(b) = y_b$,

среди всех гладких (имеющих непрерывную первую производную) кривых, проходящих через те же точки, имеет

следующую формулировку: если экстремум функционала вида (1.9) существует и достигается среди гладких функций, то он может достигаться только на экстремалих.

Функционал достигает экстремума, если функция является решением уравнения Эйлера:

$$\frac{\delta J}{\delta y} = 0, \quad (1.10)$$

где ; .

В развернутом виде уравнение (1.10) представляет собой дифференциальное уравнение второго порядка, а смысл уравнения Эйлера заключается в том, что задачу определения функции, доставляющей экстремум функционалу (1.9), оно сводит к известной задаче интегрирования дифференциального уравнения.

Для функционала, зависящего от второй производной, необходимым условием экстремума является выполнение уравнения Эйлера – Пуассона

Для определения оптимального закона управления уравнение движения преобразуется к безразмерному виду и определяется функция , доставляющая минимум функционалу

Уравнение Эйлера-Пуассона для функционала (1.17) имеет вид

то есть распадается на два уравнения , откуда следует, что . Таким образом, оптимальным по расходу ресурсов является режим с постоянной скоростью движения.

Величина скорости на участке экстремали выбирается такой, что, с учетом участков максимального ускорения, максимальной мощности и в режиме выбега, средняя скорость движения по перегону являлась бы заданным значением.

Практическая реализация оптимального управления состоит в следующем. Скорости на участках экстремали – величиной, которая должна быть известна перед началом движения. Эту скорость определяют из заданного времени хода и длины участка. Другой способ определения этой скорости – выполнение тягового расчета для заданной массы состава и условием, с учета участков разгона и торможения, а также падения скорости на крутых подъемах, чтобы средняя скорость движения по

перегону в целом равнялась заданной.

Таким образом, с помощью вариационного исчисления задачу выбора оптимального режима по энергетическим показателям, можно решить при допущении постоянства к.п.д. локомотива в процессе движения и прямой зависимости расхода энергоресурсов от реализуемой мощности. Достоинство метода состоит в простоте и общности итогового результата, а недостаток – невозможностью учета промежуточных режимов ведения, отсутствии конкретной схемы управления.

1.1.2 Методы расчета управления движением поезда на основе принципа максимума Понтрягина.

Принцип максимума Л. С. Понтрягина [3, 51] сводит решение к нелинейной краевой задаче, для которой выполняется поиск в пространстве сопряженных переменных. Метод является эффективным средством исследования задач оптимального управления, и представляет собой необходимое условие оптимальности. Принцип максимума расширяет классическое вариационное исчисление на случаи, когда управляющие воздействия ограничены (принадлежат замкнутой области) и описываются кусочно-непрерывными функциями, а координаты (переменные состояния) принадлежат открытой области. При этом управление ищется в классе кусочно-непрерывных функций, так, чтобы при переходе из начальной точки траектории в конечную точку функционал качества достигал экстремума.

В соответствии с постановкой задачи исследования составляется гамильтониан вида [3, 51]

$$H = U + \lambda_1 I + \lambda_2 \dots, \quad (1.11)$$

где U , I – соответственно напряжение в контактной сети и потребляемый ток;

$\lambda_1, \lambda_2, \dots$ – вспомогательные переменные (множители Лагранжа), определяемые из сопряженной системы дифференциальных уравнений;

$$\dot{\lambda}_1 = -\frac{\partial H}{\partial x_1}, \quad \dot{\lambda}_2 = -\frac{\partial H}{\partial x_2}, \quad \dots; \quad (1.12)$$

$$\lambda_1 = \lambda_1(t_0), \quad \lambda_2 = \lambda_2(t_0), \quad \dots. \quad (1.13)$$

Из уравнения (1.13) при постоянстве уклона на каждом элементе профиля пути находят что $\lambda_1 = \text{const}$, т.е. λ_1 постоянна в пределах профиля пути, имеющего неизменный уклон.

Условие оптимальности процесса движения для электрической тяги имеет вид:

$$U - \lambda_1 I = 0. \quad (1.14)$$

т.е. в каждый момент времени необходимо выбирать такое управление , которое обеспечивает выполнение условия GOTOBUTTON ZEqnNum207531 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum207531 * Charformat \! * MERGEFORMAT (1.14), здесь .

Для практической реализации задачи с помощью вычислительных средств ее подвергают дискретизации, разбивая весь исследуемый участок на шаги варьирования режимов. Скорость на -м шаге определяют из выражения

$$, \quad (1.15)$$

где – скорость в начале шага интегрирования, принимается равной шагу варьирования;

– время в пределах -го шага;

, – постоянные на -м шаге соответственно параметры скорости и времени. характеризует инерционные свойства поезда и представляет собой время, в течении которого поезд достиг бы установившейся скорости , если бы двигался с постоянным ускорением, равным ускорению в начале шага;

;

$$. \quad (1.16)$$

Частная производная вычисляется прямым дифференцированием или приближенно аппроксимированием.

Решением уравнения (1.12) для -го шага будет

$$, \quad (1.17)$$

где – значение вспомогательной переменной в начале шага;

.

После преобразования гамильтониана (1.11), дифференцирования GOTOBUTTON ZEqnNum202283 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum202283 * Charformat \! * MERGEFORMAT (1.15) по времени и

подстановки GOTOBUTTON ZEqnNum202283 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum202283 * Charformat \! * MERGEFORMAT (1.15) – GOTOBUTTON ZEqnNum168843 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum168843 * Charformat \! * MERGEFORMAT (1.16) в (1.11), получаем значение критерия оптимальности на шаге варьирования при постоянном значении , поскольку оно относится к началу шага. Это позволяет выбирать оптимальный режим управления в начале шагов варьирования, и до интегрирования уравнений, что существенно сокращает объем вычислений и, соответственно, ресурс ЭВМ. Критерий оптимальности управления на -м шаге варьирования:

$$, \quad (1.18)$$

где – позиция контроллера машиниста;
– номер элемента профиля пути.

Значение должно быть отрицательным и постоянным на всем анализируемом участке за исключением промежутков, где система находится на границе допустимой области.

Для определения оптимального режима необходимо задать начальными значениями основные , и вспомогательные переменные , переменные, которые рассчитывают значение выражения (1.18) в начале движения задавая различными режимами управления; выбирают режим, удовлетворяющий (1.18). Режимы скорости при оптимальном управлении получают, решая GOTOBUTTON ZEqnNum202283 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum202283 * Charformat \! * MERGEFORMAT (1.15) - GOTOBUTTON ZEqnNum585031 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum585031 * Charformat \! * MERGEFORMAT (1.17) на первом шаге варьирования. Принимая в качестве начальных переменных в конце предыдущего шага, определяют оптимальный режим управления и траекторию на последующих шагах, двигаясь, справа налево до конца первого элемента. Когда конечное состояние поезда не совпадает с заданным, тогда изменяются начальные значения вспомогательных переменных.

Использование принципа максимума предполагает определенное упрощение, а также не полностью описывает модель поезда из-за невозможности его использования для нелинейных моделей движения. Согласно постановке задачи, по данному методу разгон и торможение должны осуществляться с максимальным ускорением, определяемым максимальными силами тяги и торможения. Для практической реализации такое решение не является приемлемым, вследствие требований условий комфортабельности для пассажиров и сохранности грузов.

1.1.3 Методы расчета управления движением поезда на основе динамического программирования Р. Беллмана

Метод динамического программирования является широко известным и наиболее универсальным методом решения задач выбора оптимального управления [6, 25]. В основу метода динамического программирования положен принцип оптимальности, который применительно к рассматриваемому процессу можно сформулировать следующим образом: «оптимальное управление поездом, начиная с любой точки траектории, не зависит от предыдущего процесса движения, а определяется лишь состоянием системы в этой точке и стратегией оптимального управления на оставшемся участке пути». Метод динамического программирования позволяет вместо определения минимума сложной функции большого числа переменных свести задачу к более простой – к последовательности минимизаций некоторых функций одной переменной.

Согласно принципу оптимальности, функционал, начиная с любой точки траектории движения, также является оптимальной траекторией, т.е. функционал вида

будет тоже иметь экстремум при управлениях :

где – функция, определяющая оптимальное управление.

Таким образом, после преобразований получим неклассическое дифференциальное уравнение в частных производных, называемое дифференциальным уравнением Беллмана [6]:

$$, \quad (1.19)$$

где – правые части уравнения движения системы;

– функция, характеризующая оценку конечного состояния системы.

Выражение (1.19) представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение в частных производных относительно функции , осложненное операцией минимума, решение которого в общем виде не представляется возможным. Поэтому приходится пользоваться в большинстве случаев численными методами оптимизации [3].

Геометрическая интерпретация задачи оптимального ведения поезда представлена на рис. 1. Начальному состоянию объекта управления соответствует точка , а конечному – . Переход из начального состояния в конечное состояние происходит с помощью переходной функции изменения режимов, ограниченной на каждом шаге варьирования максимальной

переменной – с интервалом , по – , причем шаг по скорости с целью экономии машинного времени рекомендуется выбирать

равномерным. Таким образом, на последнем шаге варьирования в

допустимом диапазоне скоростей из каждой точки деления этого диапазона, принятой за начальную, интегрируя уравнения движения поезда, определяют траектории при различном управлении (на рис. 1.1 показано шесть траекторий для последнего шага). Из полученных траекторий выбирают ту, которая попадает в точку с установленной заранее погрешностью, т.е. условием выбора режима на последнем шаге является только попадание в конечную точку, поэтому все траектории, приводящие в точку , являются оптимальными. В дальнейших шагах по выбору оптимального варианта рассматривается критерий оптимальности каждой кривой режима варьирования.

Значения критерия для -го шага определяется выражением

$$, \quad (1.20)$$

где – расход энергоресурсов;
– множитель Лагранжа;
– время движения.

Таким образом, критерии оптимальности на последнем шаге для различных управлений (рис. 1.1):

Для рассматриваемых процессов, согласно принципу Беллмана, оптимизация режимов тяги проводится на каждом не последнем шаге с учетом влияния последующих оптимальных стратегий управления.

Когда переходят к предпоследнему шагу – с

диапазоном скоростей , который также поделен на интервалы . Из каждой точки деления при работе на различных позициях, интегрируя уравнения движения поезда, определяются все возможные траектории. Траектории, приводящие в начало допустимых, на последнем шаге (т.е. ведущих в точку) сравнивают между собой, а остальные из рассмотрения исключаются. Таким образом, критерий оптимальности стратегии управления на предпоследнем шаге устанавливается как минимум критерия оптимальности на двух

предпоследних шагах:

где α_k , β_k – значение критерия оптимальности соответственно на последнем и предпоследнем шагах (включая последний шаг);

– значение критерия оптимальности только на шаге k ;

– управление (положение контроллера машиниста);

– начальная скорость на шаге k ;

верхний индекс «о» обозначает оптимальную траекторию.

Аналогичные операции выполняются до начала участка. Определяя критерий оптимальности для k -го шага

получают из траекторий одну оптимальную исходящую из начальной точки с начальными по шагам скоростями

и соответствующими им управлениями

. Суммируя времена хода по шагам, получают расчетное время движения по участку по оптимальной траектории

. Если это время не удовлетворяет условию

где $T_{\text{зад}}$ – заданное графиком движения время движения по участку;
 ΔT – допустимая погрешность;

весь расчет повторяется с другим значением множителя Лагранжа (уменьшение увеличивает). Окончательно оптимальная траектория рассчитывается в прямом направлении при известном наборе управлений.

1.1.4 Выбор режимов тяги с учетом переменных тарифов на электроэнергию и стохастических процессах в тяговой сети

Содержание задачи выбора оптимального управления поездом, присутствие факторов случайности и неопределенности параметров, позволяет классифицировать ее как задачу стохастического оптимального управления (ЗСОУ). Для ее решения применяют приближенные методы, основанные на построении детерминированных аналогов моделей задачи. Здесь одним из основных методов является переход к анализу математических ожиданий случайных характеристик моделей задач. В частности, напряжение на токоприемнике ЭПС принимается, неизменным, равным математическому ожиданию. Такой подход требует тщательного анализа, поскольку не всегда приводит к детерминированным аналогам, которые являются адекватными исходной задаче [60].

Формально замена стохастической задачи выбора режимов ведения поезда, задачей в форме модели нелинейного программирования возможна, если на основе исходных данных в математической модели имеет смысл математическое ожидание . Тогда вместо рассмотрения случайных функций, формирующих модель управления, решается задача вида:

.DSMT4

,

которая является задачей нелинейного программирования. Такая замена стохастических задач оптимизации их детерминированными аналогами возможна не в любом случае [14, 15]. Правомочность перехода к представленной выше форме модели задачи выбора управления тягой поезда при учете стохастических свойств напряжения на токоприемнике движущегося электровоза требует дополнительного обоснования.

Рассмотрим следующую модель стохастического оптимального управления с уравнениями движения (1.1) GOTOBUTTON ZEqnNum355140 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum355140 * Charformat \! * MERGEFORMAT (1.2):

(1.21)

(1.22)

где

(1.23)

(1.24)

В (1.21) – (1.24) обозначено: Y^* – заданный объем перевозок, - эквивалентное сопротивление тяговой сети, P^* – вероятность выполнения Y^* - , $M[^*]$ – знак математического ожидания. Ограничения задачи задают следующие множества : $G_1 = G_u$ – множество управлений (позиции контроллера);

(1.25)

ограничение вероятностных требований на область допустимых фазовых траекторий, где P_2 – граничная вероятность, а

- конечная координата рассматриваемого участка пути;

(1.26)

вероятностные ограничения на возможные управления $u(x, t)$ в соответствии с требованиями технической эксплуатации тяговых двигателей, где P_3 – заданное значение вероятности, а область допустимых управлений равна

допустимый ток – , q_0 – нагрузка на ось экипажа, - коэффициент сцепления колеса с рельсом, K' – сила нажатия тормозных колодок колесной пары, - коэффициент трения тормозной колодки о колесо;

(1.27)

ограничение по времени хода T^* , P_3 - заданное значение вероятности.

Учет показателя стоимости электроэнергии при переменном тарифе оплаты в различные периоды суток (дифференцированный тариф – стоимость в ночной и пиковый период колеблется более чем в 7 раз), наряду с показателями электропотребления, скорости и времени движения по участку, привел к существенному расширению содержания задачи поиска оптимального управления и потребовал усовершенствования методов для эффективной реализации задачи [15].

Для учета показателя стоимости можно внести дополнения в математическую модель, пусть функция $c(t)$ – определяет ценовой коэффициент в зависимости от времени t , тогда критерий оценки закона управления на участке (1.24) представляет собой функционал (затраты

цены электроэнергии на тягу поезда)

(1.28)

управление полученное посредством такого функционала будет оптимально по затратам на цену электроэнергии.

В работах [14, 15, 81] выполнены исследование свойств математических моделей задачи по выбору оптимальных режимов ведения поезда, в которых учитывается переменный, случайный, характер напряжений в электротяговой сети, исходы из свойств математических моделей стохастических процессов. При этом не используются свойства сопутствующего поездопотока GOTOBUTTON ZEqnNum905051 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum905051 * Charformat \! * MERGEFORMAT (1.21). Такой подход имеет достаточно оснований в связи с существенным изменением грузонапряженности перевозок на железных дорогах Украины в последний период (по сравнению с 80 – 90 годами прошлого столетия, когда были разработаны модели на основе (1.5) – GOTOBUTTON ZEqnNum190936 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum190936 * Charformat \! * MERGEFORMAT (1.6)). В задачах выбора режимов управления поездом часто напряжение на токоприемнике движущегося электровоза считается постоянным, величина которого принимается равной математическому ожиданию [11, 14]. Как показано в [81, 83, 82] на основе анализа функций уравнений движения (1.1) и характеристик ограничений (1.3) – GOTOBUTTON ZEqnNum389590 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum389590 * Charformat \! * MERGEFORMAT (1.4) можно сделать вывод о том, что в этом случае не выполняются неравенства Иенсена [95] вида

(1.29)

где

– действительная случайная величина, – непрерывная выпуклая вверх функция действительного переменного. При этом возможны существенные различия между решениями приближенной и стохастической задачи выбора оптимального управления движением поезда.

В рассматриваемой задаче может быть получена оценка

для математического ожидания величины напряжения на токоприемнике ЭПС, поэтому ЗНСП формально представима в следующем виде

$$, \quad (1.30)$$

Известно, что «осредненная» задача ЗНСП (1.29) дает точное решение стохастической, если все функции (1.30) линейны относительно набора , или же выполняются отношения

$$, \quad (1.31)$$

В случае (1.31) любое допустимое решение (1.30) будет допустимым и для ЗНСП-задачи [3], причем для оптимальных решений выполнены отношения

$$(1.32)$$

Соотношения (1.31) – GOTOBUTTON ZEqnNum559431 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum559431 * Charformat \! * MERGEFORMAT (1.32) имеют место, если выполняются неравенства (1.29).

Анализ показывает, что правые части (1.1) не являются линейными непрерывными и выпуклыми вверх функциями действительного переменного относительно , как и некоторые другие элементы дискретизированной модели задачи (1.3) – (1.4). В именно, в уравнениях (1.1)-а) невыпуклой является сила тяги, а в (1.1)-в) – функции и

. К невыпуклости модели приводит и способ вхождения этих параметров в уравнения. Анализ модели ЗВРП показывает, что замена напряжения значением математического ожидания может приводить к существенным различиям между решениями стохастической задачи оптимального управления и ее детерминированного эквивалента. Далее приводятся результаты расчетов, которые подтверждают это положение.

Другим теоретическим подходом к решению задачи по выбору режимов ведения поездов с учетом случайного переменного напряжения в тяговой сети является представление процесса управления как двухэтапной задачи стохастической оптимизации [15, 60]. Такое описание процессов основано на следующих положениях. В связи со стохастическими факторами , обусловленными нестабильностью напряжений в электротяговой тяговой сети и напряжений на токоприемнике ЭПС , действительные режимы ведения поездов отличаются от режимов, рассчитанных для фиксированных . Поэтому здесь возникает задача выбора оптимальных режимов для (1.1) – (

1.4), которые являются наиболее устойчивыми к присутствующей в задаче неопределенности. Для ЗРВП считается, что “защищенность” выбранных режимов ведения поездов означает необходимость минимальных дополнительных затрат электроэнергии на их коррекцию при движении. Для этого ЗРВП может быть представлена в форме двухэтапной задачи стохастического оптимального управления [15, 81]. В двухэтапной ЗРВП в качестве вектора, зависящего от неопределенных факторов, выбираются значения возможных диапазонов напряжений, отличных от принятого расчетного номинала :

$$\quad , \quad (1.33)$$

В векторе (1.33) через введены оценки вероятностей для заданной системы диапазонов значений напряжений . Обозначим через дополнительный расход электроэнергии, обусловленный неточностью задания напряжений в уравнениях движения (1.1) и компенсируемый за счет тока . Тогда критерий двухэтапной ЗРВП, как минимизацию ожидаемых затраты на реализацию управления и его коррекцию, принимает следующий вид

$$\quad , \quad (1.34)$$

где

$\left| \right|$, величина электропотребления из (3), – знак математического ожидания.

В двухэтапной задаче стохастического оптимального управления (1.1) (1.4), (1.33) `GOTOBUTTON ZEqnNum452556 \* MERGEFORMAT REF ZEqnNum452556 \* Charformat \! \* MERGEFORMAT (1.34)` корректирующее множество совпадает с множеством управлений, а вектор параметров (1.33) представляет дополнительную информацию, необходимую для постановки двухэтапной ЗРВП. Значения компонентов (1.33) могут быть рассчитаны для каждого электрифицированного участка на основе применения интегрированных информационных технологий процесса перевозок (ВМД – вагонной информационной модели дороги, энергетической модели дороги [99]).

Аналогичная постановка двухэтапной задачи расчета оптимальных режимов ведения поезда может быть сделана с использованием критерия минимума стоимости электроэнергии, когда учитываются различные тарифы оплаты электроэнергии по периодам суток.

В работах [11–14] для непосредственной реализации стохастических моделей задач оптимизации режимов ведения поезда предложен специализированный метод на основе непрерывного динамического программирования (НДП). Как показали численные исследования, использование НДП позволило на порядок сократить время расчетов по сравнению с методом дискретного динамического программирования на равномерной по координате скорости сетки.

Разработка НДП алгоритма управления тягой выполнена в разделе 3.1.

1.1.5 Методы теории нечеткого управления на основе баз правил

Для применения математических методов анализа и исследования сложных систем возможно использование нового математического аппарата, позволяющего формально описывать нечеткие понятия, которыми оперирует человек, описывая цели и представления о системе. Таким аппаратом является постоянная теория нечетких множеств [7, 22], созданная Л.Заде, первая фундаментальная работа которого была опубликована еще в 1965 г. На протяжении последних тридцати лет это новое направление интенсивно развивалось, появились сотни работ, посвященных теоретическим и прикладным аспектам теории нечетких множеств.

Понятие нечеткой и лингвистической переменных используется при описании объектов и явлений с помощью нечетких множеств.

Нечеткая переменная характеризуется тройкой (α, X, A) , где

α — наименование переменной;

X — универсальное множество (область определения α);

A — нечеткое множество на X , описывающее ограничения (т.е. $\mu_A(x)$) на значения нечеткой переменной α .

Лингвистической переменной (ЛП) называется пятерка (β, T, X, G, M) , где

β — наименование лингвистической переменной;

T — множество ее значений (терм-множество), представляющих собой наименования нечетких переменных, областью определения каждой из которых является множество X . Множество T называется базовым терм-множеством лингвистической переменной;

G — синтаксическая процедура, позволяющая оперировать элементами терм-множества T , в частности, генерировать новые термы (значения). Множество $TUG(T)$, где $G(T)$ — множество сгенерированных термов, называется расширенным терм-множеством лингвистической переменной;

M — семантическая процедура, позволяющая превратить каждое новое значение лингвистической переменной, образуемое процедурой G , в нечеткую переменную, т.е. сформировать соответствующее нечеткое множество.

Используемый в экспертных и управляющих системах механизм нечетких выводов в своей основе имеет базу знаний, формируемую специалистами-экспертами предметной области в виде совокупности нечетких предикатных правил вида:

Правило 1: если x есть A_1 , тогда y есть B_1

Правило 2: если x есть A_2 , тогда y есть B_2

.....

Правило N : если x есть A_n , тогда y есть B_n

где x — входная переменная, y — переменная вывода (имя для значения данных, которое будет вычислено); A и B — функции принадлежности, определенные соответственно на x и y .

Знание эксперта $A \rightarrow B$, отражающее нечеткое причинное отношение предпосылки и заключения, можно назвать нечетким отношением R :

$$R = A \rightarrow B,$$

где « $\rightarrow$ » называют нечеткой импликацией.

Отношение R можно рассматривать как нечеткое подмножество прямого произведения $X \times Y$ полного множества предпосылок X и заключений Y . Таким образом, процесс получения (нечеткого) результата вывода B' с использованием наблюдения A' и знания $A \rightarrow B$ можно отобразить в виде формулы

$$B' = A' \ R = A' \ (A \rightarrow B)$$

где « $\circ$ » — операция свертки.

В соответствии с этой формулой в общем случае нечеткий логический вывод осуществляется в следующие этапы [7].

1. Нечеткость (введение нечеткости, фаззификация, fuzzification).

Функции принадлежности, определенные на входных переменных, применяются к их фактическим значениям, для того чтобы определить степени истинности каждой предпосылки каждого правила.

2. Логический вывод. Вычисленное значение истинности для предпосылок каждого правила применяется к заключениям каждого правила. Это приводит к одному нечеткому подмножеству, которое будет назначено каждой переменной вывода для каждого правила. В качестве правил логического вывода обычно используются только операции $\min$ (минимум) или prod (умножение). При операции $\min$ функция принадлежности вывода «отсекается» по высоте, соответствующей вычисленной степени истинности предпосылки правила (нечеткая логика «И»). При операции умножения функция принадлежности вывода масштабируется при помощи вычисленной степени истинности предпосылки правила.

3. Композиция. Все нечеткие подмножества, назначенные к каждой переменной вывода (во всех правилах), объединяются вместе, чтобы сформировать одно нечеткое подмножество для каждой переменной вывода. При подобном объединении обычно используются операции $\max$ (максимум) или sum (сумма). При операции $\max$ комбинированный вывод нечеткого подмножества конструируется как поточечный максимум по

всем нечетким подмножествам (нечеткая логика «ИЛИ»). В случае операции суммы комбинированный вывод нечеткого подмножества конструируется как поточечная сумма по всем нечетким подмножествам, назначенным переменной вывода правилами логического вывода.

4. Дополнительно может быть введен этап приведения к четкости (дефаззификация, defuzzification), используемый, когда целесообразно преобразовать нечеткий набор выводов в четкое число.

Рассмотрим некоторые наиболее часто используемые модификации алгоритма нечеткого вывода, полагая, для простоты, что в базе знаний содержатся только два нечетких правила вида:

П1: если x есть $A1$ и y есть $B1$, тогда z есть $C1$,

П2: если x есть $A2$ и y есть $B2$, тогда z есть $C2$,

где x, y — имена входных переменных, z — имя переменной вывода, $A1, A2, B1, B2, C1, C2$ — некоторые заданные функции принадлежности, при этом четкое значение $z0$ необходимо определить, на основе приведенной информации и четких значений $x0, y0$

Алгоритм Mamdani [REF _Ref241185140 \n \h 77, REF _Ref241186930 \n \h 102]. Формально он может быть описан следующим образом.

1. Нечеткость: находятся степени истинности для предпосылок каждого правила: $A1(x0), A2(x0), B1(y0), B2(y0)$.

2. Нечеткий вывод.

Находятся уровни «отсечения» для предпосылок каждого из правил (с использованием операции $\min$)

$$\alpha 1 = A1(x0) \wedge B1(y0),$$

$$\alpha 2 = A2(x0) \wedge B2(y0),$$

где через $\wedge$ обозначена операция логического минимума ($\min$).

Затем находятся «усеченные» функции принадлежности

$$\mu(z) = (\alpha 1 \wedge C1(z)),$$

$$\mu(z) = (\alpha 2 \wedge C2(z)).$$

3. Композиция:

С использованием операции максимум ($\max$, обозначаемой как $\vee$) производится объединение найденных усеченных функций, что приводит к получению итогового нечеткого подмножества для переменной выхода с функцией принадлежности

$$\mu \Sigma(z) = C(z) = \mu(z) \vee \mu(z)$$

4. Приведение к четкости (для нахождения $z0$) проводится, как правило, центроидным методом: четкое значение выходной переменной определяется как центр тяжести для кривой $\mu \Sigma(z)$.

Алгоритм Tsukamoto. Исходные посылки — как у предыдущего алгоритма, но функции $C1(z), C2(z)$ являются монотонными (монотонно возрастающими или монотонно убывающими)

1. первый этап: такой же, как в алгоритме Mamdani.

2. На втором этапе сначала находятся (как в алгоритме Mamdani) уровни «отсечения» $\alpha 1$ и $\alpha 2$, а затем — посредством решения уравнений

$$\alpha 1 = C1 (z1), \alpha 2 = C2 (z2)$$

четкие значения $z1$, $z2$ для каждого из исходных правил:

$$z1 = \mu C1-1(\alpha 1) , \quad z2 = \mu C2-1(\alpha 2)$$

3. Определяется четкое значение переменной вывода (как взвешенное среднее $z1$, $z2$):

Алгоритм Larsen. В алгоритме Larsen нечеткая импликация моделируется с использованием оператора умножения.

1. Первый этап — как в алгоритме Mamdani.

2. На втором этапе, как в алгоритме Mamdani первоначально находятся значения

$$\alpha 1 = A1 (x0) \wedge B1(y0) , \quad \alpha 2 = A2 (x0) \wedge B2(y0),$$

а затем — частные нечеткие подмножества $\alpha 1 C1 (z)$, $\alpha 2 C2 (z)$

3. Находится итоговое нечеткое подмножество с функцией принадлежности

$$\mu \Sigma(z) = C (z) = (\alpha 1 C1 (z1)) \vee (\alpha 2 C2 (z2))$$

4. При необходимости производится приведение к четкости как в ранее рассмотренных алгоритмах.

Предложен подход к расчету оптимальных режимов тяги, использующий модели и методы нечеткого вывода, позволяющие использовать разнородные и ограниченные данные для принятия решения о выборе рациональных режимов ведения поезда. На этапе формирования модели нечеткого управления учитывается то, что на режимы ведения поездов одинаковой массы на одном и том же участке влияют множество неопределенных факторов. Среди них отметим такие, как напряжение на токоприемнике электровоза, ограничения по скорости, метеорологические условия, случайные препятствия, квалификация машиниста. Следует также учесть, что не бывает поездов одинаковой массы и, несмотря на наличие такого постоянного фактора, как профиль пути, от которого непосредственно зависит режим ведения, рациональные режимные карты уникальны для каждой поездки.

1.1.6 Метод динамического программирования в нечеткой форме

Использование метода динамического программирования (ДП) целесообразно для задач управления, которые сводятся к многошаговым процедурам принятия решений. Однако в условиях существенных неопределенностей, связанных с информацией о процессе, нечеткостью целей, применение традиционного метода ДП без его модификаций является весьма неэффективным [25].

Такую модификацию проводят заменой принципа оптимальности нечетким функциональным неравенством. В этом случае, конечно, нельзя говорить об отыскании глобального оптимума задачи многошагового принятия решения. Речь идет о получении приемлемых с практической точки зрения результатах.

Пусть исследуемый процесс описывается уравнением состояния вида

где x - вектор состояний процесса; u - последовательность выбираемых решений; p - вектор параметров процесса; t - дискретное время k - нелинейный оператор.

Поскольку поведение процесса, его параметры, а также последовательность принимаемых решений носят нечеткий характер, для учета этих факторов вводится функция принадлежности вида $\mu(x)$, где μ - нечеткая последовательность принимаемых решений (нечеткая стратегия); x_0 - нечеткое начальное состояние; x_{max} - верхняя граница конечного состояния или результата.

Функция, описывающая обратное движение или функция возврата имеет вид

где μ - нелинейный оператор возврата.

Задача состоит в отыскании такой последовательности выбираемых решений u , которая бы приводила к оптимизации, в смысле заданной цели, функции возврата μ , при учете ограничений на состояния процесса и на принимаемые решения.

Таким образом, нечетким решением задачи достижения нечеткой цели называется пересечение нечетких множеств цели и ограничений, то есть функция принадлежности решений μ EMBED Equation.DSMT4 равна

При наличии нескольких целей и ограничений нечеткое решение описывается функцией принадлежности

В большинстве случаев функция принадлежности решения никогда не достигает значения 1. Этот результат очевиден, поскольку в действительности цели и ограничения конфликтуют друг с другом. В идеальном случае, если функция принадлежности решения нормальна, то существует значение x , которое полностью удовлетворяет целям и ограничениям. Более того, если нечеткие цели являются функциями стратегии выбора решений u , а нечеткие ограничения являются функциями состояний x , тогда положим

и получим выражение

При изменении принципа согласованности целей и ограничений к детерминированным или вероятностным многошаговым процессам принятия решений, следует, что на каждом шаге t имеется нечеткое ограничение μ_t , функция принадлежности которого является функцией переменной принятия решения x_t и существует единственная цель J , связанная с состоянием процесса на последнем шаге $N-1$. Пусть дискретное состояние s_t , а максимизирующее решение – вектор x_t^* с функцией принадлежности

и с функцией возврата

Пусть переход от $(N-u)$ -го шага к $(N-u+1)$ -му шагу описывается детерминированной функцией

Тогда функция возврата для процедуры динамического программирования описывается следующим соотношением:

.

1.2 Выводы

В разделе выполнен обзор существующих методов расчета режимов тяги поезда. Приведено описание и развитие методов энергетической и стоимостной оптимизации режимов ведения грузовых поездов на электрифицированных участках. Представлены актуальные задачи управления тягой грузовых поездов по критерию минимума стоимости электроэнергии.

Отмечено, что одним из эффективных путей экономии энергоресурсов есть внедрения энергетически оптимальных графиков движений поездов (перегонных времен хода) и оптимальных режимных карт на главных направлениях железных дорог Украины.

Проблематика усовершенствования тяговых расчетов имеет большую историю. Разные аспекты развития теории и методов тяговых расчетов зависят от полноты параметров процесса, которые учитываются, от профиля пути, ограничений скорости, от способа учета стохастических и других свойств напряжения электротяговой сети, а также других факторов.

Одной из важных современных задач является автоматизированное формирование режимов тяги грузовых поездов, учитывающих переменные тарифы на электроэнергию в условиях работы железных дорог Украины на оптовом рынке электроэнергии – ОРЭ.

Материалы раздела опубликованы в работах [29, 32, 33, 34, 36, 75].

РАЗДЕЛ 2

ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ ТЯГИ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ ТАРИФАХ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

2.1 Методики экспериментальных исследований режимов тяги грузовых поездов

Целью опытных поездок является оценка эффективности оптимальных режимов ведения поездов. Связь режима ведения поезда и расхода энергоресурсов обусловлена зависимостью полезной механической работы от режима ведения поезда и зависимостью к.п.д. локомотива от режима его работы, которая задается контроллером машиниста и скоростью движения. Экономичность режима ведения поезда на участке оценивается удельным расходом энергоресурсов. В эксплуатации пользуются удельным расходом энергоресурсов, отнесенным на 104 ткм брутто выполненной перевозочной работы. Проведение опытных поездок основывается на категории критической весовой нормой (КВН) грузового поезда, которой является наибольший вес поезда по тяговым свойствам локомотива, проверенный при опытных поездках. КВН устанавливается для конкретного участка и периода эксплуатации по условиям сцепления колес с рельсами и нагреву тяговых электрических машин. В соответствии с «Правила тяговых расчетов для поездной работы» (ПТР) [70] основой для задания критической весовой нормы грузового поезда является расчетный вес поезда. Расчетный вес поезда устанавливается, исходя из того, что не предполагается взятие его с места на расчетном или скоростном подъемах. Временно КВН поезда на участке может корректироваться, или движение таких поездов осуществляется с применением кратной тяги. Это предусмотрено в тех случаях, когда на расчетном подъеме вводятся ограничение скорости движения ниже расчетной, или же на предшествующих скоростным подъемам участках вводится ограничение скорости движения до такого уровня, при котором тяжелейший подъем не может быть пройден за счет использования кинетической энергии поезда со скоростями, которые допускаются ПТР. Также КВН поезда может корректироваться; если на участке эксплуатации возникают особо неблагоприятные погодные условия, характеризующиеся значительным увеличением сопротивления движению.

Методика организации опытных поездок с целью реализации оптимального ведения поезда машинистом и сбора данных для формирования соответствующей базы знаний рационального движения по участку состояла в следующем [5]. Опытные поездки проводились на участке оборота локомотива с проверкой критического веса поезда по каждому участку работы локомотивных бригад. Количество опытных поездок устанавливалось так, чтобы одним локомотивом с удовлетворительными результатами для поезда критического веса было подряд проведено не меньше трех поездок. Они проводились в период, когда на данном участке наиболее часто наблюдались неблагоприятные

условия для реализации сцепления колес с рельсами (дождь; снег; мороз; туман и т.п.), характерные для данного участка дороги. Поездки проводились с поездами, груженными, углем, металлом, рудой, нефтепродуктами и т.п., определяющими графиковую норму, а также со специальными поездами, нагруженными щебеночным балластом, прошедшим по вагонное взвешивание, а также с обычными нагруженными поездами, имеющими требуемые средние осевые нагрузки для поездов на данном участке.

Материалы опытных поездок дополнялись копиями натуральных листов, где указывались число вагонов; род вагонов; число осей вагонов. В числе опытных поездок, проведенных с одним весом поезда, предусматривались следующие варианты ведения поезда по участку: – без остановок на раздельных пунктах, а также с предусмотренными графиком движения остановками, во всех случаях с максимально допустимыми скоростями; – с остановками перед расчетным и скоростным подъемами для определения условий, которые обеспечивают пропуск поездов установленного веса.

Результаты тяговых расчетов и данных опытных поездок, как вывод об опытных испытаниях, были предоставлены начальникам служб локомотивного хозяйства и перевозок. Они содержали: – исходные данные для определения оптимального удельного расхода электроэнергии на основании норм ПТР и результатов расчета; – основные итоги опытных поездок с рекомендацией и обоснованием критической нормы веса поезда. При этом отмечались условия проведения исследовательских поездок (включая температуру внешнего воздуха, атмосферное давление, скорость ветра и т.д.), которые сопоставлялись с исходными данными, принятыми в расчете, и учтенными соответственно нормам ПТР; – условия по обеспечению пропуска поездов установленного веса; – особые условия движения поездов, которые значительно изменялись в отдельные периоды эксплуатации исходных данных, в том числе погодные условия.

Расход электроэнергии на движение поездов по участку определяется на основе соответствующих зависимостей тока и времени хода от пути по перегонам, суммируя расход электроэнергии по отдельным элементам времени согласно ПТР (разд. 2.4; 3.4).

В приложении Г представлены данные о проведении опытных поездок и использовании их результатов для формирования базы знаний опытных поездок по участку, которая используется для построения рациональных режимных карт ведения поездов в рамках нечеткой модели управления.

2.2 Исследование режимов ведения поездов с учетом ОРЭ и дифференцированных тарифов

В связи с многочисленными (24) коэффициентами цены электроэнергии в условиях ОРЭ создавать и реализовывать пакет режимных карт не представляется возможным. В связи с этим ставится задача построения аппроксимации цены электроэнергии в ОРЭ с меньшим числом коэффициентов, чтобы ее использовать при разработке пакета

режимных карт.

Для этого были проведены расчеты с ежечасным отправлением поезда при оптимизации значения целевой функции стоимости электроэнергии.

В таблице приведены распределения значений коэффициентов стоимости по часам суток для двух тарифов.

Таблица 2.1

Распределение коэффициента цены для разных тарифов оплаты электроэнергии

Период, час	Дифференцированный тариф	ОРЭ
0	0,25 (ночь)	0,7
1	0,25	0,7
2	0,25	0,7
3	0,25	0,7
4	0,25	0,7
5	1,02 (полу-пик)	0,71
6	1,02	1,16
7	1,02	1,18
8	1,8 (пик)	1,34
9	1,8	1,36
10	1,8	1,2
11	1,02 (полу-пик)	1,2
12	1,02	1,2
13	1,02	1,2
14	1,02	1,2
15	1,02	1,2
16	1,02	1,23
17	1,8 (пик)	1,28
18	1,8	1,55
19	1,8	1,57
20	1,02 (полу-пик)	1,53
21	1,02	1,44
22	1,02	1,15
23	0,25 (ночь)	0,7

Рассмотрим расчеты характеристик движения четырех поездов различной массы на одном участке пути. Пусть масса первого поезда будет 3000 т., второго 4050 т., третьего 5025 т. и четвертого 6000. В таблице показана стоимость затраченной на движение поезда электроэнергии с учетом того, что поезд отправляется в разное время суток.

С использованием дифференцированного тарифа были получены следующие результаты, таблица 2.2 и диаграмма (рис. 2.1).

Таблица 2.2

Расчетная стоимость электроэнергии при оплате по дифференцированному тарифу

Время выхода	Поезд 1 3000 т.	Поезд 2 4050 т.	Поезд 3 5025 т.	Поезд 3 6000 т.
--------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------

2:00:00	312,35	341,46	339,35	376,05
3:00:00	312,35	341,46	339,35	376,05
4:00:00	312,35	341,46	339,35	376,05
5:00:00	310,72	341,15	335,71	375,75
6:00:00	953,92	888,56	758,99	798,9
7:00:00	1274,39	1393,15	1381,29	1519,42
8:00:00	1272,74	1392,84	1380,87	1533,98
9:00:00	1932,08	1997,38	1998,06	2003,99
10:00:00	2248,93	2458,49	2540,1	2773,13
11:00:00	2250,58	2458,81	2447,04	2707,87
12:00:00	1608,58	1975,41	1956,93	2167,63
13:00:00	1274,39	1393,15	1544,35	1718,09
14:00:00	1274,39	1393,15	1384,56	1534,29
15:00:00	1274,39	1393,15	1384,56	1534,29
16:00:00	1274,39	1393,15	1384,56	1534,29
17:00:00	1272,74	1392,84	1380,87	1533,98
18:00:00	1932,08	1997,38	1998,06	2003,99
19:00:00	2248,93	2458,49	2540,1	2773,13
20:00:00	2250,58	2458,81	2447,04	2707,87
21:00:00	1608,58	1975,41	1956,93	2167,63
22:00:00	1274,39	1393,15	1544,35	1718,09
23:00:00	1276,02	1393,45	1388,21	1534,59

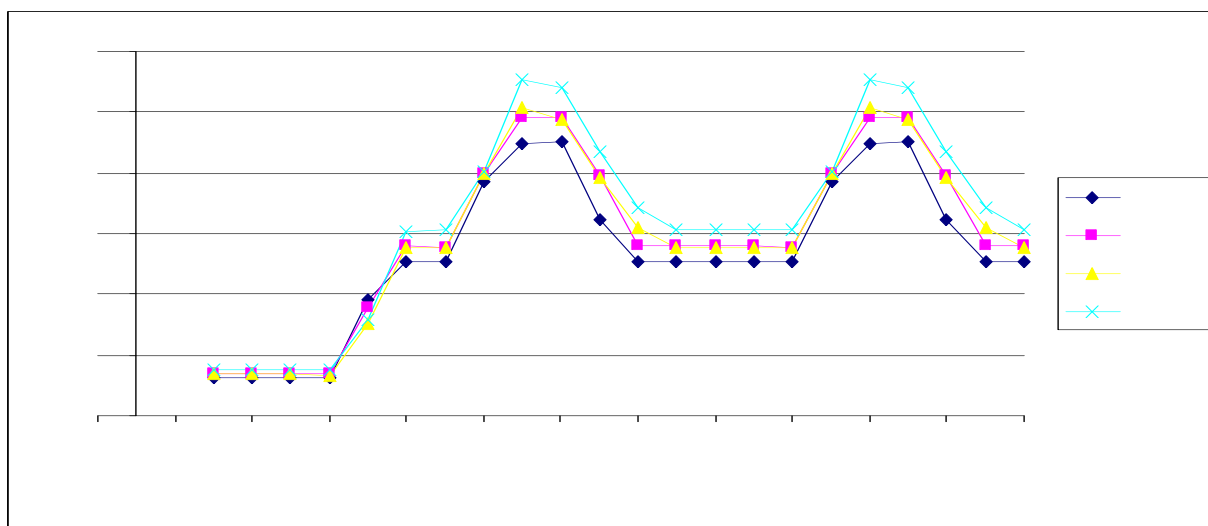


Рис. 2.1 Расчетная стоимость электроэнергии при оплате по дифференцированному тарифу

Расчет для движения поезда в ОРЭ представлен на следующей таблице и диаграмме (таблица 2.3 , рис. 2.2).

Таблица 2.3

Расчетная стоимость электроэнергии при оплате по ОРЭ

Время выхода	Поезд 1 3000 т.	Поезд 2 4050 т.	Поезд 3 5025 т.	Поезд 3 6000 т.
2:00:00	829,26	956,08	950,19	1052,94
3:00:00	829,26	956,08	950,19	1052,94
4:00:00	829,26	956,08	950,19	1052,94
5:00:00	829,23	956,08	950,14	1052,94
6:00:00	835,53	962,09	953,32	1058,58
7:00:00	1267,7	1248,43	1191,8	1339,13
8:00:00	1465,39	1596,69	1662,14	1713,84
9:00:00	1557,38	1710,77	1746,76	1937,88

10:00:00	1603,02	1842,66	1797,05	2001,97
11:00:00	1524,65	1758,43	1755,74	1909,16
12:00:00	1456,1	1639	1677,98	1842,75
13:00:00	1456,1	1639	1628,9	1805,04
14:00:00	1456,1	1639	1628,9	1805,04
15:00:00	1456,1	1639	1628,9	1805,04
16:00:00	1456,03	1638,98	1628,75	1805,03
17:00:00	1479,52	1657,56	1644,45	1822,47
18:00:00	1531,07	1710,83	1685,45	1872,08
19:00:00	1668,62	1915,48	1938,79	2158,09
20:00:00	1798,96	2129,44	2172,43	2293,18
21:00:00	1778,78	2119,62	2104,38	2288,82
22:00:00	1745,3	2034,1	2043,12	2215,63
23:00:00	1562,02	1787,37	1902,94	2008,52

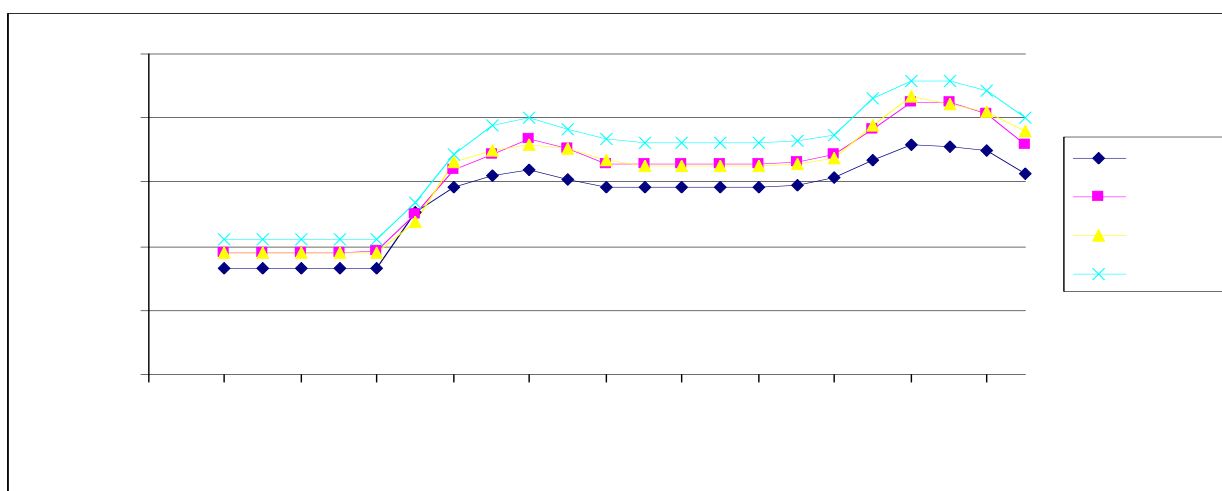


Рис. 2.2 Расчетная стоимость электроэнергии при оплате по ОРЭ

Использование почасового тарифа при ОРЭ на практике потребует расчета оптимальных режимных карт для выезда поезда в каждый час суток отдельно. Для упрощения процедур расчета предлагается ввести аппроксимацию почасового тарифа ОРЭ с помощью трех или четырех зонного тарифа. Зададим эти тарифы такими коэффициентами, усредненными за соответствующие периоды суток (таблица 2.4). На рис. 2.3 приведена диаграмма изображающая эти тарифы, полученные с помощью аппроксимации к трем и четырем зонам, основываясь на базовом тарифе для ОРЭ.

Таблица 2.4

Распределение коэффициента цены для аппроксимации тарифов ОРЭ

Период, час	ОРЭ ₃ три зоны	ОРЭ ₄ четыре зоны
0	0,759	0,806
1	0,759	0,806
2	0,759	0,806
3	0,759	0,806
4	0,759	0,806
5	0,759	0,806
6	1,200	1,224

7	1,200	1,224
8	1,350	1,420
9	1,350	1,420
10	1,200	1,224
11	1,200	1,224
12	1,200	1,224
13	1,200	1,224
14	1,200	1,224
15	1,200	1,224
16	1,200	1,224
17	1,200	1,224
18	1,523	1,420
19	1,523	1,420
20	1,523	1,420
21	1,523	1,420
22	1,200	1,420
23	1,200	0,806

Проведенные расчеты показали такое отношение стоимостей затрачиваемой электроэнергии по разным тарифам к базовому тарифу ОРЭ

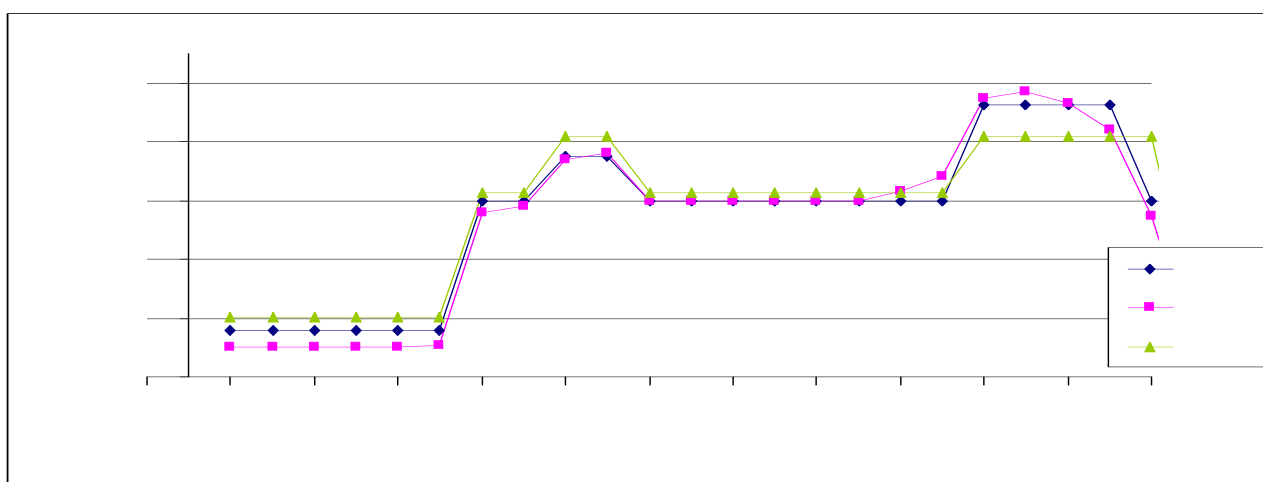


Рис. 2.3 Сравнительная диаграмма тарифа ОРЭ и его двух аппроксимаций

Таблица 2.5

Отношение затрат на оплату электроэнергии к основному тарифу ОРЭ для разных типов грузовых поездов

Отношение тарифов	Поезд 1 3000 т.	Поезд 2 4050 т.	Поезд 3 5025 т.	Поезд 3 6000 т.	Средний процент
ОРЭ/ ДТ	2,2%	5,6%	5,3%	5,6%	4,8%
ОРЭ/ ОРЭ₄	-0,3%	-1,5%	-1,5%	-1,9%	-1,3%
ОРЭ/ ОРЭ₃	-3,2%	-2,5%	-1,6%	-2,9%	-2,5%

Сравнительный анализ режимов оптимальных по стоимости для условий ОРЭ, ДТ и аппроксимации ОРЭ с использованием 4-рех зон позволяет сделать следующие заключения, что предлагаемая

четырёхзонная модель аппроксимации с достаточной точностью предоставляет возможность замены условий ОРЭ.

В таблица 2.6 приведены отношения затрат на оплату движения грузовых поездов разной массы при длительном времени хода. Показано, что минимальное отношение между аппроксимациями переменных тарифов принадлежит четырехзонной модели.

Таблица 2.6

Отношение затрат на оплату электроэнергии к основному тарифу ОРЭ

Отношение тарифов	Поезд 1 2000 т.	Поезд 2 3000 т.	Поезд 3 4000 т.	Поезд 4 5000 т.	Средний процент
ОРЭ/ ДТ	10,5%	9,3%	10,4%	13,4%	11,5%
ОРЭ/ ОРЭ₄	-2,3%	-2,1%	-2,0%	-2,2%	-2,1%
ОРЭ/ ОРЭ₃	-3,5%	-3,2%	-3,5%	-3,5%	-3,5%

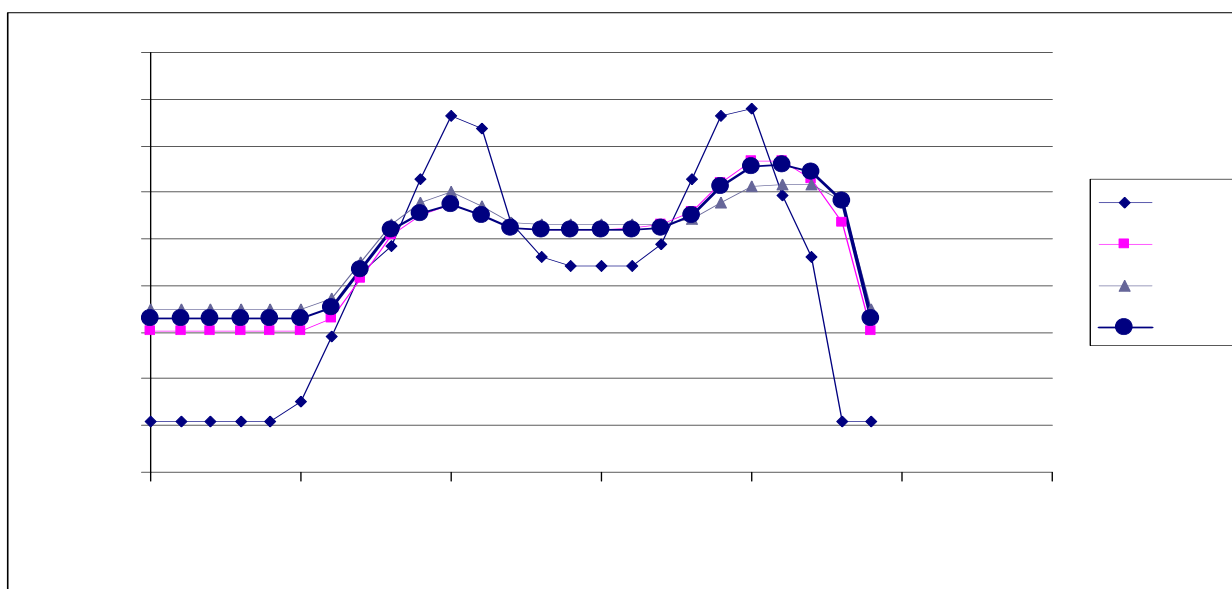


Рис. 2.4 График сравнительных оценок стоимости электроэнергии при использовании различных моделей многозонного тарифа

На рис. 2.4 приведен сводный график стоимости электроэнергии использованной на тягу грузовых поездов при применении различных моделей многозонного тарифа. Модель четырехзонной аппроксимации ОРЭ₄ занимает положение максимально приближенное к почасовому тарифу ОРЭ и повторяет характер изменений тарифа дифференцированного тарифа.

Задачу определения и минимизации числа режимных карт, необходимых для реализации многозонного тарифа можно решать введением дополнительных ограничений. Потребуется специфицировать параметры поезда, а именно: массу поезда и час выезда, для каждой указанной ситуации необходимо иметь набор режимных карт подходящих параметров поезда.

2.3 Режимы ведения поездов оптимальные по стоимости с учетом активной и реактивной составляющих мощности

В разделе 1.1.4 была представлена методика и расчетные соотношения для оценки эффективности режимов тяги поездов по стоимости, когда учитывается не одинаковая стоимость активной и реактивной составляющих.

Расчеты стоимости электроэнергии потраченной на управление поездом массой 2000 т. на участке Киев пас. – Фастов с локомотивом ВЛ-80.

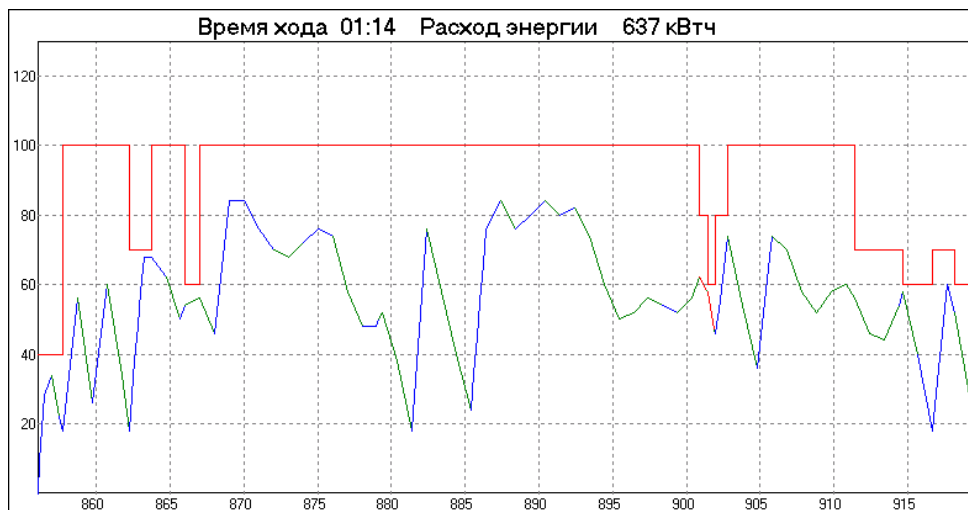
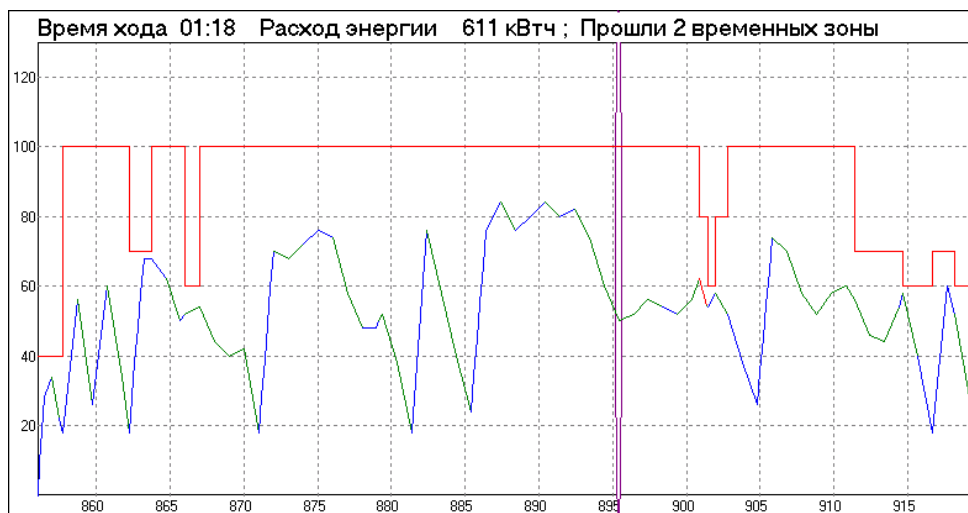


Рис. 2.5 График скорости для одноставочного тарифа



энергия по временным зонам				
	18	19		
время	48.8	29.2		
потрачено кВтч	304.2	150.2		
на собств. нужды	97.5	58.5		
коэф. цены	0.6758689832071	0.7402264556322		
Итого	271.6	154.4		
Всего: 425.987546031473			OK	

Рис. 2.6 График скорости и стоимость электроэнергии для управления в условиях тарифов ОРЭ

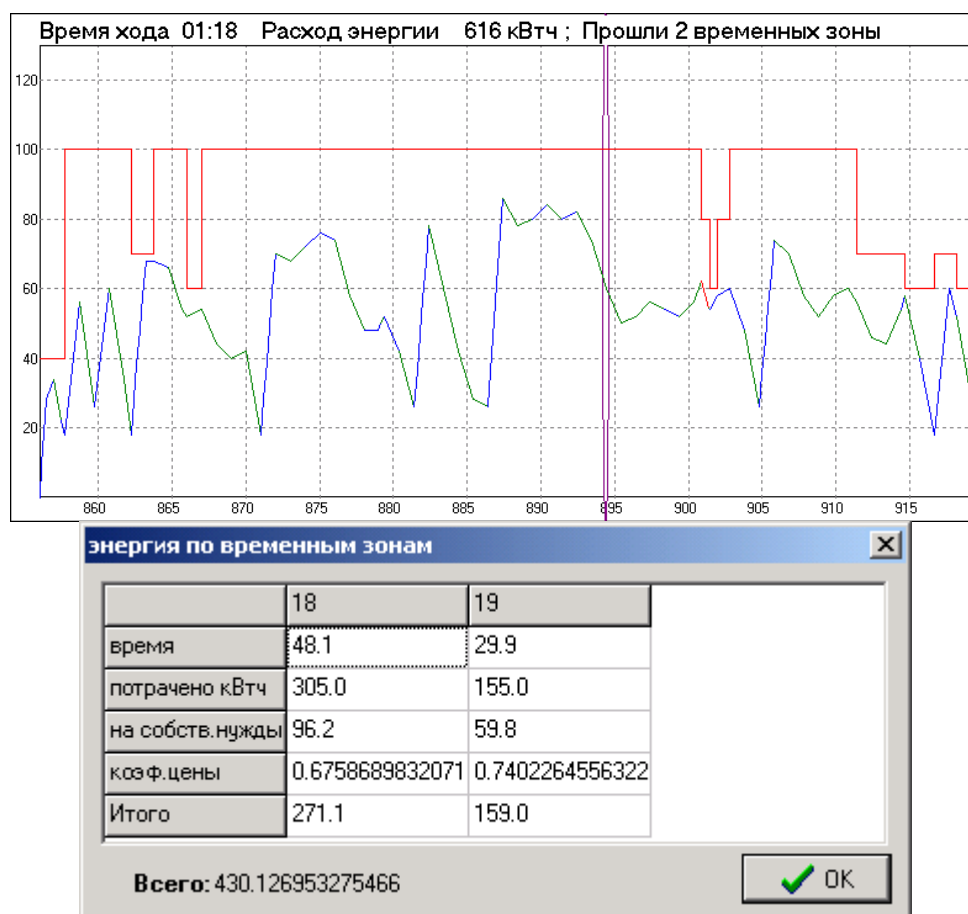


Рис. 2.7 График скорости и стоимость при управлении в ОРЭ с учетом оплаты стоимости активной и реактивной энергии

Как видно из приведенных графиков (рис. 2.6, рис. 2.7) управление на одном участке заметно изменяется, если в целевую функцию стоимости включены компоненты учета компонентов реактивной мощности. Затраты электроэнергии могут возрасти за счет снижения стоимости, которая компенсируется разными расходами реактивной и активной мощности в периодах с разным коэффициентом цены. В таблице (таблица 2.7) приведена сводная информация по расходам электроэнергии для разных тарифов с учетом влияния платы за потребление и генерацию реактивной электроэнергии.

Таблица 2.7

Стоимость электроэнергии поездов разных масс с учетом влияния реактивной энергии

Масса поезда	Стоимость электроэнергии		
	Однотавочный тариф	Тариф ОРЭ	Тариф ОРЭ с учетом влияния реактивной энергии
960 т.	311	374	381

1840 т.	554	635	673
4000 т.	701		

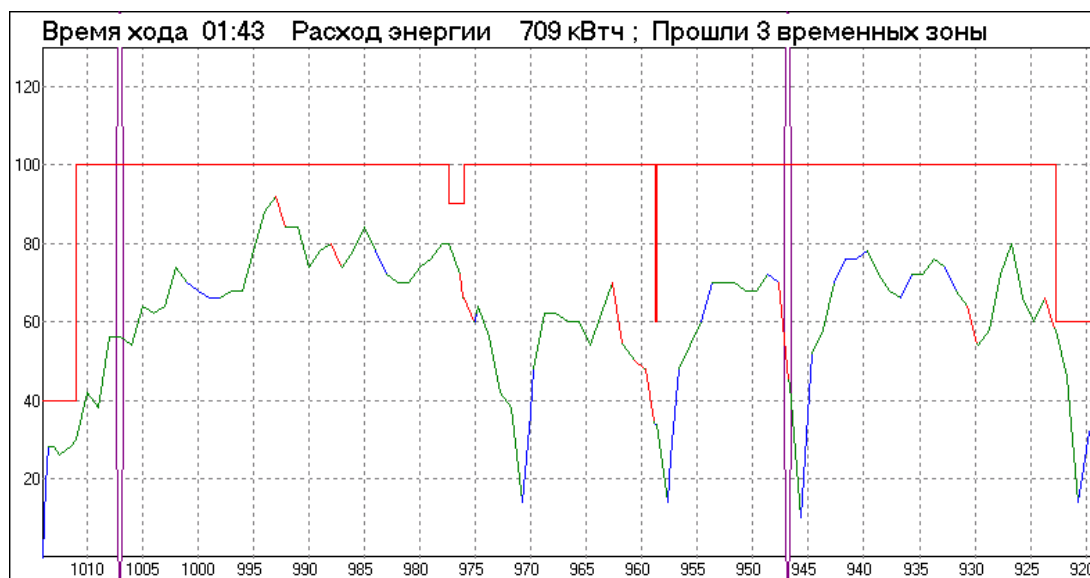


Рис. 2.8 Пример управления поездом при тарифах ОРЭ

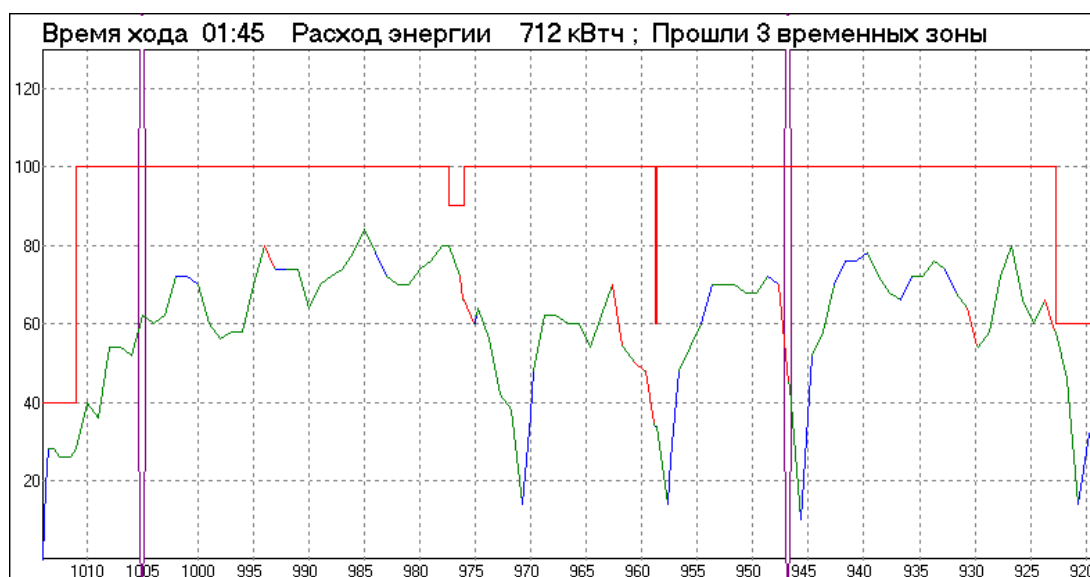


Рис. 2.9 Управление при тарифе ОРЭ и учете реактивной составляющей

2.4 Исследования с учетом $\cos(\phi)$, характеристики тяговых двигателей для моделирования процесса управления режимов тяги поездов

2.4.1 Учет переменных тарифов для расчета режимов ведения грузовых поездов

В соответствии с концепцией функционирования и развития оптового рынка электрической энергии Украины, утвержденной Кабинетом Министров Украины от 16 ноября 2002 года, постановление № 1789, дальнейшая перспектива повышения эффективности производства, передачи, распределения и снабжения электрической энергией потребителей, том числе железнодорожный транспорт, связывается с развитием конкурентной среды, обеспечивающей установление

справедливых цен на электроэнергию при ее надежной поставке. В связи с этим актуальна задача выбора оптимальных режимов движения поездов с учетом переменной стоимости электроэнергии, представленной согласно (1.28), предполагающая прогнозирование электропотребления по периодам суток в рамках переменных тарифов. Представим некоторые результаты исследований переменной цены электроэнергии, полученные по данным электропотребления Юго-Западной ж.д. Эти результаты позволяют обоснованно выбрать параметры моделей по расчету оптимальных режимов движения поездов, обеспечивающих минимум стоимости электроэнергии.

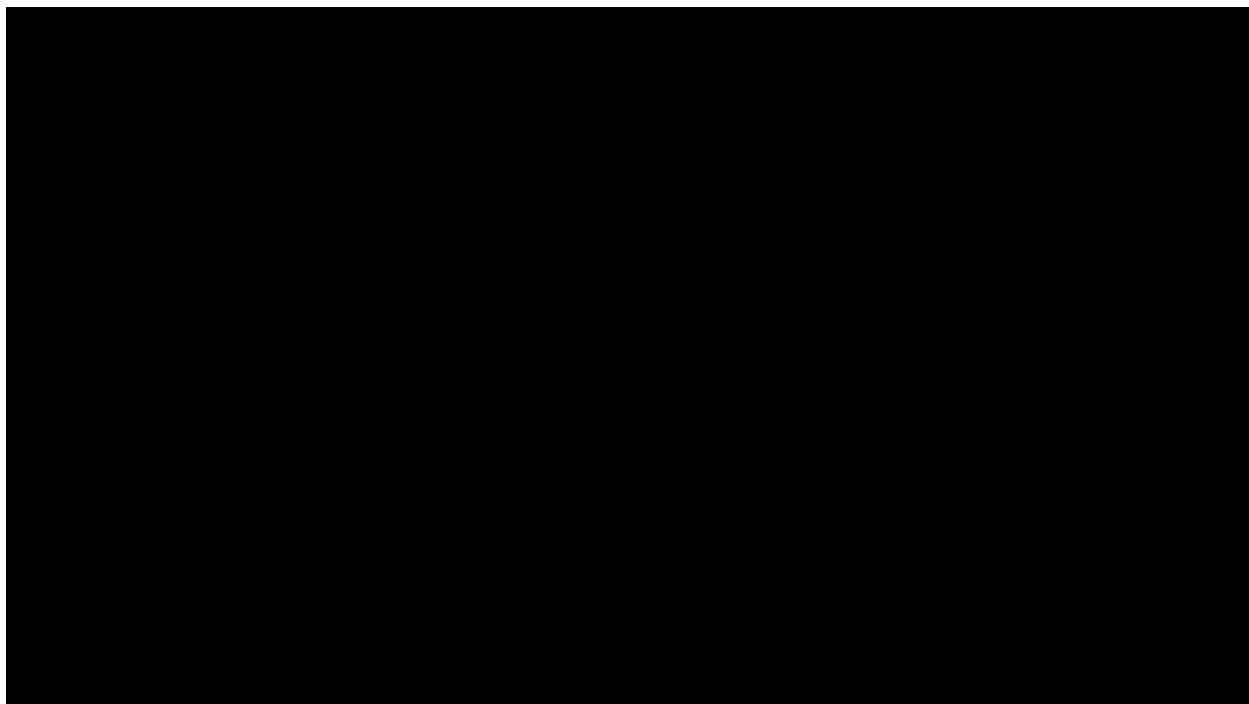


Рис. 2.10. Характеристики цены электроэнергии, потребленной на тягу поездов, по периодам суток в рамках ОРЭ.

На рис. 2.10 представлены графики характеристик цены электроэнергии в рамках ОРЭ по часам суток (грн., МВт.час), имеющие место в октябре 2002 г. Средние квадратические отклонения и коэффициенты вариации даны в масштабе. Подобные свойства цены имели место и в другие месяцы 2002 г. Можно выделить четыре временные зоны, существенные с точки зрения вариации цены электроэнергии, учитываемой при расчетах оптимальных режимов тяги поезда.

На рис. 2.11 и рис. 2.12 представлены графики цены электроэнергии в ОРЭ по временным интервалам в течение октября 2002 г, показывающие периодический характер в пиковый период, связанный с рабочими и выходными днями. Режимные карты, рассчитанные для постоянной цены электроэнергии, или же на основе критерия минимума расхода электроэнергии, имеют ограниченное использование и могут быть рекомендованы лишь для части периодов суток.

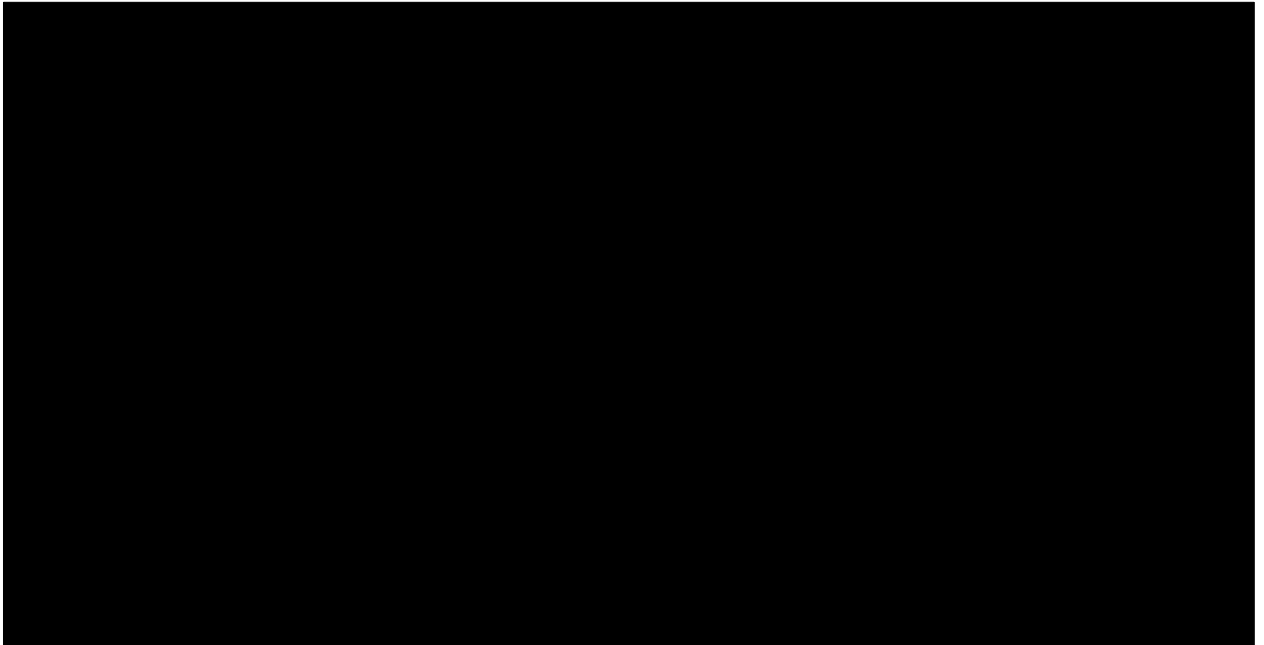


Рис. 2.11. Цена электрической энергии ОРЭ по временным интервалам

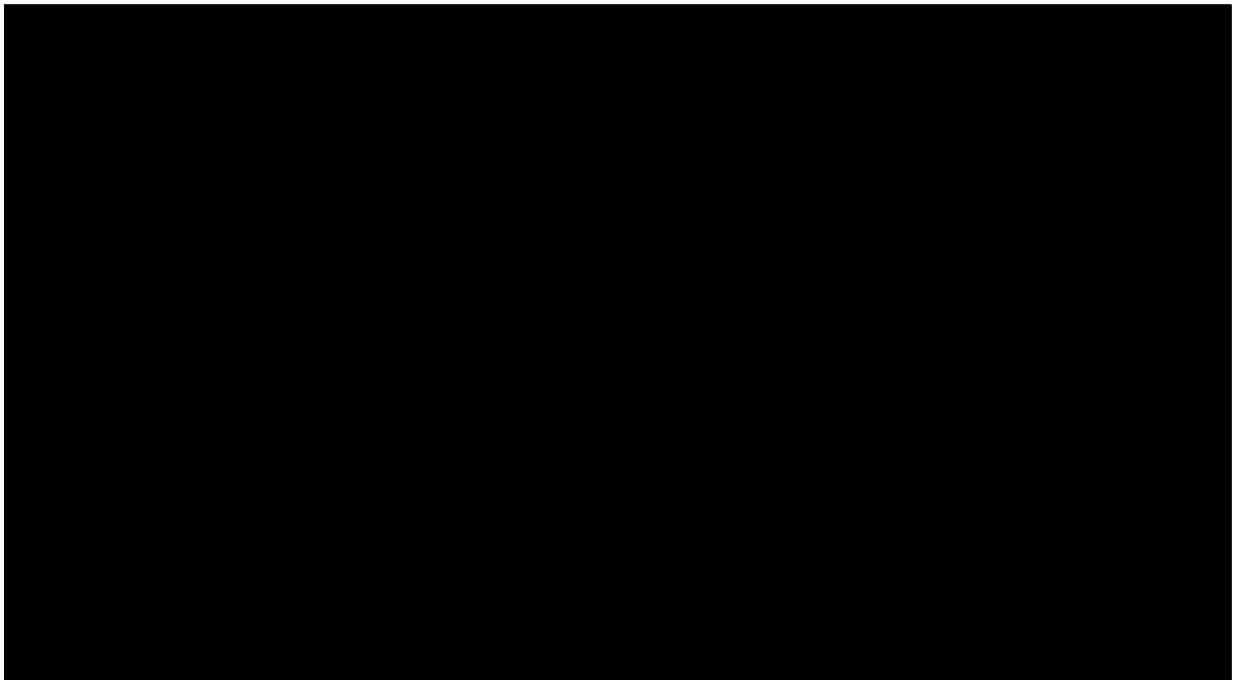


Рис. 2.12. Графики цен электроэнергии на ОРЭ в пиковые часы

При этом в вечернее время недельный цикл, характерный для утреннего пика, отсутствует.

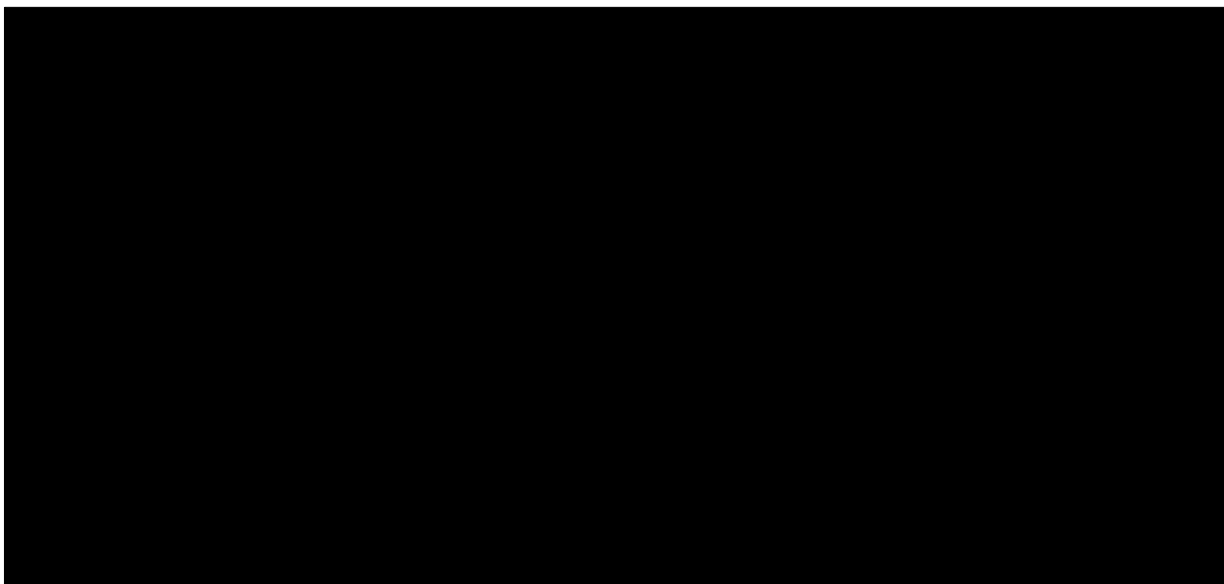


Рис. 2.13. График цены электроэнергии на ОРЭ в рабочие дни недели

Расчеты показали, что, несмотря на подобие графиков, цены электроэнергии в периоды утреннего пика (8 – 9 и 9 – 10 часов), коэффициент корреляции Пирсона, устанавливающий степень линейной зависимости между двумя множествами данных [42, 98] выборки, представлены на рис. 2.13, оказались различными, нулевая гипотеза опровергается. Использование непараметрического критерия Манна-Уитни обусловлено ограниченностью экспериментальных данных, а также стремлением априори не использовать предположение о нормальном законе распределения цен электроэнергии в рассматриваемый период.

Рис. 2.13, рис. 2.10 дают основания утверждать, что в пиковые периоды цена электроэнергии не является стационарным процессом, а ее характеристики изменяются во времени, что подтверждается расчетами по критерию Манна-Уитни. Различия между ценой в ночной, пиковый, полупиковый периоды наглядны и существенны. Так отношение ночной цены и цены в утренний пик

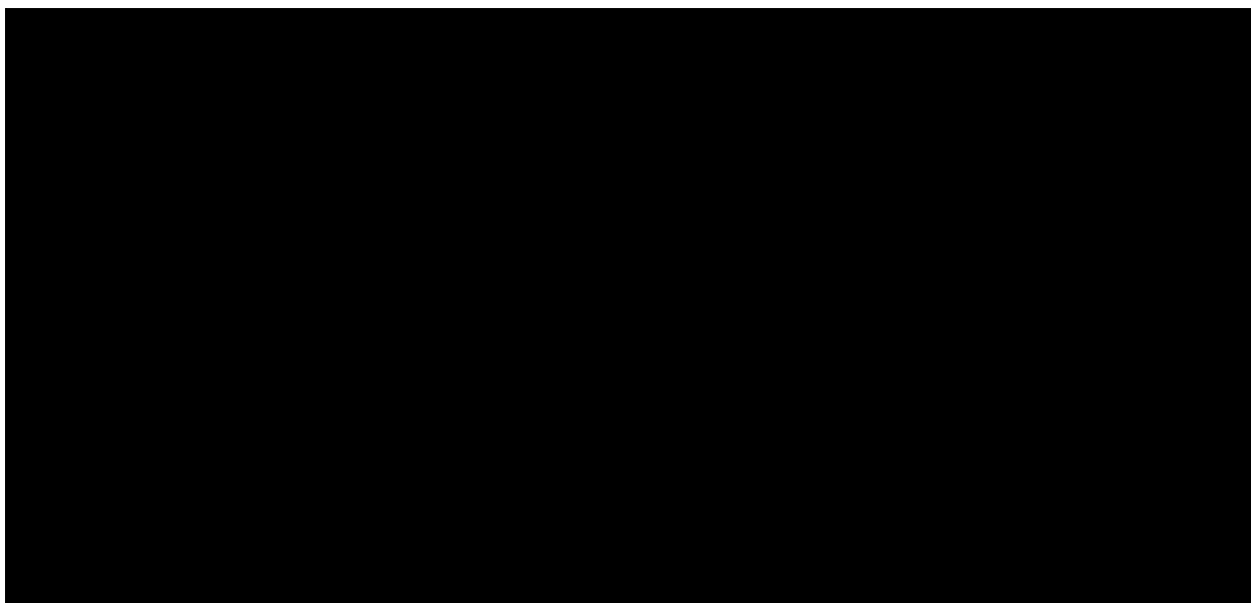


Рис. 2.14. Диапазон цен электроэнергии в ОРЭ по периодам суток

составляет 1.9, по отношению к вечернему пику цены – 2.2, а по отношению к полупиковому – 1.7 раза; различие между ценами в полупиковом и пиковом периодах достигает 25 – 30 %. Различие между нижним и верхним значением цены электроэнергии оказалось одинаковым для все периодов суток, и равным 8 – 9% (рис. 2.14).

В таблице представлены интервалы цены электроэнергии по периодам суток, рассчитанные с доверительной вероятностью 0.95 (таблица 2.8).

Заметим, что кроме суточной переменности цен отмечается и региональная, по отдельным областям. Для случая Юго-Западной ж.д., охватывающей Киев и Киевскую обл., Винницкую, Житомирскую, Сумскую, Хмельницкую и Черниговскую области, различие цен составляет 6 %, а для города Киева – до 50 %. Таким образом, предложенная и разработанная в разделе модель движения поезда с ценой электроэнергии вида представляется достаточно обоснованной.

Таблица 2.8

Доверительные интервалы цены электроэнергии по периодам суток

часы	Сниж	Сверхн	часы	Сниж	Сверхн
1	64,96	74,14	13	111,23	133,48
2	64,37	74,1	14	111,17	133,22
3	63,83	75,02	15	108,29	133,46
4	64,52	75,46	16	108,43	133,85
5	64,81	74,26	17	110,05	137,24
6	64,33	80,85	18	112,72	146,56
7	109,95	125,07	19	138,93	172,79
8	110,63	129,42	20	141,75	171,34
9	110,34	150,98	21	139,32	168,07
10	109,08	152,39	22	131,92	156,55
11	110,44	135,82	23	109,97	125,08
12	110,43	133,52	24	66,58	77,69

Как показали исследования цена электроэнергии в ОРЭ является нестационарным случайным процессом, а для отображения этого свойства в моделях по расчету оптимальных режимов ведения поезда необходимо задавать характеристики (2.1) – переменное по периодам суток математическое ожидание цены электроэнергии в рамках ОРЭ. Для более точного моделирования рассматриваемых процессов остановимся на вопросе выбора закона распределения цены в периодах суток. На рис. 2.15 приведены гистограммы распределения цены электроэнергии в пиковые

часы (8 – 9 и 9 – 10), полученные для периода октября 2002 г. по данным электропотребления Юго-Западной ж.д. Такого рода представления получены и для других периодов суток. Расчеты с использованием критерия Колмогорова – Смирнова [79, 98] на уровне значимости 5 % показали возможность считать, что в каждом сечении случайный процесс “формируемая в рамках ОРЭ цена электроэнергии” является нормально-распределенной случайной величиной. Полученный результат позволяет представить модель цены для использования при расчетах режимов ведения поезда в условиях функционирования ОРЭ в следующем виде

), (

2.1)

где

– функция Гаусса, а – количество регионов, через которые проходит поезд по графику движения.

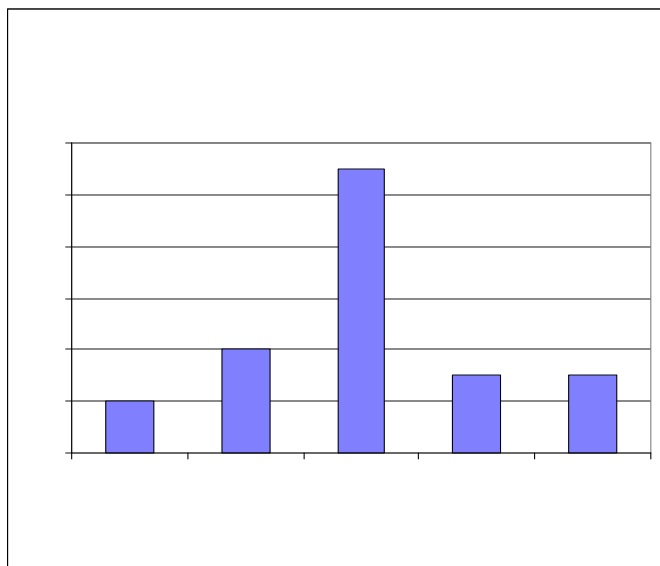


Рис. 2.15. Выбор закона распределения для цены электроэнергии

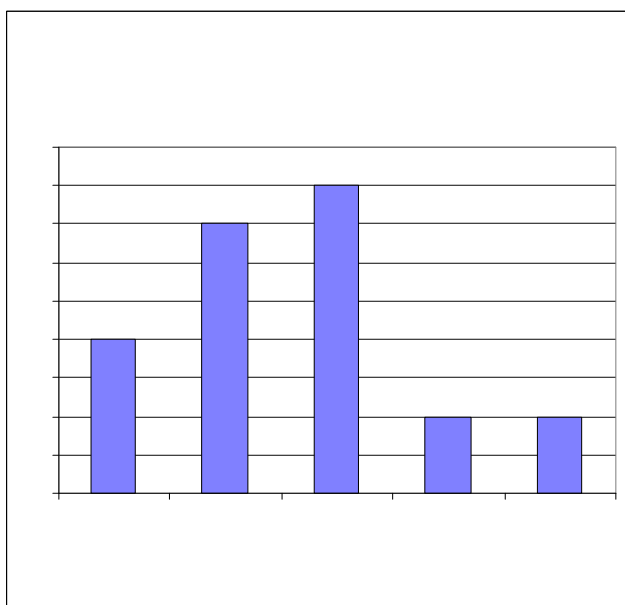


Рис. 2.16. Выбор закона распределения для цены электроэнергии

2.4.2 Учет влияния активной и реактивной составляющих мощности на оптимальные режимы ведения грузовых поездов

Наряду с активной мощностью поставщиком электроэнергии учитывается также и реактивная мощность, которая подлежит оплате по установленным тарифам, и может составлять значительную часть счета за электроэнергию. В зависимости от вида используемого оборудования электрическая нагрузка подразделяется на активную, индуктивную и емкостную. Железнодорожный транспорт имеет дело со смешанными активно-индуктивными нагрузками. Соответственно, из электрической сети происходит потребление как активной, так и реактивной энергии. Активная энергия преобразуется в полезную – механическую, тепловую и пр. энергии. Реактивная же энергия не связана с выполнением полезной работы, а расходуется на создание электромагнитных полей в электродвигателях, трансформаторах, дросселях и осветительных приборах. Реактивный ток дополнительно нагружает линии электропередачи, что приводит к увеличению сечений проводов и кабелей и соответственно к увеличению капитальных затрат на внешние сети.

Основная часть электроэнергии потребляется электродвигателями локомотивов. Любой асинхронный электродвигатель является потребителем реактивной мощности. Для его работы требуется создание переменного магнитного поля, для чего необходим намагничивающий или, как говорят, реактивный ток. При отсутствии компенсирующих устройств в сетях, реактивный ток (реактивная мощность) поступает к двигателям из сетей энергоснабжающей организации, и следовательно, подлежит оплате. Поэтому задачу компенсации реактивной мощности (КРМ) в сети можно рассматривать как задачу энергосбережения. В документе «Методики расчетов платы за перетоки реактивной мощности между

электропередающей организацией и ее потребителями» (Министерство топлива и энергетики, приказ N 19 от 17.01.2002) [71] описана система платы за реактивную составляющую электроэнергию.

Плата за потребление и генерацию реактивной электроэнергии, на основании методики, определяется по формуле:

(2.2)

где — основная плата за потребление и генерацию реактивной электроэнергии; — надбавка (при $>0,25$) за недостаточную оснащенность электрической сети потребителя устройствами КРМ; — скидка платы при участии в оптимальном суточном регулировании режимов сети энергоснабжающей организации в расчетный период.

Величина надбавки находится в нелинейной зависимости от , и при , может принимать значения сравнимые с основной платой за потребление и генерацию реактивной электроэнергии [71].

Уменьшение величины за счет применения компенсирующих устройств реактивной мощности на локомотивах — довольно сложная задача, требующая централизованного решения. Эту задачу нужно решать путем введения рациональных режимов управления движением поезда с применением критерия минимизации расхода реактивной энергии или уменьшением затрат на оплату потребленной реактивной мощности.

2.5 Проблемы достоверности данных для моделирования движения поезда. Идентификация параметров поезда по данным опытных поездок

Использование информации из опытных поездок для восстановления фактических показателей о движении поездов на участке.

Данные, записанные с датчиков при движении поезда, представлены на рис. 2.17 - рис. 2.18.

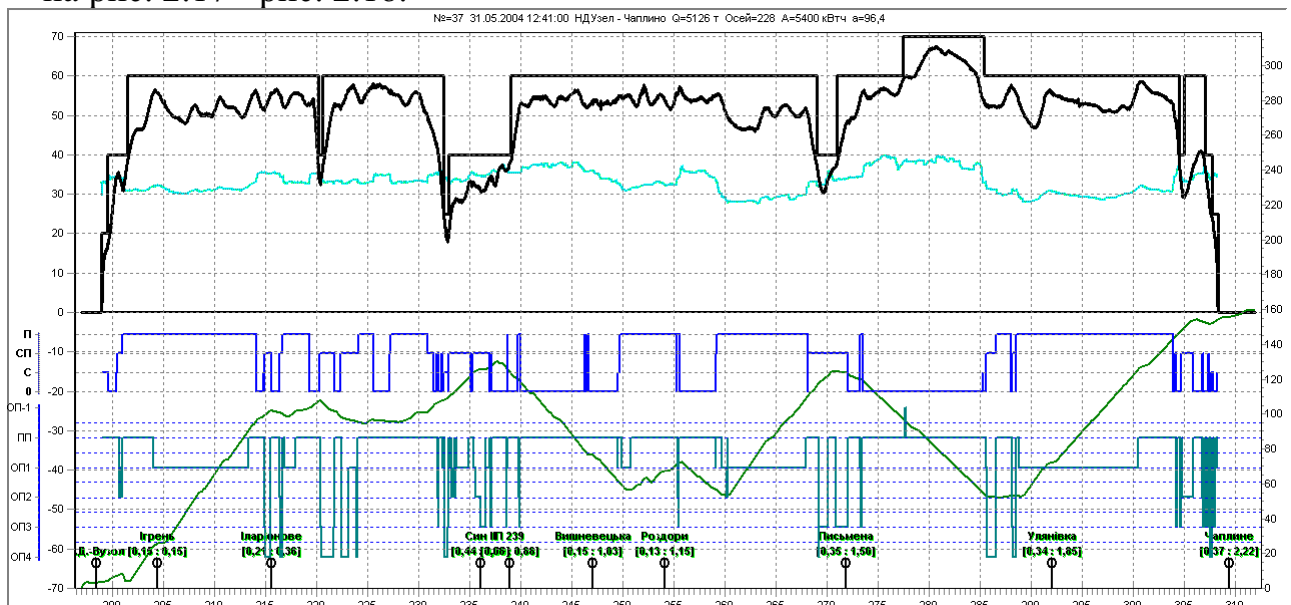


Рис. 2.17 Поезд массой 5000 т. локомотив ВЛ-8 на участке НДУзел - Чаплино

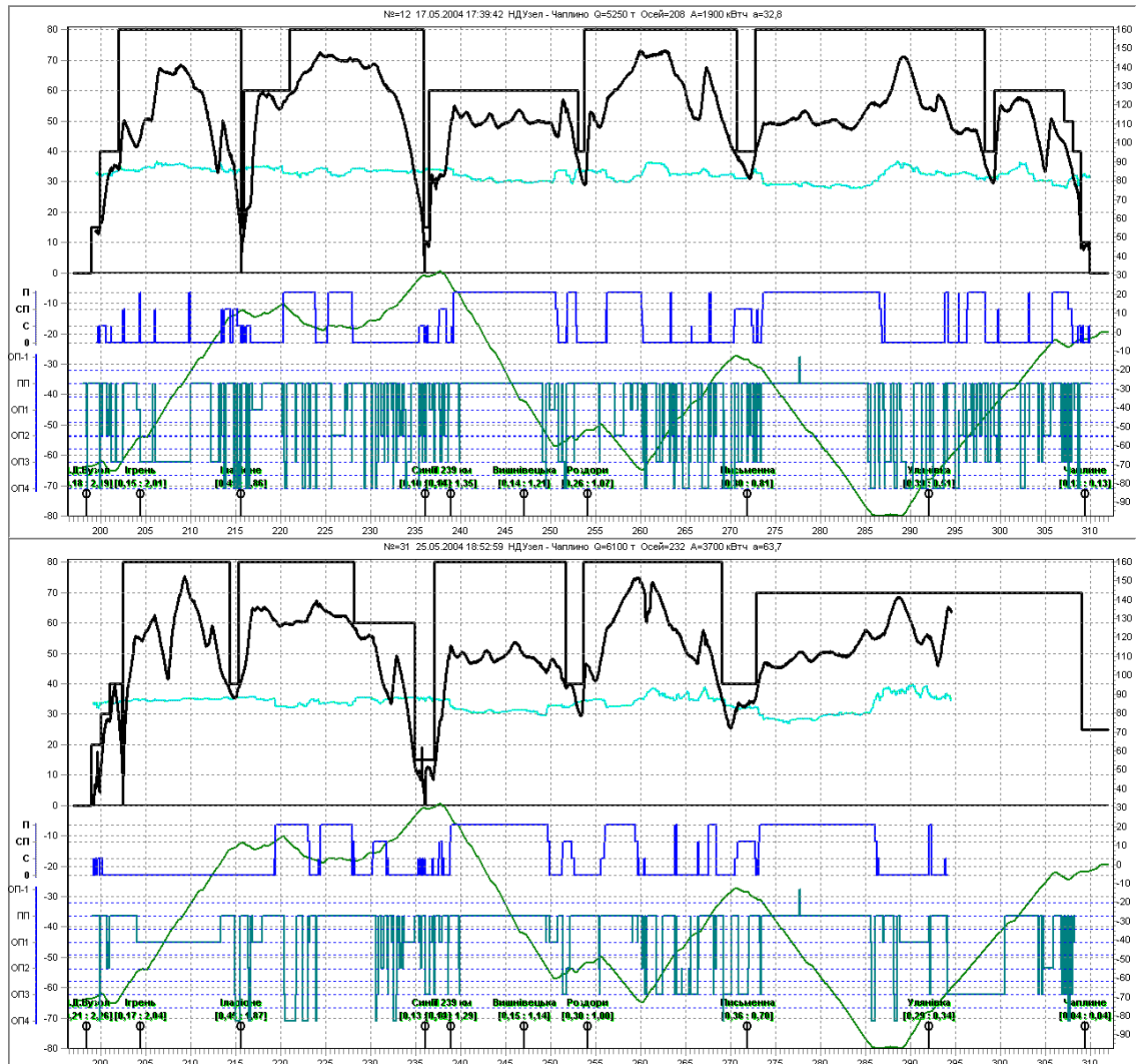


Рис. 2.18 Поезд массой 6000 т. локомотив ВЛ-8 на участке НДУзел - Чаплино

Применение одного из новых методов статистической обработки ограниченных выборок, известного под названием метода BOOTSTRAPa. Метод BOOTSTRAPa заключается в том, что одну реальную выборку из генеральной совокупности с помощью ЭВМ тиражируют в большом количестве экземпляров, а затем из полученного массива случайным образом делают необходимое (весьма большое) число новых выборок, которые затем уже анализируют.

1. При помощи BOOTSTRAPa удаётся избавиться от предположения о гауссовом распределении.
2. BOOTSTRAP способен по единственной выборке оценить всевозможные изменчивости выборок из генеральной совокупности так, как будто бы имеется массив реальных выборок.

Методы генерации прогнозных выборок. Важной проблемой относительно достоверного использования математико-статистических и эконометрических методов прогнозирования есть ограничение на объем выборки - не всегда возможно представить выборку данных нужных размеров. Большое нагромождение статистических данных осуществляется постепенно и, вследствие этого, объемы выборок еще малые. Для работы с малыми объемами выборок нужно иметь соответствующие методы обработки данных. Достаточных объемов выборок могут и не быть (например, в экспериментальных, индивидуальных, мелкосерийных, серийному производствах) [54].

Следует получить количественные прогнозные характеристики с помощью моделей, а также выучить статистические свойства выборок или оценок параметров моделей. Эти проблемы можно решить с помощью метода «бутстреп», который был предложен в 1977 г. Б. Эфроном из Стенфордского университета (США).

Для обеспечения необходимых для достоверного статистического анализа данных в математическом сервисе системы управления необходимая реализация группы методов «размножения выборок», наиболее известным представителем которых является бутстреп, - развитие «метода составленного ножа».

Считаем, что средствами системы образованная выборка

. Допускают, что это набор независимых одинаково распределенных случайных величин. Для исследования некоторой статистики из одной выборки сделать много, исключая по одному наблюдению (и возвращая раньше исключенные) (М. Кенуей «метод составленного ножа») Перечислим выборки, которые выходят из исходной:

Всего p новых (размноженных) выборок объемом $(p - 1)$ каждая. По каждой из них можно рассчитать значение интересующей исследователя статистики (с уменьшенным на 1 объемом выборки):

Полученные значения статистики позволяют судить о ее распределении и о характеристиках распределения - о математической надежде, медиане, квантилях, разбросе, среднем квадратичном отклонении. Значения статистики, построенные по размноженным подвыборкам, не являются независимыми. Показано на примере ряда статистик, что возникают в методе наименьших квадратов и в анализе кластера, что при росте объема выборки влияние зависимости может ослабевать и

значениями статистик типа можно пользоваться как

независимыми случайными величинами. Разброс величин дает наглядное представление о том, какую точность может дать рассмотрена статистическая оценка.

Б. Эфрон разработал способ размножения выборок, который существенно использует датчики псевдослучайных чисел. Новые выборки строят моделируя выборки из эмпирического распределения. А именно, берут конечную совокупность из n элементов исходной выборки

и с помощью датчика случайных чисел сформировать из нее любое число размноженных выборок.

Существуют много способов развития идеи размножения выборок. Можно за исходной выборкой построить эмпирическую функцию распределения, а затем любым способом от кусочно-постоянной функции перейти к непрерывной функции распределения, например, соединив

точки отрезками прямых.

Другой вариант – перейти к непрерывному распределению, построив непараметрическую оценку плотности. После этого рекомендуется брать размноженные выборки из этого непрерывного распределения (что является оценкой выходного), непрерывность защитит от совпадений элементов в этих выборках.

2.6 Выводы

В разделе выполнены исследования режимов тяги грузовых поездов при переменных тарифах на электроэнергию. Установлено существенное отличие режимов тяги грузовых поездов, оптимальных по критериями минимума потребления и стоимости электроэнергии в условиях переменных

тарифов и ОРЭ, а также необходимость разработки пакетов режимных карт ведения поездов, которые могут быть использованы на электрифицированных участках в разные периоды суток.

Установлено, что предложенная в работе кусочно-линейная аппроксимация тарифов на электроэнергию ОРЭ, состоящая из четырех интервалов, позволяет с необходимой для практики точностью рассчитать режимы тяги поездов, оптимальные по стоимости потребленной электроэнергии, а также с учетом различия тарифов активной и реактивной энергии.

На основе анализа экспериментальных данных получено математическое описание коэффициента мощности, которое позволяет получить уточненные режимы тяги поездов, учитывающие различия стоимости реактивной и активной электроэнергии.

Материалы раздела опубликованы в работах [32, 33, 34, 36, 38, 45, 59, 85, 88].

РАЗДЕЛ 3

РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ТЯГИ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА СТОИМОСТИ ПОТРЕБЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

3.1 Развитие метода расчета оптимальных режимов ведения поездов с использованием непрерывного динамического программирования

В связи с предлагаемым в диссертации переходом к комплексной экономической оценке оптимальных режимов ведения поездов в условиях ОРЭ, формированию соответствующих режимных карт при использовании показателей потребления и стоимости электроэнергии, существенно возрастает сложность и объем решаемых задач оптимального управления. Для обеспечения эффективного решения таких категорий задач в разделе выполнена разработка усовершенствованных моделей, методов, алгоритмов и программного обеспечения [34, 37]. Отметим также важное обстоятельство, что представленные в разделе методы регулирования участковых скоростей движения поездов ориентированы на возможности использования данных, формируемых современными информационными технологиями железнодорожного транспорта Украины по мониторингу процесса перевозок и электропотребления в тяговой сети. При получении уравнений оптимального управления в форме непрерывного динамического программирования (НДП) совокупность случайных факторов задачи не учитывается. Учет этих факторов еще в большей мере свидетельствует об актуальности разработки специализированного метода расчета режимов тяги на основе НДП.

Остановимся на вопросах разработки такого специализированного метода, учитывающего существенные свойства задачи управления тягой поездов и обладающего высокой вычислительной эффективностью, используя подход НДП. Считаем, что дифференциальные уравнения (3.1)–(3.2) и начальные условия (3.3) [34, 37] описывают движение поезда как гибкой нити длины l , имеющей погонную массу m и равную q :

:

(3.1)

(3.2)

EMBED Equation.DSMT4

(3.3)

В (3.1)–(3.3) обозначено: x – координаты пути и время; u – управление (номер позиции контролера электровоза); v – скорость центра

масс поезда; массы локомотива и поезда; коэффициент инерции вращающихся масс; ускорение силы тяжести; сила тяги локомотива; сопротивление поступательному движению поезда; – действующая на поезд тормозная сила; температура перегрева тяговых электродвигателей; τ_{∞} ; тепловые характеристики и ток тягового электродвигателя [14]; напряжение контактной сети;; суммарная сила нажатия тормозных колодок; EMBED Equation.DSMT4

. В качестве критерия эффективности используем:

(3.4)

где

активный ток электровоза, эквивалентное сопротивление тяговой сети. Ограничения: множество управлений (позиции контролера, торможения); ограничения допустимых фазовых траекторий задаются как ; конечная координата участка пути; ограничения на возможные управления в соответствии с требованиями технической эксплуатации тяговых двигателей; область допустимых управлений равна ; допустимый ток , нагрузка на ось экипажа, коэффициент сцепления колеса с рельсом, сила нажатия тормозных колодок колесной пары, коэффициент трения тормозной колодки о колесо [14, 70];

(3.5)

ограничение по заданному времени движения на участке, представленное в этом разделе в изопериметрической форме.

Силы сопротивления в (3.1) включают: -1) сопротивление от профиля пути и кривых в плане – ; -2) сопротивление от скорости

поезда , где () – константы, соответствующие типам вагонов [14]. Поскольку являются непрерывными кусочно-линейными функциями, то по оси OX (путь) можно выбрать сетку таким образом, чтобы силы для участка были постоянной величиной. Для нашего рассмотрения существенно, что сила тяги и токовые характеристики тягового электродвигателя, представленные на рис. 3.1 [34], есть невыпуклая вверх функция и для всех управляющих позиций контроллера с высокой точностью может быть аппроксимирована квадратическими полиномами относительно скорости

$$(3.6)$$

Отметим, что вектор случайных параметров включает: характеристики поездопотока на участке, значения напряжений на токоприемнике электровоза и др.; параметры поезда (,) и связанные с его движением характеристики в (3.1)–(3.2) считаются детерминированными.

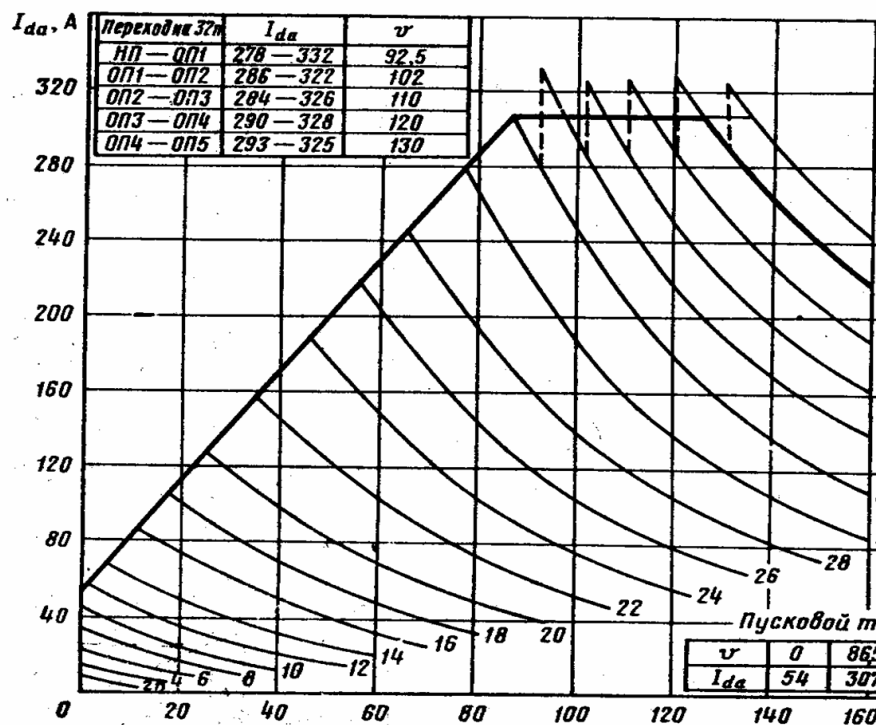
Рис. 3.1 Прим

Переход от решения 3) программирования (Д) формирование квадрата затраты электроэнергии Основными этап следующие.

1. Построение модели управления движением пути (OX . Здесь на от

выбора управления в з этом производится нег 3.1) –(3.2), учитывая у). Укажем отличие пр

ДДП, когда сетка фазового пространства по координате является равномерной (шаг 2 км/час) и заранее заданной [15]. В случае процедуры ДДП на участке рассматривается вариантов траекторий движений (число узлов по скорости в координате), многие



из которых невозможны. Последнее обстоятельство требует выполнения процедур анализа реализуемости таких управлений. Вдоль координаты пути сетка неравномерная, выбор точек (, ..., , ...,) проведен таким образом, чтобы на участках силы сопротивления от профиля были постоянными.

1. Формирование аппроксимации “клеток” фазового пространства квадратическими полиномами, представляющими затраты (электро)энергии на переход из в при движении поезда в пределах клетки.

Выполнить переход от набора “клеток” некоторого участка к оценке математического ожидания затрат (электро)энергии на перемещение по участку из точки пути в точку : формирование единой энергетической модели движения по участку на основе обобщения моделей аппроксимаций клеток, попадающих в диапазон относительно решений текущего этапа.

Для выполнения этого необходимо – установить номер этапа , начальное и конечное значение параметров “трубки”, задающей область значений возможных скоростей движения, которые определяют точность решения задачи по скорости : при решении задачи в целом является решение – ого этапа.

Выполнение линейной аппроксимации ограничения времени движения путем замены уравнения (3.5) “среднепутевой” скоростью. Далее выполняется построение по методу множителей Лагранжа рекуррентных уравнений – условий оптимальности НДП с учетом ограничений по времени .

2. Решение системы рекуррентных уравнений, выбор оптимальных режимов управления двигателем и расчет значений участковых скоростей движения, соответствующих модели этапа 2.

3. Сужение области аппроксимации участков, переход к этапу 2. В случае выполнения условия близости результатов для последующих моделей аппроксимаций фазового пространства результаты этапа 4 есть искомое решение задачи формирования оптимального управления тягой поезда на участке.

Представим отдельные задачи этапов рассматриваемого метода более подробно. Как указывалось, ДДП предполагает исследование всех путей между узлами с координатами и , а также другими. Вместе с тем построенные на основе интегрирования уравнений (3.1) –(3.2) траектории движения поезда не проходят через узлы равномерной сетки, они отражают только те управления двигателем, которые могут быть реализованы.

Для примера укажем выбор управления тягой электровоза ЧС4, который выполняется следующим образом. По электромеханическим характеристикам двигателя AL 4442 nP определяем зону максимальных значений к.п.д. двигателя:

А [44]. Для разных скоростей движения по токовым характеристикам двигателя определяем номера управляющих позиций, попадающих в зону значений оптимальных по к.п.д. токов [29], которые приведены в таблица 3.1. Аппроксимируя по тяговым характеристикам локомотива ЧС4 выбранные управляющие позиции в зоне соответствующих скоростей, получаем искомые зависимости вида (3.6), которые используются для интегрирования уравнений (3.1) – (3.2). Если в зоне оптимальных токов находится несколько управляющих позиций, для каждой из них строится возможная траектория (смотри координаты , рис. 3.1). Подобным образом строятся и аппроксимационные модели для тормозных сил.

Для оптимизации режимов движения поездов по методу НДП будем связывать с узлами формируемой сетки фазового пространства состояний (номер координаты номер узла на прямой) следующие компоненты векторов –1) скорость ; –2)

затраты (электро)энергии для всей траектории, начиная от

; –3) режимы движения – ; –4)

температура тягового двигателя; –5) время движения до рассматриваемого узла (в мин.); –6) номер позиции контроллера, активный ток электровоза. Вектор дает возможность реализовать задачу (3.1) - (3.6) на основе НДП.

Таблица 3.1

Управляющие позиции электровоза ЧС4 в зоне оптимальных токов
для различных скоростей движения

км/час		км/час	
10	10	70	24
20	12	80	26
30	16	90	26, 28
40	18	100	28
50	20	110	30
60	22	120	32

В связи с тем, что на прямых могут быть узлы с близким значениям компонентов (), введена процедура осреднения значений характеристик, которая выполняется только для узлов, удовлетворяющих отношениям: (, ,).

Характеристикой узла также является вектор , компоненты которого есть набор различных номеров управляющих позиций, соответствующих траекториям, отнесенным к узлу. Сокращение дерева траекторий обеспечивается и за счет структурных ограничений, устанавливающих допустимые последовательности режимов управления движением. Например, согласно этим ограничениям после режима тяги (Д) не желательно применение торможения (Т) и отражают другие подобные правила выбора режимов ведения поездов.

Для вычисления характеристик узлов сетки на каждом этапе выполняется следующая процедура численного интегрирования уравнений (3.1)–(3.2). При постоянном значении сил с учетом моделей (3.6) дифференциальные уравнения (3.1) приводят к нелинейным уравнениям, выраженным через интегралы от рациональных дробей и полиномы вида

(3.7)

Результаты решений GOTOBUTTON ZEqnNum416905 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum416905 * Charformat \! * MERGEFORMAT (3.7) методом “золотого сечения” [19] дают значения

скоростей при известных скоростях. В уравнениях
 GOTOBUTTON ZEqnNum416905 * MERGEFORMAT REF
 ZEqnNum416905 * Charformat \! * MERGEFORMAT (3.7) параметры
 рассчитанные константы. При известных скоростях {
 , } с учетом принятой методики задания изменений скоростей на
 участках линейной функцией [29] температура тягового двигателя
 в точке пути может быть получена из (3.2) согласно уравнению

$$, \quad (3.8)$$

где некоторые известные константы.

Последовательно решая уравнения GOTOBUTTON ZEqnNum416905
 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum416905 * Charformat \! *
 MERGEFORMAT (3.7), (3.8) определяют основные характеристики
 вектора , через которые рассчитываются его остальные компоненты.

Например, величины определяются по значениям токов и
 напряжений, или за счет нахождения работы сил тяги путем
 аналитического интегрирования, когда соответствует уравнению
 GOTOBUTTON ZEqnNum416905 * MERGEFORMAT REF
 ZEqnNum416905 * Charformat \! * MERGEFORMAT (3.7).

Для получения рекуррентных уравнений метода НДП построим
 квадратические аппроксимации зависимостей вида

$$(3.9)$$

для приращений работы на шаге (значения скоростей на
 последовательных этапах)

по значениям характеристик узлов пространства состояний.

Соотношения между коэффициентами (3.9) и моделей ,
 полученных из решений линейных алгебраических уравнений, легко
 устанавливаются:

. На этом заканчивается аппроксимация отдельных “клеток”
 фазового пространства.

Путем обобщения моделей (3.9) для отдельных клеток, попадающих в диапазон Δ на i -ом этапе процедуры НДП, производится формирование единой энергетической модели движения по участку

. Такая процедура соответствует получению математического ожидания затрат энергии на участке. При этом коэффициенты осредненной модели являются решениями системы линейных алгебраических уравнений 4-го порядка, соответствующей определению коэффициентов уравнения регрессии вида $\hat{y}_i = \sum_{j=1}^4 a_{ij} x_j$ по методу наименьших квадратов. Далее будем обозначать их, отмечая знаком "тильда":

Рекуррентные уравнения НДП для моделей вида (3.9) в задаче без ограничений получены в работе [31]. В связи с тем, что нелинейное относительно скорости ограничение (3.5) не позволяет получить разрешимую систему уравнений НДП, в том числе с использованием множителей Лагранжа, выполняется ее замена его линейной аппроксимацией вида

(3.10)

Содержательно (3.10) представляет среднюю путевую скорость движения поезда по участкам (коэффициенты модели – относительные длины участков Δ_i). Принимая функцию состояния в точке

равной $\bar{y}_i$, используя для учета ограничения (3.10) множители Лагранжа λ_i , получим условия оптимальности НДП для задачи ЗРВП в следующем виде

(3.11)

Полученные уравнения позволяют сформировать рекуррентные соотношения для вычисления $\bar{y}_i$ (соответствует $\bar{y}_i$) по параметру $\bar{y}_i$ (соответствует $\bar{y}_i$):

(3.12)

Далее подставляя величины из (3.11) в (3.12), получают аналитическое представление для функции $f(v)$, в котором соответствующие коэффициенты равны

(3.13)

EMBED Equation.DSMT4

Выполняя процедуру подстановки (3.11)–(3.13) типа последовательно, строят $f(v)$ и получают оптимальное значение решения для скорости

. Используя это значение, рассчитываются оптимальные значения скоростей на остальных участках v_i в следующем виде

EMBED Equation.DSMT4

(3.14)

Задачи с ограничением (3.5) решают методом одномерного поиска по значениям параметра v_i задается значение v_i , вычисляются решения (3.14), которые подставляются в записанное через скорости на участках ограничение (3.5). Если это ограничение с заданной точностью не

выполнено, тогда изменяется значение v_i на новой итерации [30]. Оптимальные решения (3.14) могут быть представлены через

скорость v_i на любом из участков пути i . После вычисления решений

при заданном значении v_i проводится сужение области аппроксимации моделей участков пути:

Если выполнено условие точности ϵ , или же на каждой прямой

осталось по одной 4-х угольной области, то процедура НДП решения ЗВРП заканчивается. Иначе процедура расчета по НДП продолжается, начиная с этапа формирования единой энергетической модели для клеток, скорости которых отличаются от рассчитанных оптимальных не более чем на установленную величину.

На рис. 2.9 показан график оптимальных скоростей движения пассажирского поезда на участке Киев – Мироновка, рассчитанный на основе предложенного метода. Горизонтальными прямыми линиями представлены ограничения скоростей движения на различных участках пути. Заданное время движения и расход электроэнергии характеризуют оптимальную траекторию ЗВРП, причем решение построено с учетом стохастического характера напряжений в электротяговой сети. Режимы управления (номера управляющих позиций электровоза ЧС4) для рассчитанных скоростей определяются с использованием данных из таблица 3.1.

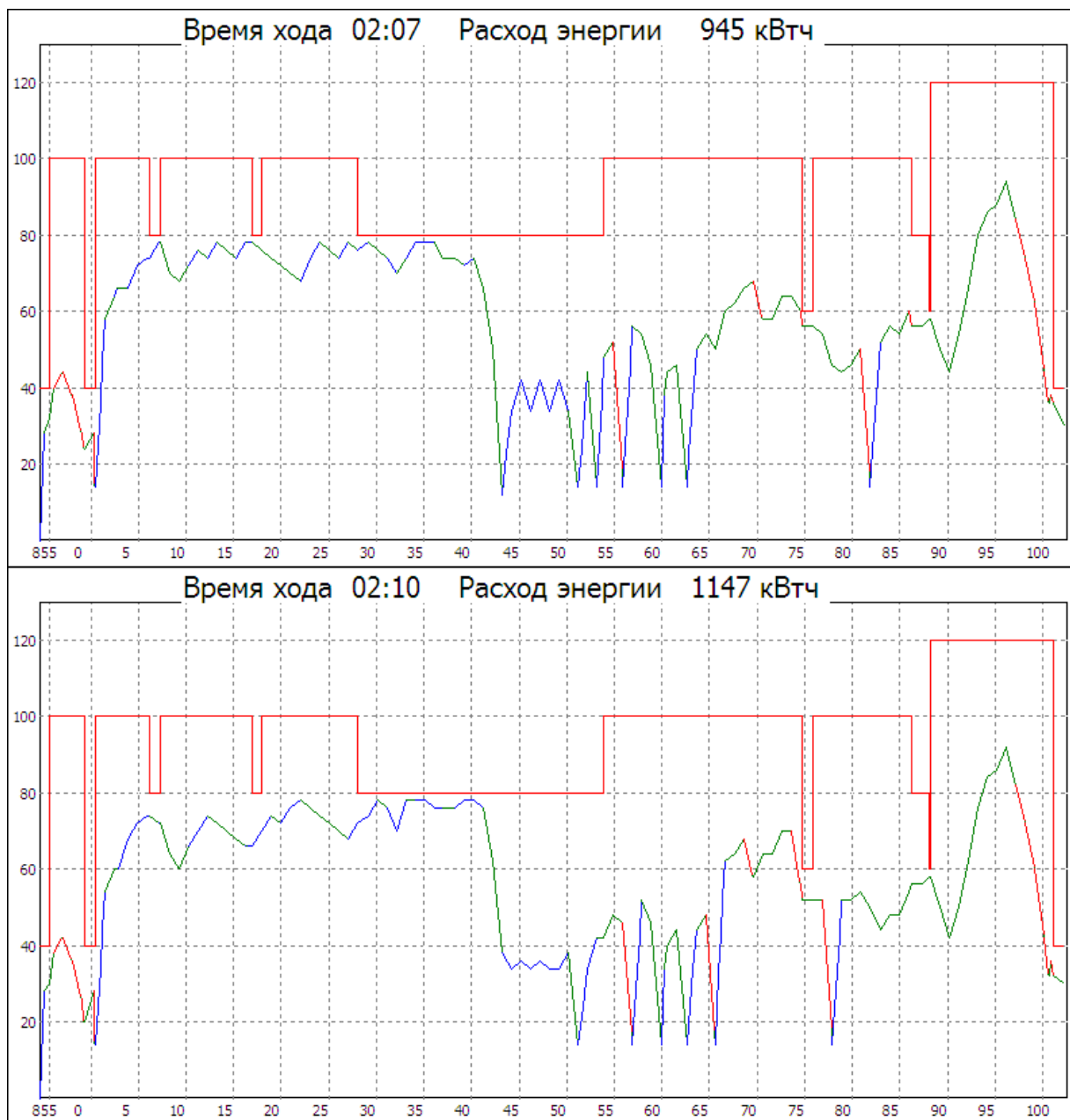


Рис. 3.2 Графики скоростей оптимальных режимов ведения грузовых поездов массы 3000 и 4500 т.

Расчеты, выполненные по предложенной выше методике НДП, показали возможность существенного сокращения (на порядок) времен

формирования оптимальных режимов тяги, по сравнению с использованием метода дискретного динамического программирования на равномерной по координате скорости сетки, в том числе с использованием на основе данных из таблица 3.1., также существенно повышает вычислительную эффективность процедур и метода дискретного динамического программирования [6].

3.2 Активная и реактивная составляющие мощности

Расчет рациональных (по расходу или стоимости энергии) режимов ведения поезда является одним из направлений снижения потребления электроэнергии. В настоящее время все более актуальной становится задача оптимизации режимов движения поезда по критерию минимума стоимости электроэнергии, цена которой в различные периоды суток при различных методах закупки неодинакова. Закупка электроэнергии может осуществляться по дифференцированным тарифам, тогда ее стоимость в ночной и пиковый период колеблется более, чем в 7 раз (ночь – 0,25 , полу пик – 1,02 , пик 1,8 по отношению к одноставочному тарифу); возможно использование механизма оптового рынка электроэнергии, при котором цена меняется в каждый час суток, а её вариация составляет 10%.

Методика расчета оплаты за электроэнергию

Основная часть электроэнергии потребляется электродвигателями локомотивов. Любой асинхронный электродвигатель является потребителем реактивной мощности. Для его работы требуется создание переменного магнитного поля, для чего необходим намагничивающий или, как говорят, реактивный ток. При отсутствии компенсирующих устройств в сетях, реактивный ток (реактивная мощность) поступает к двигателям из сетей энергоснабжающей организации, и следовательно, подлежит оплате. Поэтому задачу компенсации реактивной мощности (КРМ) в сети можно рассматривать как задачу энергосбережения. Проблема компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий в последнее время стала актуальнее и острее в связи с внедрением в систему платы за электроэнергию «Методики расчетов платы за перетоки реактивной мощности между электропередающей организацией и ее потребителями» (Министерство топлива и энергетики, приказ N 19 от 17.01.2002) [71].

Плата за потребление и генерацию реактивной электроэнергии, на основании методики, определяется по формуле:

(3.15)

где $P_{\text{осн}}$ – основная плата за потребление и генерацию реактивной электроэнергии; $P_{\text{надб}}$ – надбавка (при $\cos \varphi < 0,25$) за недостаточную оснащенность электрической сети потребителя устройствами КРМ; $P_{\text{скид}}$ – скидка платы при участии в оптимальном суточном регулировании режимов сети энергоснабжающей организации в расчетный период.

Величина надбавки находится в нелинейной зависимости от , и при , может принимать значения сравнимые с основной платой за потребление и генерацию реактивной электроэнергии [71].

Уменьшение величины за счет применения компенсирующих устройств реактивной мощности на локомотивах – довольно сложная задача, требующая централизованного решения. Эту задачу нужно решать путем введения рациональных режимов управления движением поезда с применением критерия минимизации расхода реактивной энергии или уменьшением затрат на оплату потребленной реактивной мощности.

Следует разработать методику, которая позволит рассчитывать участковые времена хода и их реализацию – режимные карты, оптимальные не только по расходу электроэнергии на тягу, но и по стоимости электроэнергии с учетом переменных тарифов оплаты и расхода реактивной энергии.

Основой оптимизации перегонных времен хода является математическое моделирование движения поезда. Поезд представлен как гибкая нерастяжимая нить. В качестве метода оптимизации режимов вождения поездов, между пунктами остановки при заданном времени хода, выступает динамическое программирование в дискретной форме.

Предложен и исследован усовершенствованный критерий эффективности движения поездов, который учитывает активную и реактивную составляющую электрической энергии, с учетом переменных тарифов на оплату электроэнергии в разные периоды суток.

Критерий оценки закона управления на участке представляет собой функционал (затраты электроэнергии на тягу поезда) [14, 82]:

(3.16)

где - активный ток электровоза

А с учетом стоимости электроэнергии (функция $c(t)$ – определяет ценовой коэффициент в зависимости от времени t) при расходе активной и реактивной энергии критерий может выглядеть как:

(3.17)

где первый член отражает стоимость расхода только активной энергии, а второй – стоимость реактивной, D - коэффициент ЕЕРП, что характеризует часть влияния реактивного перетока в точке учета, на технико-экономические показатели в расчетном режиме, квт/квар. - надбавка за недостаточное оснащение средствами компенсации

реактивной энергии.

(3.18)

– основная плата за потребленную и сгенерированную реактивную энергию, второе слагаемое выражения `GOTOBUTTON ZEqnNum449357 \* MERGEFORMAT REF ZEqnNum449357 \* Charformat \! \*`

`MERGEFORMAT (3.18)`, , нормативное базовое значение коэффициента стимулирования капитальных вложений в средства компенсации в сетях потребителя;

– коэффициент, рассчитывающийся по регламентированной таблице в зависимости от фактического значения коэффициента потребителя в среднем за отчетный период; для тяговых подстанций железнодорожного транспорта переменного тока = 1,0 , а для постоянного тока = 0,5. Для железнодорожного транспорта переменного значения надбавки равняется 0.

Итого полученный критерий выглядит после упрощения таким образом:

(3.19)

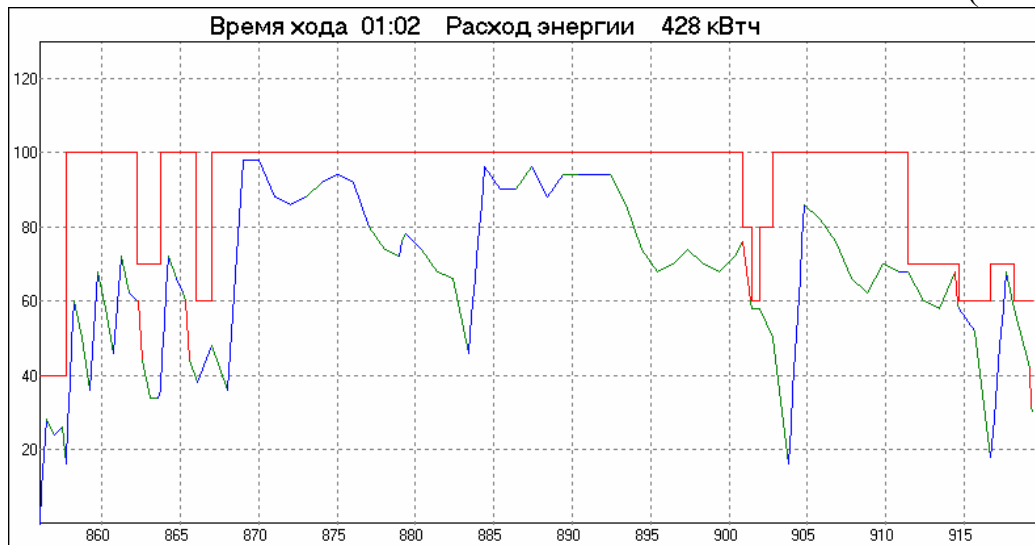


Рис. 3.3 Оптимизация по общему расходу электроэнергии

Вычисления ЕЕРП (коэффициент D) выполняются электропоставляющей организацией один раз на два года. Полученные значения ЕЕРП, базового коэффициента стимулирования капитальных вложений в средства компенсации и коэффициента убытков от генерации реактивной мощности из сети потребителя закрепляется в договоре [71].

Моделирование режимов ведения поездов Для построения характеристики были использованы данные из опытных поездок на локомотиве ВЛ-80т. Измеренные зависимости значения от полного тока локомотива были аппроксимированы кривой вида:

(3.20)

На рис. 3.4. представлены точки измеренных во время испытаний значений и кривая аппроксимирующая их зависимость.

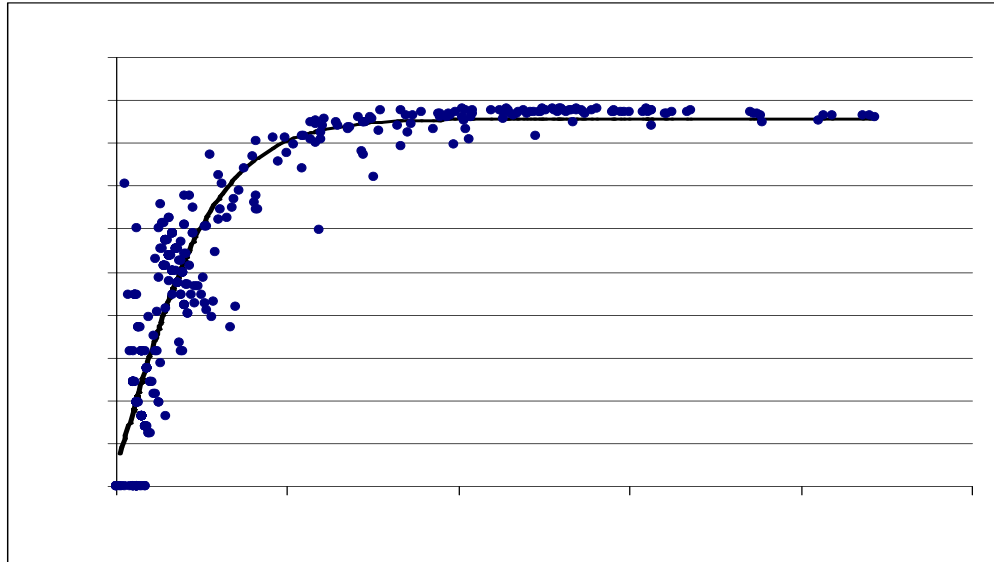


Рис. 3.4. Аппроксимация функции

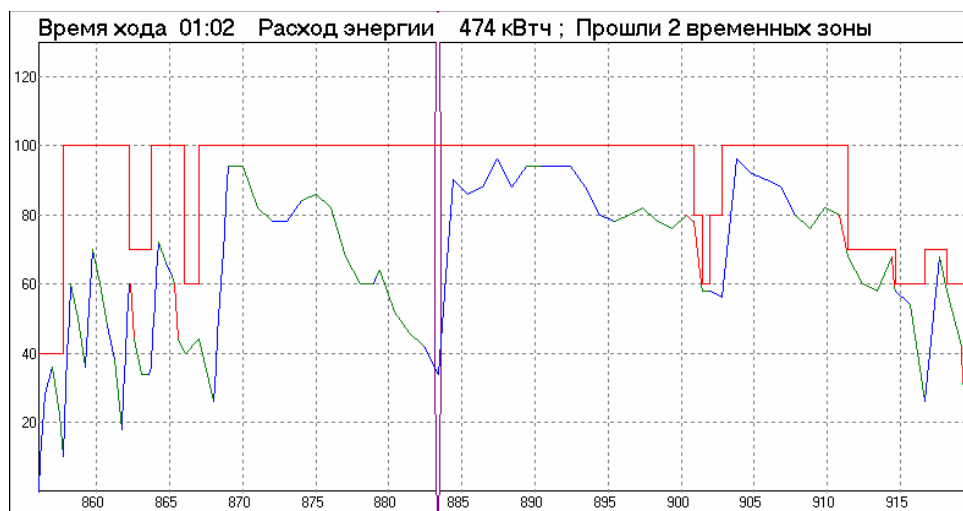


Рис. 3.5 Оптимизация с учетом платы за реактивную энергию

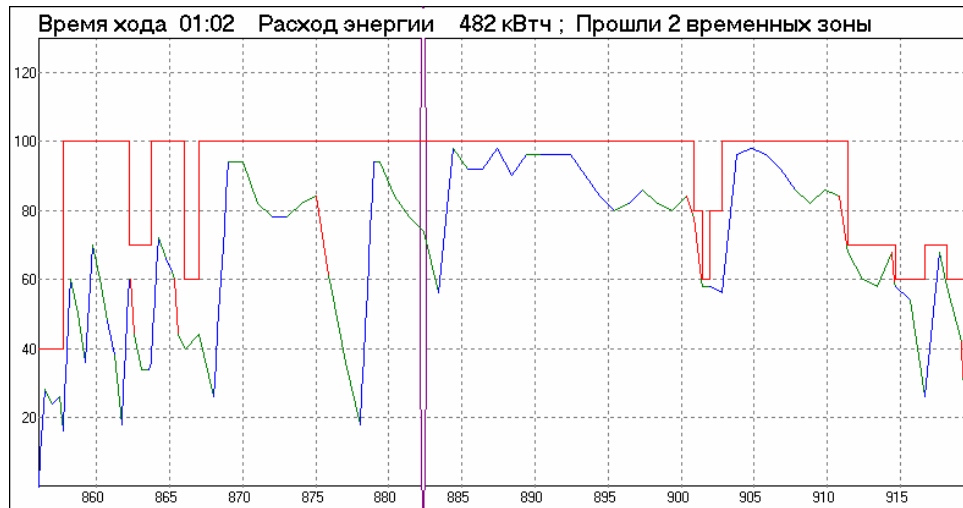


Рис. 3.6 Оптимизация по стоимости полного расхода энергии

Выполнены расчеты управления поездом на участке с применением дифференцированных тарифов на оплату электроэнергии. На рис. 3.3. показана зависимость скорости локомотива при оптимизации движения по общему расходу электроэнергии.

Можно отметить отличие характера управления поездом при различных критериях оптимизации. В первом, классическом, случае получается минимальный расход электроэнергии рис. 3.3. Для второго случая расход электроэнергии выше, т.к. для уменьшения расхода на оплату потребовалось использовать большее количество энергии в зоне с меньшей стоимостью, при дифференцированном тарифе на оплату. Для третьего случая на рис. 3.5., стоимость энергии подсчитана более точно с учетом затрат на использование реактивной энергии, стоимость которой составляет примерно 10% от тарифа на активную электроэнергию.

3.3 Критерий эффективности применения переменных тарифов с учетом активной и реактивной составляющих электроэнергии

При работе железных дорог Украины в условиях рынка электрической энергии задачи по расчету оптимальных режимов ведения поездов должны решаться во взаимосвязи с задачами по оценке эффективности применения переменных тарифов оплаты электроэнергии [81]. Для преодоления вычислительных трудностей такого подхода было предложено обобщенное правило вида

$$\dots \quad (3.21)$$

($\dots$), которое состоит в использовании характеристики математического ожидания цены электроэнергии. Содержание этого условия в том, что для определения экономической целесообразности важно знать не собственно объемы потребления электроэнергии на тягу

поездов по периодам суток, а лишь соотношения между этими показателями для разных периодов. Если отношение (3.21) имеет место, то перевод рассматриваемого полигона на переменный тариф выгоден. Условие (3.21) также позволяет установить предельные относительные объемы электропотребления по зонам дифференцированных тарифов (либо переменных тарифов оптового рынка - ОРЭ), при которых переход на переменные по периодам суток тарифы является эффективным по критерию минимума стоимости электроэнергии.

В GOTOBUTTON ZEqnNum743136 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum743136 * Charformat \! * MERGEFORMAT (3.21) обозначено:

- временные зоны переменного тарифа,
- структуры распределения электропотребления на тягу в различных

временных зонах , в которых тариф составляет - сj

- величины , ; .

- , стоимость электропотребления при одноставочном тарифе.

Критерий GOTOBUTTON ZEqnNum743136 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum743136 * Charformat \! * MERGEFORMAT (3.21) все же не в полной мере учитывает данные относительно стохастических характеристик тарифов на электроэнергию в различные периоды, а также относительного электропотребления на тягу в период “i” , . При этом можно выделить два аспекта, позволяющих уточнить GOTOBUTTON ZEqnNum743136 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum743136 * Charformat \! * MERGEFORMAT (3.21). Во-первых, в работе [82] на основе дополнительной информации, необходимой для постановки двухэтапной задачи стохастического программирования [25], получено более точное условие оценки эффективности применения дифференцированных тарифов при закупках электроэнергии на тягу вида

$$, \quad (3.22)$$

где

случайная величина удельного потребления электроэнергии,

, – среднее и отклонение от средних в -ом периоде суток,

вероятность ого интервала отклонений;

– случайная величина цены и ее среднее значение на протяжении i-ого часа суток;

- знак математического ожидания значений случайных величин.

В (3.22) в сумму вводится второй член, что обобщает критерий GOTOBUTTON ZEqnNum743136 * MERGEFORMAT REF ZEqnNum743136 * Charformat \! * MERGEFORMAT (3.21). Для применения критерия (3.22) необходим закон распределения отклонений случайных величин удельного потребление электроэнергии в каждом -ом периоде, который может быть представлен в таблицы следующего вида

$$\left| \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right| \left| \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right| \left| \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right| \left| \begin{array}{c} \dots\dots \\ \\ \end{array} \right| \left| \begin{array}{c} \dots\dots \\ \\ \end{array} \right| \left| \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right|. \quad (3.23)$$

В (3.23) указаны отклонения от средних и соответствующие значения вероятностей. Законы распределения вида (3.23) необходимо построить для всех тарифных зон дифференцированных тарифов, используемых при анализе эффективности методов оплаты за потребленную на тягу электроэнергию.

Отношение (3.21) с некоторыми изменениями может быть применено также и для оценки эффективности закупки электроэнергии на оптовом рынке электроэнергии (ОРЭ), а значит и для применения соответствующих методов по расчету режимов тяги поездов. При этом критерий принимает следующий вид [81]

$$, \quad , \quad (3.24)$$

где характеристики представляют следующее:

– прогнозируемые оценки цены электроэнергии для i -ого часа суток,

прогнозируемый показатель потребления для i -ого часа суток,

- приведенный показатель потребления электроэнергии вида

$$, \quad (3.25)$$

когда ΔE_i – объем потребления электроэнергии i -ого облэнерго на протяжении i -ого часа суток,

корректированные показатели относительного потребления электроэнергии (100% объема принимается за единицу) на тягу за тот же период,

единый, принятый за базовый, тариф платы за электроэнергию,

единый тариф платы за электроэнергию для i -ого облэнерго (то есть тариф для некоторых пространственных координат графиков движения поездов).

Условия (3.22), (3.23) также обобщаются на основе постановки двухэтапной задачи стохастического программирования и более полный критерий экономической эффективности тарифов ОПЭ принимает вид

$$(3.26)$$

где второй и третий члены суммы применяются при условиях ОПЭ. В
 GOTOBUTTON ZEqnNum887373 * MERGEFORMAT REF
 ZEqnNum887373 * Charformat \! * MERGEFORMAT (3.26) обозначено:

ξ_i , случайная величина относительного потребления электроэнергии,

σ_i вероятность i -ого интервала отклонения;

μ_i случайная величина цены, среднее и отклонение от средних в i -ом часовой тарифной зоне,

σ_i вероятность i -ого интервала отклонения;

E – знак математического ожидания случайных значений цены.

Для (3.26) также необходимо построить законы распределения для отклонений случайных величин потребления электроэнергии в каждом i -ом периоде таблицы тарифов и закон распределения отклонений случайных величин цены электроэнергии следующего вида

$$\left| \begin{array}{cccc} \mu_i & \sigma_i & \xi_i & \dots \end{array} \right| \quad (3.27)$$

В (3.27) указаны отклонения от средних, а также соответствующие значения вероятностей. Законы такого вида следует построить для всех временных зон, учтенных в ОПЭ, то есть почасово.

Дальнейшим усовершенствованием и уточнением критериев (3.21), (3.22), (3.25) является учет потребления как активной, так и реактивной электроэнергии, и в первую очередь их различной стоимости. Такое обобщение критериев эффективности применения переменных тарифов предполагает использование зависимостей для $\cos(\varphi)$, см. рис. 3.4. Следуя методике формирования моделей (3.21) – (3.27), получим уточненные критерии для условий применения дифференцированных тарифов вида

, (3.28)

и для условий оптового рынка согласно

(3.29)

где

В (3.28), (3.29) обозначения величин соответствуют (3.22) – (3.27), кроме новых, которые введены дополнительно в связи с различием цен активной и реактивной составляющих электропотребления и обозначают следующее:

, случайная величина относительного потребления активной и реактивной электроэнергии, соответственно,

случайная величина цены, среднее и отклонение от средних в -ом часовой тарифной зоне для активной и реактивной электроэнергии, соответственно.

Как было отмечено, особенность предложенных уточненных оценок стоимости электропотребления на тягу при переменных тарифах (а также соответствующих режимных карт управления движением поездов и критериев (3.28), (3.29)) состоит в учете различной цены для активной и реактивной составляющих. Это различие дополняет такие свойства оптимальных по стоимости электроэнергии моделей режимов ведения поездов как необходимость учета переменной цены электроэнергии по периодам суток и изменения цены электроэнергии по пространственным координатам. Соответственно усложняется и задача расчета оценок критериев эффективности переменных тарифов (3.28), (3.29). В связи с зависимостью режимов движения от цены электроэнергии по периодам суток, задачи по расчету оптимальных режимных карт (участковые скорости) приобретают комбинаторный характер. Для получения практических рекомендаций на основе критериев (3.28), (3.29) необходимо применение методов имитационного моделирования графика движения поездов.

Для решения задачи расчета эффективности стоимостной оптимизации режимов тяги может быть рекомендована следующая обобщенная итерационная процедура:

Рис. 3.7 Схема расчета эффективности стоимостной оптимизации режимов тяги

- 1) на основе графика движения поездов получить оценки матриц прогнозируемого электропотребления по временным зонам переменных тарифов (дифференцированных - ДТ, оптового рынка – ОРЭ)

, установить номер этапа процедуры расчета ;

- 2) на основе задать распределение тяговых подстанций по зонам переменных тарифов (ДТ(k), ОРЭ(k)), задать функцию цены электроэнергии ;

- 3) рассчитать режимы движения поезда , оптимальные для функции , определить расчетные матрицы электропотребления тяговых подстанций по зонам ДТ ; для каждого оптимального графика рассчитать объемы и стоимости потребления активной и реактивной энергии заменить

- 4) если матрицы и являются “близкими”, им соответствует одно и то же распределение тяговых подстанций (ТП) по зонам переменных тарифов согласно (3.28) или (3.29) , тогда расчет оптимальных режимов и перераспределения ТП по зонам переменных тарифов закончен; , перейти к п. 6);

- 5) заменить прогнозируемую матрицу на расчетную для k-ого этапа процедуры , перейти к п.2.

- 6) для матриц проверить условия (3.28) или (3.29); если отношение (3.28) не выполнено, то переход на дифференцированный тариф является невыгодным для железных дорог (то же и в отношении ОРЭ).

3.4 Управления тягой грузовых поездов в условиях ОРЭ для поездопотока

Разработанные ранее модели управления движением поезда применялись в условиях движения одного поезда между станциями. Задача управления потоком поездов следующих по расписанию не рассматривалась.

На рис. 3.8 приведены примеры расчета времени хода грузовых поездов отправляющихся со станций с промежутком 10 мин., на них

можно увидеть несущественность влияния изменений режима управления, на время хода поезда между перегонами.

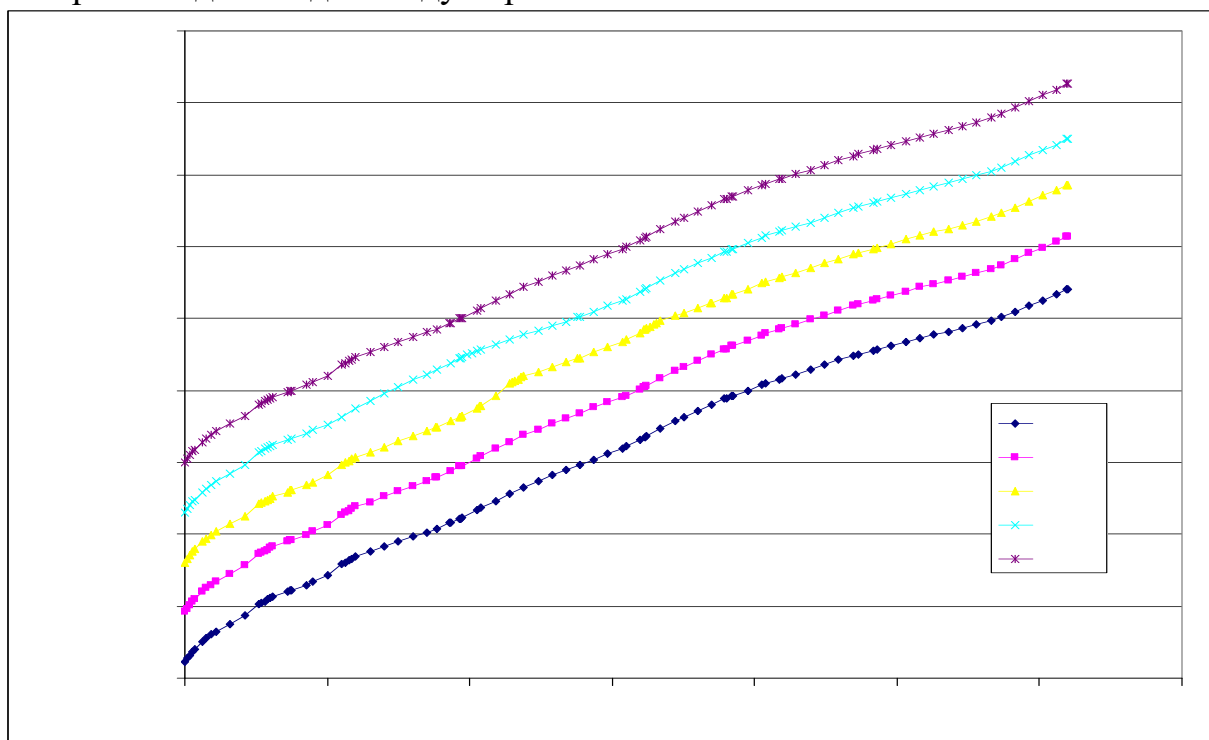


Рис. 3.8 Времена хода поездов выехавших со станции с промежутком 10 мин.

На рис. 3.9 изображена разница между временами хода нескольких поездов вышедших друг за другом с интервалом в 10 мин. При регулировании движения поездов с использованием тарифов ОРЭ нагон одного поезда другим не превышает 5 мин., что является допустимым по нормативам.

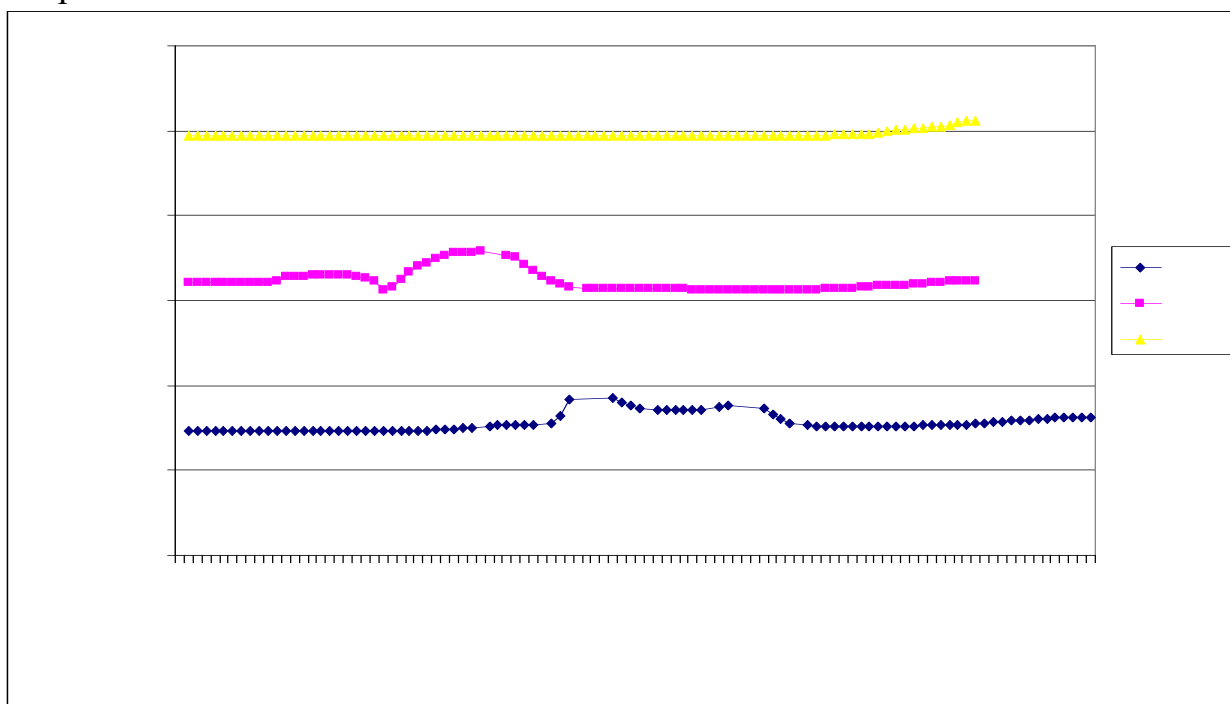


Рис. 3.9 Отображение времени нагона между поездами

Использование режимов учитывающих особенности ОРЭ при наличии графика движения приемлем – обеспечивается нормативно допустимый интервал между следующими друг за другом поездами.

В общем случае управление движением поездов в условиях поездопотока требует корректировки модели тяги – задания дополнительного ограничения на координату поезда в пути.

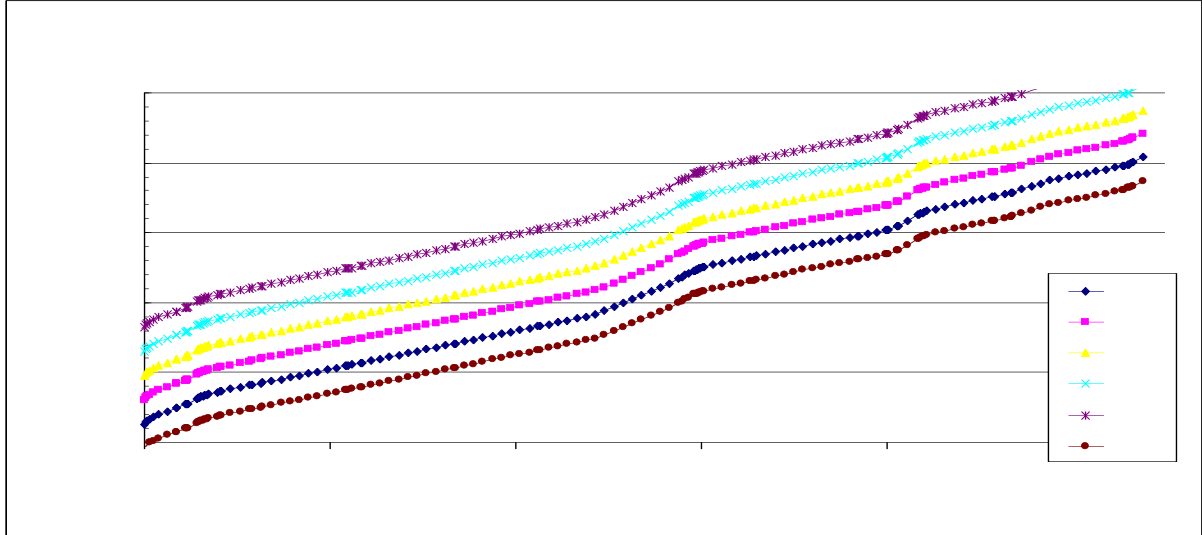


Рис. 3.10 Положение грузовых поездов последовательно отправленных со станции

На рис. 3.10 показано, что грузовые поезда, отправленные со станции с промежутком 10 мин. не будут нагонять друг друга. Внедрение рациональных режимных карт учитывающих переменную стоимость электроэнергии для всех отправляющихся поездов позволит избежать проблемы пересечения поездов во время движения.

Исследованиями установлено, что использование режимов тяги, учитывающих особенности ОРЭ, для последовательности поездов, является приемлемым - обеспечивается нормативно допустимый интервал между поездами. В общем случае управление тягой поездов в условиях поездопотока требует корректирования модели тяги, а именно - введение дополнительного ограничения на координату поезда по перегону.

3.5 Разработка нечеткой системы управления тягой поезда на основе использования данных опытных поездок

Сокращение эксплуатационных расходов – важнейшее направление повышения эффективности работы железных дорог Украины. Железнодорожный транспорт один из значительных потребителей топливно-энергетических ресурсов Украины. В год только на тягу поездов потребляется более четырех миллиардов кВт•ч электроэнергии. Одним из эффективных путей экономии энергоресурсов является внедрение энергетически-оптимальных графиков движений поездов (расчет времен хода по участкам) и оптимальных режимных карт ведения поездов на главных направлениях железных дорог Украины.

Проблеме обеспечения энергетически-эффективного процесса перевозок посвящены многочисленные исследования в Украине и за рубежом [14, 15, 82]. В них рассматриваются вопросы формализации постановок задач, учитывающих разнообразные факторы и условия процесса движения поезда по переменному профилю пути, математические методы исследования возникающих при этом оптимизационных задач. Сложность задачи организации оптимального ведения поезда в первую очередь определяется полнотой учета совокупности факторов характеризующих участок, силы, модель поезда и т.д. В зависимости от полноты имеющихся данных для решения задачи расчета оптимальных режимов тяги применяются различные методы, основанные на моделях непрерывного и дискретного оптимального управления.

Построение нечеткой системы управления для выбора режимов управления движением поезда

В моделях [14, 15, 82] использовано множество величин, значения которых сложно точно получить, или же их измерение требует больших затрат. На практике надежной основой для оценки и расчетов рациональных режимов ведения поездов являются опытные поездки, представляющие выполненные фактически режимы тяги. Рассмотрим задачу выбора рационального режима тяги локомотива на основе построения базы нечетких правил экспертных систем по данным опытных поездок и организации нечеткого вывода. Такие правила управления учитывают отклонения фактических состояний от оптимальной режимной карты для эталонного случая, рассчитанной для поезда заданной массы на заданном перегоне (эталонный режим). Эталонными режимами служат данные о фактических поездках или же расчеты согласно моделям в работах [14, 15, 82]. Для моделирования опытных поездок использовались расчеты режимов тяги поездов с разными массами, разным напряжением на токоприемнике, при различных ограничениях по скорости и изменением других параметров.

При формировании правил установлены такие параметры:

Δt_i – разница по времени движения на участке « i », для характеристики которого введены значения нечетких величин Tr : «отставание (сильное, слабое, отсутствует)» и «опережение (отсутствует, слабое, сильное)», Δv_i – отклонение скорости для участка « i », величина V_p со значениями: «сильное, отсутствует, слабое». Δm – разница массы поезда опытной траектории и поезда из эталонной поездки, величина M_p . Si – участок пути, или номера пикетов, величина Sp , где $i = 0, 1.. n$ – это количество точек опытной траектории для одного перегона.

Нечеткие правила имеют вид, подобный работе [77]:

ЕСЛИ si есть Sp И Δm есть M_p И Δt_i есть Tr И Δv_i есть V_p ТО ΔU_i ,

где ΔU_i – количество позиций контролера, относительно текущего положения, которые обеспечивают управление, близкое к оптимальному на некотором i -том участке пути. При построении модели управления в

виде нечетких правил использована работа [77], а каждая нечеткая характеристика аппроксимируется N нечеткими величинами с треугольными функциями принадлежности. Для нечеткой характеристики заданы минимальное и максимальное значение, интервала, в которых находятся её допустимые значения. Аппроксимирующие величины имели треугольную степень принадлежности: вершина лежит в центре, ей соответствует степень принадлежности 1, а две другие вершины по сторонам от нее со степенями принадлежности 0. Нечеткий вывод основывается на правиле нечеткой импликации, построенном на правиле Мамдани [77].

Рассмотрим величину M_p (разница масс поездов по отношению к эталонному поезду). Минимальное значение разницы масс равнялось -320 т., а максимальное 300т. Разбив этот интервал на 13 частей, имеем такие значения нечеткой величины, показанные в таблице (таблица 3.2).

Названия каждого значения даны таким образом: значения около 0 называются «Н» (нет отклонения), максимальные значения «Т» (тяжелее), минимальные значения «Л» (легче); между ними «СрЛ» (средне легче) и «СрТ» (средне тяжелее). Изображение этой величины в виде графиков функции принадлежности показано на рис. 3.11.

Таблица 3.2

Значения нечеткой величины M_p (масса поезда)

№	Название значения	$\alpha=0$	$\alpha=1$	$\alpha=0$
1	Л1	-420	-320	-220
2	Л2	-358	-258	-158
3	Л3	-300	-200	-100
4	СрЛ1	-250	-150	-50
5	СрЛ2	-200	-100	0
6	Н2	-150	-50	50
7	Н	-100	0	100
8	Н1	-50	50	150
9	СрТ1	0	100	200
10	СрТ2	50	150	250
11	Т3	100	200	300
12	Т2	150	250	350
13	Т1	200	300	400

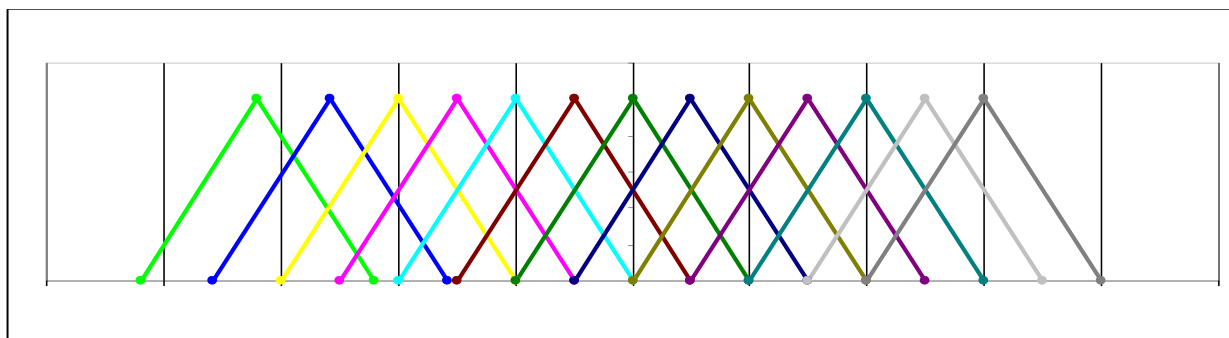


Рис. 3.11 Функции принадлежности при аппроксимации нечеткой величины M_r

Каждая аппроксимация была представлена нечеткими значениями, полученными при разбиении допустимого интервала на части рис. 3.11 - рис. 3.13.

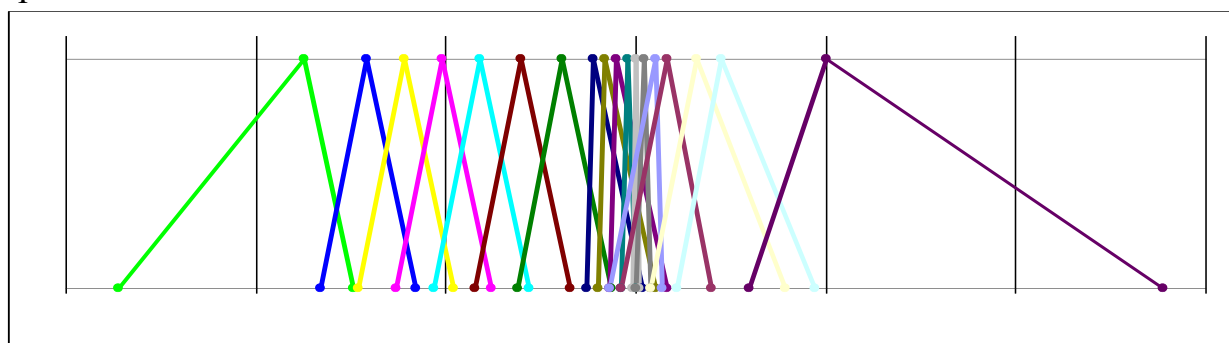


Рис. 3.12 Функции принадлежности при аппроксимаций нечеткой величины T_r (отставание по времени)

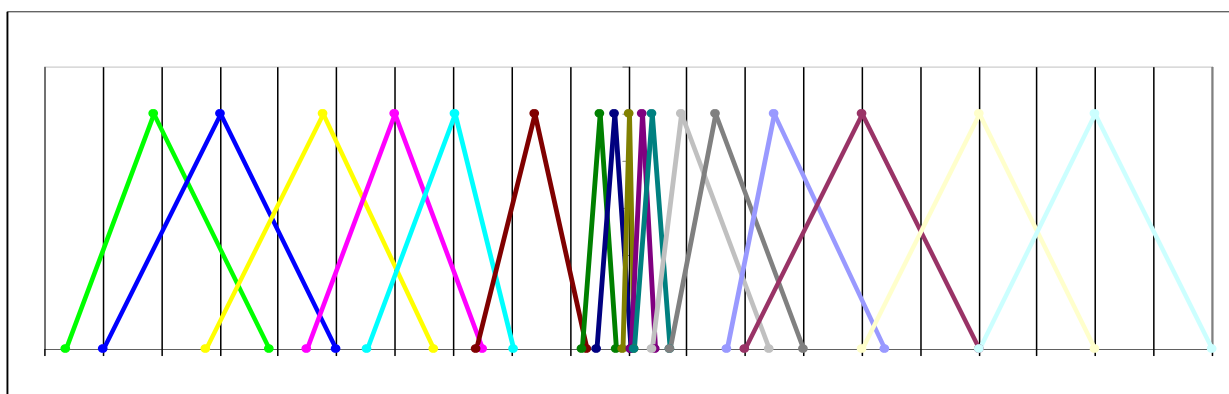


Рис. 3.13 Функции принадлежности при аппроксимаций нечеткой величины V_r (отклонение в скорости)

Разбиение каждой величины следовало откорректировать так, чтобы добиться наибольшего соответствия значениям, которые подаются на вход нечеткой модели.

На следующем шаге выполнено формирование базы правил. При этом каждое значение из обучающей выборки эталонных режимов тяги сопоставляется со значениями нечеткой характеристики и заменяется той, значения которой имеют максимальную степень принадлежности среди всех заданных в области. Например, значения отклонений $\Delta m = 80$, $\Delta ti = -5$

и $\Delta v_i=30$, а $\Delta U_i=3$ тогда получим такое правило:

ЕСЛИ Δm есть «Н» И Δt есть «Опер.сред2» И Δv есть «Быс4» ТО $\Delta U=3$.

Для каждой точки опытной траектории получается несколько правил и возникает проблема их противоречивости: правила с одинаковыми посылками будут подтверждать разные выводы. Проблема решается приписыванием каждому правилу степени истинности. При появлении противоречивых правил проверяется их степень истинности и остается правило с наибольшей степенью истинности. Такой способ уменьшает общее количество правил в базе и полностью устраняет противоречивость. Степень истинности вычисляем как произведение степени принадлежности всех величин участвующих в правиле [77]. Построенная база правил имеет вид таблицы, в которой есть столбцы посылок, столбец вывод и степень истинности правила. В следующей таблице представлена часть полученной базы правил (таблица 3.3).

Использование базы нечетки правил заключается в определении отображения входных посылок $f(s_i, \Delta m, \Delta t_i, \Delta v_i) \Rightarrow \sim \Delta U_i$, где $\sim \Delta U_i$ –нечеткая величина, для определения количественного значения которой необходимо выполнять операцию дефазификации [7, 77]. В представленных результатах был использован метод дефазификации по правилу среднего центра.

Таблица 3.3

Фрагмент полученной базы правил

Степень ист. правила	s	Δm	Δt	Δv	ΔU
0,6310	61600	T2	Отст.слаб1	Нет	0
0,9465	62200	T2	Отст.слаб1	Нет	0
0,8051	63200	T2	Отст.слаб1	Нет1	0
0,4395	500	СрТ1	Отсутст2	Нет	-9
0,3863	1000	СрТ1	Отст.слаб	Сред2	-2
0,4016	1600	СрТ1	Отст.сред	Сред2	-4
0,5653	2000	СрТ1	Отст.сред	Сред2	-2
					
0,0231	61000	СрТ2	Опер.сил2	Сред4	2
0,0383	61200	СрТ2	Опер.сил2	Сред4	2
0,9800	167	Л2	Отсутст2	Нет	0
0,6517	334	Л2	Отсутст2	Нет	-2
0,5667	500	Л2	Отсутст2	Нет	-9

Результаты проведенного моделирования проиллюстрированы примером на рис. 3.14, где изображен график зависимости скорости от пройденного расстояния для двух разных поездов.

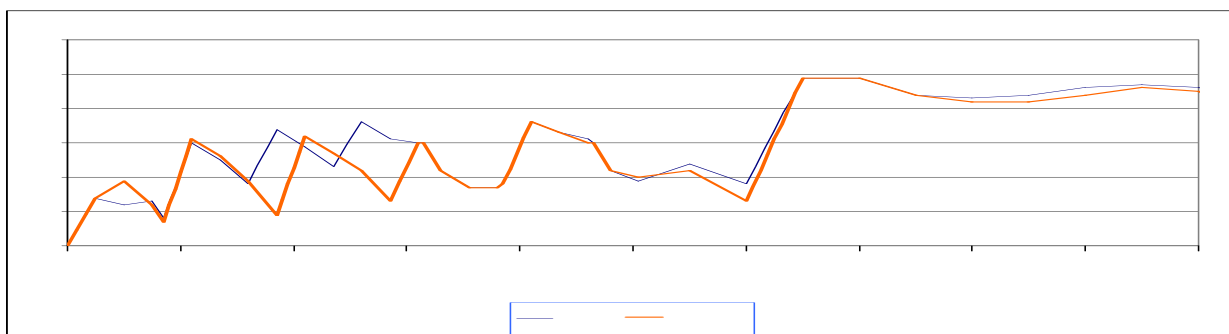


Рис. 3.14 Скорость эталонного и контрольного поезда на заданном перегоне

Тонкая линия – скорость эталонного поезда, которая представляет рассчитанную согласно традиционным моделям [14-16], идеализированную оптимальную траекторию. Исходными данными для построения базы правил являлись значения отклонений в скорости, времени хода, массе поезда от эталонной поездки. Жирная линия показывает контрольную расчетную поездку, информация о которой не попадала в обучающую выборку, которую нужно приблизить к эталонной поездке на основе базы нечетких правил.

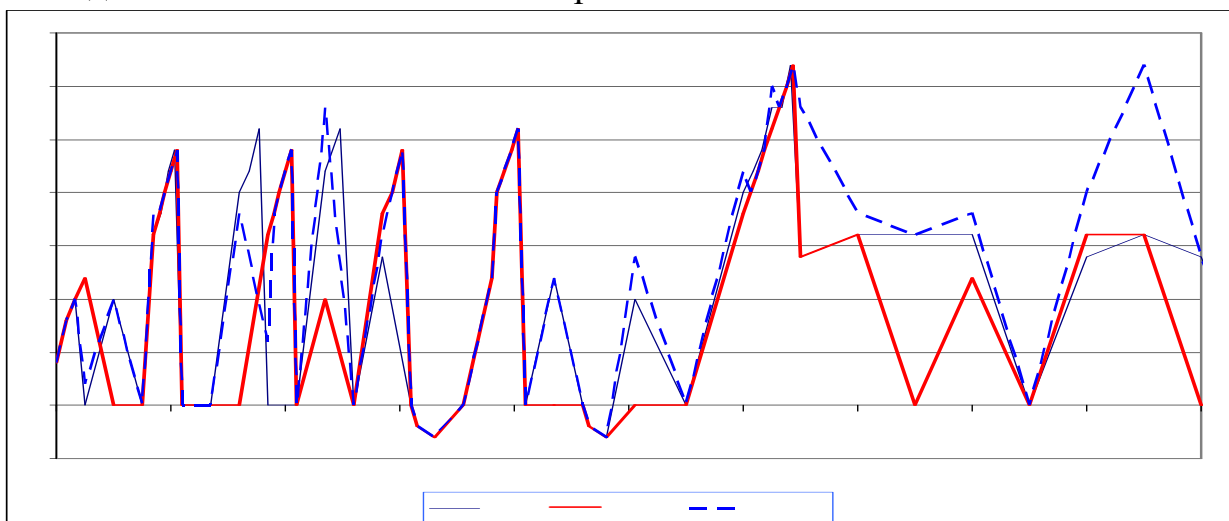


Рис. 3.15 Зависимость номера позиции контроллера от участка пути

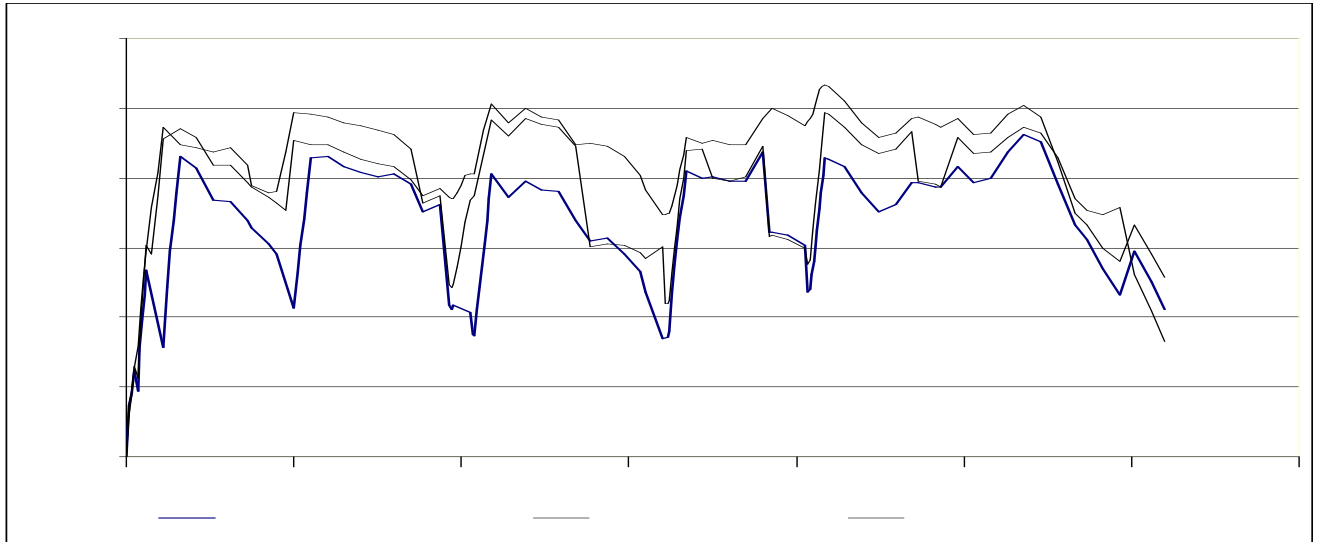


Рис. 3.16 График скорости движения поезда

На * MERGEFORMAT

рис. 3.16 показано как система, основанная на выводе из базы нечетких правил, производила корректировку управления в контрольной поездке. Пунктирная линия представляет рекомендуемое управление, которое нужно задать машинисту локомотива, чтобы движение поезда приблизилось к показателям заданного эталонного управления. Из графика видно, что рекомендуемое системой управление стремится увеличить номер позиции контроллера, а вместе с ним и скорость, чтобы ускорить движение. Это связано с тем, что в качестве контрольной была взята поездка с опозданием, поэтому повышение скорости приближает ее к оптимальному управлению.

Выбор параметров нечеткой модели.

Дальнейшее развитие представленной модели может происходить в направлении учета в форме правила установленные ограничения по скорости и состояние пути. Например, в роли входного параметра характеризующего состояние пути может использоваться величина приведенного профиля пути, которая будет состоять из уклона и кривизны пикета. Тогда правило примет вид:

ЕСЛИ p_i есть P_p И Δt есть M_p И Δt_i есть T_p И Δv_i есть V_p ТО ΔU_i ,

где вместо параметра S_i – участок пути, будем использовать характеристику состояния пути – P_p или профиль.

Внесение такого рода изменений позволит сократить объем базы правил, за счет приведения одинаковых ситуаций о состоянии профиля пути к одним правилам.

Сравнительный анализ моделей нечетких величин экспертной системы управления режимами тяги поезда

dm	dT	dV	S	dU _{tr}	dU _{gaus}	dU _{tr_new}	dU _{gaus_new}
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	0	100	1.34	1.35	1.34	1.37
0	0	0	200	1.37	1.16	1.37	1.39
0	0	0	300	0	-0.97	0	1.54
0	0	0	400	-8.2	-11.8	0	0.0761
0	0	0	1000	0	-0.9	0	-0.625
0	0	0	3200	-1.7	0	0	0
0	0	0	3700	0	-1.2	0	0

В таблице приняты следующие обозначения параметров базы правил для управления тягой (таблица 3.4): dm – приращение массы поезда относительно эталонной поездки, dT – приращение времени хода, dV – приращение скорости движения по участку, S – координата пути, dU_{tr} – управление режимом тяги в форме рекомендуемого числа позиций контроллера (треугольная форма функции принадлежности нечеткой величины), dU_{gaus} – управление режимом тяги в форме рекомендуемого числа позиций контроллера (форма функции принадлежности нечеткой величины – кривая Гаусса), dU_{tr_new} – управление режимом тяги для упрощенной базы правил, включающей только правила с высокими степенями принадлежности (треугольная форма функции принадлежности нечеткой величины), dU_{gaus_new} – управление режимом тяги для упрощенной базы правил (функция принадлежности – кривая Гаусса).

Данные таблица 3.4 позволяют установить степень влияния аналитической формы моделей нечетких величин, используемых в правилах управления режимами тяги, на результирующий показатель – изменение позиции контроллера электровоза. В частности, таблица позволяет установить, что исключение правил с относительно малыми степенями принадлежности входных величин привело к уменьшению зависимости рекомендованного управления от вида функции принадлежности (сравнить столбцы 5 – 6 и 7 – 8 таблица 3.4). Во втором случае рекомендуемое управление отличается лишь на одну позицию, строка 3.

Таблица 3.5

Сравнительный анализ моделей нечетких величин экспертной системы управления режимами тяги поезда

dm	dT	dV	S	dU _{tr}	dU _{gaus}	dU _{tr_new}	dU _{gaus_new}
30	0.15	0.6667	180	0	-6.38	0	1.54
30	0.15	-3.333	580	-18	-12.1	0	-12.9
30	0.15	43.33	1420	-18.1	-12.8	-18.1	-12.8
30	0.15	0.6667	3500	-18.7	-10.8	0	4.33e-013
30	2	-16.67	5260	-18	-12.8	0	2.51e-028

30	2	-16.67	5620	-18.5	-12.8	0	2.51e-028
30	2	-16.67	5460	-17.8	-12.8	0	2.51e-028
30	2	-16.67	5100	-18.7	-12.8	0	2.51e-028
30	0.6667	-20.67	580	-1.21	-1.92	0	-12.8
30	0.6667	-2	580	-18.2	-12.3	0	-12.9

В Приложении приведены примеры расчетов модели нечеткого управления тягой грузового поезда, основанные на базе правил, выполненные в интегрированной среде MatLab fuzzy toolbox.

3.6 Выводы

В разделе получены результаты, научная и практическая значимость которых заключается в следующем.

1. Получили дальнейшее развитие модели и методы решения задачи по расчету оптимальных по стоимости режимов ведения грузовых поездов при переменным по периодам суток тарифам на электроэнергию. Разработана уточненная модель расчета режимов тяги с учетом стоимости как активной так реактивной энергии в условиях применения переменных тарифов оплаты электроэнергии.

2. Разработаны уточненные критерии стоимостной эффективности перевода тяговых подстанций на условия оплаты по переменным тарифам, которые учитывают как активную, так и реактивную составляющие электропотребления и их различную удельную стоимость.

3. По данным опытных поездок локомотива ВЛ-80т построена модель зависимости коэффициента мощности от тока, которая позволяет выполнять уточненные режимы тяги поездов, учитывающие разную стоимость реактивной и активной электроэнергии.

Проведенные исследования показали достаточную точность полученных режимов управления локомотивом. Построенную базу нечетких правил, заменяющую собой модель движения поезда, можно использовать как советчик машиниста для выбора управления на очередном участке пути с учетом условий неопределенности.

4. Предложен и реализован подход к расчету оптимальных режимов тяги поездов, использующий модели и методы нечеткого вывода, позволяющие использовать разнородные и ограниченные данные для принятия решения о выборе рациональных режимов ведения поезда. На этапе формирования модели нечеткого управления учитывается, что на режимы ведения поездов одинаковой массы на одном и том же участке влияют множество неопределенных факторов. Среди них отметим такие, как напряжение на токоприемнике электровоза, ограничения по скорости, метеорологические условия, случайные препятствия, квалификация машиниста. Следует также учесть, что не бывает поездов одинаковой массы и, несмотря на наличие такого постоянного фактора, как профиль пути, от которого непосредственно зависит режим ведения, рациональные

режимные карты уникальны для каждой поездки.

Материалы раздела опубликованы в работах [31, 35, 37, 39, 45, 59, 84, 86, 87, 89, 90].

РАЗДЕЛ 4

ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИИ РАСЧЕТОВ ОПТИМАЛЬНЫХ ПО СТОИМОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ РЕЖИМОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОЙ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННЫХ ТАРИФОВ

4.1. Процедуры реализации основных задач моделирования процессов управления тягой грузовых поездов по критерию минимума стоимости потребленной электроэнергии

Разработанные выше модели и методы, ориентированные на реализацию управления тягой грузовых поездов, по критерию минимума стоимости потребленной на тягу поездов электроэнергии, предназначены для работы железных дорог Украины в рыночных условиях, в первую очередь – для работы в рамках оптового рынка электроэнергии – ОРЭ. В настоящее время все железные дороги УЗ перешли на работу в ОРЭ, что делает вопросы стоимостной оптимизации режимов тяги все более актуальными и экономически оправданными. Как отмечалось в работе, переход к реализации представленных выше моделей и методов «стоимостным» управлением тягой поездов предполагает выполнение не только научно-технических и технологических, но и значительных организационных работ. Это, в частности, связано с необходимостью формирования пакетов режимных карт, предназначенных для различных периодов суток, а также переподготовки машинистов, других специалистов по управлению грузовым движением поездов. Следует заметить, что реализация оптимальных в стоимостном смысле режимов тяги для ОРЭ сложна и потому, что машинисты не имеют (не могут непосредственно получить) опыта такого рода управления ведением поезда. Изменения стоимости электроэнергии по периодам суток (почасовые) не дают возможности выработать навык рационального управления, поэтому такие режимы могут быть реализованы только путем выполнения требований расчетов.

В условиях ОРЭ и перехода к стоимостному критерию управления тягой грузовых поездов возникают некоторые новые задачи, как в области моделирования процессов ведения поездов, так и для рационального планирования и разработки соответствующих нормативных графиков. Рассмотрим некоторые основные из них.

П1. Расчет режимов тяги грузовых поездов, рациональных по стоимости потребленной электроэнергии при переменных тарифах.

П2. Компромиссно-оптимальные режимы тяги поездов.

П3. Автоматическое формирование адаптивной модели управления тягой поездов на основе эталонных поездок, использование нечеткой модели управления тягой.

П4. Выдача рекомендаций по изменению управления тягой поезда во время движения с учетом отклонений от графика.

П5. Моделирование процессов управления тягой для поездопотока.

П6. Расчет режимов тяги грузовых поездов, рациональных по стоимости потребленной электроэнергии при дифференцированных тарифах.

П7. Формирование нормативных графиков управления движением поездов по критерию минимума стоимости потребленной на тягу электроэнергии для условий ОРЭ.

П8. Расчет критериев оптимальности (экономической эффективности) применения переменных тарифов на электроэнергию для заданного железнодорожного полигона.

П9. Режим обучения управления движением поездов по критерию минимума стоимости потребленной электроэнергией на тягу.

Содержательная характеристика задач и процедур П1 – П8 приведена в табл. 4.1.

Программный комплекс для автоматизации тяговых расчетов решает задачи, указанные в табл. 4.1, а также позволяет создавать и модифицировать структуры входных данных, представляющих характеристики парка тягового подвижного состава, профиля пути, параметров и условий изменения тарифов на электроэнергию при применении дифференцированных и переменных тарифов ОРЭ, заданий по реализации критериев оценки эффективности применения переменных тарифов на электроэнергию для заданных полигонов и др.

Таблица 4.1

Общая характеристика задач моделирования и оптимизации по стоимости потребленной электроэнергии режимов управления тягой грузовых поездов в условиях применения переменных тарифов

N п/п	Название задачи автоматизации	Краткая технологическая характеристика	Отличие реализации
1	Расчет режимов тяги грузовых поездов, рациональных по стоимости потребленной электроэнергии при переменных тарифах	Формирование рациональной последовательности участковых скоростей движения поезда, а также соответствующих режимов управления тягой	Формирование набора режимных карт, используемых в различные периоды суток
2	Компромиссно-оптимальные режимы тяги поездов	Решение задачи установления взаимосвязей между режимами, оптимальными по критериям минимума стоимости и минимума потребленной на тягу поездов электроэнергии	Сопоставление режимных карт, оптимальных по различным критериям, позволяет выбрать рациональный набор законов управления
3	Автоматическое формирование адаптивной модели управления тягой поездов на основе эталонных поездок, использование нечеткой	Обеспечение возможности адаптации моделей автоматизированной системы расчетов оптимальных режимов тяги на основе расширения базы эталонов,	Автоматическое формирование структур управления режимами тяги, расширение базы

	модели управления тягой	отобранных результатов эффективных режимов управления движением поездов на участках	знаний о законах управления
4	Выдача рекомендаций по изменению управления тягой поезда во время движения с учетом отклонений от графика	Возможности использования программного комплекса для обучения управлением тягой по стоимостным критериям. Оценка различий в управлении для некоторых установленных ситуаций	Реализация функций тренажера машиниста
5	Моделирование процессов управления тягой для поездопотока	Расчет режимов тяги для последовательности поездов, отправляемых от заданной станции с заданным периодом для установленного времени суток. Контроль обеспечения нормативного интервала	Анализ множества режимов тяги по участку, расчет временных интервалов между поездами
6	Расчет режимов тяги грузовых поездов, рациональных по стоимости потребленной электроэнергии при дифференцированных тарифах	Формирование режимов управления тягой поездов для условий использования дифференцированных тарифов, как частного случая ОРЭ	Детерминированные коэффициенты, формирующие условие оплаты по периодам суток
7	Формирование нормативных графиков управления движением поездов по критерию минимума стоимости потребленной на тягу электроэнергии для условий ОРЭ.	Расчет режимов тяги на основе аппроксимаций переменных тарифов на электроэнергию для ОРЭ	Формирование представительного набора режимов тяги для участка, различные периоды суток
8	Расчет критериев оптимальности (экономической эффективности) применения переменных тарифов на электроэнергию для заданного железнодорожного полигона.	Оценка степени эффективности применения стоимостного управления тягой поездов в условиях переменных тарифов на электроэнергию	Сравнение и оценка выгод от использования наборов режимов управления по стоимости для заданных полигонов движения поездов
9	Режим обучения управления движением поездов по критерию минимума стоимости потребленной электроэнергией на тягу	Функционирование программного комплекса как тренажера машиниста, представление одновременно двух режимов – (позиции контроллера) – для критерия оптимальности по стоимости и по потреблению электроэнергии.	Сравнительный анализ режимов тяги в типичных ситуациях

Основу методов и алгоритмов решения задач таблица 4.1 составляют результаты исследований разделов 2 и 3 диссертации. Некоторые необходимые при этом данные представлены в приложениях.

4.2. Вопросы автоматизации процедур формирования оптимальных по стоимости режимов ведения поездов. Функциональное назначение и логическая структура системы.

Для реализации усовершенствованных математических моделей процессов оптимального и рационального управления тягой поездов, представленных в разд. 3, существенным является эффективная программная реализация алгоритмов расчетов. Это в первую очередь касается моделей непрерывного динамического программирования, алгоритмов формирования наборов компромиссно-оптимальных решений для выбора рациональных с учетом стоимостных показателей режимов тяги и др. В связи с этим остановимся на некоторых основных вопросах автоматизации основных процедур формирования и выбора в ходе расчетов оптимальных по стоимости режимов тяги грузовых поездов. Они в целом позволяют уточнить требования к информационным технологиям и программным средствам, необходимым для внедрения разработанных в диссертации методов совершенствования управления тягой поездов на полигонах железных дорог Украины.

Программное обеспечение, необходимое для функционирования программного комплекса автоматизации расчетов оптимальных по стоимости режимов ведения поездов, предполагает следующее: Microsoft Windows XP (или более поздние версии) драйвера BDE (Borland Database Engine).

Язык программирования: C++, интегрированная среда C++Builder.

Разработанный программный комплекс выполняет следующие основные функции, обеспечивающие реализацию заданий пункта 4.1:

1. Ведение базы данных, хранящей следующие сведения:
 - расписание поездов (названия станций, плечи обслуживания);
 - ветки пути;
 - координаты станций;
 - ограничения на ветках (пробы тормозов, нейтральные вставки, временные ограничения);
 - характеристики кривых участков;
 - расположение и длина нейтральных вставок;
 - профиль участка и километраж.
2. Составление режимных карт управления поездом на участке, точки зрения критериев:
 - минимум потребления электроэнергии (при учете переменности напряжения на токоприемнике);
 - оптимальные по расходу электроэнергии на тягу;

- минимум стоимости электроэнергии при дифференцируемых тарифах оплаты.

при ограничениях:

- по времени хода;
- ограничение скоростей на заданных участках пути;
- по перегреву тяговых двигателей.

3. Выдача и печать документов по режимам тяги поездов.

- Режимная карта управления режимами тяги;
- Режимная карта, защищенная от изменений напряжения на токоприемнике;
- Количество затраченной электроэнергии с учетом временных зон;
- Перегонные времена на участке пути;
- График изменения скорости на участке пути;
- Расписание движения поездов;
- Плечи обслуживания;
- Переменность напряжения на токоприемнике по дискретному закону.

Концептуальная модель программы, типовых расчетов по критерию минимума стоимости потребленной активной и реактивной электроэнергии

– хранилище, позволяет определять данные, передаваемые между процессами;

Концептуальная модель системы, построена по способу DFD-диаграмм (диаграмма потоков данных) [17].

– поток управления, моделирующий передачу управления.

В диаграммах используем следующие обозначения:

На рис. 4.1. представлен АРМ в обобщенном виде (1-й уровень DFD-диаграммы).

Рис. 4.1 Общая структура задач по автоматизации расчетов режимов тяги.

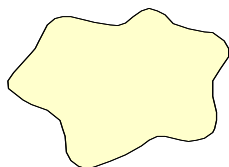
На схеме указан главный процесс и потоки данных и управления, связанные с ним. От пользователя в систему поступают данные и управление. Пользователь участвует в задании начальных данных для выполнения задачи расчета управления поездом. Полученные в процессе работы данные попадают опять пользователю, что и отразила стрелка в другую сторону. Также выходом работы системы могут, как показано, быть режимные карты и другие отчеты. В систему поступают различные внешние сущности, так данные о расписании поездов и плечах обслуживания.

Теперь раскроем главный блок и входящие, выходящие из него потоки более подробно. Процесс составления режимов управления выглядит так:

Рис. 4.2. Схема формирования первичных данных для расчетов режимов тяги в программном комплексе

Присутствие блоков-хранилищ предполагает создание базы данных, содержащей всю необходимую информацию.

Представим систему в терминах объектно-ориентированного программирования (ООП) [17]. Оперировать будем такими понятиями:



- класс: тип данных инкапсулирующий в себе данные и функции по их обработке;

- связь наследование;

- связь контейнеризация (одна сущность содержит в себе другую);

○

- отношение использования (один объект использует каким-то образом другой).

В приложении Б приведена полная разработанная диаграмма классов проекта, представленная в виде трехуровневой модели.

Трехуровневая модель представляет проект в виде трех разрезов:

- представление;
- логика приложения;
- данные.

Это определено рядом вложенных при создании проектов принципов:

1. Отделение интерфейса от модели (логики приложения).
2. Разработка отдельно уровня данных, может очень повысить эффективность работы.
3. Полученную реализацию системы, можно разделить на три части и хранить их на отдельных физических устройствах.

Далее представлены высокоуровневые классы проекта:

- БазаДанных – класс содержат в себе ссылки на все объявленные таблицы и их связи. В его обязанности входит работа с сервером БД. Наследник стандартного класса библиотеки VCL [REF _Ref345892934 \n \h 4] класса TDataModule.
- Поезд – класс в котором содержатся все сведения и расчеты связанные с локомотивом и вагонами. Хранятся тяговые и силовые характеристики, рассчитываются все тяговые, тормозные .и остальные силы.
- РасчетТраектории – содержит в себе методы поиска оптимальной траектории. В нем хранится объект типа Траектория, в котором описана она. Методы класса реализуют схему динамического программирования.
- Траектория – этот класс хранит связи узловых точек расчета, необходимых для выделения среди них оптимальной траектории. Содержит методы для выдачи на печать и для построения графической формы.
- TPrintForm – окно в котором найденная траектория будет выводиться в виде режимной карты. Наследник стандартного VCL класса TForm
- TGraphForm - окно в котором найденная траектория будет выводиться в графическом виде. Наследник стандартного VCL класса TForm

ержит в себе объект
еобходимые входные
е формы для вывода
ния. Наследник

Наличие блока хранилища, предполагало создание базы данных, структура которой представляется с помощью ER-диаграмм [REF _Ref345921348 \n \h 41]. Диаграмма включает в себя все сущности и связи, важные для организации системы (см. рис. 4.3).

Рис. 4.3 Обобщенная модель базы данных

Представленные отношения реализованы в виде таблиц БД, структура которых приведена в приложении. Типы полей указаны в формате СУБД Paradox.

Программа состоит из исполнимого файла «resar.exe». В каталоге /BASE/ содержится БД программы, хранящая расписание поездов и характеристики плеч обслуживания.

Запуск программы «Расчет режимных карт» можно осуществить из файлового менеджера, дважды щелкнуть по ярлыку с надписью «Resar» мышью. Сразу после запуска на экране появится главное окно программы (рис. 3.2.), после этого систему можно эксплуатировать.

Входные данные должны быть представленные в виде следующих показателей или структур данных:

Начальная, конечная скорость – скорости состава. Вещественное число ≥ 0 .

Напряжение – величина напряжения на токоприемнике. Вещественное число ≥ 0 .

Время хода – промежуток времени, за который необходимо преодолеть участок пути.

Время прихода – время, в которое поезд остановится.

Вес вагона – вес одного вагона в тоннах. Вещественное число.

Количество вагонов – сколько вагонов в составе. Целое число.

Локомотив – выбор типа локомотива. Строковое значение.

Диаметр бандажа - Вещественное число.

Описание пользовательского интерфейса системы расчета режимов тяги

Главное меню программы содержит следующие пункты:

Расписание поездов:

- создать;

- удалить.

Плечи обслуживания;

Электроэнергия;

Напряжение;

Расчет:

- расчет;

- расчет устойчивой траектории.

Документ

- режимная карта;

- перегонные времена.

Выход.

Координаты станций.

Параметры плеч обслуживания локомотивных бригад

Выход

Плечо обслуживания: ЖМЕРИНКА-КИЕВ_ПАСС

Установка ветки пути: 0

проба тормозов		нейтральные вставки		временные ограничения	
координаты станций		километраж		кривые	
Название станции	Вх.стрелка	Ось	Вых.стрелка	Скорость по станц	Скорость по перегону
ЖМЕРИНКА	1123	1123	1120,3	40	100
БРАИЛОВ	1117,3	1115,7	1115,4	80	100
ГНИВАНЬ	1102,1	1101,2	1099,6	60	100
ТЮШКИ	1087,8	1087,4	1086,5	80	100
ВИННИЦА	1076,6	1076,1	1075,7	60	100
ВИННИЦА_ГРУЗ	1073,4	1072,4	1071,1	80	100
СОСОНКА	1062,7	1062,3	1061,3	80	100
САЛЬНИЦКИЙ	1059,1	1058,8	1058,5	100	100
КАЛИНОВКА	1055	1053,3	1053	80	100
ВАРШИЦА	1050	1049,7	1049,4	100	100

Текущий номер ветки пути: 0

Рис. 4.4. Окно для ввода координат станций

Километраж

Параметры плеч обслуживания локомотивных бригад

Выход

Плечо обслуживания: ЖМЕРИНКА-КИЕВ_ПАСС

Установка ветки пути: 1

проба тормозов		нейтральные вставки		временные ограничения	
координаты станций		километраж		кривые	
Начало	Конец				
1123	856				

Текущий номер ветки пути: 0

Рис. 4.5. Окно ввода километража по плечу.

Кривые пути.

Параметры плеч обслуживания локомотивных бригад

Выход

Плечо обслуживания: ЖМЕРИНКА-КИЕВ_ПАСС

Установка ветки пути: 1

проба тормозов нейтральные вставки временные ограничения

координаты станций километраж кривые профиль

	Прямая	Кривая	Радиус
I	300	68	446
	130	190	1471
	70	100	538
	0	260	617
	1081	73	556
	130	82	617
	1210	117	3125
	30	72	2500
	612	1080	1042
	1892	558	3125

Текущий номер ветки пути: 0

Рис. 4.6. Окно ввода кривых на участке пути.

Профиль пути.

Параметры плеч обслуживания локомотивных бригад

Выход

Плечо обслуживания: ЖМЕРИНКА-КИЕВ_ПАСС

Установка ветки пути: 1

проба тормозов нейтральные вставки временные ограничения

координаты станций километраж кривые профиль

	длина	уклон
I	100	0,6
	100	-1,3
	100	0,1
	100	-1,1
	100	0,6
	100	0,6
	100	-1,2
	100	1,1
	100	-0,4
	100	-0,6

Текущий номер ветки пути: 0

Рис. 4.7. Интерфейс ввода профиля пути.

Ввод исходных данных для расчета режимов тяги грузовых поездов

На рис. 4.8. представлены поля ввода исходных данных расчета.

Рис. 4.8 Главное окно, для ввода исходных данных

Пользователю необходимо задать:

Начальная, конечная скорость – скорости состава. Вещественное число 0.

Напряжение – величина напряжения на токоприемнике. Вещественное число 0.

Время хода – промежуток времени, за который необходимо преодолеть участок пути.

Время прихода – время, в которое поезд остановится.

Вес вагона – вес одного вагона в тоннах. Вещественное число.

Количество вагонов – сколько вагонов в составе. Целое число.

Локомотив – выбор типа локомотива. Строковое значение.

Диаметр бандажа - Вещественное число

Учет переменного напряжения – учет переменного напряжения на токоприемнике по нормальному закону (см. «3.8.Учет переменного напряжения»).

Учет стоимости электроэнергии. (см. «3.7.Учет стоимости электроэнергии»).

Учет стоимости электроэнергии

Отметив поле выбора «Учет стоимости электроэнергии», программа при расчете будет учитывать, в каких временных зонах проезжал поезд по времени хода, и какая цена электроэнергии была использована. После расчета выбрав пункт «энергия по временным зонам» из контекстного меню, можно просмотреть какая стоимость потраченной энергии (рис. 4.9.).

	полу-пик	ночь
потрачено кВтч	250,8	130,8
на собств. нужды	63,3	58,7
коэф. цены	1,02	0,25
Итого	320,4	47,4

Рис. 4.9. Просмотр стоимости электроэнергии по временным зонам.

Учет переменного напряжения

Отметив поле выбора «Учет переменного напряжения» программа при расчете будет учитывать переменность напряжения на токоприемнике. Станет доступным пункт меню «Напряжение», в котором можно просмотреть нормальный закон распределения напряжения в сети (рис. 4.10).

Для поиска помехо-защищенной траектории используется дискретный закон изменения напряжения на токоприемнике, параметры которого необходимо задавать, выбрав «Напряжение»=> «Дискретный закон» (рис. 4.11)

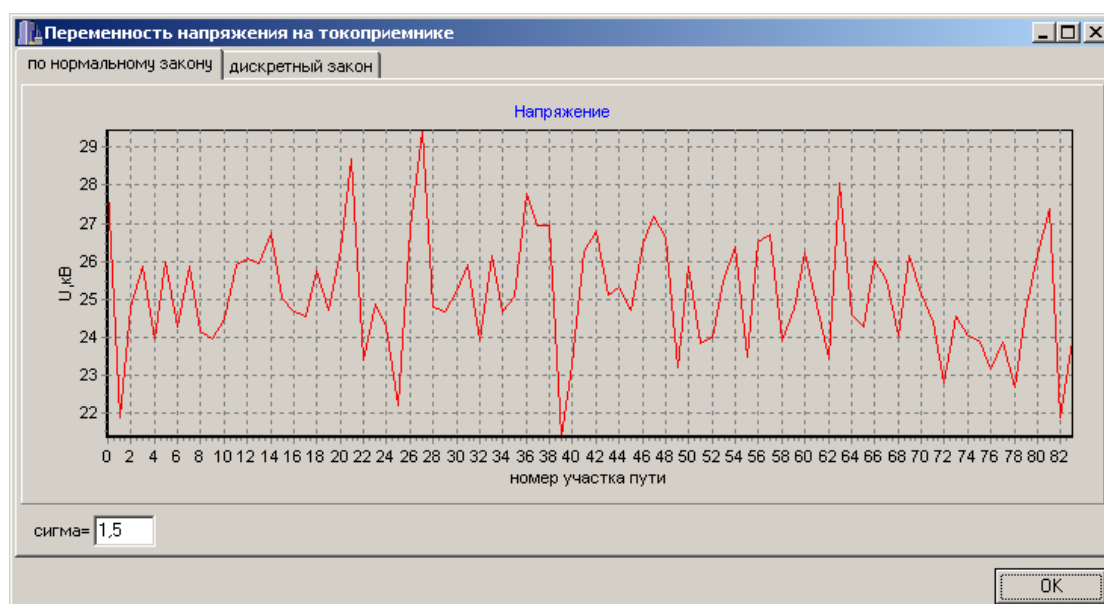


Рис. 4.10. Вид переменного напряжения по нормальному закону.

напряжение	20	22	24	26	28	30
вероятность	0,1	0,2	0,4	0,2	0,1	0

Рис. 4.11. Окно для ввода параметров дискретного закона переменного напряжения на токоприемнике.

Вывод результатов расчета режимов тяги поездов.

После выполнения расчета со всеми введенными параметрами пользователь получает результаты в виде графика изменения скорости поезда на участке пути (рис. 4.12.).

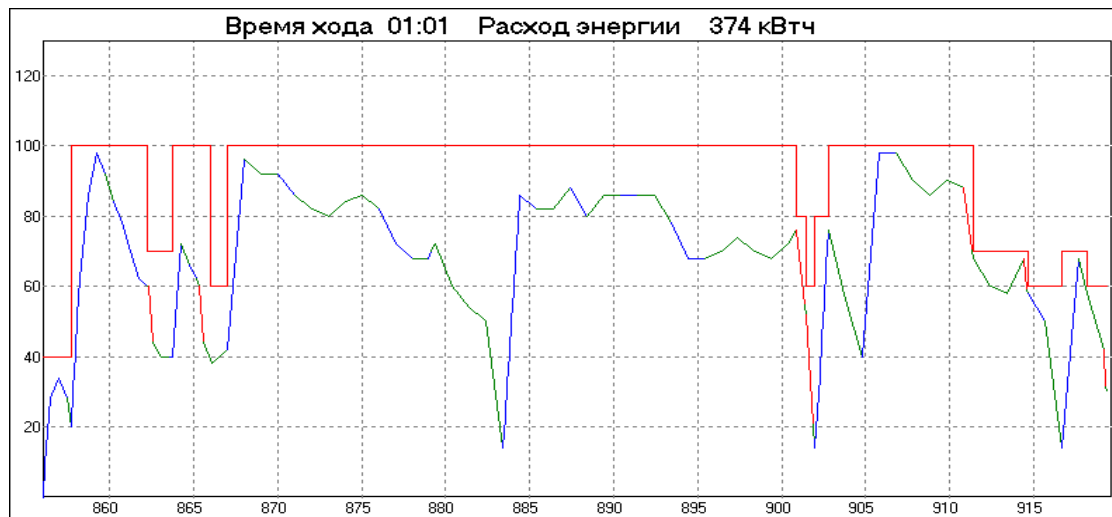


Рис. 4.12. Графика изменения скорости поезда.

Обозначения на графике объяснены в пункте «режимы» того же контекстного меню:

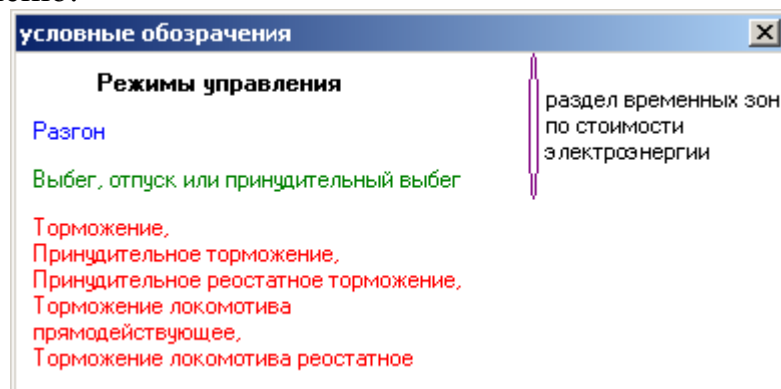


Рис. 4.13. Окно «условные обозначения».

Также результат расчетов — режимную карту ведения поездом можно распечатать выбрав пункт меню «Документ», нажав в открывшемся окне «печать» (рис. 4.14).

Print Preview

Стр.1

Режимная карта
Участок КИЕВ ПАСС-ФАСТОВ_1
Общий расход электроэнергии 403кВтч

Километр+ПК	Скорость, км/ч	Режим	Ток двиг., А	Удоп, км/ч	Примечание
КИЕВ_ПАСС					
856+0	0	4	800	40	
856+2	9	8	800	40	
856+3	19	10	700	40	
856+5	28	12	650	40	
857+0	38	Выбег	0	40	
857+5	24	Выбег	0	40	
857+7	14	16	1050	40	
857+8	24	18	1050	100	
857+9	33	20	1050	100	
858+0	43	22	1050	100	
858+1	52	22	1050	100	
858+2	62	Выбег	0	100	
858+7	52	Выбег	0	100	
859+2	38	20	1050	100	
859+4	48	22	1050	100	
859+5	58	24	1050	100	
859+7	68	Выбег	0	100	
860+2	58	Выбег	0	100	

0% Page 1 of 4

Рис. 4.14. Режимная карта.

Также предоставляется для печати документ «перегонные времена хода» (рис. 4.15)

Print Preview

Стр.1

Перегонные времена хода
Поезд 005 Участок КИЕВ ПАСС-ФАСТОВ_1
Локомотив ЧС-4 Число вагонов 12
Общий расход электроэнергии 403кВтч

Перегон	Время хода, мин	Скорость, км/ч	Расход, кВтч
КИЕВ_ПАСС - КИЕВ_ВОЛЫНСКИЙ	21:01:00 10.9	39	101
КИЕВ_ВОЛЫНСКИЙ - ЖУЛЯНЫ	21:08:00 6.5	50	57
ЖУЛЯНЫ - ВОЯРКА	21:16:00 8.1	67	3
ВОЯРКА - ВАСИЛЬКОВ	21:28:00 11.6	72	41
ВАСИЛЬКОВ - МОТОВИЛОВКА	21:35:00 7.3	70	0
МОТОВИЛОВКА - СОРОЧИЙ_ВРОД	21:44:00 9.2	60	26
СОРОЧИЙ_ВРОД - ФАСТОВ_1	21:53:00 9.4	53	48
КИЕВ_ПАСС - ФАСТОВ_1	21:53:00 63.0	61	277

0% Page 1 of 1

Рис. 4.15. Перегонные времена хода.

4.1 Выводы

В разделе сформулированы новые задачи, как в области моделирования процессов ведения поездов, так и для рационального планирования и разработки соответствующих нормативных графиков в условиях ОРЭ и перехода к стоимостному критерию управления тягой грузовых поездов.

Приведена внутренняя структура автоматизированной системы расчета рациональных режимов тяги грузовых поездов. Система содержит базу данных, которая хранит все необходимые исходные данные. Представлено описание интерфейса и взаимодействие с пользователем.

Программный комплекс решает задачи расчета режимов тяги поездов рациональные по стоимости потребленной электроэнергии при переменных тарифах, а также компромиссно-оптимальные режимы тяги поездов, позволяет автоматически формировать адаптивную нечеткую модель управления тягой поездов и выдавать рекомендации относительно изменения управления поездом во время движения др.

Усовершенствованы средства автоматизации из расчетов рациональных режимов тяги грузовых поездов по стоимостным показателям потребления активной и реактивной электрической энергии в условиях переменных тарифов и ОРЭ.

Материалы раздела опубликованы в работах [28, 31, 36, 57].

ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

В диссертации получены новые решения важного для современного железнодорожного транспорта Украины задания относительно усовершенствования режимов тяги грузовых поездов с учетом стоимости потребленной активной и реактивной электроэнергии в условиях переменных тарифов и оптового рынка электроэнергии. На основе выполненных в диссертации исследований и разработок, а также полученных результатов, можно констатировать следующее.

1. Установлено существенное отличие режимов тяги грузовых поездов, оптимальных по критериями минимума потребления и стоимости электроэнергии в условиях переменных тарифов и ОРЭ, а также необходимость разработки пакетов режимных карт ведения поездов, которые могут быть использованы на электрифицированных участках в разные периоды суток.

2. Установлено, что предложенная в работе кусочно-линейная аппроксимация тарифов на электроэнергию ОРЭ из четырех интервалов, позволяет с необходимой для практики точностью рассчитать режимы тяги поездов оптимальные по стоимости потребленной электроэнергии, а также с учетом различия тарифов активной и реактивной энергии.

3. На основе анализа экспериментальных данных получено математическое описание коэффициента мощности, которое позволяет получить уточненные режимы тяги поездов, учитывающие различную стоимость реактивной и активной электроэнергии.

4. Получено дальнейшее развитие математических моделей для расчета режимов управления тягой грузовых поездов в условиях переменных тарифов на электрическую энергию, которые являются оптимальными по стоимости потребленной в разные периоды суток активной и реактивной энергии.

5. Получено развитие критериев стоимостной эффективности перевода тяговых подстанций железных дорог в условия оплаты по переменным тарифам, которые учитывают активную и реактивную составную потребления электроэнергии и их различную удельную стоимость. Критерии дают возможность определить эффективность переменных тарифов на электроэнергию для заданных графиков движения поездов, а также учитывают стохастические свойства тарифов в условиях ОРЭ.

6. На основе данных опытных поездок разработан адаптивный метод расчета рациональных режимов ведения грузовых поездов, основанный на нечеткой модели управления, который обеспечивает достаточную для практики точность управления движением поезда, используя наборы эталонных режимов тяги.

7. Установлено, что при рациональном по стоимостным показателям управлении потоком поездов в условиях переменных тарифов на электроэнергию и ОРЭ изменения режимов управления отдельными поездами несущественно влияют на время хода поездов по перегонам, при

этом обеспечивается нормативно допустимый интервал между поездами..

8. Усовершенствованы средства автоматизации расчетов рациональных режимов тяги грузовых поездов по стоимостным показателям потребления активной и реактивной электрической энергии в условиях переменных тарифов и ОРЭ. Программный комплекс решает задачи расчета режимов тяги поездов рациональные по стоимости потребленной электроэнергии при переменных тарифах, а также компромиссно-оптимальные режимы тяги поездов, позволяет автоматически формировать адаптивную нечеткую модель управления тягой поездов и выдавать рекомендации относительно изменения управления поездом во время движения др.

9. Результаты работы использованы при разработке и внедрении аппаратно-программного комплекса для расчета рациональных режимов ведения грузового поезда электровозами. Получено авторское свидетельство на компьютерную программу «Аппаратно-программный комплекс для расчета рациональных режимов ведения грузового поезда электровозами».

Результаты диссертационных исследований испытаны в научно-исследовательских работах, а также использованы в учебном процессе университета, которые подтверждены соответствующими документами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 0.Айзинбуд, К.С. Исследование оптимизации управления электроподвижным составом с учетом конечной длины поезда [Текст]// Автореф. канд. тех. наук. - Ростов-на-Дону, 1975. – 22с.
- 0.Айзинбуд, К.С. О преобразовании уравнения движения поезда для решения оптимизационных тяговых задач [Текст]// Тр. РИИЖТ, вып. 110, 1975. - С. 35-38.
- 0.Алексеев, В.М. Оптимальное управление [Текст]// В.М. Алексеев, В.М. Тихомиров, С.В. Фомин // М. ФИЗМАТЛИТ 2005г. 384с.
- 0.Архангельский А. Я. С++ Builder 6. Справочное пособие. [Текст]// Бином, 2002.
- 0.Бондар, Б. Є. Звіт з НДР розробка і дослідні випробування пристрою для організації оптимального ведення поїзда машиністом [Текст]// Б. Є. Бондар, Я. Е. Савич, В. М. Ляшук, В. А. Зубенко, Д. В. Бобырь // Дніпропетровськ, 2004 – 67 с.
- 0.Беллман, Р. Динамическое программирование [Текст]// М.:ИЛ, 1960.
- 0.Беллман, Р. Вопросы принятия решений в расплывчатых условиях [Текст] /Р. Беллман, Л. Заде // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М.: Мир, 1976.
- 0.Берман, И.С. Анализ результатов тяговых расчетов при изменяющемся напряжении на токоприемнике [Текст] /И.С. Берман, Л.А. Койфман // Вычислит. техн. на жел.-дор. транспорте. Ленинград: ЛИИЖТ, 1980. – С. 120-125.
- 0.Босов, А.А. Методы решения некоторых задач оптимальных тяговых расчетов на ЭЦВМ [Текст] // Дис. канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1968 . -145 с.
- 0.Босов, А.А. Об одной модели тяговых расчетов с учетом ограничения на уровень продольных динамических усилий [Текст] /А.А. Босов, Г.В. Евдомах // Проблемы динамики и прочности подвижного состава. - Днепропетровск, 1982. – С. 40-44.
- 0.Блохин, Е.П. Применение динамического программирования к определению режимов вождения длинносоставных поездов [Текст] /Е.П. Блохин, Г.В. Евдомах, И.Б. Малышко // Проблемы динамики и прочности подвижного состава. – Днепропетровск, 1984. – С. 12-24.
- 0.Блохин, Е.П. Ресурсосберегающие методы ведения поездов при переменных тарифах оплаты электроэнергии [Текст] /Е.П. Блохин, В.В. Корниенко, В.В. Скалозуб // Сб. “Электрoфикация и научно-технический прогресс на железнодорожном транспорте”. Россия, Санкт-Петербург, 2004. С. 112 - 118.
- 0.Блохин, Е.П. Экстраполяционные методы оптимизации в задаче обеспечения устойчивости движения электровоза ДСЗ [Текст] /Е.П. Блохин, М.Л. Коротенко, А.Г. Рейдемейстер, В.В. Скалозуб // Сб. научн. трудов Национальной горной академии Украины, №13, том 3. – Дніпропетровськ: Навчальна книга, 2002. – С. 123 – 128.

0.Блохин, Е.П. Выбор энергетически оптимальных режимов ведения поездов [Текст] /Е.П. Блохин, А.Н. Пшинько, Г.В. Евдомах, В.В. Скалозуб, В.Б. Землянов //Залізничний транспорт України, №6, 2001. – С. 19 –22.

0.Блохин, Е.П. Выбор режимов ведения поездов как стохастическая задача векторной оптимизации [Текст] /Е.П. Блохин, В.В. Скалозуб // Транспорт. Збірн. наук. праць ДІТУ. Вип. 7. Дніпропетровськ: Наука і освіта. 2001. – С. 28 – 31.

0.Блохин, Е.П. Методика расчета оптимальных по расходу электроэнергии времен хода поезда [Текст] /Е.П. Блохин, А.В. Слободян, Г.В. Евдомах // Транспорт. Сб. научн. тр. ДИИТа. Днепропетровск: Наука и образование, 1999. – С. 47 – 55.

0.Буч, Гради. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на С++, 2-е изд. [Текст]// М.: «Издательство Бином», СПб.: «Невский диалект», 2000.

0.Васильев, Ф.П. Методы решения экстремальных задач [Текст]// М.: Наука, 1988.

0.Габасов, Р. Методы оптимизации [Текст] /Р. Габасов, Ф.М. Кириллова// Минск: Изд-во БГУ, 1981. – 347 с.

0.Гетьман, Г.К. Научные основы определения рационального мощностного ряда грузовых электровозов для железных дорог Украины [Текст] // Дисс. докт. техн. наук. Днепропетровск, 2001. – 416 с.

0.Гребенюк, П.Т. и др. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст] // М.: Транспорт, 1985. – 287 с.

0.Заде, Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений [Текст] // М.: Мир, 1976.

0.Землянов, В.Б. Интегрированная система управления электроснабжением железнодорожного транспорта [Текст] /В.Б. Землянов, А.Н. Пшинько, В.Т. Доманский, В.В. Скалозуб // 7th International Scientific Conference of Railway Experts. Proceedings. ЮЖЕЛ – 2000. Yugoslavia, Vrnjacka Banja, october 4 – 6, 2000. - Р. 65 – 68.

0.Землянов, В.Б. Интегрированная информационная технология перевода тяговых подстанций на многотарифную оплату за потребленную электроэнергию [Текст] /В.Б. Землянов, В.В. Скалозуб, В.В. Доманский // Залізничн. транспорт, №3, 2000.- С. 41 – 43.

0.Згуровский, М.З. Интегрированные системы оптимального управления и проектирования [Текст] // К. «Вища школа» 1990.

0.Зейферт, Г. Вариационное исчисление в целом 2-е изд. [Текст] /Г. Зейферт, В. Трельфалль // М.: РХД, 2000

0.Евдомах, Г.В. Автоматизация тяговых расчетов, учитывающих динамическую нагруженность поезда [Текст] // Дисс. канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1987. С. 150– 154.

0.Евдомах, Г.В. Режимы ведения пассажирских поездов с учетом случайного напряжения в тяговой сети и дифференцированных тарифов оплаты электроэнергии [Текст] /Г.В. Евдомах, В.В. Скалозуб, К.Г. Железнов, А.П. Иванов // Вісник Дніпропетровського національного уні

верситету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Вип. 3, 2004. С. 65 – 73.

О.Евдомах, Г.В. Оптимизация режимов тяги поездов при переменных тарифах на электроэнергию [Текст] /Г.В. Евдомах, В.В. Скалозуб, А.П. Иванов // XI Міжнародна конференція «Проблеми механіки залізничного транспорту», ДПТ 2004.

О.Ерофеев, Е. В. Определение оптимальных режимов движения поезда при заданном времени хода [Текст] // Вестник ВНИИЖТа, 1969, №1. – С. 54 – 57.

О.Иванов, А.П. Автоматизация формирования нечеткой модели управления движением поезда по опытным данным [Текст] / А.П. Иванов // Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні технології на транспорті, в промисловості та освіти», ДНУЗТ 2011 р.

О.Иванов, А.П. Анализ оптимальных по стоимости режимов тяги грузовых поездов в условиях переменных тарифов на электроэнергию [Текст]// 65 Міжнародна науково-практична конференція „Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту” ДПТ, 2005.

О.Иванов, А.П. Исследование режимов ведения поездов с учетом стоимостей активной и реактивной электроэнергии [Текст]// Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Вип. 21, 2008. С. 239 – 242.

О.Иванов, А.П. Математическое моделирование и оптимизация процесса ведения грузовых поездов с учетом продольных сил и порожних вагонов [Текст] // Проблеми математичного моделювання. Міждержавна науково-методична конференція. Тези доповідей. м. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2005.

О.Иванов, А.П. Моделирование оптимальных режимов движения поездов по данным опытных поездок [Текст]// Проблеми математичного моделювання. Міждержавна науково-методична конференція. Тези доповідей. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007.

О.Иванов, А.П. Развитие и автоматизация методов расчета оптимальных по стоимости потребленной электроэнергии режимов управления тягой грузовых поездов [Текст] / А.П. Иванов // Збірник наукових праць. Донецький інститут залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. Випуск 31. - Донецьк 2012. С. 41 – 46. ISSN 1993-5579.

О.Иванов, А.П. Режимы тяги поездов на основе нечеткой модели управления движением [Текст]// «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту України» м. Дніпропетровськ, ДПТ 2006.

О.Иванов, А.П. Стоимостная оптимизация режимов ведения поездов с учетом рекуперации и переменных тарифов на электроэнергию [Текст]// V міжнародна конференція «Проблеми економіки транспорту» м. Дніпропетровськ 2006.

О.Иванов, А.П. Усовершенствование методов нечеткого управления тягой поездов с учетом оптового рынка электроэнергии [Текст]// Международная

научно-практическая конференция „Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании”, Днепропетровск 2008

0.Інструкція по технічному нормуванню витрат електричної енергії і палива локомотивами на тягу поїздів. ЦТ-0059 [Текст]// Київ 2003. – 86 с.

0.Кренке Д. Теория и практика построения баз данных// Питер, 2003, - 800 с.

0.Корн, Г. Справочник по Математике для Научных Работников [Текст] /Г. Корн, Т. Корн // М.: Наука, 1974. – 831 с.

0.Корнієнко, В.В. Першочергові завдання залізниць України як суб'єкта оптового ринку електроенергії [Текст] /В.В. Корнієнко, В.Я. Карпенко, В.Т. Доманський, В.В. Скалозуб // Залізничний транспорт України., 6, 2003. с. 18 – 25.

0.Костромин, А.М. Об оптимальном управлении тепловозом при вождении поездов [Текст]//Сб. научн. тр. “Труды Белорусского ин – та инж . жел. дор. транспорта”, вып. 116, 1972. - С. 21 – 34.

0.Кузнецов, В.Г. Стоимостная оптимизация режимов ведения грузовых поездов с учетом затрат активной и реактивной электроэнергии [Текст] /В. Г Кузнецов, А.П. Иванов // VI міжнародна конференція «Проблеми економіки транспорту» м. Дніпропетровськ 2007 с.176.

0.Макаров, Г.Г. Тяговые расчеты с учетом длины поезда и распределения его массы [Текст]// Вопросы проектирования железнодорожных станций и узлов. – М., 1982. – С. 31 – 41.

0.Малышко, И.Б. Разработка технологии ведения поездов с учетом продольных сил и действительного напряжения на токоприемнике [Текст] // Дисс. канд. техн. наук. Днепропетровск, 1987. – 182 с.

0.Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] // М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

0.Марквардт, К.Г. Метод производства тяговых расчетов на ЭЦВМ с учетом изменения напряжения на токоприемнике [Текст] /К.Г. Марквардт, Г.И. Гатальский // Труды ВЗИИТ.- вып.74, 1975. – С. 59-63.

0.Математические методы исследования операций [Текст] / Ю.М. Ермольев, И.И. Ляшко, В.С. Михалевич, В.И. Тюптя // К.: Вища школа, 1979. – 312 с.

0.Математическая теория оптимальных процессов. - 3-е изд. [Текст]/ Л.С. Понтрягин и др.// М.: Наука, 1976. – 392 с.

0.Мирошниченко, Р.И. Режимы работы электрифицированных участков [Текст] //М.: Транспорт, 1982. –207 с.

0.Мирошниченко, Р.И. Влияние напряжения на токоприемнике электровоза и массы поезда на энергетические показатели работы ЭПС [Текст] /Р.И. Мирошниченко, М.С. Гочуа, И.С. Берман // Труды ВЗИИТ, вып. 635, 1980. – С. 102-115.

0.Моделі і методи соціально-економічного прогнозування: Підручник [Текст]/ Геєць В.М., Клебанова Т.С., Черняк О.І., Іванов В.В., Дубровіна Н.А., Ставицький А.В.—Х.: ВД «Інжек», 2005. – 396 с.

0.Моисеев, Н.Н. Математические задачи системного анализа [Текст]// М. Наука, 1981. – 488 с.

0.Моисеев, Н.Н. Элементы теории оптимальных систем [Текст] //М.: Наука, 1975. – 526 с.

0.Мямлін, С.В. Моделювання режимів ведення пасажирських і вантажних поїздів, оптимальних по вартості електроенергії [Текст] /С.В. Мямлін, К.І. Железнов, В.В. Скалозуб, А.П. Иванов, В.В. Жишко // Тези доп. І науково-практичної конф. “Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, техно-логія, економіка і управління”. – Ч1. – Київ КУЕТТ, 2004, С. 185 – 187.

0.Новиков, А.И. Рациональные режимы работы тепловозов: Автореф. дисс. д-ра техн. Наук [Текст] //М., 1969. – 26 с.

0.Оптимизация режимов ведения поездов по критерию минимума стоимости потребленной и реактивной электроэнергии [Текст] / В.В. Скалозуб, В.Г. Кузнецов, Д.А. Босый, А.П. Иванов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 4 (78), 2008. С. 111 – 115.

0.Палей, Д.А. Алгоритм тягового расчета при заданном времени хода по участку постоянного тока с учетом изменяющегося напряжения на токоприемнике электровоза в режимах тяги и рекуперации [Текст] // Труды ВЗИИТ, вып. 52,-1964. – С. 28-40.

0.Палей, Д.А. расчет системы электроснабжения на ЭВМ методом статистических испытаний [Текст] // Автореф. дис. канд. техн. наук. - Москва, 1966.- 27с.

0.Петров, Ю.П. Вариационные методы теории оптимального управления [Текст] //Ленинград: Энергия, 1977. – 280 с.

0.Петров, Ю.П. Оптимальное управление движением транспортных средств [Текст] // Ленинград: Энергия, 1969. – 96 с.

0.Першиц, Ю.И. Преобразования профиля для тяговых расчетов с учетом длины поезда и распределения масс [Текст] /Ю.И. Першиц, В.В. Космин // М.: ВЗИИТ, 1984.– 96 с.

0.Подвижной состав и тяга поездов [Текст] // Под ред. В. В. Деева, Н. А. Фурьянского. М.: Транспорт, 1979. – 368 с.

0.Почаевец, Э.С. Исследование оптимального тягового режима электроподвижного состава [Текст]//Сб. научн. тр. МИИТа, вып. 282. 1968. - С. 52 – 64.

0.Почаевец, Э.С. Регрессионный анализ и оптимизация расхода электроэнергии поездов метрополитена [Текст] // Тр. ВЗИИТ, выл. 115, 1981. – С. 104 – 111.

0.Почаевец, Э.С. Вероятностные характеристики реального потока поездов [Текст] /Э.С. Почаевец, Ю.Б. Манусов // Деп. ЦНИИ ТЭИ, РЖ жел . дор. транс. №11, 1971. – 30 с.

0.Почаевец, Э.С. Анализ режимов системы электроснабжения методами теории случайных событий [Текст] /Э.С. Почаевец, Я.Е. Савич // Тр. РИИЖТ, 1981. – С. 67 – 71.

0.Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст] //М.: Транспорт , 1985. – 287 с.

0.Про затвердження Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії. Наказ N 19 від 17.01.2002, Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 1 лютого 2002 р за N 93/6381. Міністерство Палива Та Енергетики України [Текст].

0.Програма енергозбереження на 1996-2010 роки [Текст]. /Міністерство транспорту України, Державна Адміністрація Залізничного транспорту України. – Київ, 1996, - 20 с.

0.Пузанов, Н.Я. Расчет систем электроснабжения на ЭЦВМ с учетом влияния уровня напряжений в тяговой сети на работу ЭПС [Текст] // Тр. ВНИИЖТ, вып. 338, 1967. - С. 38 – 59.

0.Пузанов, Н.Я. Расчеты на ЭЦВМ кривых движения [Текст]// Вестник ВНИИЖТ, №4, 1966. - С. 60 – 64.

0.Пшинько, А.Н. Энергооптимальные технологии на железнодорожном транспорте [Текст] /А.Н. Пшинько, С.В. Мямлин, В.В. Скалозуб, А.П. Иванов // Тр. Международн. научно-техн. конф. – Одесса, 2004. С. 203 – 206.

0.Рекомендации по обеспечению энергооптимального процесса перевозок на основе информационных технологий управления системами электрической тяги [Текст] //Р - 618, , принята V – комиссией Организации Сотрудничества Железных Дорог, Чешская Республика, г. Сенгограби, 2003 . – 28 с.

0.Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст] /Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский // М. Горячая линия – Телеком, 2004 г.

0.Савич, Я.Е. Оптимизация напряжений на шинах тяговых подстанций постоянного тока [Текст] //Дисс. канд. техн. наук. Москва – Днепропетровск, 1985.– 166с.

0.Свешников, А.А. Прикладные Методы теории случайных функций [Текст]// М.: Наука, 1968. – 463 с.

0.Сидельников, В.М. Автоматизация выбора оптимального режима ведения поезда при электрической тяге на ЭЦВМ [Текст]// Дис. канд. техн. наук. – Москва, 1966. - 132 с.

0.Скалозуб, В.В. Ресурсозберігаючі методи управління тягою поїздів і удосконалення конструкцій рухомого складу [Текст]// Дисс. докт. техн. наук. Днепропетровск, 2003.

0.Скалозуб, В. В. Комплексные задачи выбора режимов ведения поезда по показателю стоимости электроэнергии [Текст] // Транспорт. Зб. наук. праць, вип. 12. – Дніпропетровськ, 2002. – С. 148 – 157.

0.Скалозуб, В.В. Модели и методы расчета компромиссно-оптимальных режимов движения поезда [Текст] //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Вип. 3(20). – Дніпропетровськ, 2002. – С. 137 – 146.

0.Скалозуб, В.В. Выбор режимов управления движением поезда на основе нечеткой продукционной модели [Текст] / В.В. Скалозуб, А.П. Иванов, // Вестник Белорусского государственного университета транспорта, Беларусь, Наука и транспорт, 1-2, - 2007 – С. 41 – 46.

0.Скалозуб, В.В. Оптимальное управление режимами движения грузовых поездов в условиях оптового рынка электроэнергии [Текст] /В.В. Скалозуб, А.П. Иванов // Проблеми математичного моделювання. Міждержавна науково-методична конференція. Тези доповідей. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2004

0.Скалозуб, В.В. Модели управления движением поездов на основе данных опытных поездок [Текст] / В.В. Скалозуб, А.П. Иванов // Локомотив информ, май 2007, г.Харьков, «Тезностандарт». с.33-35.

0.Скалозуб, В.В. Моделирование оптимальных режимов движения поездов по данным опытных поездок [Текст] /В.В. Скалозуб, А.П. Иванов // Проблеми математичного моделювання. Міждержавна науково-методична конференція. Тези доповідей. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007.

0.Скалозуб, В.В. Моделирование процессов ведения поездов по критерию минимума стоимости электрической энергии [Текст] /В.В. Скалозуб, А.П. Иванов // Проблеми математичного моделювання. Тез. доп. Міжнародної науково-методичної конф. Дніпродзержинськ, 2003. с.141.

0.Скалозуб, В.В. Управление движением поезда на основе нечеткого описания состояний системы [Текст] /В.В. Скалозуб, А.П. Иванов // м. Дніпропетровськ «Системні технології» № 3(50), 2007.

0.Скалозуб, В.В. Выбор режимов управления движением поезда на основе нечеткой продукционной модели [Текст] /В.В. Скалозуб, А.П. Иванов // Вестник Белорусского государственного университета транспорта, Беларусь, Наука и транспорт 1-2, 2007.

0.Скалозуб, В.В. Разработка энергооптимальных и ресурсоэкономных режимных карт ведения поездов [Текст] /В.В. Скалозуб, А.П. Иванов, К.И. Железнов, В.В. Жижко // Міжнародна науково-технічна конференція „Енергоефективність’2004” м.Одеса.

0.Скалозуб, В.В. Оптимизация режимов ведения поездов на основе непрерывного динамического программирования [Текст] /В.В. Скалозуб, К.И. Железнов // Математичне моделювання. Дніпродзержинськ: ДДТУ, N2, 2002, – С. 32 – 36.

0.Тяговый расчет при изменяющемся напряжении на токоприемниках электровазов для однопутных и многопутных участков переменного тока [Текст] // Отчет о НИР / ВНИИЖТ; N Б 911210, 1981. - 92 с.

0.Улановский, М.Б. Влияние систем электроснабжения и ЭПС [Текст]// Тр. ЦНИИ МПС, вып. 412, 1970. – С. 40 – 61.

0.Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления, т.1. [Текст] // М., ФМЛ, 1962.- 608 с.

0.Флемінг, У. Оптимальное управление детерминированными и стохастическими системами [Текст] /У. Флемінг, Р. Ришел // М.: Мир, 1978

0.Цукало, П. В. Экономия электроэнергии на электроподвижном составе [Текст] //М.: Транспорт, 1983. – 174 с.

0.Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука [Текст] //М.: Мир, 1978. – 418 с.

0.Экспертно-имитационное моделирование в информационных системах управления сложными технологическими и инженерными объектами [Текст] / В.А. Андриященко, В.Б. Землянов, В.А. Михайлова, В.В. Скалозуб //Комп'ютерне моделювання. Дніпродзержинськ, N3, 1998, - С. 43 – 47.

0.Электроподвижной состав [Текст] //. Под ред. А. Т. Головатого, П. И. Борцова. – М.: Транспорт, 1983. – 350 с.

0.Электровоз ВЛ8. Руководство по эксплуатации [Текст] // М.: Транспорт, 1971.

0.Mamdani, E.H. Advances in the Linguistic Synthesis of Fuzzy Controller [Текст] // Int. J. Man-Machine Studies. -1976.-Vol. 8.-P.669-678.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

СВЕДЕНИЯ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ

УЗГОДЖЕНО:

Керівник СНЦ ТАУ
Пішнітько О. М.
2007 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Головний інженер – перший заступник
начальника ДП Придніпровська залізниця

Душейко В. В.
2007 р.



ПРОТОКОЛ

здавання НДР № ПР/НТО-06576/НЮ,
державний реєстраційний номер 0106U006498

Східним науковим центром Транспортної академії України представлена для здавання НДР № ПР/НТО-06576/НЮ «Обладнання електровоза серії ВЛ8 пристроєм для навчання машиністів раціональним режимам ведення поїздів», яка виконувалась в період з 24.04.2006 р. по 01.12.2007 р. для локомотивного депо Н.Д.-Вузол ДП Придніпровська залізниця

До складу документів входить:

1. Звіт про виконану роботу на 113 сторінках.
2. Акт впровадження результатів роботи на одній сторінці.
3. Пропозиції щодо доцільності продовження наукових досліджень по даній тематиці на одній сторінці.

Комісія в складі начальника служби локомотивного господарства ДП Придніпровська залізниця Паляна С. Р., головного інженера локомотивного депо Н.Д.-Вузол Хітрий О. В., керівника теми, заступника керівника СНЦ ТАУ професора Боднаря Б. Є., виконавців НДР Ляшук В. М., Бобирь Д. В., Іванова О. П., Коренюка Р. О. прийняла рішення про наступне:

1. Робота виконувалась по етапам, відповідно до календарного плану, про що свідчать акти здавання-приймання, які знаходяться в службі локомотивного господарства Придніпровської залізниці.
2. Розроблено програмне забезпечення для реалізації функцій швидкостеміра, АЛСН та для введення інформації з кишенькового комп'ютера і автоматичної обробки параметрів траєкторії дослідної поїздки.
3. Обладнано розробленим пристроєм електровоз серії ВЛ8 №1585.
4. Проведені дослідні випробування пристрою, підтверджують ефективність його застосування для навчання машиністів раціональним з точки зору економії електроенергії режимам ведення поїзда.
5. В процесі проведення досліджень встановлено, що застосування рекомендацій розробленого пристрою дозволяє зменшити питому витрату електроенергії на тягу у середньому на 5–8%.
6. Виконана робота повністю відповідає вимогам технічного завдання на цю роботу і вважається завершеною науково-дослідною роботою.

Голова комісії

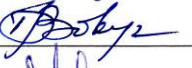


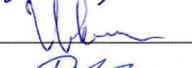
С. Р. Палян

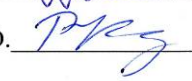
Члени комісії:

Боднар Б. Є. 

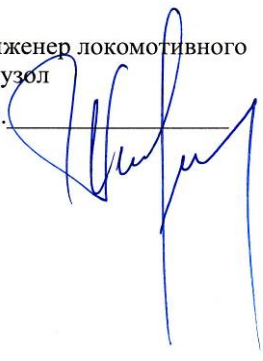
Ляшук В. М. 

Бобирь Д. В. 

Іванов О. П. 

Коренюк Р. О. 

Головний інженер локомотивного
депо Н.Д.-Вузол

Хітрий О. В. 

УЗГОДЖЕНО:

Керівник СНЦ ТАУ
О. М. ПІШНЬКО« 30 » _____ 2007 р.


ЗАТВЕРДЖУЮ:

Головний інженер – перший заступник
начальника ДП Придніпровська залізниця
В. В. ДУШЕЙКО« ____ » _____ 2007 р.
**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВО-ДОСЛІДНОЇ РОБОТИ***«Обладнання електровоза серії ВЛ8 пристроєм для навчання машиністів
раціональним режимам ведення поїздів»
державний реєстраційний номер 0106U006498*

Ми, що підписалися, представник **Виконавця** – керівник СНЦ ТАУ **ПІШНЬКО ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ** з однієї сторони та представник **Замовника** – головний інженер – перший заступник начальника ДП Придніпровська залізниця **ДУШЕЙКО ВОЛОДИМИР ВАСИЛЬОВИЧ** з другої сторони, склали цей акт про те, що згідно договору №ПР/НТО – 06576/НЮ від 26.04.2006 р. **Виконавцем** на 01.12.2007 р., виконано 100% робіт за договором та досягнути наступні результати.

Обладнано електровоз серії ВЛ8 №1585 пристроєм для навчання машиністів раціональним режимам ведення та проведені дослідні випробування у локомотивному депо Н.Д.-Вузол. Пристрій виконаний на сучасній мікропроцесорній базі, перевагами якого, спільно з наочністю представлення дослідних даних, є можливість подальшої обробки на ПЕОМ та аналізу всієї інформації, яка одержується під час випробувань, що було неможливе при існуючих раніше методах вимірювань унаслідок великої їх трудомісткості, складності розрахунків і обробки експериментальних даних.

Результати дослідних поїздок з локомотивом, обладнаним розробленим пристроєм, підтверджують ефективність його застосування з метою навчання машиністів раціональним з точки зору економії електроенергії режимам ведення.

Робота є одним із етапів розробки та впровадження заходів щодо економії енергоресурсів на тягу поїздів. Впроваджуючи результати досліджень в цьому напрямку, можливо скоротити питомі витрати електроенергії на тягу поїздів у середньому на 5–8% за рахунок вибору раціональних режимів ведення поїзда.

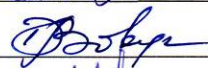
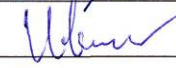
Заступник керівника СНЦ ТАУ,
керівник темид.т.н., професор Боднар Б. Є. 

« 30 » 12 2007 р.

Начальник служби локомотивного
господарства ДП Придніпровська залізницяПалян С. Р. 

« ____ » _____ 2007 р.

Відповідальні виконавці теми

Ляшук В. М. Бобирь Д. В. Іванов О. П. Коренюк Р. О. Головний інженер локомотивного депо
Н.Д.-ВузолХітрий О. В. 

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ВЫБОРА
ОПТИМАЛЬНЫХ ПО СТОИМОСТИ РЕЖИМОВ ТЯГИ
ПОЕЗДОВ

Б.1 Структура базы данных АРМ расчет режимных карт.

Рис. Б.1 Схема базы данных

Б.2 Объектно-ориентированная модель разработанной системы

Представление

Логический уровень

Работа с данными

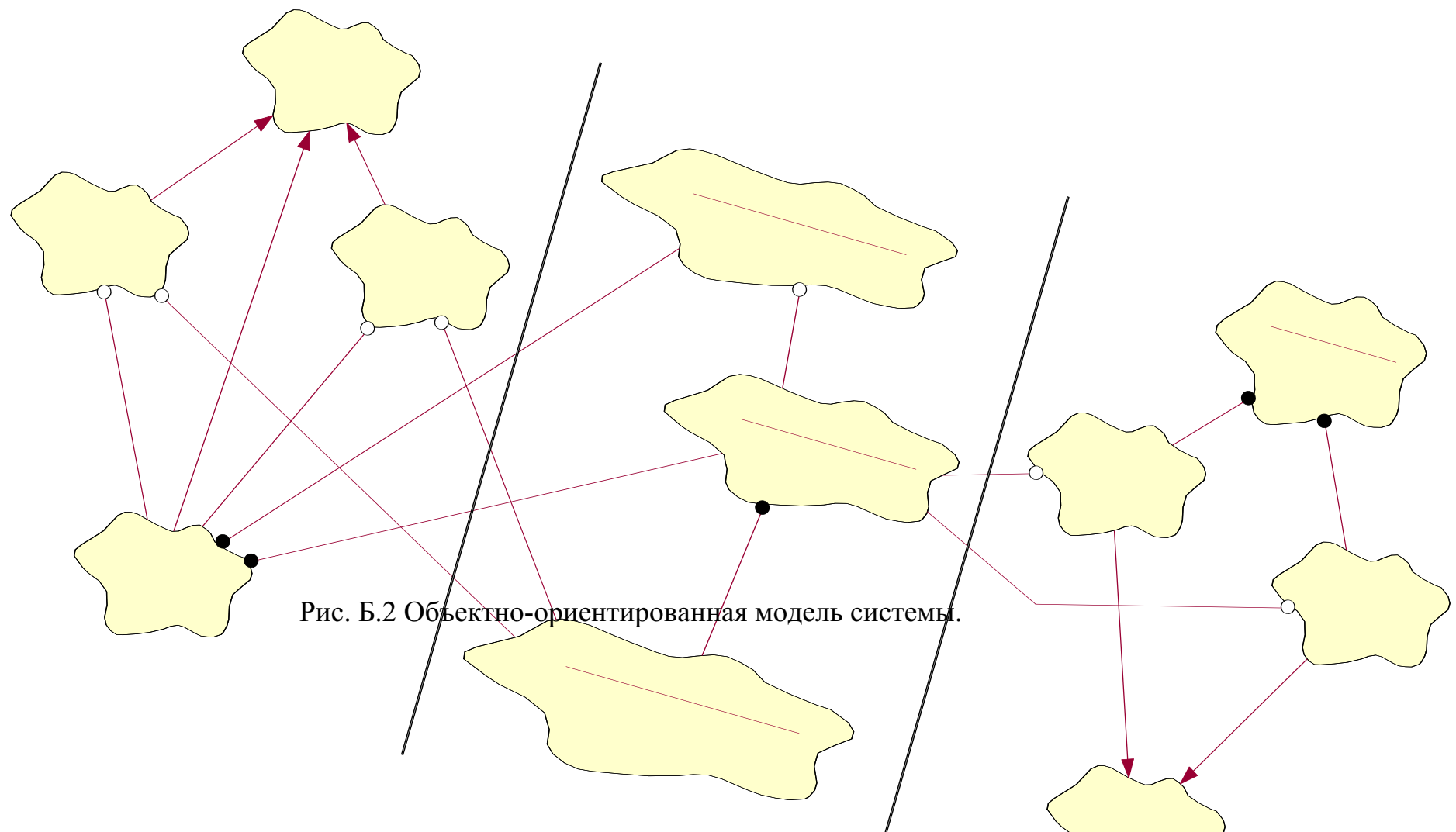


Рис. Б.2 Объектно-ориентированная модель системы.

Б.3 Описание таблиц базы данных АРМ расчет режимных карт.

Таблица Б.1

Таблица Поезда

Название поля	Содержимое поля	Тип поля	Связь
Номер	номером поезда	NUMBER	
Плечо	наименование плеча	ALPHA(20)	Плечи_обслуж
Направление	направление	NUMBER	

Таблица Б.2

Таблица Расписание_поездов

Название поля	Содержимое поля	Тип поля	Связь
Номер	номером поезда	NUMBER	Поезда
Станция	название станции проходящей поездом	ALPHA(20)	
Время_прибытия	ограничение на время	TIME	
Время_отправления	ограничение на время	TIME	

Таблица Б.3

Таблица Плечи_обслуж

Название поля	Содержимое поля	Тип поля	Связь
Плечо	название плеча обслуживания	ALPHA(30)	Плечи_обслуж
Ветка	наличие ветки	NUMBER	

Таблица Б.4

Таблица Коорд_станций

Название поля	Содержимое поля	Тип поля	Связь
Плечо	название плеча обслуживания	ALPHA(30)	Плечи_обслуж
Название	Название станции	ALPHA(20)	
Вх_стрелка	номера соответствующих стрелок	NUMBER	
Ось	Ось	NUMBER	
Вых_стрелка	номера соответствующих стрелок	NUMBER	
Скор_по_станц	максимально допустимая скорость по станции	NUMBER	
Скор_по_перегону	допустимая скорость по перегону	NUMBER	

Таблица Б.5

Таблица Нейтрал_вставки

Название поля	Содержимое поля	Тип поля	Связь
Плечо	название плеча обслуживания	ALPHA(30)	Плечи_обслуж
Км_нач	на каком километре начинается	NUMBER	
Пикет_нач	на каком пикете начинается вставка	NUMBER	
Км_кон	на каком километре заканчивается	NUMBER	
Пикет_кон	на каком пикете заканчивается вставка	NUMBER	

Таблица Б.6

Таблица Времен_огранич

Название поля	Содержимое поля	Тип поля	Связь
Плечо	название плеча обслуживания	ALPHA(30)	Плечи _ обслуж
Скорость	скорость должна быть на данных километрах	NUMBER	
Км_нач	на каком километре начинается	NUMBER	
Пикет_нач	на каком пикете начинается вставка	NUMBER	
Км_кон	на каком километре заканчивается	NUMBER	
Пикет_кон	на каком пикете заканчивается вставка	NUMBER	

Таблица Б.7

Таблица Профиль

Название поля	Содержимое поля	Тип поля	Связь
Плечо	название плеча обслуживания	ALPHA(30)	Плечи _ обслуж
Длина	длина наклонного участка	NUMBER	
Уклон	на сколько градусов он наклонен	NUMBER	

Таблица Б.8

Таблица Кривые

Название поля	Содержимое поля	Тип поля	Связь
Плечо	название плеча обслуживания	ALPHA(30)	Плечи _ обслуж
Прямая	длина прямого участка	NUMBER	
Кривая	длина непрямого участка	NUMBER	
Радиус	С каким радиусом поворот	NUMBER	

Таблица Поезда- в данной таблице содержится список всех поездов, которые существуют на дороге. Данная таблица содержит следующие поля:

Номер - уникальный код поезда. Данное поле является ключевым полем числовой тип.

Плечо - наименование плеча. Поле позволяет хранить текстовые строки размером не превышающим 50 символов.

Направление - Числовое поле длинной.

Таблица Расписание поездов содержит список станций проезжаемых каждым поездом. Таблица имеет следующую структуру полей:

Номер – данное поле является номером поезда по нем осуществляется связь с таблицей Поезда, имеет числовой тип.

Станция – название станции проходящей поездом. Текстовое поле длиной 30 символов.

Время прибытия – ограничение на время

Время отправления – ограничение на время.

Таблица Плечи обслуж - содержит полный список плечей обслуживания по дороге. С этой таблицей связаны другие в которых хранится информация о характеристиках участков пути и другая немаловажная информация используемая для расчета. Таблица имеет следующую структуру полей:

Код- ключевое поле счетчик, которое имеет числовой тип.

Плечо – название плеча обслуживания. Текстовое поле длиной 20 символов.

Ветка – наличие ветки. Булевское значение.

Таблица Координаты станций- хранит расположение станций на данном плече:

Плечо –ссылка на таблицу Плечи обслуж.

Название – наименование станции. Текстовое поле.

Вх_стрелка, Вых_стрелка – номера соответствующих стрелок.

Скор_по_станц – максимально допустимая скорость по станции. Вещественное число.

Скор_по_перегону – допустимая скорость по перегону. Вещественное число.

Таблица Нейтральные вставки - в таблице содержатся данные о нейтральных вставках, которые находятся на участке. Данная таблица содержит в себе следующие поля:

Плечо –ссылка на таблицу Плечи обслуж.

Км_нач – на каком километре начинается. Целое число.

Пикет_нач – на каком пикете начинается вставка. Целое число.

Км_кон- на каком километре заканчивается. Целое число.

Пикет_кон – на каком пикете заканчивается вставка. Целое число.

Таблица Временные ограничения - в таблице содержатся данные об ограничениях по скорости на участках плеча. Данная таблица содержит в себе следующие поля:

Плечо –ссылка на таблицу Плечи обслуж.

Скорость – какая скорость должна быть на данных километрах.

Км_нач – на каком километре начинается ограничение. Целое число.

Пикет_нач – на каком пикете начинается. Целое число.

Км_кон- на каком километре заканчивается. Целое число.

Пикет_кон – на каком пикете заканчивается ограничение. Целое число.

Таблица Проба тормозов - в таблице содержатся данные об участках, где необходимо проводить пробу тормозов. Данная таблица содержит в себе следующие поля:

Плечо –ссылка на таблицу Плечи обслуж.

Тип – тип торможения. Стоковое поле длиной 5 символов.

Скор_начала – скорость на которой начинается торможение. Целое число

Скор_конца – скорость на которой заканчивается торможение. Целое число

Путь – какой тормозной путь надо пройти.

Километр – на каком километре начинается ограничение. Целое число.

Пикет- на каком пикете начинается. Целое число.

Таблица Профиль - в таблице содержатся данные об участках, где есть неровность пути. Данная таблица содержит в себе следующие поля:

Плечо –ссылка на таблицу Плечи обслуж.

Длина – длина наклонного участка. Целое число.

Уклон – на сколько градусов он наклонен. Целое число.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОЙ ПОЕЗДОВ ПО ДАННЫМ ОПЫТНЫХ ПОЕЗДОВ

Для исследования базы данных опытных поездов производилось в среде математического моделирования MatLab. На рисунках далее изображена настройка моделей и примеры полученных управлений для различных параметров модели нечеткого управления тягой поездов.

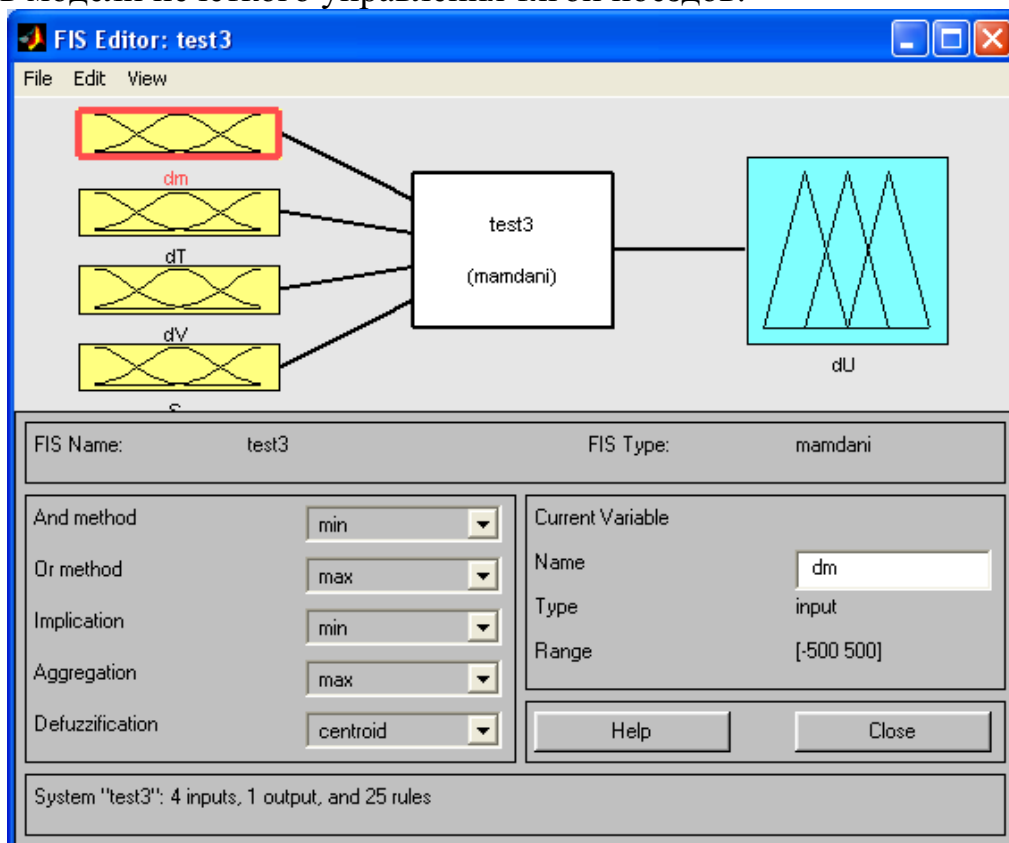


Рис. В.1 Общий вид модели нечеткого управления тягой поезда

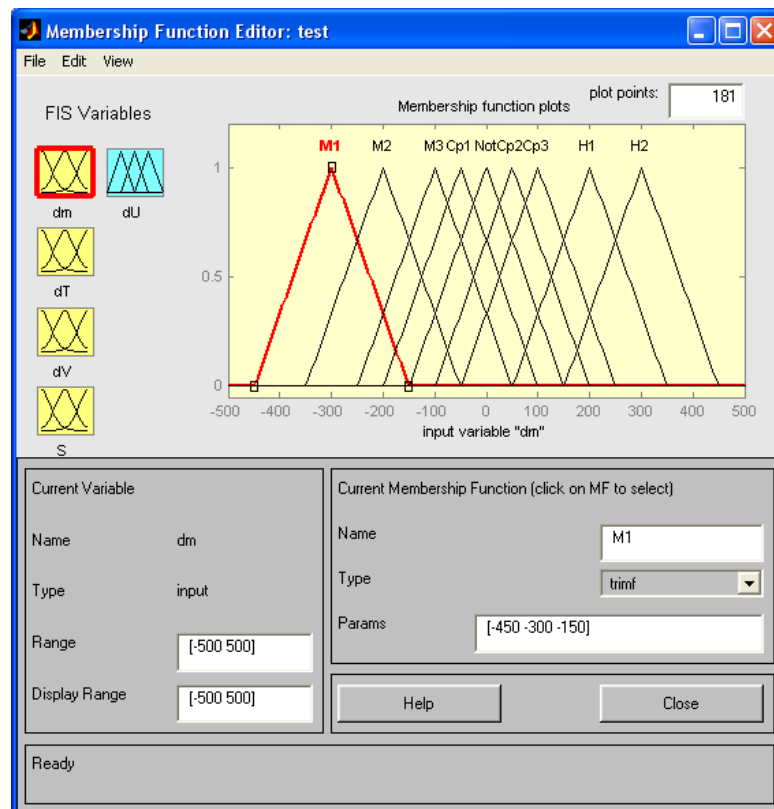


Рис. В.2 Представление нечеткой величины с помощью термов

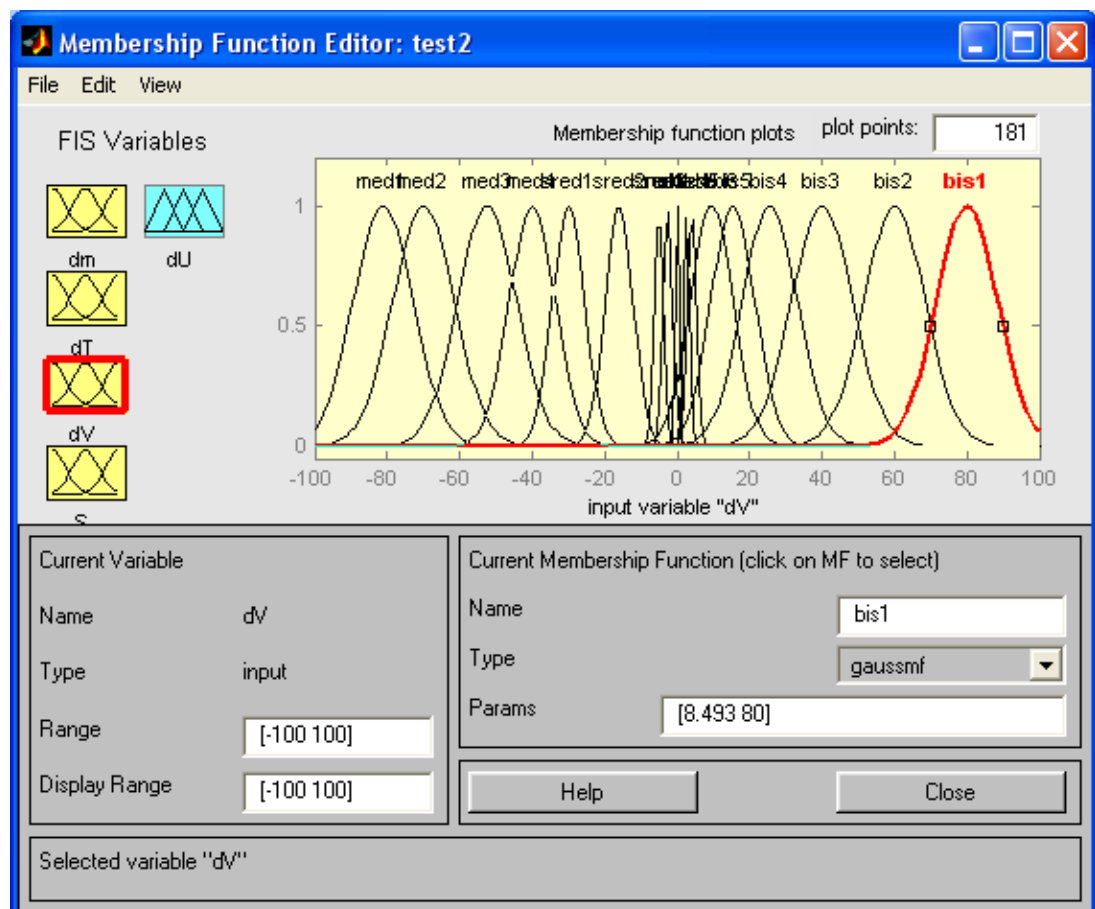


Рис. В.3 Графики функций принадлежности

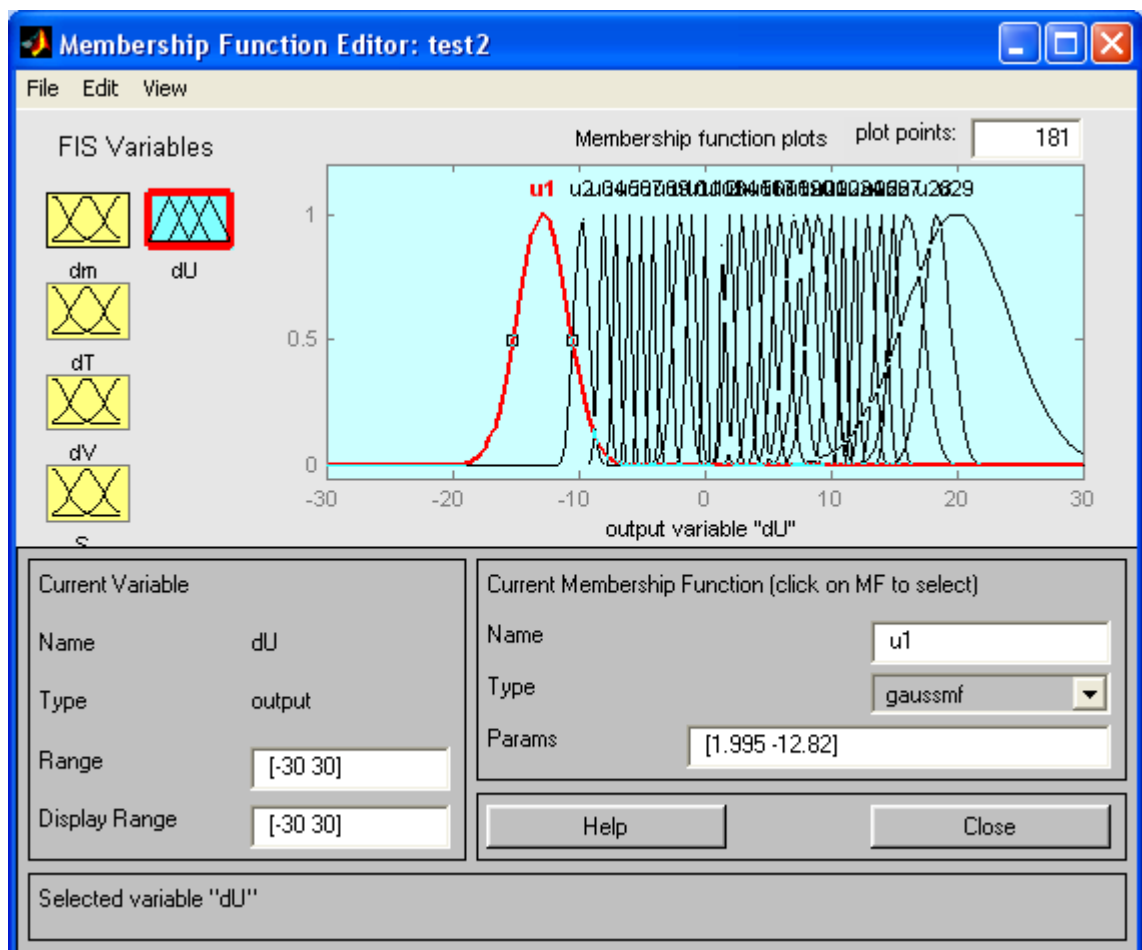


Рис. В.4 Графики функций принадлежности

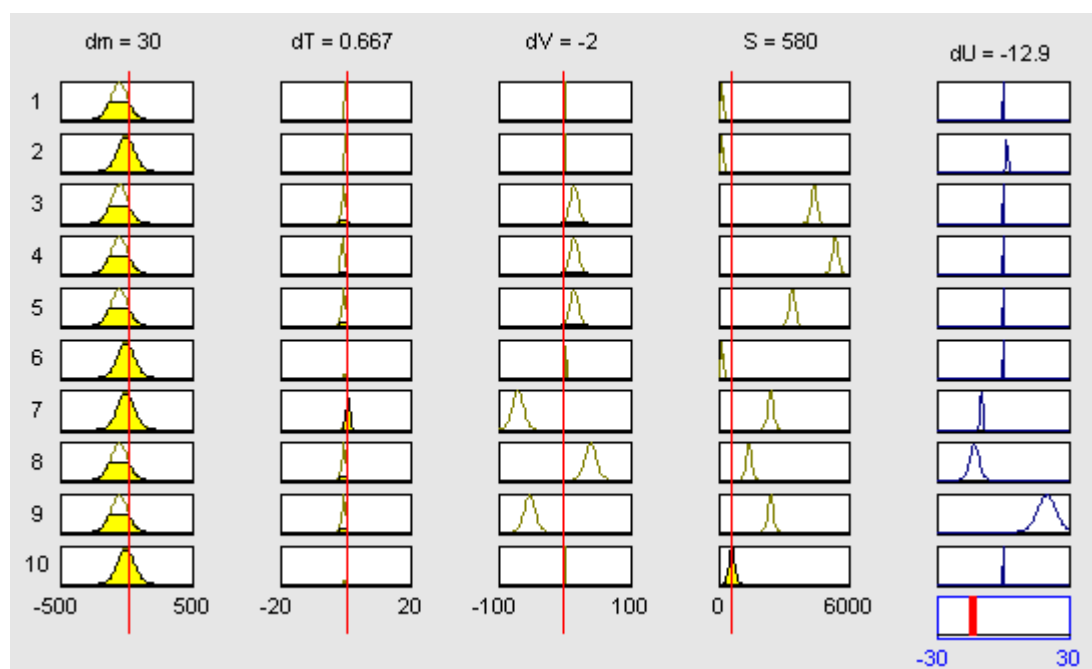


Рис. В.5 Пример работы механизма нечеткого вывода

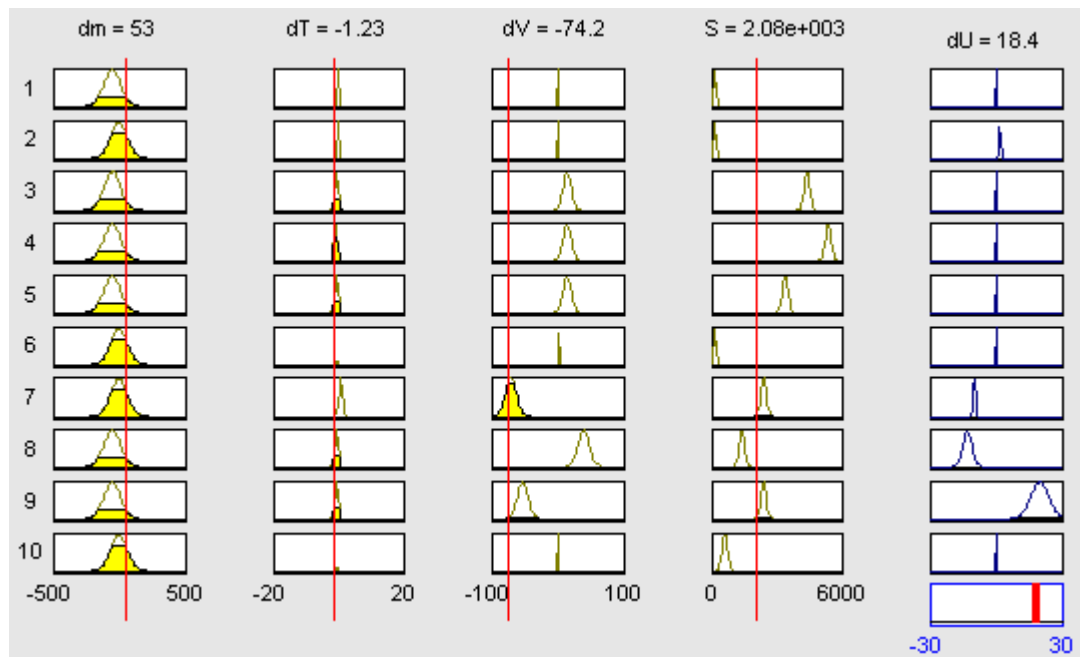


Рис. В.6 Пример работы механизма нечеткого вывода

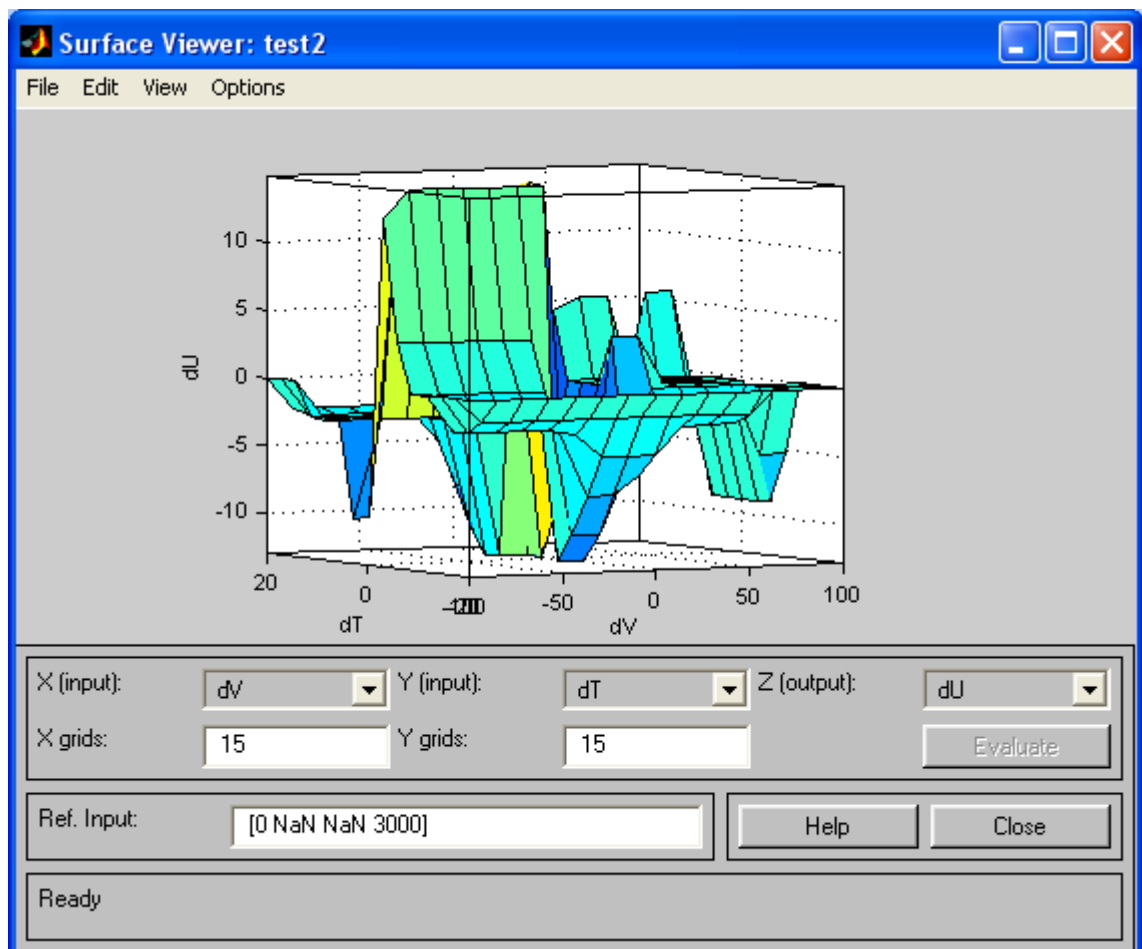


Рис. В.7 Изображение зависимости входных величин

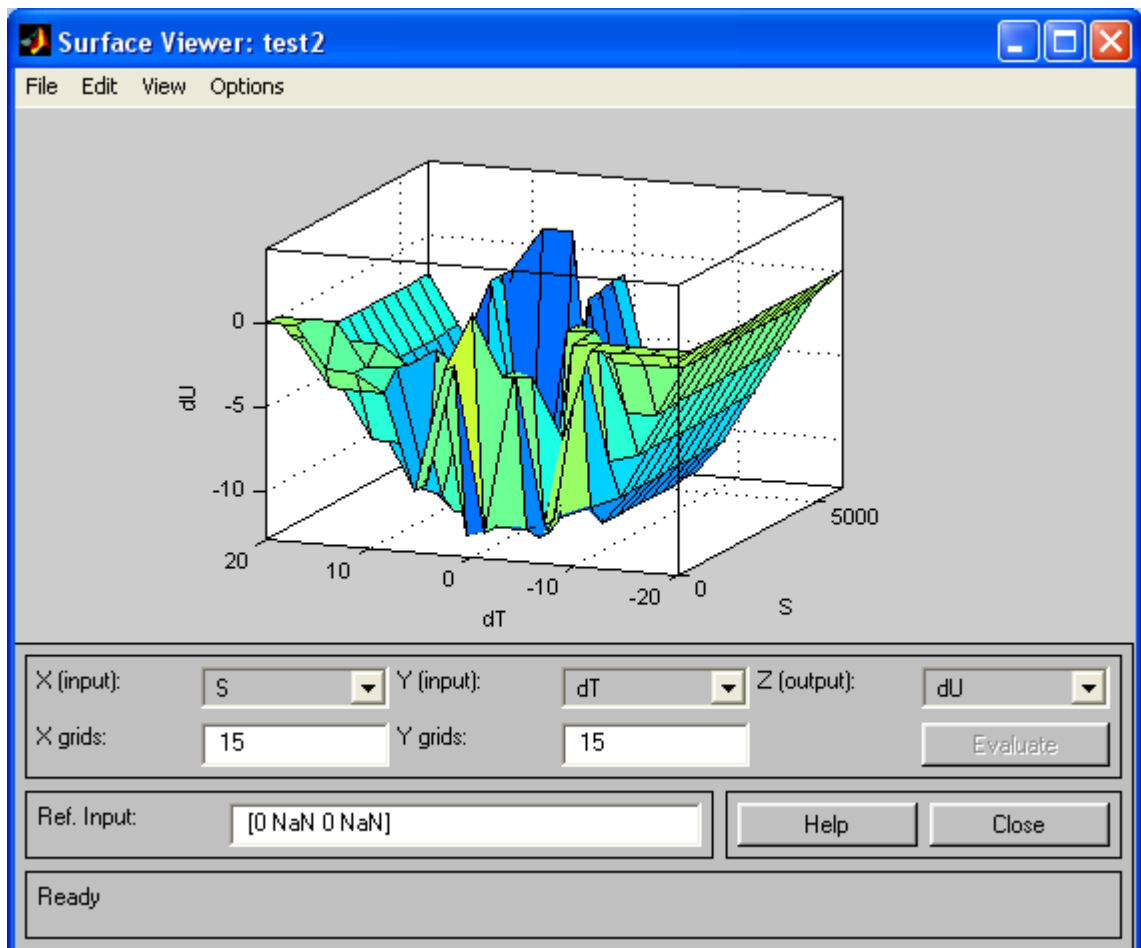


Рис. В.8 Изображение зависимости входных величин в виде поверхности

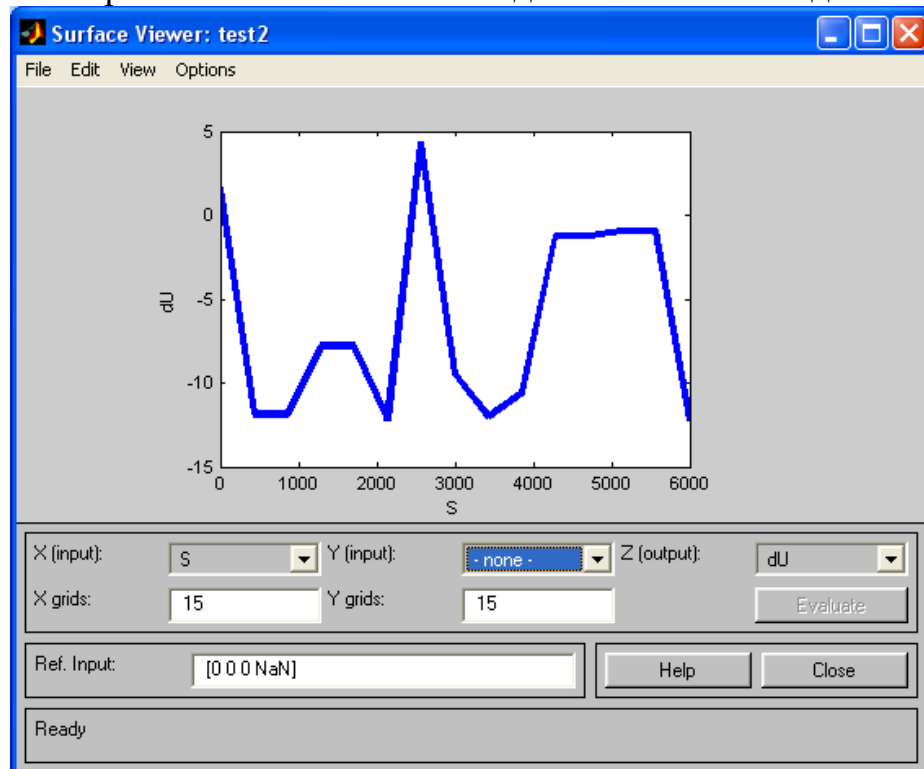


Рис. В.9 Двухмерное изображение зависимости входных величин

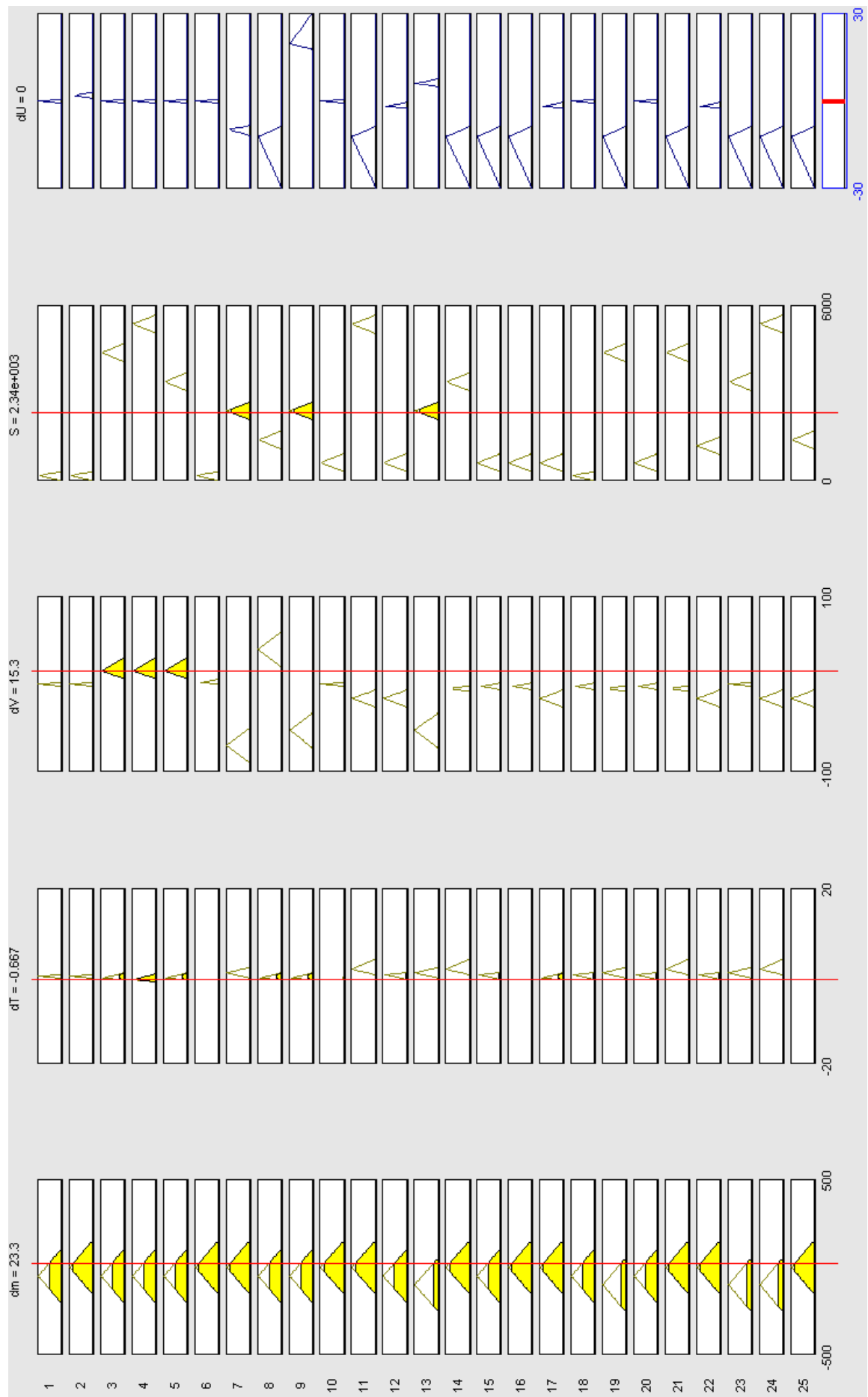


Рис. В.10 Работа механизма нечеткого вывода

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТНЫХ ПОЕЗДОК ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗЫ ЗНАНИЙ ПО РАЦИОНАЛЬНОМУ ДВИЖЕНИЮ ПОЕЗДОВ ПО ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННОМУ УЧАСТКУ.

В приложении представлены разделы методики проведения опытных поездок, выполненных для получения экспериментальных данных о рациональных режимах ведения грузовых поездов по заданному участку, назначение и основные положения которой приведены в разд. 3.4. Методика экспериментальных исследований обеспечивала полноту и достоверность данных опытных поездок. Результаты испытаний далее используются для формирования компонентов модели нечеткого управления режимами тяги, которая разработана в разд. 3.4.

Требования к локомотивам в тягово-энергетических испытаниях

В опытных поездках использованы локомотивы, которые в эксплуатации не имели повышенной или сниженной силой тяги по сцеплению, пробег после текущего ремонта ТР-2 или ТР-3 составлял 90-140 тыс. км., а средний прокат бандажей – до 5 мм. При испытаниях песок применялся исходя из опыта работы машиниста. Измерения, выполняемые в процессе исследовательских поездок, свидетельствовали об исправной работе локомотива.

Силы тяги локомотива на ободе колес оценивалась по величинам токов тяговых двигателей. При неблагоприятных условиях на лимитирующем участке допускалась работа локомотива на границе сцепления, которое характеризуется периодической пробуксовкой колесных пар с кратковременным снижением токов, которая устранялась импульсной подачей песка.

При испытаниях не допускалось снижение скорости ниже расчетной и ликвидация буксования за счет уменьшения позиций контроллера; а также разное буксование любой оси. Если такие требования не были обеспечены, то вес поезда по сцеплению является чрезмерным. На скоростном подъеме скорость и позиции регулирования в начале подъема были наибольшими из числа возможных. Обеспечивалось требование по скорости движения при выходе со скоростного подъема – она должна быть не меньше принятой в расчетах согласно ПТР [70].

При движении на расчетном подъеме измеряются фактическая скорость движения и фактическое напряжение на группе тяговых двигателей, для которых должно выполняться соотношение:

$$\text{где } \quad , \quad (Г.1)$$

— расчетная скорость электровоза,

— напряжение на тяговых двигателях (по характеристикам при номинальном напряжении на токоприемнике). Напряжение на токоприемнике электровоза при испытаниях было в допускаемых ПТЭ пределах.

Расчет нормы веса поезда

В соответствии с ПТР нормы веса поездов устанавливаются отдельно для каждого перегона (сборные поезда), тягового плеча (участковые поезда), или же для нескольких сопредельных участков (маршрутные поезда). Расчет веса поезда ведется для каждого перегона с учетом особенностей его профиля пути. Вес поезда устанавливается, исходя из силы тяги локомотива, крутизны подъемов на участке, степени использования кинетической энергии поезда. Вес поезда на данном участке рассчитывают по расчетному (руководящему)

подъему, который обозначается .

Для движения поезда используют следующие виды энергии: - электроэнергия, потребляемая электровозом; - потенциальная энергия, как сила земного тяготения, проявляется при движении поезда по уклонам; - кинетическая энергия, которая накапливается при разгонах поезда за счет расхода других видов энергии. Хотя кинетическая энергия не является самостоятельной, ее рациональное использование позволяет резко увеличить вес поезда.

Теория и практика вождения поездов показывают, что эффективное использование потенциальной и кинетической энергии за счет выбора управления тягой дает возможность значительно увеличить вес и скорость движения поездов на участках.

Методы расчета нормы веса поезда зависят от характера профиля пути, причем различают два типа профиля. Профиль с наиболее крутым затяжным подъемом, который встречаются на пути следования поезда (имеет длину, достаточную для достижения поездом равномерной скорости и движения его с этой скоростью на части подъема), и является расчетным. Если наиболее крутые подъемы имеют относительно небольшую длину, и поезд на нем не достигает равномерной скорости, а движется уменьшающейся скоростью на всем протяжении подъема, в этом случае может быть использована кинетическая энергия поезда.

Для затяжных подъемов, когда поезд движется по наиболее крутому подъему с равномерной скоростью, сила тяги локомотива уравновешивается сопротивлением поезда согласно уравнению [65, 70]:

$$\dots \quad (Г.2)$$

Тогда получают

$$\dots \quad (Г.3)$$

где

— касательная сила тяги; — вес локомотива; — расчетный уклон;

$$, \quad (Г.4)$$

, — удельное сопротивление локомотива и вагона зависящие от скорости движения поезда. Таким образом, на основе изложенного вес поезда устанавливают на основе крутизны наиболее тяжелого подъема, силы тяги локомотива, скорости движения, поскольку ними определяются значения величин, , .

В случае не затяжных подъемов для управления движением кроме силы тяги локомотива используют кинетическую энергию поезда. При этом вес поезда определяют как:

$$, \quad (Г.5)$$

где

— скорость поезда в начале подъема; — скорость поезда в конце подъема; — длина подъема в м; - среднее значение силы тяги (для скорости).

Определение веса поезда по нагреву тяговых двигателей

Требования по нагреву тяговых двигателей проверяются для заданного расчетного веса поезда по сцеплению. Значение допустимого превышения температуры обмоток устанавливаются как разность величин допустимых температур и расчетной температуры окружающего воздуха. Превышение температуры обмоток тяговых двигателей определяют по сеткам кривых нагрева и остывания электрических машин локомотивов, приведенным в ПТР [70]. Контроль температуры обмотки якоря тягового двигателя выполнен с использованием базы данных функций и для конкретного тягового двигателя. Для непрерывно расчета и

отслеживания температуры обмоток тягового двигателя с помощью функций

$$\text{и} \quad \text{в ходе опытных поездок определялись средние токи тягового двигателя за отдельные промежутки времени (цикл измерения). Далее вычисляются значения функций:}$$

$$\text{и} \quad \text{(Г.6)}$$

и температура перегрева тяговых двигателей локомотива согласно:

$$\text{где} \quad \text{,} \quad \text{(Г.7)}$$

- начальное превышение температуры, °С;
- превышение температуры при длительном действии тока, °С;
- интервал времени измерения среднего тока, мин;
- тепловая постоянная времени, мин.

При определении превышения температуры найденное значение превышения принималось начальным для следующего измерения. При выключенном токе () =0, значение температуры превышения принималось равным :

$$\text{Расчетная температура обмотки тягового двигателя рассчитывают как:} \quad \text{(Г.8)}$$

$$\text{где} \quad \text{,} \quad \text{(Г.9)}$$

- коэффициент сезона, летом =1, зимой – =1,1;
- коэффициент внешнего воздуха ПТР [70].

Расчетная масса поезда , с учетом ограничения по допустимой температуре перегрева тяговых двигателей (главного генератора) равняется:

$$\text{где} \quad \text{,} \quad \text{(Г.10)}$$

- коэффициент по учету потерь в стали от нагрева обмоток (обмотки якоря
- вес поезда при испытаниях; – пересчитанный вес поезда;
- приведенное превышение температуры обмоток, полученное при испытаниях поезда веса

;

– допустимое для поезда веса приведенное превышение температуры обмоток (ГОСТ 2582-72).

Оценка потребления электроэнергии на движение по участку

Расход электроэнергии на движение поездов по участку определяют на основе зависимостей тока и времени хода от пути по перегонам, суммируя расход электроэнергии по отдельным элементам времени (шагам интегрирования) по формулам ПТР (разд. 2.4; 3.4).

Отображение и обработка данных опытных поездок.

После проведения опытных поездок, с целью отладки оборудования и программного обеспечения, необходимо продолжить работу для подтверждения экономии электроэнергии при оптимальном ведении поезда с учетом рекомендаций разработанной системы.

Рекомендуемый режим ведения поезда может быть в виде голосовой подсказки или визуально наблюдаться на экране монитора.

Результаты работы разработанной системы отображаются на экране монитора, рис. Г.1, Г.2.

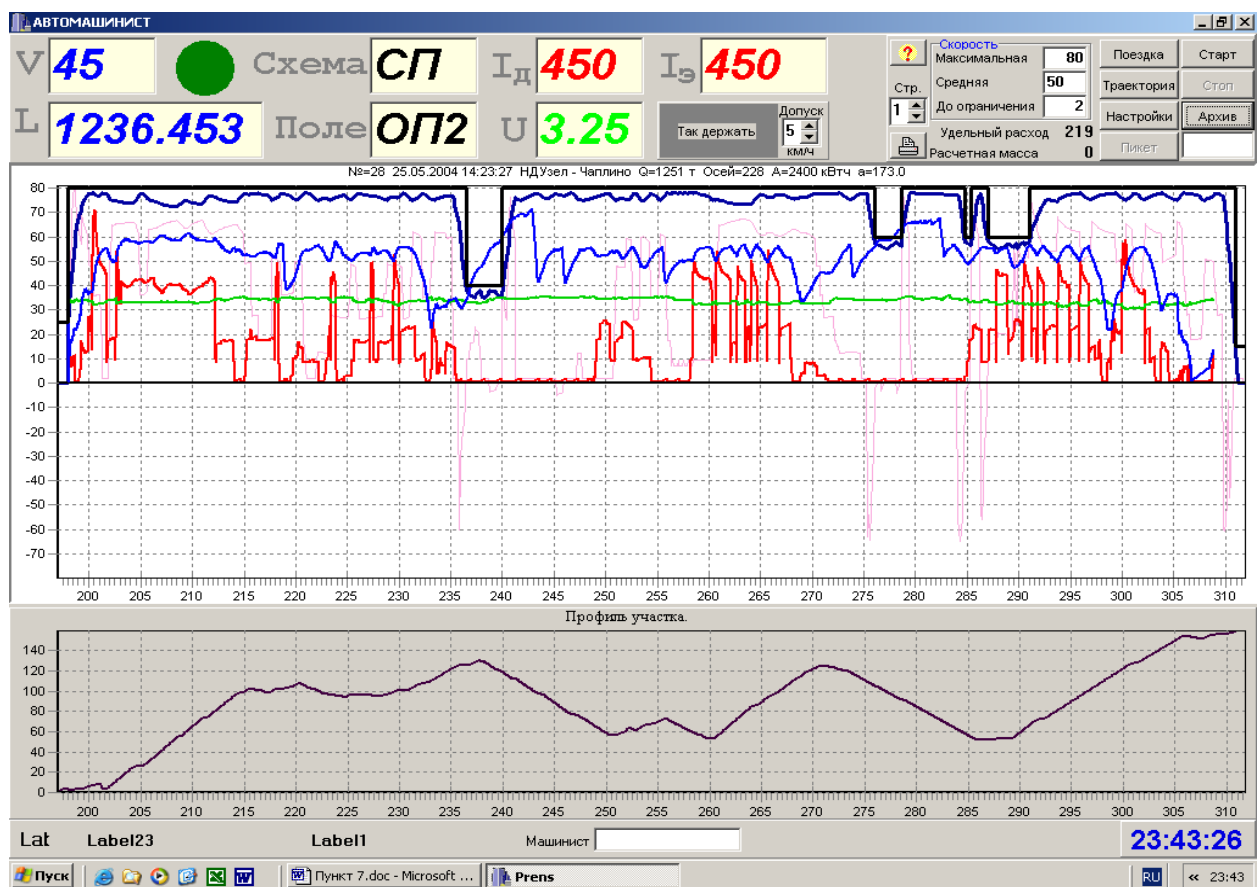


Рис. Г.1. Графическое отображение опытной поездки Н.Д.–Узел – Чаплино

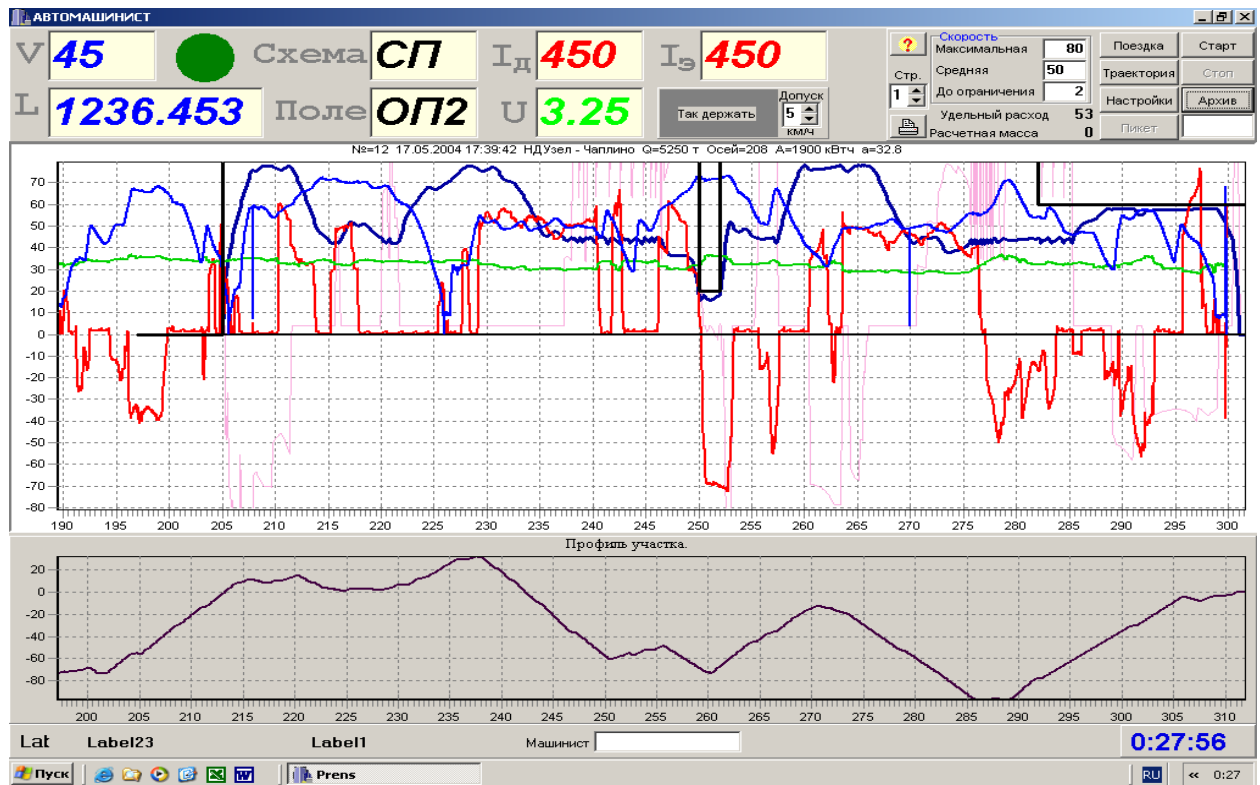


Рис. Г.2. Графическое отображение опытной поездки Чаплино – Н.Д.–Узел

В результате проведенных сравнений удельных расходов электроэнергии за период 06–07.2004 г. и 10–11.2004 г., полученных при обработке маршрутных листов (форма ТУ3) в локомотивном депо Н.Д.–Узел, приведенных на рис. Г.1, Г.2. и данных, полученных в результате проведенных опытных поездок (отмечены точками):

– рис. Г.3 – 25.05.04 г. $Q=1251$ т, а 4 ткм бр. направление Н.Д.–Узел – Чаплино,

– рис. Г.4 – 31.05.04 г. $Q = 4500$ т, а 20,6 кВт/104 ткм бр. направление Чаплино – Н.Д.–Узел,

можно сделать выводы о целесообразности продолжения исследований по совершенствованию устройства для организации оптимального ведения поезда машинистом.

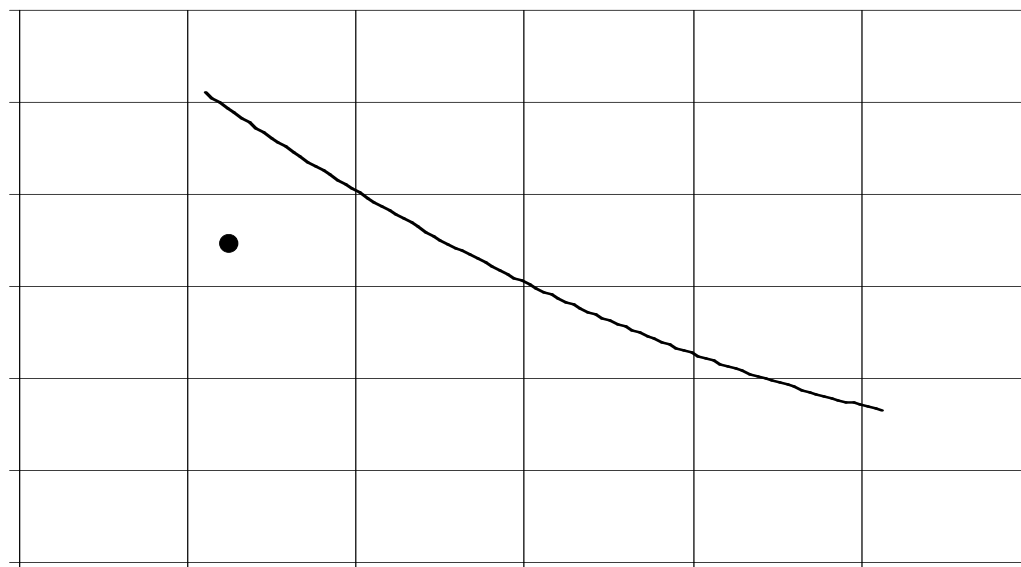


Рис. Г.3. Зависимость удельного расхода от массы брутто направление Н.Д.
–Узел – Чаплино (по маршрутным листам ТУЗ)

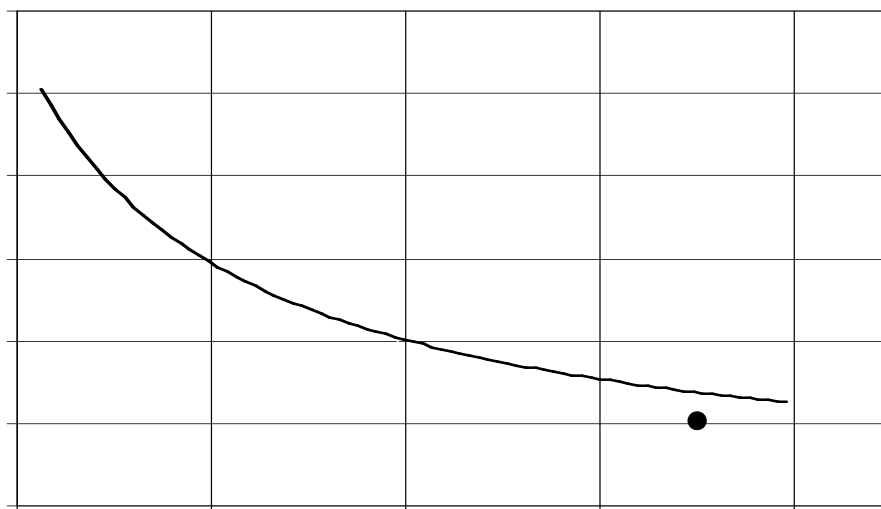


Рис. Г.4. Зависимость удельного расхода от массы брутто направление Чаплино
– Н.Д.–Узел (по маршрутным листам ТУЗ)

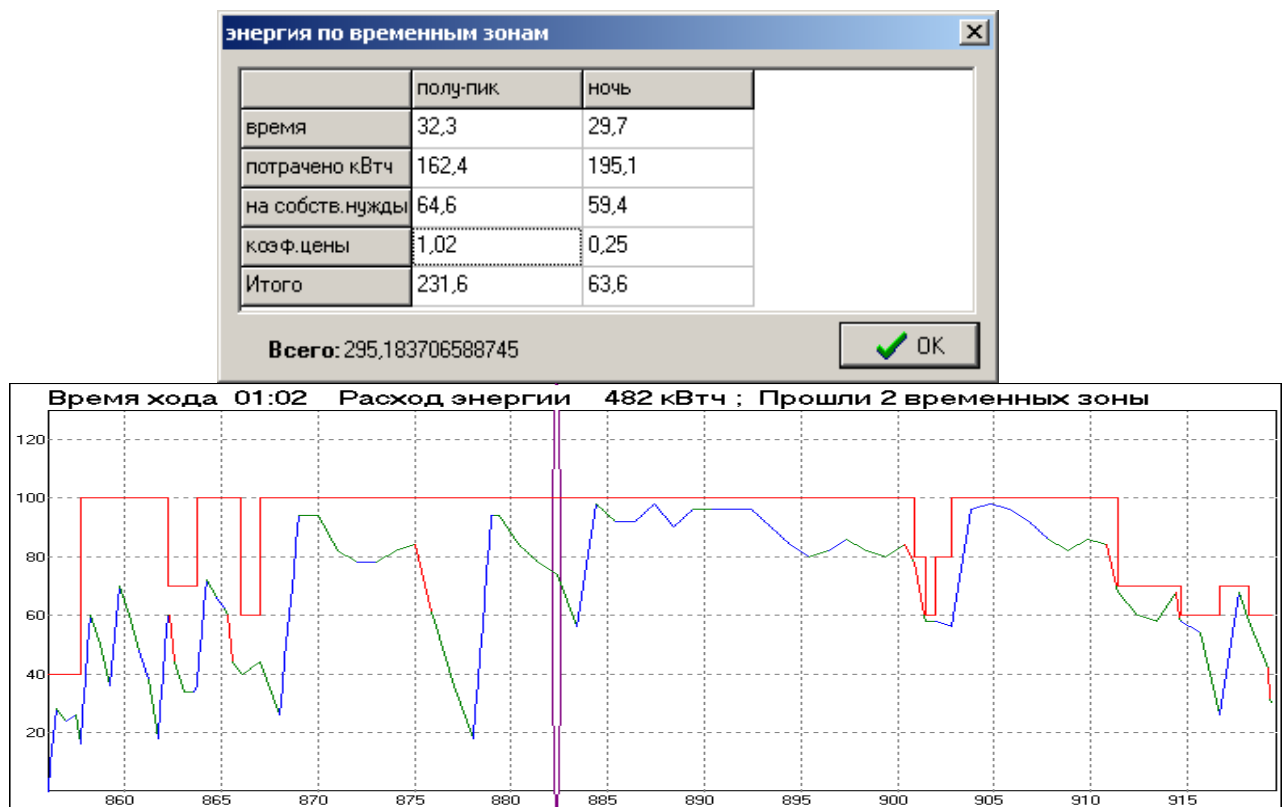


Рис. Г.5. Графики оптимальных скоростей движения пассажирского поезда в условиях переменных тарифов оплаты электроэнергии для различных периодов суток

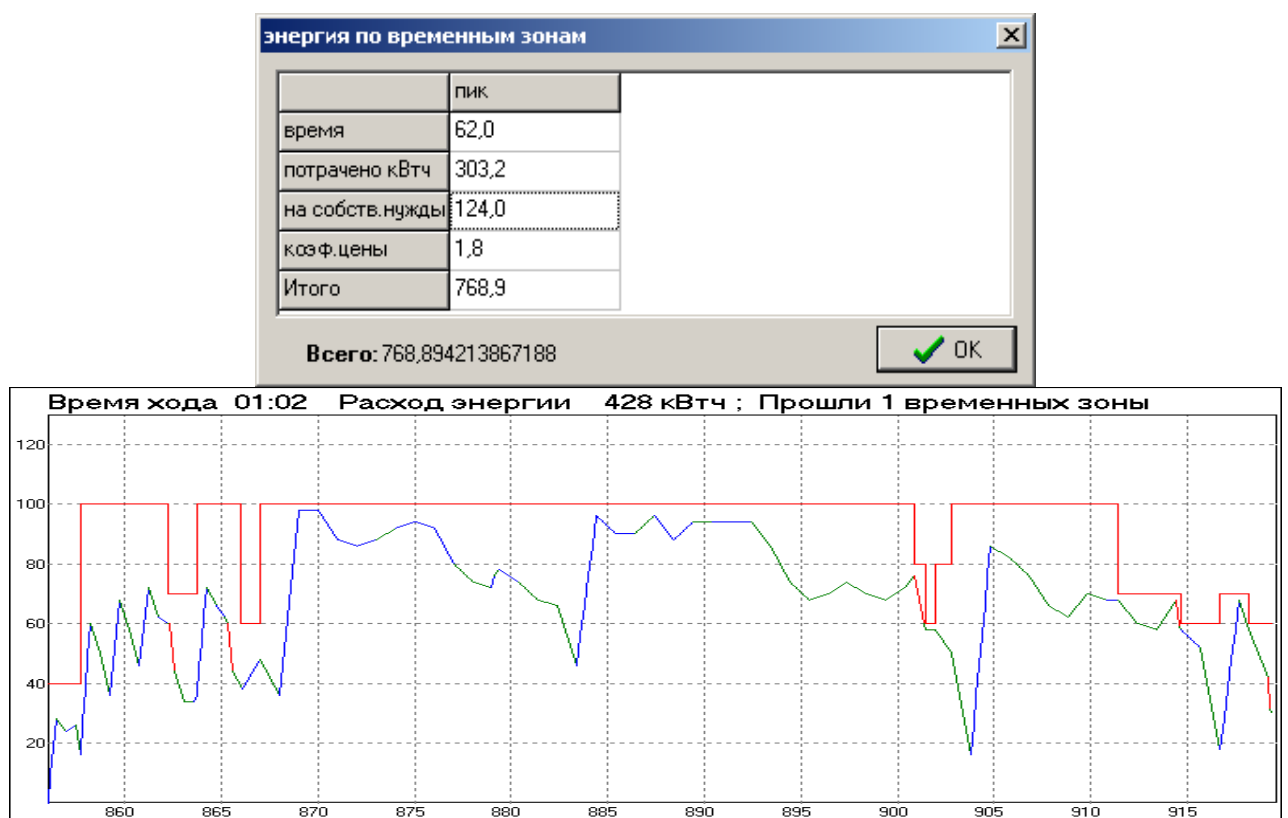


Рис. Г.6. График оптимальных скоростей движения пассажирского поезда в условиях одноставочного тарифа