

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский университет транспорта»
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи

МАЛАХОВ Сергей Валерьевич



ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ТЯГУ ПОЕЗДОВ НА ОСНОВЕ
УТОЧНЕННОГО МЕТОДА ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук
Капустин
Михаил Юрьевич

Москва – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 МЕТОДЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ И ОПТИМАЛЬНЫХ ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ	10
1.1 Анализ методов выполнения тяговых расчетов	10
1.2 Численный метод выполнения тяговых расчетов	15
1.3 Анализ методов выполнения оптимальных тяговых расчетов	23
1.4 Особенности применения метода динамического программирования к решению задачи оптимального определения режима движения поезда в тяговых расчетах	29
1.5 Выводы по разделу 1	38
2 АЛГОРИТМ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ОПТИМАЛЬНОСТИ БЕЛЛМАНА ДЛЯ ТЯГОВОГО РАСЧЕТА	40
2.1 Математическое моделирование процесса движения поезда	40
2.2 Разработка программы выполнения тяговых расчетов с применением метода динамического программирования для выбора режима движения поезда.....	51
2.3 Исследование программной реализации математической модели поезда на адекватность	65
2.4 Особенности применения метода динамического программирования в бортовой системе управления поездом.....	74
2.5 Выводы по разделу 2	77
3 НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД ВЫПОЛНЕНИЯ ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА	79
3.1 Движение поезда в условиях неопределенности	79
3.2 Метод выполнения тяговых расчетов с нейросетевым регулятором режима движения поезда.....	83

3.3 Нейросетевой метод для энергооптимального тягового расчета и его программная реализация	87
3.4 Эффективность применения нейросетевого метода в системах управления тяговым подвижным составом.....	110
3.5 Выводы по разделу 3	112
4 ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО МЕТОДА И ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ В ТЯГОВЫХ РАСЧЕТАХ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ.....	114
4.1 Применение нейросетевого метода и динамического программирования в стационарных условиях	114
4.2 Применение нейросетевого метода и динамического программирования на борту тягового подвижного состава.....	123
4.3 Особенности применения нейросетевого метода в системах управления перспективного тягового подвижного состава	128
4.4 Выводы по разделу 4	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	136
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	138
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	139

ВВЕДЕНИЕ

Российский железнодорожный комплекс играет особое стратегическое значение для страны. Он является связующим звеном единой экономической системы, обеспечивает стабильную деятельность промышленных предприятий, своевременный подвоз жизненно важных грузов в самые отдаленные уголки страны, а также является самым доступным транспортом для миллионов граждан.

С 2003 года вопросы оптимизации работы данного вида транспорта, включая повышение энергоэффективности, решает ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД»).

В 2016 году ОАО «РЖД» утвердило энергетическую стратегию до 2020 г. и на перспективу до 2030 г. [63].

Целью этого документа является: максимальное рациональное использование топливно-энергетических ресурсов во всех сферах деятельности ОАО «РЖД» для повышения экономической эффективности железнодорожных перевозок на основе внедрения инновационных технических средств и технологий, использование потенциала повышения энергоэффективности при обеспечении надежности энергоснабжения и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

При этом стратегия позволит решить наиболее важные задачи:

- полное и надежное энергетическое обеспечение перевозочного процесса;
- значительное снижение удельных энергозатрат во всех сферах деятельности ОАО «РЖД»;
- качественное улучшение структуры управления энергетическим комплексом Компании;
- расширение использования энергоэффективных технологий в управлении движением поездов;
- существенное повышение уровня рекуперированной энергии и эффективное её использование.

С ростом грузооборота холдинга ОАО «РЖД» происходит и рост издержек, в том числе потребление электроэнергии. Также рост издержек происходит за счет индексации тарифов на электроэнергию из-за роста нагрузки на электросеть страны. Эти тенденции позволяют говорить об актуальности темы снижения затрат электроэнергии на тягу поездов.

Инновационное развитие ОАО «РЖД» осуществляется в соответствии с задачами Долгосрочной программы развития ОАО «РЖД» до 2025 г. (ДПР), инструментом для её реализации является Стратегия развития железнодорожного транспорта в РФ до 2030 г. В соответствии со Стратегией научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 г. и на перспективу до 2030 г. [58] одним из основных направлений инновационного развития является повышение энергетической эффективности производственной деятельности [48].

Снижение энергозатрат на тягу поездов может быть достигнуто несколькими путями: развитие методов энергооптимального нормирования в случаях ведения поезда машинистом, разработка и внедрение систем энергооптимального автоматического ведения поезда, повышение энергоэффективности тягового подвижного состава (ТПС), повышение энергоэффективности источников электроснабжения и др.

Первые два направления не требуют существенных капиталовложений и могут быть реализованы за счет применения прикладной части теории тяги поездов – тяговых расчетов. Однако, методы выполнения тяговых расчетов до последнего времени не позволяли одновременно повысить точность, снизить время расчета и сократить потребность в вычислительных ресурсах, что особенно важно для автоматического ведения поезда или для выполнения многих параллельных тяговых расчетов. Предлагаемый комплексный подход позволяет расширить возможности применения тяговых расчетов в системах, требующих решения оптимизационных задач при постоянно меняющихся условиях.

Таким образом задача снижения энергозатрат на тягу поездов является актуальной и может быть решена за счет совершенствования методологии тяговых расчетов в части повышения точности при одновременном сокращении временных

затрат на расчет, что важно для применения в перспективных беспилотных системах управления поезда.

Основы тяговых расчетов в теории тяги поездов проработаны достаточно полно, однако с развитием математического аппарата и появлением новых технологий появилась возможность дальнейшего развития методов, которые позволяют использовать тяговые расчеты в новом качестве, в том числе для систем управления поездом с непрерывным машинным обучением. Значительный вклад в развитие научной основы для решения прикладных задач тяги поездов и оптимального ведения поезда внесли такие видные ученые и инженеры, как Астрахан В.И.[2,3], Баранов Л.А.[4, 5, 6], Ветлугин Б.И. [7], Головин В.И. [9], Головичер Я.М. [10], Гребенюк П.Т. [12], Ерофеев Е.В. [14, 15, 16], Розенфельд В.Е. [56] Лазарян В.А. [21], Лисенков В.М. [22], Лисицын А.Л. [23], Мугинштейн Л.А. [30], Никифоров Б.Д. [32, 33], Осипов С.И. [38], Плакс А.В. [43], Пясик М.С. [52], Савоськин А.Н. [57], Пудовиков О.Е. [50, 51], Ябко И.А. [69], и др. Отсутствие больших вычислительных мощностей не позволяло применять методы неявной аппроксимации функций для решения прикладных задач тяги поездов и оптимального ведения поезда.

Целью диссертации является совершенствование метода тягового расчета для получения энергооптимальных траекторий движения поезда и программная реализация предложенной методики.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- а) провести анализ методов тяговых расчетов, сформулировать оптимальную задачу и определить метод ее решения;
- б) подобрать современный математический аппарат, наиболее применимый для решения сформулированной оптимальной задачи;
- в) разработать алгоритм и на его основе ПО для выполнения оптимальных тяговых расчетов;
- г) проанализировать результаты тяговых расчетов, выполненных разработанным ПО, в части применимости для практических задач;

д) разработать новый метод выполнения оптимальных тяговых расчетов с повышенной точностью, с меньшими затратами времени и вычислительных ресурсов;

е) оценить практическую применимость нового метода выполнения оптимальных тяговых расчетов и метода Беллмана в условиях стационарного использования для оперативного нормирования энергозатрат и в условиях работы бортовой локомотивной системы управления движением поезда;

ж) разработать механизм внедрения нового ПО оптимальных тяговых расчетов на основе метода искусственных нейронных сетей (ИНС) в перспективные локомотивные системы управления движением поезда.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

а) разработан метод тягового расчета с применением ИНС для модели поезда в виде дискретных тел и локомотива с дискретным управлением тягой;

б) предложена эффективная численная реализация метода оптимального тягового расчета, основанного на принципе оптимальности Беллмана, отличающаяся тем, что находятся энергооптимальные траектории для всех возможных времен хода по участку и адаптированного для обучения ИНС;

в) разработан программный комплекс для оперативного нормирования энергозатрат на тягу поездов с непрерывным обучением нейросети;

г) выбрана архитектура и определена специфика размещения нейросети в качестве оптимального регулятора движения поезда в изолированной программной среде для перспективных локомотивных микропроцессорных систем управления движением поезда.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы обосновывается следующими результатами и выводами:

а) разработана математическая модель системы «поезд-инфраструктура», а на её основе алгоритм оптимального тягового расчета методом динамического программирования на базе ИНС, который реализован в программном комплексе для нормирования энергоресурсов на тягу поездов;

б) доказана возможность использования нейросети в виде изолированного программного кода в центральном вычислителе перспективной локомотивной микропроцессорной системы управления движением поезда;

в) результаты теоретической проработки диссертационного исследования и практической реализации использованы при разработке ГОСТ Р «Микропроцессорные системы и устройства безопасности, управления и диагностики железнодорожного тягового подвижного состава. Требования к типовой архитектуре, интерфейсам, функциям», а также в утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 28.01.2019 г. №123р Концепции развития локомотивных устройств безопасности.

В диссертационной работе на защиту вынесены следующие положения:

а) метод тягового расчета с применением ИНС для модели поезда в виде дискретных тел и локомотива с дискретным управлением тягой;

б) численная реализация алгоритма решения тягового расчета на основе принципа оптимальности Беллмана для модели поезда в виде соединенных упруго-вязкими связями дискретных масс с локомотивом в голове, управление которым является дискретным;

в) программный комплекс для оперативного нормирования энергозатрат на тягу поездов с непрерывным обучением на реальных данных поездок;

г) архитектура бортовой системы управления локомотива для эффективного использования тяговых расчетов с применением ИНС при оперативном управлении поездом.

Достоверность результатов подтверждается корректностью исходных математических положений и обоснованностью принятых допущений, а также сравнительным анализом предложенных численных реализаций тяговых расчетов с результатами, полученными в реальных условиях эксплуатации на участке Орел-Тула.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры «Тяговый подвижной состав» РОАТ РУТ (МИИТ) 2018-2020 г.; на совещаниях в Дирекции тяги – филиал ОАО «РЖД»

2019 г.; в рамках инсталляции выставочных стендов ПКБ ЦТ на железнодорожном салоне техники и технологий «PRO//Движение. Экспо» 2019 г.; в рамках конкурса акселератора ОАО «РЖД» 2019 г.; на десятом международном симпозиуме «Eltrans 10.0» (Санкт-Петербург, 2019 г.), на IX Международной научно-практической конференции «ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ НА ТРАНСПОРТЕ» (Гомель, 2019 г.).

По теме диссертации было опубликовано 2 статьи в научных рецензируемых журналах, 3 статьи в сборниках конференций, 4 патента и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

1 МЕТОДЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ И ОПТИМАЛЬНЫХ ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ

1.1 Анализ методов выполнения тяговых расчетов

Тяговые расчеты, как набор прикладных методов решения задач тяги поездов, могут применяться, как для стационарного применения: оперативное нормирование электроэнергии на тягу поездов, так и для решения задач управления поездом при размещении на борту локомотива. Для большего понимания проблематики ведения поезда и решения поставленной задачи необходимо рассмотреть эволюционное развитие методов моделирования движения поезда, методов получения режимов движения поезда (рисунок 1.1).

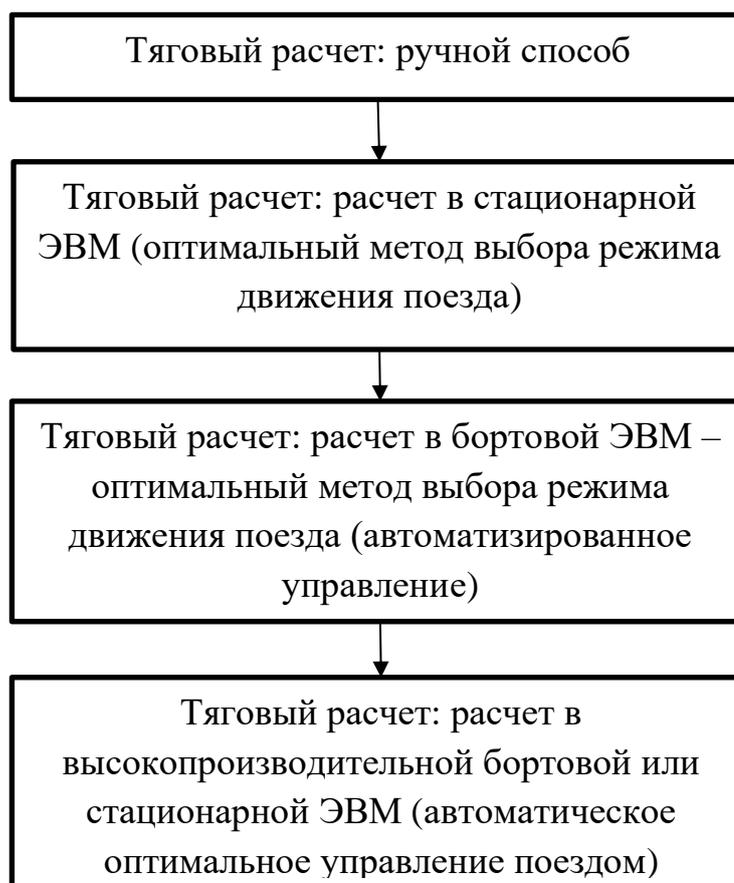


Рисунок 1.1 – Эволюционное развитие методов выполнения тягового расчета

В первую очередь необходимо определить понятие «тяговый расчет» и цель расчета. Правила тяговых расчетов для поездной работы [46] не разъясняют, что же можно считать тяговым расчетом, но и в других источниках невозможно найти единой устоявшейся формулировки [56, 24]. Поэтому в дальнейшем тяговым расчетом будет считаться комплекс методов и способов определения массы поезда, скорости и времени движения поезда по участку пути, расхода энергии на тягу поезда, сил в поезде при движении по участку пути и решения тормозных задач [12]. Отсюда следует, что целей расчета может быть несколько: определение допустимой массы поезда, определение среднего времени движения, определение расхода энергии и т.д. Такое разнообразие целей обусловлено и комплексным характером расчета, а также значительным набором параметров системы «поезд - внешняя среда»: масса поезда, характеристики локомотива и состава, профиль пути, тип пути, погодные условия и т.д.

В поездной практике часто приходится сталкиваться с различными ситуациями, принятие решения в которых будет зависеть от различных критериев. Пример, ведение пассажирского поезда, следующего без опоздания, оценивается по расходу электроэнергии – критерий минимум расхода электроэнергии. Ведение пассажирского поезда, следующего с опозданием, оценивается нагоном – критерий быстроедействие. На все параметры (время, скорость, продольные силы в поезде, токи и т.д.) могут быть наложены определенные ограничивающие условия, например, можно поставить задачу проследовать выбранный участок с заданным временем и минимальным расходом энергии. Такая задача является типовой для нормирования энергозатрат. Второй типовой является задача на максимально быстрое проследование поездом участка пути. Такая информация может быть полезна как для определения максимальной пропускной способности участка, так и для практических целей в случае задержки поезда. Возможны и другие задачи, но в рамках текущей работы будет рассмотрена только первая задача.

В отсутствие электронно-вычислительных машин на железнодорожном транспорте пользовались различными методами выполнения тяговых расчетов: аналитический, графический, графоаналитический. Каждый из этих методов

подробно описан в литературе [4], поэтому подробно здесь приводиться не будет. Основное отличие методов состоит в способе решения основного уравнения движения поезда [56]:

$$a = \xi f_y(v), \quad (1.1)$$

где a – ускорение центра масс поезда, $\frac{\text{км}}{\text{ч}^2}$;

ξ – константа, учитывающая размерности величин, входящих в формулу, и инерцию вращающихся масс поезда, $\frac{\text{км}}{\text{ч}^2}$;

$f_y(v)$ – равнодействующая удельных сил, действующих на поезд, $\frac{\text{Н}}{\text{т}}$.

Размерности величин в диссертации указаны в соответствии с [46].

В остальном же каждый метод использует следующий алгоритм расчета:

- определение начальных условий – не изменяющиеся или изменение детерминировано (основное и дополнительное сопротивление движению локомотива, состава в соответствии с моделью поезда, тяговые и тормозные характеристики локомотива, тепловая характеристика ТЭД и т.д.);
- определение массы поезда;
- решение основного уравнения движения поезда для определения скорости, времени, расхода электроэнергии, нагрева ТЭД в зависимости от координаты.

Так как силовые расчеты очень трудоемкие, то считали поезд материальной точкой и динамические внутренние силы поезда не учитывались при расчете. При ручном способе выполнения тягового расчета модель поезда является наиболее грубой, так как от этого напрямую зависит трудоемкость расчета. Например, при решении (1.1) методом МПС (графический метод) дополнительное сопротивление от уклона являлось кусочно-непрерывной функцией (в начале расчета профиль спрямляют для уменьшения количества элементов профиля), если представлять его непрерывной функцией, то трудоемкость расчета вырастает на порядок. Тяговые расчеты широко использовались и используются при нормировании массы поезда и расхода электроэнергии.

Из ручных методов выполнения тяговых расчетов наибольшее распространение получил метод МПС – графический метод [38]. Точность метода МПС достаточно сложно оценить, так как она зависит от большого количества сложно формализуемых факторов, таких как точность позиционирования линейки на каждом шаге расчета скорости, изменения толщины карандаша, точность графика удельной ускоряющей и замедляющей сил и т.д. Таким образом, можно в целом сказать, что точность метода МПС, даже безотносительно к точностям исходных данных, была недостаточной для оценки расхода электроэнергии, так как в данном случае инженерная точность в 5 % категорически не подходит (сложно дать оценку даже методической погрешности расчета методом МПС, так как многое зависит от указанных недетерминированных и неформализованных факторов, поэтому точность расчета в 5 % процентов здесь приводится только потому, что этот метод расчета широко использовался в инженерной практике). Говорить об адекватности ручных расчетов для поставленной задачи не приходится, так как для оценки экономии энергии необходимо считаться с единицами и десятими долями процента, что при инженерной точности расчета будет элиминировано погрешностью.

Точность занимает одно из центральных мест при оценке затраченной электроэнергии, поэтому целесообразным представляется использование аналитического метода для нахождения скорости движения поезда. Действительно, в [12] показано применение аналитического метода при торможении, его можно распространить на режимы выбега и тяги, если выразить тяговые характеристики в виде полинома 3-го порядка, например, интерполировав характеристики кубическими сплайнами (подобный подход применен в работе [69]). В этом случае и в случае численного решения погрешность будет сводиться к погрешности входных данных (пренебрегаем погрешностью решения уравнения (1.1) численным методом). Поэтому только аналитический и численный методы остаются пригодными для автоматизации тягового расчета, причем качество таких тяговых расчетов на несколько порядков выше тех, которые выполнены вручную.

В дальнейшем при расчетах будет использоваться только численное решение уравнения (1.1). Этому есть несколько причин. Во-первых, аналитический расчет имеет большую трудоемкость вычислений, чем формула Рунге-Кутты 4-го порядка. Во-вторых, решение, предложенное в [12], позволяет находить координату в зависимости от скорости, т.е. приходится задаваться скоростью, что значительно усложнит алгоритм (очень многие события зависят от координаты – торможение или остановка, ограничение скорости, уклон и т.д.). В-третьих, аналитический метод накладывает определенные ограничения на функции, которыми могут быть аппроксимированы тяговые характеристики, сопротивление движению и т.д.

Выполнение тяговых расчетов с помощью ЭВМ позволяет решать задачи, которые ранее из-за трудоемкости не имели решения. Это задача автоматического оперативного нормирования и ведения поезда. Для этого недостаточно только выполнения тягового расчета, требуется информация об оборудовании локомотива, более точные тормозные расчеты. При тяговом расчете не проверяется адекватность решения, что очень важно для правильного и безопасного ведения поезда. Цифровая техника позволила решать тяговые задачи из более широкого круга. Тем не менее, как будет показано ниже, оптимальные решения требуют значительной производительности вычислительных средств.

Задачи оптимизации движения поезда были недоступны для решения без применения ЭВМ, что объясняется сложностью этих задач. В настоящее время недостаточно только выполнить тяговый расчет и получить вектор режимов (пусть и оптимальный). Результаты расчетов зависят от условия движения поезда, которые меняются не только от координаты, но и от времени, а также от технического состояния подвижного состава. Это означает, что расчеты должны выполняться с такой частотой, чтобы соответствовать частоте изменений условий движения и учитывать данные, полученные с датчиков для повышения адекватности модели движущегося поезда. Но для решения этой задачи необходимо более подробно рассмотреть выполнение тягового расчета с помощью цифровой ЭВМ.

1.2 Численный метод выполнения тяговых расчетов

В настоящее время использование микропроцессорных систем управления, безопасности, диагностики и прочих на железнодорожном транспорте значительно расширилось. Такие системы постепенно заменяют морально устаревшие аналоговые системы, которые уступают по массогабаритным показателям, надежности, безопасности, защищенности, экономичности и функциональности. Использование таких систем невозможно без реализации управляющих алгоритмов в виде программ. Ввиду своей сложности тяговые расчеты стали также выполняться на цифровых ЭВМ.

В действующих Правилах тяговых расчетов (ПТР) по сравнению с ПТР 1985 года исключен порядок тяговых расчетов с применением ЭВМ и характеристика программы, реализующая такой тяговый расчет, поэтому будет рассмотрен вариант решения тягового расчета на ЭВМ из [45]. Авторы предлагают использовать алгоритмы ручного расчета и не пользуются преимуществами расчетов на ЭВМ, хотя дата издания 1985 год, а первые ЭВМ появились в начале 50-х годов и к дате издания [45] уже существовали персональные ЭВМ. Тем не менее, для решения основного уравнения движения используется следующая методика, которая использует известные кинематические формулы:

$$v(s) = v_0 + a \cdot \Delta t, \quad (1.2)$$

$$\Delta s = v_{\text{ср}} \cdot \Delta t. \quad (1.3)$$

С учетом (1.1), (1.2) и (1.3) можно записать:

$$\Delta s = \frac{v_{\text{ср}} \cdot \Delta v}{\xi f_{\text{уср}}} = \frac{(v_{\text{к}} + v_{\text{н}})(v_{\text{к}} - v_{\text{н}})}{2\xi f_{\text{уср}}}. \quad (1.4)$$

Если определять скорость поезда из (1.1) с помощью метода Эйлера [31] будет получен аналогичный результат, так как в обоих случаях используется

разложение скорости в ряд Тейлора. Погрешность метода Эйлера больше, чем метода Рунге-Кутты 4-го порядка, так как не учитываются члены разложения ряда Тейлора со вторым и более высокими порядками производных. Произведем сравнение метода Рунге-Кутты 4-го порядка [31] с его модификацией, которая была предложена Мерсоном [31]. Метод Рунге-Кутты-Мерсона позволяет оценивать погрешность метода на каждом шаге и принимать решение об изменении шага интегрирования: Уравнение (1.1) может быть преобразовано к следующему виду:

$$v(s + ds) = \frac{\xi f_y}{v(s)} ds. \quad (1.5)$$

Надо отметить тот факт, о котором упоминалось в пункте 1.1 в части переменной интегрирования. Можно интегрировать по скорости и находить координату, как предлагается в [45]. В этом случае приходится задаваться шагом по скорости и находить изменение координаты. Так как многие внешние факторы зависят от координаты, например, профиль пути, ограничения скорости, место остановки, место пробы тормозов, то использование переменной интегрирования в виде скорости значительно усложнит расчет. Осложнения будут из-за изменения средней ускоряющей силы на заданном отрезке скоростей. Скорость при выбеге может изменяться незначительно, что усложнит учет ограничений скорости. Поэтому целесообразно интегрировать по координате и выбрать ее шаг дискретизации минимальным, например, один метр. Такая точность измерения координаты достаточна для точной остановки, безопасного выполнения скоростных ограничений, учета изменения профиля и прочее. Тем более в настоящее время на отечественных железных дорогах не существует системы позиционирования, используемой в эксплуатации, позволяющей достичь точности позиционирования поезда в 1 метр. Датчики ДПС имеют накапливаемую ошибку [37], а СНС имеют погрешность для одной частоты до 30 и более метров. В зарубежной практике существуют системы позиционирования с точностью в 1 метр и менее, использующие радиолокационный принцип действия датчиков с

обязательным использованием реперных точек [1]. Таким образом, шаг дискретизации по координате в 1 метр обеспечит точность расчета приемлемую для дальнейшего применения в системе управления поездом. В случае значительной погрешности при метровом шаге возможно его уменьшение в 2^n раз до такого значения, которое приведет к уменьшению погрешности до приемлемого значения.

По схеме Рунге-Кутты-Мерсона скорость на следующем шаге будет определяться по следующей формуле:

$$v(s + \Delta s) = v(s) + \frac{(k_4 + k_5)}{2}, \quad (1.6)$$

где s – координата в километрах;

$$k_1 = \frac{\Delta s}{3v(s)} \cdot \xi f_y(v(s))v(s + \Delta s) = v(s) + \frac{(k_4 + k_5)}{2}, \quad (1.7)$$

$$k_2 = \frac{\Delta s}{3(v(s) + k_1)} \cdot \xi f_y(v(s) + k_1), \quad (1.8)$$

$$k_3 = \frac{\Delta s}{(v(s) + \frac{k_1 + k_2}{2})} \cdot \xi f_y\left(v(s) + \frac{k_1 + k_2}{2}\right), \quad (1.9)$$

$$k_4 = k_1 + \frac{4\Delta s}{3(v(s) + 0,375 \cdot (k_1 + k_3))} \cdot \xi f_y(v(s) + 0,375 \cdot (k_1 + k_3)), \quad (1.10)$$

$$k_5 = \frac{\Delta s}{3(v(s) + 1,5 \cdot (k_4 - k_3))} \cdot \xi f_y(v(s) + 1,5 \cdot (k_4 - k_3)). \quad (1.11)$$

Погрешность вычисления на каждом шаге будет определяться по следующей формуле:

$$R = \frac{1}{10} (2k_4 - 3k_3 - k_5). \quad (1.12)$$

Как видно, в приведенном методе для определения следующего значения скорости требуется найти пять точек, вместо одной для метода Эйлера. Остается подсчитать насколько оказывается проигрышнее по времени метод Рунге-Кутты-Мерсона относительно метода Эйлера и сравнить их погрешности.

Для этого необходимо реализовать эти алгоритмы в виде программ и произвести расчет на 50000 метрах, этого будет достаточно для возникновения разницы во времени вычислений. При сравнении требуется использовать профилировщик, специальную программу, которая определяет количество инструкций ЦПУ для выполнения требуемых вычислений или время выполнения каждой функции с точностью до микросекунд. В качестве измерительного средства был использован профилировщик фирмы Automated QA's AQTime версии 5.41.415.86. Для всех равных условий метод Эйлера занял в 2,5 раза меньше процессорного времени, чем метод Рунге-Кутты-Мерсона. Сравнились только времена чистого выполнения процедуры, без вызовов внешних процедур. Такой подход позволяет оценить какое время относительно времени всего расчета занимает время расчета тем или иным методом интегрирования. Измерение показало, что расчет по схеме Рунге-Кутты-Мерсона занимает всего 0,68 % от всего процессорного времени, потраченного на расчет. С учетом дочерних вызовов метод Эйлера оказывается в 5 раз более производительным по сравнению с методом Рунге-Кутты-Мерсона, как и ожидалось, но процент времени работы последней схемы не превышает 18 % (Эйлера 3,6 %) от общего процессорного времени расчета. С учетом доли в общих временных затратах следует признать, что разрыв не является существенным. Метод Эйлера выигрывает по производительности у методов более высоких порядков, но проигрывает по точности вычислений, поэтому не будет использован.

Тем не менее, для нужд оптимизации использование схемы Рунге-Кутты-Мерсона может быть излишним, так как важным моментом является время вычислений, которое можно сократить при использовании метода Рунге-Кутты 4-го порядка, а в некоторых случаях, например, в режиме тяги при реостатно-контакторном управлении необходимо использовать формулы Рунге-Кутты

различных порядков (обычно первого, второго, четвертого). Использование метода Рунге-Кутты 4-го порядка вместо Рунге-Кутты-Мерсона оправдано еще и потому, что величины шага дискретизации в 1 метр достаточно для точности расчета электроэнергии и может быть недостаточно только в некоторых случаях, например, при малых скоростях, но не стоит забывать про ускорение вычислений за счет увеличения шага в случае приемлемых погрешностей, что оказывается решающим аргументом в пользу этой схемы. Если отказаться от метода Рунге-Кутты-Мерсона, то отпадает необходимость расчета погрешности вычисления и может быть снижено время вычислений с незначительной потерей точности вычислений при некоторых условиях.

Как видно из произведенных измерений расчет дочерних функций, а к ним относятся сила тяги, тормозная сила, основное сопротивление движению, дополнительное сопротивление от уклона, дополнительное сопротивление движению от метеоусловий, занимает значительное время. В литературе изучение вопросов производительности не находит детального изучения и должным образом не раскрыт вопрос стандартизации алгоритма тягового расчета с применением ПЭВМ. Каждый должен заново реализовывать указанный в [45] алгоритм или предлагать собственный, что и сделано в работах [34, 13]. Для задач оптимизации время вычислений играет большую роль и вопрос оптимальной по скорости программы актуален. Поэтому важно внимательно изучить вопрос получения указанных функций необходимых для выполнения тягового расчета.

Для электровозов с контакторно-релейным управлением существует ограниченный набор позиций управления, причем некоторые позиции имеют особое отличие. Это так называемые ходовые позиции, которые позволяют работать на естественных характеристиках тяговых электродвигателей. В [45] нет электровозов с плавным регулированием силы тяги, в [46] указаны характеристики ВЛ85, 2ЭС5К, 2ЭС10, 2ЭС6. Способ регулирования силы тяги не влияет принципиально на методику тягового расчета, так как всегда аналоговое управление можно свести к дискретному. В качестве исходных данных берутся характеристики на ходовых позициях в случае плавного регулирования силы тяги

берутся типовые характеристики, например, по зонам регулирования для 2ЭСб. Ходовые позиции отличаются от остальных тем, что в силовую цепь электровоза не включены пусковые сопротивления. На остальных позициях идет расход электроэнергии на нагревание пусковых сопротивлений, поэтому время нахождения на таких позициях целесообразно уменьшать. В расчете пренебрегают временем на реостатных позициях и учитывают движение только на ходовых позициях, что объясняется стремлением минимизировать время на реостатных позициях. Хотя для электровозов с контакторно-релейным управлением пренебрежение реостатными позициями уменьшает множество позиций управления и существуют такие электровозы, которые могут длительно находиться на реостатных позициях без риска перегрева резисторов, но длительное движение на реостатных позициях приведет к бесполезной трате электроэнергии, что недопустимо по критерию экономии электроэнергии, по критерию быстрогодействия это также нецелесообразно, так как скорость на ходовых позициях выше, чем на реостатных.

При переходе с одного соединения тяговых электродвигателей (ТЭД) на другое требуется несколько переключений электрической схемы электровоза. Для разных электровозов постоянного тока количество переходных позиций различно и зависит от типа перехода, но не более 10. Во время переключения меняется ток двигателей, а значит и сила тяги электровоза. Переключения происходят автоматически и достаточно быстро, поэтому временем в состоянии перехода между соединениями ТЭД – временем коммутации электрической схемы можно пренебречь.

При тяговом расчете на ЭВМ графическую зависимость силы тяги от скорости необходимо представить в виде аналитической зависимости или в табличном виде. Последний способ будет накладывать определенные ограничения на алгоритм, но является более быстрым. Широкое распространение получила аппроксимация или интерполяция зависимостей. Одним из простых и точных методов, позволяющих допустить погрешность в половину толщины линии графика, является интерполяция кубическими сплайнами [31]. Расчет силы тяги

при сплайновой интерполяции занимает незначительное время (около 1 % от времени выполнения расчета по замерам профилировщика, если использовать программную реализацию алгоритма из [31]).

Основное сопротивление движению для электровозов и вагонов задано аналитически и может быть использовано без дополнительных изменений. Расчет основного сопротивления движению занимает незначительное время (около 1 % от времени выполнения расчета по замерам профилировщика).

Дополнительное сопротивление от бокового ветра определяется аналогичным силе тяги способом, так как зависимости сопротивления поезду от скорости заданы графически при некоторой постоянной скорости ветра и заданной плотности воздуха. Расчет дополнительного сопротивления поезду от бокового ветра занимает ощутимое время (порядка 10 % от времени выполнения расчета по замерам профилировщика).

Дополнительное сопротивление от профиля пути будет зависеть от профиля пути и модели поезда. В ПТР предлагается рассматривать поезд как материальную точку и рассчитывать только квазистатические силы в поезде. Эта модель допускает большие погрешности в зоне стыков элементов профиля и может оказать решающее влияние на выбор того или иного режима движения. Поэтому целесообразно с позиции точности расчета рассматривать поезд, как систему тел, связанных упруго-вязкими связями. Такая модель поезда требует незначительного усложнения алгоритма расчета, но игнорируется многими авторами, в том числе и авторами ПТР.

Тормозная сила, определяющаяся действием ПТ, задана аналитически. Расчет тормозной силы поезда является наиболее сложным, так как необходимо знать количество вагонов, тип вагона, состояние воздухораспределителей в вагонах (включены или выключены). К тому же торможение делится на две фазы: неустановившееся и установившееся, поэтому требуется зависимость тормозного коэффициента поезда от времени. Время торможения отсчитывается от его начала, за начало торможения принимается момент снижения давления в уравнительном резервуаре темпом не меньшим, чем установленный инструкцией [44] для первой

ступени торможения. Тормозной коэффициент во время неустановившегося торможения изменяется нелинейно, а в процессе установившегося торможения не изменяется. Если не учитывается фаза неустановившегося торможения или учитывается с помощью подготовительного пути, то участок траектории скорости при торможении строят обратным отсчетом от точки желаемой остановки до максимальной скорости поезда. Если учитывать фазу неустановившегося торможения, то тормозной путь будет зависеть от начальной скорости торможения нелинейно, т.е. той скорости, при которой произведена смена режима ведения поезда. В этом случае существует два подхода: метод последовательного приближения, метод дискретного расчета. В первом случае обратным отсчетом строят часть траектории скорости обратным отсчетом до максимальной скорости, а часть при неустановившемся торможении строится несколько раз при приближении поезда к точке начала торможения. Во втором случае с некоторой дискретностью (дискретность определяется с учетом приемлемой погрешности скорости начала торможения) задается вектор скоростей начала торможения, для которого определяется вектор координат начала торможения для режима торможения: первая ступень торможения, ПСТ (ЭТ – не рассматривается, как управляющее воздействие). В литературе [12, 9, 7] и в ПТР уделено достаточно внимания определению тормозного пути, но не методам построения кривой скорости в режиме торможения. Наиболее предпочтительным и универсальным является первый метод, который сокращает вычисления на одно торможение: требуется в среднем 5 – 10 итераций на одно торможение. Очень важной характеристикой качества торможения является его точность. Точность торможения определяется погрешностью управления при торможении и погрешностью измерения координаты.

Расчет динамических продольных внутренних сил в поезде занимает значительное время, но как было отмечено ранее, не считается обязательным, что ошибочно для грузовых поездов. В расчетах следует учитывать фактор динамических продольных сил [53] дополнительно к фактору квазистатических продольных сил, указанных в ПТР, как ограничение.

При движении поезда происходит изменение характеристик электровоза из-за изменения напряжения в контактной сети [56, 57]. Изменение напряжения в контактной сети происходит из-за изменения положения поезда по отношению к тяговым подстанциям, различной нагрузки фидерной зоны. Нагрузка фидерной зоны обусловлена режимом движения самого поезда и других поездов этой фидерной зоны. Так как характеристики электровоза являются начальной информацией, то необходимо на каждом шаге расчета производить их пересчет. Если изменение напряжения в контактной сети можно с некоторой точностью определить путем расчета, то фактор нагрузки от соседних поездов спрогнозировать в общем случае не представляется возможным.

Выполнение тягового расчета на ЭВМ не избавляет от выбора режима движения поезда. Выбор режима движения поезда зависит от многих факторов. В первую очередь от стратегии движения: выполнение времени хода, нагон опоздания. В первом случае имеет смысл экономить электроэнергию, а во втором экономить время. Так как при выполнении тягового расчета совсем необязательно решать оптимизационную задачу, то выбор режима поезда может осуществляться по любому алгоритму, который позволит удерживать параметры поезда при управлении им в заданных ограничениях рамках.

В данном пункте были рассмотрены особенности выполнения тягового расчета на ЭВМ. Это важный шаг делает возможным практический переход к понятию автоматического оптимального управления поездом. В пункте отдельно был сделан акцент на тех моментах, которые заслуживают детального рассмотрения и имеют важное значение при анализе результатов расчетов.

1.3 Анализ методов выполнения оптимальных тяговых расчетов

В предыдущем пункте было указано на необходимость выбора режима движения поезда при выполнении тягового расчета. Действительно, управление поездом заключается в смене его состояний с таким расчетом, чтобы была достигнута какая-либо цель. Цели могут быть локальные: увеличение скорости,

уменьшение скорости, поддержание скорости в некотором диапазоне и глобальные: выполнение времени хода, движение с максимальной скоростью. Можно предложить еще глобальные цели: минимизация числа смен режима движения поезда, минимизация расхода электроэнергии, но невозможно не принимать во внимание порядок работы железной дороги в Российской Федерации. Например, в пассажирском движении существует график движения поездов, который является определяющим (целевым) условием для системы управления поездом. Также важным моментом являются показатели движения поезда: участковая скорость, техническая скорость, маршрутная скорость и прочее. Время хода каждого поезда (график) составляется независимо от энергетического расчета движения поезда. Поэтому цель минимизация электроэнергии может быть рассмотрена чисто теоретически и не имеет практического применения.

После определения целей движения необходимо отметить важный момент, если задача движения с максимальной скоростью на заданном участке пути является оптимизационной задачей с целью минимизировать время движения (критерий быстроедействие), то цель выполнения времени хода может быть достигнута различными путями. Фактически возникает неопределенность в выборе движения поезда, что недопустимо из-за существования лучших решений по некоторым критериям. Для того чтобы избавиться от неопределенности необходимо перейти к оптимизационной задаче. Эта задача может быть сформулирована следующим образом: выбрать такой вектор режимов движения поезда, чтобы обеспечить его перемещение по указанному участку пути за время, отличающееся от заданного на величину не более заданной погрешности, с наименьшими затратами движения. Последнее условие элиминирует неопределенность в выборе режима движения. Совсем необязательно, чтобы был один единственный критерий оптимизации, например, можно рассматривать оптимальный вектор режимов не только по критерию минимума электроэнергии, но и по критерию минимума переключений.

Формализация оптимизационной задачи:

$$J = \min \left(\int_0^T i(n, t) u(n, t) dt \right), \quad (1.13)$$

при условии:

$$\begin{aligned} T &\rightarrow T_x, \\ s &= s_{\Pi}, \\ 0 &\leq v \leq v_{max}, \\ u &> u_{min}, \\ i &< i_{max}, \\ n &\in N, \end{aligned}$$

где i – ток электровоза, А;

u – напряжение в контактной сети, В;

t – время, с;

s – пройденный путь, м;

v – скорость поезда, км/ч;

T – время хода поезда, с;

T_x - заданное время хода, с;

s_{Π} - заданный путь, м;

v_{max} - максимальная скорость поезда в текущих условиях движения, км/ч;

i_{max} – максимальный ток в текущих условиях движения, А;

u_{min} – минимально допустимое напряжение на данном участке движения, В;

n – управление;

N - множество управлений.

Целевая функция в (1.13) предполагает рассматривать первичную энергию, то есть энергию до преобразования в зависимости от времени (аналогично в зависимости от координаты). Это объясняется тем, что измерительная аппаратура на электровозах именно таким образом фиксирует расход электроэнергии. Целевую функцию, которая рассматривает энергию после преобразования, можно записать следующим образом:

$$J = \min \left(\int_0^{s_n} \frac{F_k}{\eta} ds \right) = \min \left(\int_0^T \frac{F_k}{\eta} v dt \right), \quad (1.14)$$

где F_k - сила тяги электровоза, Н;

η - КПД электровоза;

Список условий к (1.13) может быть дополнен множеством других, например, ограничением продольных сил в поезде, ограничением нагрева тяговых машин, ограничением множества управлений и прочее.

Анализ подынтегрального выражения показывает, что безусловная оптимизация не может быть применена для решения задачи (1.13). Вариационное исчисление [59] не подходит по причине того, что подынтегральное выражение в формулах (1.13) и (1.14) зависит от управления. Множество управлений для электровоза постоянного и переменного тока является дискретным. Поэтому подходящими методами [8], которые могут быть использованы для решения задачи (1.13), являются метод Беллмана (динамическое программирование) [47, 15, 65] и принцип максимума Понтрягина [52, 69, 29, 64].

Отличие методов является принципиальным. Метод Беллмана представляет собой метод направленного перебора (т. е. дискретный метод), а принцип максимума Понтрягина представляет собой видоизмененный метод Лагранжа и является аналитическим. Существует значительное количество диссертаций и работ по тематике оптимального управления, в том числе и поездом, где применяется и тот и другой метод. Напрямую аналитический метод применять нельзя, так как предполагается использовать дискретные устройства управления, то есть для принципа максимума Понтрягина требуется адаптация. Динамическое программирование не имеет детализированного алгоритма и требует для каждой задачи разработки уникального алгоритма или применения уже разработанного, что тоже можно назвать адаптацией [25]. Принцип максимума Понтрягина имеет строго детерминированный алгоритм, но предъявляет требования к функциям и функционалам.

Указанный аналитический метод обладает рядом серьезных недостатков [5, б], в основном заключающиеся в недостаточной детализации математической модели и ограничениях, которые при реализации ухудшают качество управления движением поезда. Необходимо четко понимать, что теоретические изыскания по проблеме энергооптимального ведения поезда должны быть рассмотрены с точки зрения сложности реализации, качества и точности управления, удобства пользования – эргономичности управления, эффективности. Это не относится напрямую к математическим методам, но затрагивает их косвенно, как основу системы. Другим моментом является степень адекватности математической модели объекту управления. Причем в вариационном методе дополнительные усложнения модели являются проблематичными, так как к функциям предъявляются особые требования, например, непрерывность функций, дифференцируемость в понимании бесконечномерного анализа и т.д. [59] Дискретный метод обладает в этом случае значительным преимуществом, повторяя достоинство принципа максимума, то есть отсутствие необходимости пересчета оставшейся части траектории, если не изменяются условия задачи. Повышенная детализация математической модели поезда позволяет приблизиться к реальному поведению объекта управления в условиях движения. Но должна быть разумная мера детализации и не стоит включать в модель движения поезда, например, процессы коммутации схемы управления электровоза. В этом контексте важно не забывать про основные аспекты задачи и то, что рассматривается по существу тяговая задача. Как было указано ранее, тяговый расчет имеет обязательный набор задач (а выбор режима движения это только одна из задач), выполнение которых приведет к полному описанию процесса движения по заданному участку.

Оптимальный тяговый расчет является частным случаем тяговых расчетов. Без оптимального тягового расчета невозможно оптимальное управление поездом. Оптимальный тяговый расчет является необходимым, но недостаточным условием для построения системы энергооптимального ведения поезда. Тяговый расчет делается для конкретных заранее известных условий. Фактически учитываются факторы, которые могут быть спрогнозированы до поездки. Во время поездки

происходят события, заранее сложно прогнозируемые или вообще случайные, зависимости величин меняются по несколько иным законам, в отличие от заданных.

Решение оптимальной задачи в стационарных условиях не накладывает практически никаких условий на аппаратные ресурсы и временные ресурсы. Поэтому может показаться, что проблема оптимального тягового расчета решена: формализована задача, адаптированы математические методы, разработано программное обеспечение. Тем не менее, существуют некоторые моменты, которые не позволяют сделать такой вывод. Во-первых, нет обоснования достаточности математической модели поезда, не рассматриваются недетерминированные факторы, не произведена оценка качества управления по полученной оптимальной траектории. Во-вторых, оптимальный тяговый расчет вовсе не решает другую более важную проблему – оптимальное ведение поезда. С появлением ограничений по времени и в меньшей степени ограничений аппаратных ресурсов задача оптимизации движения по критерию экономии электроэнергии на порядок усложняется. К тому же фактически существующие методы не дают именно оптимального вектора режимов движения, а могут достигать только субоптимальных траекторий. Это утверждение достаточно просто доказывается исходя из самой сути слова оптимальный и понимания работы дискретной техники, а также с учетом случайных внешних условий движения.

Решение задачи оптимального ведения поезда по своей сути должно опираться на методы теории оптимального управления, но классические методы обладают серьезными недостатками для решения этой прикладной задачи, что является одной из причин отсутствия системы автоматического управления. Для полной ясности в решении вопроса оптимального управления поездом подробно рассмотрим в следующем пункте метод Беллмана и его модификацию.

1.4 Особенности применения метода динамического программирования к решению задачи оптимального определения режима движения поезда в тяговых расчетах

Метод динамического программирования, разработанный математиком Ричардом Беллманом, представляет собой дискретный метод, не имеющий универсального алгоритма для конкретной задачи. Этот метод был выбран нами по нескольким причинам. Во-первых, аналитические методы имеют ряд общих недостатков: предполагают непрерывное изменение функций, существует проблема локальных максимумов, требуется проверять решение на устойчивость (то есть на незначительную чувствительность к девиации входных данных, которая всегда присутствует в технических системах). С помощью метода Беллмана задача (1.8) может быть решена полностью, то есть могут быть найдена последовательность конкретных управлений, а не оптимальные скорости, как в [69, 64, 52]. Использование низкоуровневой автоматики для поддержания скорости в настоящее время имеет смысл только в части буферизации управления, а для нелинейной модели движения поезда может только ухудшить результат за счет линеаризованного звена со снижением качества управления.

Так как для динамического программирования сформулирован только общий алгоритм, то для каждой конкретной задачи требуется разрабатывать собственный алгоритм, учитывающий ее особенности, на основе общих правил. Метод динамического программирования является методом направленного перебора, заключающийся в фильтрации неоптимальных состояний, использовании заранее рассчитанных дискретных состояний системы.

Основные положения метода Беллмана:

- все состояния системы сводятся к дискретным;
- рассматриваются все возможные линии поведения системы (распределения состояния);
- строятся траектории состояний по принципу оптимальности: оптимальное поведение обладает тем свойством, что, каковы бы ни были

первоначальное состояние и решение в начальный момент, последующие решения должны составлять оптимальное поведение относительно состояния, получающегося в результате первого решения.

Это наиболее общий алгоритм, который составляет суть метода Беллмана [47]. Для решения конкретной задачи его требуется дополнить, но для этого следует более подробно рассмотреть общие условия задачи.

Во-первых, необходимо задаться математической моделью, которая будет использоваться: поезд – путь, локомотив – состав – путь, контактная сеть – локомотив – состав – путь, контактная сеть – локомотив – состав – путь – система интервального регулирования (АЛСН), контактная сеть – локомотив – состав – путь – система интервального регулирования (АЛСН) - дежурный по станции - поездной диспетчер. В большинстве случаев в литературе рассматриваются упрощенные системы [4, 14], что может плохо сказаться на точности решения. Более сложные системы ранее практически не рассматривались, а если и рассматривались, то для решения отличных от решаемых в работе задач [16, 15, 14, 68, 67, 66, 65, 69]. А совсем сложные системы с участием системы интервального регулирования или системы верхнего уровня управления не рассматривались в контексте оптимального управления. В основном сложности возникают не только теоретического, но и технического характера. Для системы АЛСН невозможно узнать показание светофора далее третьего (предполагается первый – зеленый, второй – желтый, третий – красный) при движении по зеленому сигналу, как по станции, так и по перегону без передачи дополнительной информации с инфраструктуры на локомотив. Ранее было нельзя предусмотреть по какому пути будет пропускаться поезд по станции или на какой путь будет принять, с какого пути будет отправление. Не было информации и о распределении поездов по следующему за станцией перегону. Это все значительно осложняло использование более подробных системы, позволяющих достаточно близко подойти к информационным условиям, в которых находится машинист. Поэтому для имитации сигналов АЛСН был разработан стенд [42]. Программные методики, разработанные для стенда, и записи сигналов рельсовых цепей были использованы

в работе для моделирования сигналов АЛСН. Очень важно учесть этот факт, что системы управления, разрабатываемые ранее, а значит и реализации алгоритмов оптимального ведения поезда не учитывали ряд существенных факторов. Детализация процесса движения поезда оказывает серьезное влияние на модель поезда. Например, если учитывается напряжение в контактной сети, то необходимо знать координаты тяговых подстанций, схемы питания, учитывать режим движения поезда, учитывать режимы движения поездов на одной фидерной зоне. Согласно [46] на постоянном токе допускаются напряжения контактной сети в диапазоне 2700 – 4000 В, а в особых случаях в диапазоне 2400 – 4000 В. Характеристики локомотивов приведены в [46] на напряжение 3000 В контактной сети постоянного тока, а для других напряжений предлагается пересчитывать эти характеристики. Изменение напряжения в контактной сети влечет за собой изменение тяговых и токовых характеристик, то есть изменяет начальные условия, что требует пересчета оптимальных кривых. Изменение напряжения контактной сети можно было бы не учитывать, если бы ее влияние на конечный результат наших расчетов – расход электроэнергии было бы несущественным. Но изменение напряжения напрямую влечет изменения тяговых возможностей локомотива до нескольких процентов, поэтому важно учитывать этот фактор. Аналогично должны быть рассмотрены и другие существенные факторы движения поезда: продольная динамика поезда, особенности работы тормозной системы поезда, системы навигации поезда, системы интервального регулирования и т.д. Ранее по объективным причинам было невозможно рассмотреть все эти сложные процессы совместно с задачей оптимизации движения поезда. Только в [10] произошло более полное рассмотрение процесса движения поезда с учетом динамически меняющихся ограничений скорости движения, но без учета продольной динамики поезда. Для дальнейших расчетов выбираем систему движения локомотив – состав – путь – контактная сеть – система интервального регулирования (в виде заранее случайным образом заданных ограничений по скорости).

Во-вторых, в методе динамического программирования движение поезда рассматривается, как многошаговый процесс, заключающийся в переходе от

одного состояния системы к другому. Каждое состояние системы характеризуется определенным набором значений параметров движения и условий. Так как алгоритм будет рассматривать только дискретные состояния, то требуется дискретизировать основные параметры движения. К ним следует отнести путь, скорость и управление (режим движения). Пройденный путь или координата являются параметрами движения, от которых зависят многие ограничения движения, например, ограничение скорости, напряжение на токоприемнике, дополнительное сопротивление движению и др. От скорости также зависят многие силовые факторы: сила тяги, основное сопротивление движению и др. Но скорость также зависит от координаты, поэтому можно было бы обойтись дискретизацией только лишь координаты, а скорость получалась бы дискретной по координате в соответствии с (1.5). Если произведем дискретизацию состояний только по координате и управлению, то этого будет достаточно для построения многошагового процесса. Однако, с учетом малости шага по отношению к длине пути можно предположить, что уникальных траекторий движения, имеющих уникальную последовательность состояний, будет большое количество, а при комбинаторно рассмотрении задача становится существенно трудоемкой. Это количество зависит не только от величины шага по пути, но и от количества управлений, что особенно важно для локомотивов с плавным регулированием тяги. Для локомотивов с дискретным управлением дискретизация управлений не требуется, а для локомотивов с непрерывным управлением требуется дискретизировать и управление. Тем не менее, даже в случае дискретного управления при 15 возможных управлениях в режиме тяги (рассматриваются только ходовые позиции) уже на пятом шаге будет порядка $15^5 = 759375$ траекторий. С ростом числа шагов будет возрастать число уникальных возможных траекторий в соответствии с формулой:

$$N_T = N_m^{N_S}, \quad (1.15)$$

где N_S - число дискретных шагов по координате;

N_m - число дискретных управлений.

Чтобы уменьшить количество возможных траекторий требуется ввести дискретизацию по скорости. В этом случае на каждом шаге принудительно снижается количество состояний путем введения эквивалентных состояний по скорости. В предыдущих вариантах реализации динамического программирования такие действия не требовались, потому что таблица возможных состояний не сохранялась. Однако, при смене критерия оптимизации или ограничений (ограничений по скорости, ограничений по температуре и т.д.) пришлось бы постоянно пересчитывать и таблицу возможных состояний, что снижает эффективность расчета, поэтому было принято решение повысить расход памяти, но минимизировать потребность в вычислительных ресурсах процессора. Под эквивалентным будет пониматься такое состояние системы, при котором два состояния, характеризующиеся отличной скоростью, считаются идентичными и имеющими одинаковую скорость равную эквивалентной. Число скоростей для одного шага определяется по формуле:

$$N_v = \frac{v_{max}}{N}, \quad (1.16)$$

где v_{max} - максимальная скорость на данном шаге, км/ч;

N – шаг по скорости, км/ч.

Например, для уменьшения количество траекторий достаточно взять величину шага по скорости в 0,1 км/ч, что более чем в 3 раза лучше точности устройств измерения скорости [39, 40, 41], и для типичного грузового поезда максимально на один шаг придется до 900 состояний, для пассажирского до 2500.

В-третьих, в алгоритме примем трехслойную модель управления (рисунок 1.2):

- первый слой – информация необходимая для решения задачи оптимального управления с учетом предварительной обработки;
- второй слой – определение режима движения на основании метода оптимизации и выдачей конкретных команд для непосредственного исполнения;
- третий слой – исполнительный.

Таким образом алгоритм должен обеспечить выдачу на выход вычислителя команды на управление конкретным устройством исполнения команд. Это обстоятельство отличает систему на базе метода Беллмана от систем на базе метода Понтрягина [10].

Теперь возможно перейти непосредственно к построению алгоритма решения задачи (1.13) методом динамического программирования. Алгоритм в укрупненном виде будет представлен тремя шагами: определение возможных состояний при движении поезда, определение возможных траекторий движения с учетом критерия оптимальности, выбор траектории, удовлетворяющей условиям.

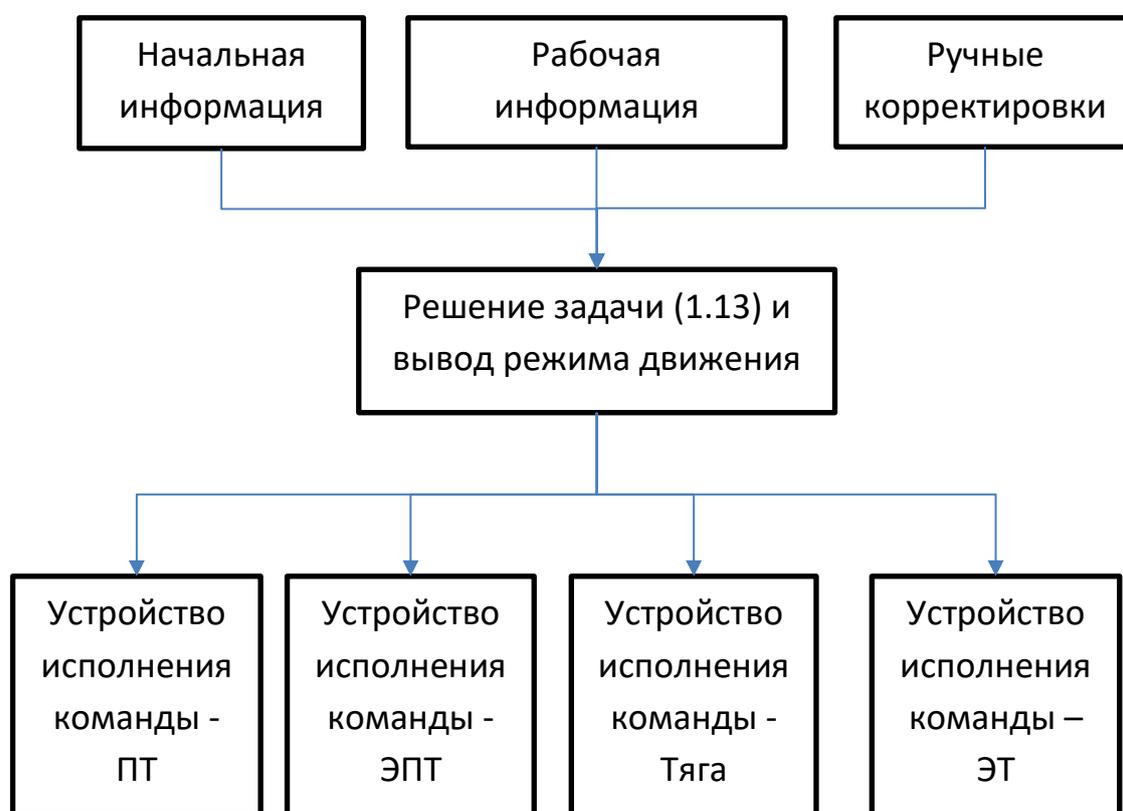


Рисунок 1.2 – Структурная схема информационных потоков при моделировании

Поэтому следующим этапом является создание таблицы возможных состояний движения поезда. Последовательность действий для этого достаточно проста:

- а) задаем начальные условия для решения уравнения движения (1.5);
- б) определяем подмножество возможных управлений из множества возможных управлений и выбираем начальное управление;

- в) определяем скорость поезда на следующем шаге для выбранного управления;
- г) проверяем нахождение параметров движения в зоне допустимых значений;
- д) принимаем решение о записи значения в таблицу возможных состояний;
- е) переходим на следующее управление и повторяем пункты а)-д), если все управления рассмотрены, то переходим на следующий шаг по координате и используем, как начальные условия точки, рассчитанные на предыдущем шаге (рисунок 1.3).

После определения всех возможных состояний необходимо найти возможные траектории, которые удовлетворяют критерию оптимальности без применения ограничивающих условий. Такой подход целесообразен в случае изменения времени хода.

На этапе выбора траектории, удовлетворяющей условиям движения, происходит перебор всех возможных траекторий и выбираются подходящие. Из них в свою очередь выбирается единственная в соответствии с критерием оптимизации.

Таким образом, полностью описаны все шаги укрупненного алгоритма динамического программирования, но пока осталось не выясненным, как выбирать величину шага по координате, как осуществляется переход от таблицы возможных состояний к таблице возможных траекторий, как учитывать эквивалентные состояния и прочее.

Определение возможных управлений производится для каждой предыдущей точки и зависит от состояния в этой точке. Это операция выполняется для тех случаев, когда управления могут быть ограничены, например, для электровозов постоянного тока существует ограничение по току двигателя и для перехода к высоким напряжениям требуется увеличение скорости (рисунок 1.3).

Расчет скорости на данном шаге дискретизации для выбранного управления производится методом Рунге-Кутты-Мерсона или Рунге-Кутты 4-го порядка,

причем шаг метода требуется выбрать меньшим шага дискретизации динамического программирования. Малый шаг позволит посчитать значение скорости более точно, чем в случае большого шага. Уменьшение шага несколько усложняет расчет, но не настолько, чтобы отказываться от уменьшения хотя бы методической погрешности, причем эта погрешность будет достаточно существенной, так как она интегрируется по всей длине расчета. Дискретизация системы уже вносит погрешность, причем эта погрешность будет зависеть от величины шага дискретизации по координате и по скорости. Если величина шага дискретизации по скорости может выбираться, исходя из точности конечного определения скорости и количества памяти вычислительной машины. То величина шага дискретизации по координате в значительной степени определяется физикой процессов переключения в системе управления электровозом.

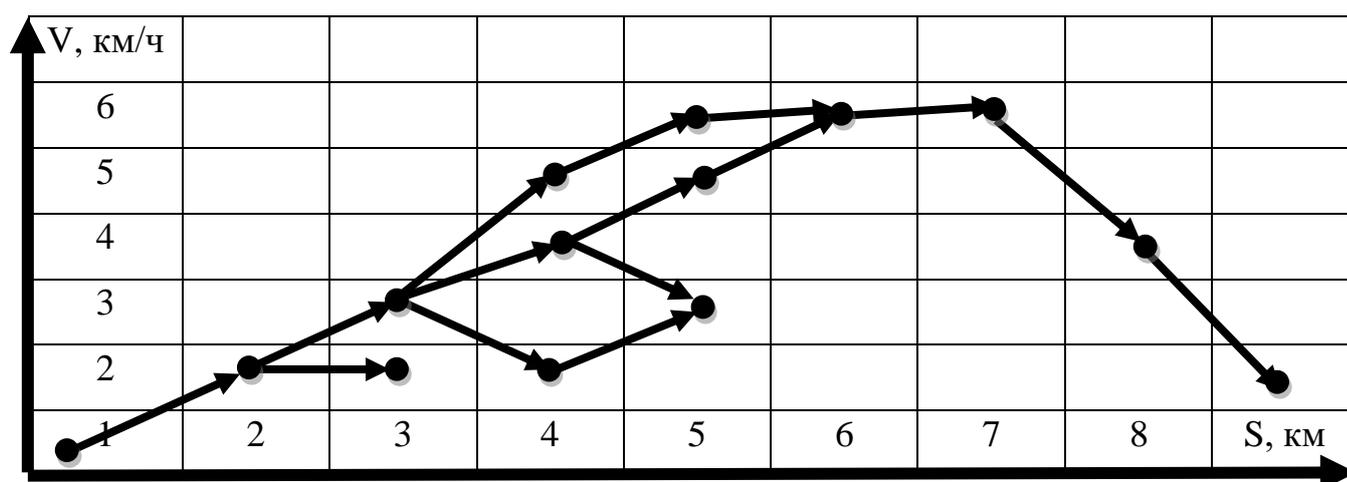


Рисунок 1.3 – Пример заполнения таблицы возможных состояний

Шаг для снижения погрешности расчетов целесообразно выбрать наименьшим, но это может быть нецелесообразным по той самой причине, что смена режимов занимает существенное время, порядка 1 секунды. Поэтому можно отталкиваться от этого времени и усреднить его по всему диапазону скоростей или ввести поддиапазоны с разным шагом дискретизации, что позволит точнее приблизиться к процессам, протекающим при малых скоростях: троганию, точной остановке. Например, для диапазона скоростей от 1 до 40 м/с в среднем шаг

дискретизации равен 20 метрам, то есть достаточно малый шаг по отношению ко всей длине расчета, например, для 200000 м это всего 0,01 %.

Каждое вновь рассчитанное состояния требуется проверять на выполнение всех условий движения и в случае несоответствия это состояние не записывается. Если условия меняются уже после расчета, когда составлена таблица возможных состояний и возможных траекторий, то требуется провести проверку с учетом изменений и пересчитать таблицу возможных траекторий. Если говорить про перерасчет, то полный перерасчет вообще не требуется производить, при изменении условий, влияющих на начальные характеристики, требуется частичный пересчет таблицы возможных состояний и полный пересчет таблицы возможных траекторий. Время пересчета таблицы возможных траекторий значительно меньше относительно времени пересчета таблиц возможных состояний, так как не требуется производить расчеты, связанные с движением поезда.

Переход от таблицы состояний к таблице траекторий осуществляется достаточно просто. Для этого необходимо предусмотреть сохранение информации о том, какие состояния следуют друг за другом. Информация также сохраняется в некоторой таблице и позволяет учитывать эквивалентные скорости, то есть общие точки траекторий. Процесс сбора траекторий должен начинаться с конечной точки, так как ее состояние задано. Состояние начальной точки также задано, но сбор не рекомендуется с нее начинать из-за неопределенности в конечной точке, так как некоторые траектории будут заканчиваться ранее, чем это запланировано и сложность сборки траекторий увеличится. На основе информации о переходах между состояниями собираются их траектории. Для каждой собранной траектории необходима таблица режимов и времени хода, для того чтобы определить вектор режимов движения для траектории с заданным временем хода. Затем для выбранного множества траекторий выполняются тяговые расчеты с известными управлениями и определяются расходы энергии. Из множества расходов энергии выбирается наименьший по значению элемент.

Таким образом, для получения требуемого результата необходимо наличие пяти связанных между собой таблиц, совокупность которых и будет называться таблицей возможных состояний:

- таблица скорости;
- таблица режимов;
- таблица времен хода;
- таблица расхода энергии;
- таблица соответствия состояний.

Таблица состояний преобразуется в таблицу возможных траекторий, которая позволяет выбрать требуемый вектор режимов. После этого требуется пересчитать траекторию, то есть выполнить тяговый расчет с полученным вектором режимов, без учета дискретизации, то есть с шагом в 1 метр.

В итоге был разобран один из методов теории оптимального управления и получены рекомендации к его реализации. В алгоритме полностью используется принцип оптимальности Беллмана, из-за того, что требуется учесть время хода поезда. В дальнейшем, чтобы решить поставленную задачу (1.13) необходимо исследовать алгоритм на реализуемость и определить его применимость.

1.5 Выводы по разделу 1

1) Тяговые расчеты являются важным инструментом для решения практических задач железнодорожного транспорта. Эволюция методов тяговых расчетов проходила в направлении ускорения проведения вычислений и усложнения математической модели поезда. На современном этапе наиболее предпочтительным является численный метод, позволяющий реализовать автоматизированный тяговый расчет.

2) Численный метод тяговых расчетов основывается на использовании методов интегрирования основного уравнения движения поезда. Так как при выполнении тягового расчета требуется многократно повторять процесс

интегрирования основного уравнения движения, то от выбора метода интегрирования зависит скорость и точность выполнения расчета. Наибольшее распространения получил метод Эйлера за простоту и приемлемую точность. Но на современном этапе развития вычислительной техники разница между методом Эйлера и более точными методами Рунге-Кутты и производных методов по времени не существенна, а по точности существенна.

3) При выполнении тягового расчета основной вопрос заключается в выборе режима движения поезда. Существует две типовые ситуации при движении поезда: следование по расписанию, нагон. В первом случае требуется выполнять время хода по участку пути, во втором случае следует двигаться как можно быстрее. Вторая задача уже сведена к экстремальной, а первую можно свести к экстремальной за счет требования минимизации затрат на движение. Рассматривая, для примера, электрическую тягу была сформулирована оптимальная задача расхода электроэнергии, которая может быть решена методами оптимизации.

4) Оптимальный тяговый расчет является частным случаем тяговых расчетов. Без оптимального тягового расчета невозможно оптимальное управление поездом. Оптимальный тяговый расчет является необходимым, но недостаточным условием для построения системы энергооптимального ведения поезда. Оптимальный тяговый расчет делается для конкретных заранее известных условий. Фактически учитываются факторы, которые могут быть спрогнозированы до поездки. Во время поездки происходят события, заранее сложно прогнозируемые или вообще случайные, зависимости величин меняются по несколько иным законам, в отличие от заданных.

5) Наиболее предпочтительным методом оптимизации с учетом вышесказанного является метод Белмана или динамическое программирование. Это метод направленного перебора, исключаящий полный перебор вариантов и может быть эффективно реализован на современной вычислительной технике без существенных ограничений в точности расчетов.

2 АЛГОРИТМ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ОПТИМАЛЬНОСТИ БЕЛЛМАНА ДЛЯ ТЯГОВОГО РАСЧЕТА

2.1 Математическое моделирование процесса движения поезда

В первом разделе было сказано достаточно о подходах к решению задачи энергооптимального тягового расчета движения поезда и известных методах ее решения. Одним из обязательных требований классических методов является требование построения математической модели поезда. От степени детализации математической модели поезда и среды, в которой происходит движение, зависит качество управления, безопасность движения, требуемая производительность системы автоведения и прочее.

Математическое моделирование является основой любого имитационного расчета. При создании математической модели необходимо стремиться к достижению компромисса между точностью и адекватностью получаемых результатов и временем моделирования. Фактически в основе моделирования лежит формализация происходящих процессов. Здесь можно столкнуться с тем, что при описании объекта количество процессов, которые требуется формализовать очень велико. Поэтому важно выделить группу основных процессов, сильно влияющих на состояние объекта.

Объектом исследования является грузовой поезд с локомотивом в голове. Для расчетов локомотивами выбраны электровозы постоянного тока ВЛ11. Необходимые параметры электровоза ВЛ11 сведены в таблицу 2.1.

Для моделирования электровоза необходимо знать следующие зависимости:

$F_k(v)$ – тяговая характеристика электровоза;

$I(v)$ – токовая характеристика электровоза;

$B(v)$ – тормозная характеристика электровоза;

$\tau_\infty(I_d)$ – тепловая характеристика обмотки тягового двигателя;

$\psi_k(v)$ – расчетный коэффициент сцепления;

$\psi_p(v)$ – коэффициент сцепления при рекуперативном торможении;

$w'_0(v)$ – основное удельное сопротивление движению под током;

$w_x(v)$ – основное удельное сопротивление движению без тока;

Таблица 2.1 – Параметры электровоза ВЛ11

Параметры электровоза	Значения
Сцепной вес, т	184
Длина, м	33
Число осей	8
Число ходовых позиций	10
Расчетная скорость, км/ч	47,1
Расчетная сила тяги, кН	451,5
Конструкционная скорость, км/ч	100
Тип ТЭД	ТЛ2К1
Расчетный режим	11
Сила тяги при трогании с места, кН	620
Допускаемое превышение температуры обмотки ТЭД,	120
Затраты энергии на вспомогательные машины,	2,08
Номинальное напряжение на токоприемнике, В	3000

Указанные электровозы имеют несколько тяговых характеристик, а именно 15 (рассматриваем только ходовые позиции). Для простоты предлагается номеровать характеристики и тяговые и токовые цифрами от 1 до 15 и вместо указания серийное соединение полное поле говорить о первом режиме или характеристике. В дальнейшем следует придерживаться этого правила, а здесь сопоставим каждой характеристике или режиму свой номер:

- 1) последовательное соединение полное возбуждение.
- 2) последовательное соединение ослабленное возбуждение первая ступень.
- 3) последовательное соединение ослабленное возбуждение вторая ступень.
- 4) последовательное соединение ослабленное возбуждение третья ступень.

- 5) последовательное соединение ослабленное возбуждение четвертая ступень.
- 6) последовательно – параллельное соединение полное возбуждение.
- 7) последовательно – параллельное соединение ослабленное возбуждение первая ступень.
- 8) последовательно – параллельное соединение ослабленное возбуждение вторая ступень.
- 9) последовательно – параллельное соединение ослабленное возбуждение третья ступень.
- 10) последовательно – параллельное соединение ослабленное возбуждение четвертая ступень.
- 11) параллельное соединение полное возбуждение.
- 12) параллельное соединение ослабленное возбуждение первая ступень.
- 13) параллельное соединение ослабленное возбуждение вторая ступень.
- 14) параллельное соединение ослабленное возбуждение третья ступень.
- 15) параллельное соединение ослабленное возбуждение четвертая ступень.

В режиме электрического торможения будет пользоваться для краткости аналогичное сопоставление.

Тяговые характеристики не могут быть получены в виде аналитических зависимостей и представлены графически в [46]. Для того чтобы получить аналитическую форму тяговых характеристик необходимо воспользоваться методами аппроксимации. Для этого случая существует достаточно много методов [31] и наиболее предпочтительным с точки зрения точности и вычислительной эффективности является метод кусочно–нелинейной интерполяции или интерполяции кубическим сплайном. Аналогичным образом получается аналитическое выражение токовых характеристик, тормозных характеристик и тепловой характеристике.

Аналитическое выражение расчетного значения коэффициента сцепления при тяге и рекуперации соответственно берется из [46]:

$$\psi_{\kappa}(v) = 2,75 + \frac{29,4}{50 + 20v} - 0,0069v, \quad (2.1)$$

$$\psi_{\rho}(v) = 0,8\psi_{\kappa}(v), \quad (2.2)$$

где v – скорость, км/ч.

Аналитические выражения для основного удельного сопротивления движению под током и без тока берется из [46]:

для звеньевого пути:

$$w'_0(v) = 18,6 + 0,1v + 0,0029v^2, \quad (2.3)$$

$$w'_x(v) = 23,5 + 0,11v + 0,0035v^2, \quad (2.4)$$

для бесстыкового пути:

$$w'_0(v) = 18,6 + 0,08v + 0,0024v^2, \quad (2.5)$$

$$w'_x(v) = 23,5 + 0,09v + 0,0034v^2. \quad (2.6)$$

Расчеты будут выполняться для двух типов пути, поэтому указаны формулы для звеньевого пути и для бесстыкового. Расчетный коэффициент сцепления выступает в роли ограничителя, т.е. не будут рассматриваться режимы, при которых сила тяги может быть больше расчетного коэффициента сцепления. Аналогичный подход используется для режима электрического торможения.

Сложность построения адекватной математической модели состоит в случайной природе многих происходящих процессов при движении электровоза, например, коэффициент сцепления меняется случайно, напряжение на токоприемнике меняется случайно и т.д. Поэтому многие возможные ситуации не предусмотреть, если не воспользоваться полным перебором. При значительном количестве одновременно происходящих процессов и областей определения их аргументов можно сделать вывод, что полный перебор всех вариантов требует огромных вычислительных затрат. Отсюда вытекает невозможность достижения полной адекватности модели, но это от нее по большому счету и не требуется. Тем не менее при использовании статистически полученных характеристик модели

необходимо обращать на это внимание при использовании результатов моделирования.

Вторым важным элементом поезда является состав, представляющий собой совокупность из сцепленных друг с другом вагонов. Для формирования поездов используются вагоны, отличающиеся различными характеристиками и параметрами: число осей, длина, тип тормозных колодок, загрузка и т.д. При расчетах будут использованы модели нескольких типов грузовых вагонов: четырехосного, шестиосного, восьмиосного, параметры которых указаны в ПТР. Очевидно, это слишком условное деление, так как четырехосные вагоны могут быть платформами или полувагонами, поэтому сведения о вагонах вносятся в таблицу 2.2.

Так как состав представляет собой полезную нагрузку на тяговый элемент, в нашем случае на электровоз, то для него нужно знать только одну характеристику, а именно основное удельное сопротивление движению вагона. Вес состава находится путем суммирования весов всех вагонов, который в свою очередь находится следующим образом:

$$q_B = q_{ВП} + q_{Гр}, \quad (2.7)$$

где q_B – вес вагона, т;

$q_{ВП}$ – вес вагона в порожнем состоянии, т;

$q_{Гр}$ – вес груза, т.

Формула (2.6) позволяет учесть различную загрузку вагонов, что имеет значение для дискретных моделей поезда [53], а такая модель и будет использована при дальнейших расчетах.

Состав используется для создания основной тормозной силы при пневматическом торможении, поэтому необходимо знать тип тормозных колодок вагонов и рабочий режим воздухораспределителя. От типа колодок будет зависеть коэффициент трения между колодкой и бандажом, режим работы воздухораспределителя определяет силу нажатия колодки на бандаж.

Таблица 2.2 – Параметры вагонов

Тип вагона	Длина, м	Вес тары, т	Вес груженого вагона, т
Четырехосные			
Полувагоны	14	26	85
Платформы	14	26	85
Крытые	15	46	84
Для перевозки скота	18	25	55
Хоппер-дозаторы	15	23	83
Вагоны-думпкары	12	31	82
Для перевозки автомобилей	18	26	45
Для перевозки битума	15	39	80
Для перевозки окатышей	15	24	84
Для перевозки зерна	15	22	84
Цистерны 60 м ³	12	26	84
Шестиосные			
Полувагоны	17	32	125
Цистерны	17	36	126
Вагоны-думпкары	17	48	126
Восьмиосные			
Полувагоны	20	45	170
Цистерны	21	48	168
Вагоны-думпкары	20	68	168

Электровоз также принимает участие в процессе пневматического торможения и такие же данные нужны для определения его тормозной силы:

$$B_m(v) = 1000\phi_{кр} \sum K_p, \quad (2.8)$$

где $\phi_{кр}$ – расчетный коэффициент трения колодки о бандаж;

K_p – расчетная сила нажатия колодки на бандаж, кН.

Расчетный коэффициент трения для стандартных чугунных колодок и колодок с повышенным содержанием фосфора:

$$\phi_{кр} = 0,27 \frac{v + 100}{5v + 100}, \quad (2.9)$$

для композиционных колодок:

$$\phi_{кр} = 0,36 \frac{v + 150}{2v + 150}. \quad (2.10)$$

Расчетная сила нажатия колодки на бандаж для стандартных чугунных колодок:

$$K_p = 2,22K \frac{16K + 100}{80K + 100}, \quad (2.11)$$

для чугунных колодок с повышенным содержанием фосфора:

$$K_p = 1,85K \frac{16K + 100}{52K + 100}, \quad (2.12)$$

для композиционных колодок:

$$K_p = 1,22K \frac{K + 20}{4K + 20}. \quad (2.13)$$

Для вагонов в [46] даны расчетные силы нажатия колодок при порожнем, среднем и груженом состояниях, для электровозов в порожнем и груженом.

В процессе движения электровоз и состав взаимодействуют между собой, что отражается на изменениях продольных усилий по длине поезда. Поезд

представляет собой набор масс, соединенных упруго-вязкими связями. Для моделирования междувагонных связей воспользуемся формулой [53]:

$$S_i = \begin{cases} \mathcal{J}_n(y_i - \Gamma_1), & \Gamma_1 < |y_i| < \lambda + \Gamma_1; \\ \mathcal{J}_k(y_i - \lambda - \Gamma_1) + S_{in} + \beta \dot{y}_i, & |y_i| > \lambda + \Gamma_1; \\ \mathcal{J}_p(y_i - \Gamma_1), & \Gamma_1 < |y_i| < \lambda + \Gamma_1; \end{cases} \quad (2.14)$$

где \mathcal{J}_n , \mathcal{J}_p – жесткости междувагонной связи соответственно при нагрузке и разгрузке;

\mathcal{J}_k – жесткость конструкции вагона;

S_{in} – усилие, при котором ход поглощающего аппарата при нагрузке исчерпывается;

Γ_1 – значение зазоров в междувагонном соединении;

λ – суммарное значение полного сжатия двух последовательно соединенных поглощающих аппаратов;

β – коэффициент вязкого сопротивления, учитывающий демпфирующие свойства груза и конструкцию вагона;

y_i – относительное перемещение вагона.

Для среднесетевых условий расчетные параметры в формуле (2.14) должны быть приняты следующими: $\mathcal{J}_n = 2600 \frac{\text{тс}}{\text{м}}$, $\mathcal{J}_p = 520 \frac{\text{тс}}{\text{м}}$, $\mathcal{J}_k = 8500 \frac{\text{тс}}{\text{м}}$, $\beta = 50 \frac{\text{тс}\cdot\text{с}}{\text{м}}$, $\Gamma_1 = 50$ мм, $S_{in} = 200$ тс, $\lambda = 150$ мм [53].

Текущая координата вагона с номером i в системе z будет:

$$z_i = L_i + x_i, \quad (2.15)$$

где L_i – координата центра масс вагона с номером i в неподвижной системе координат;

x_i – перемещение центра вагона с номером i относительно его положения в статически равновесном состоянии.

Для определения продольных сил в поезде решают систему нелинейных дифференциальных уравнение второго порядка, описывающих движение как

системы дискретных масс в режиме тяги, имеющих между собой связи с заданными характеристиками:

$$\left. \begin{aligned} m_{\text{л}} \ddot{x}_{\text{л}} &= -S_{\text{л}}(x_{\text{л}} - x_1) - S_{\text{ал}}(\dot{x}_{\text{л}} - \dot{x}_1) - F(\dot{x}_{\text{л}}, t) - \Pi_{\text{л}}(z_{\text{л}}) + W_{\text{л}}[\dot{x}_{\text{л}}]; \\ m_1 \ddot{x}_1 &= S_{\text{л}}(x_{\text{л}} - x_1) + S_{\text{ал}}(\dot{x}_{\text{л}} - \dot{x}_1) - S_1(x_1 - x_2) - S_{\text{ал}}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - \Pi_1(z_1) + W_1[\dot{x}_1]; \\ m_i \ddot{x}_i &= S_{i-1}(x_{i-1} - x_i) + S_{\text{а}i}(\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i) - S_i(x_i - x_{i+1}) - S_{\text{а}i}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1}) - \Pi_i(z_i) + W_i[\dot{x}_i]; \\ m_N \ddot{x}_N &= S_{N-1}(x_{N-1} - x_N) + S_{\text{а}N}(\dot{x}_{N-1} - \dot{x}_N) - S_N(x_N - x_{N+1}) - S_{\text{а}N}(\dot{x}_N - \dot{x}_{N+1}) - \Pi_N(z_N) + W_N[\dot{x}_N]; \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

где $m_{\text{л}}$ – масса локомотива;

m_i – масса вагона с номером i ;

$x_{\text{л}}$ – перемещение локомотива относительно его центра масс в положении статического равновесия;

$S_{\text{л}}(x_{\text{л}} - x_1)$ – зависимость силы от деформации поглощающих аппаратов локомотива и первого вагона;

$S_i(x_i - x_{i+1})$ – зависимость силы от деформации двух последовательно соединенных междувагонных аппаратов;

$S_{\text{ал}}(\dot{x}_{\text{л}} - \dot{x}_1)$ – зависимость силы от относительной скорости локомотива и первого вагона;

$S_{\text{а}i}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1})$ – зависимость силы от относительной скорости двух последовательно соединенных вагонов;

$F(\dot{x}_{\text{л}}, t)$ – сила тяги локомотива;

$\Pi_i(z_i)$ – добавочная сила от уклона;

$W_i[\dot{x}_i]$ – сила внешнего сопротивления движению.

Для режима электрического торможения:

$$\left. \begin{aligned}
 m_{\text{л}} \ddot{x}_{\text{л}} &= -S_{\text{л}}(x_{\text{л}} - x_1) - S_{\text{ал}}(\dot{x}_{\text{л}} - \dot{x}_1) + B_{\text{эл}}(\dot{x}_{\text{л}}, t) - \Pi_{\text{л}}(z_{\text{л}}) + W_{\text{л}}[\dot{x}_{\text{л}}]; \\
 m_1 \ddot{x}_1 &= S_{\text{л}}(x_{\text{л}} - x_1) + S_{\text{ал}}(\dot{x}_{\text{л}} - \dot{x}_1) - S_1(x_1 - x_2) - S_{\text{ал}}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - \Pi_1(z_1) + W_1[\dot{x}_1]; \\
 m_i \ddot{x}_i &= S_{i-1}(x_{i-1} - x_i) + S_{\text{а}i}(\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i) - S_i(x_i - x_{i+1}) - S_{\text{а}i}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1}) - \Pi_i(z_i) + W_i[\dot{x}_i]; \\
 m_N \ddot{x}_N &= S_{N-1}(x_{N-1} - x_N) + S_{\text{а}N}(\dot{x}_{N-1} - \dot{x}_N) - S_N(x_N - x_{N+1}) - S_{\text{а}N}(\dot{x}_N - \dot{x}_{N+1}) - \Pi_N(z_N) + W_N[\dot{x}_N];
 \end{aligned} \right\} (2.17)$$

где $B_{\text{эл}}(\dot{x}_{\text{л}}, t)$ – тормозная сила локомотива при электрическом торможении.

Для режима пневматического торможения:

$$\left. \begin{aligned}
 m_{\text{л}} \ddot{x}_{\text{л}} &= -S_{\text{л}}(x_{\text{л}} - x_1) - S_{\text{ал}}(\dot{x}_{\text{л}} - \dot{x}_1) + B_{\text{л}}(\dot{x}_{\text{л}}, t) - \Pi_{\text{л}}(z_{\text{л}}) + W_{\text{л}}[\dot{x}_{\text{л}}]; \\
 m_1 \ddot{x}_1 &= S_{\text{л}}(x_{\text{л}} - x_1) + S_{\text{ал}}(\dot{x}_{\text{л}} - \dot{x}_1) - S_1(x_1 - x_2) - S_{\text{ал}}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - \Pi_1(z_1) + W_1[\dot{x}_1] + B_1(\dot{x}_1, t_1); \\
 m_i \ddot{x}_i &= S_{i-1}(x_{i-1} - x_i) + S_{\text{а}i}(\dot{x}_{i-1} - \dot{x}_i) - S_i(x_i - x_{i+1}) - S_{\text{а}i}(\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1}) - \Pi_i(z_i) + W_i[\dot{x}_i] + B_i(\dot{x}_i, t_i); \\
 m_N \ddot{x}_N &= S_{N-1}(x_{N-1} - x_N) + S_{\text{а}N}(\dot{x}_{N-1} - \dot{x}_N) - S_N(x_N - x_{N+1}) - S_{\text{а}N}(\dot{x}_N - \dot{x}_{N+1}) - \Pi_N(z_N) + \\
 &+ W_N[\dot{x}_N] + B_N(\dot{x}_N, t_N);
 \end{aligned} \right\} (2.18)$$

где $B_{\text{л}}(\dot{x}_{\text{л}}, t)$ – тормозная сила локомотива при пневматическом торможении;

$B_i(\dot{x}_i, t_i)$ – зависимость тормозной силы вагона с номером i от абсолютной скорости и времени t .

В режиме выбега невозможно оказывать воздействий на продольную динамику поезда, поэтому в этом режиме определение сил по длине поезда не выполняется. Продольная динамика при использовании критерия минимума расхода энергии выступает в роли ограничивающего фактора для множества возможных режимов на данном шаге. Если при расчете для данного режима окажется, что продольные силы, возникающие в поезде, превышают допустимые, то такой режим не может быть применен на текущем шаге. Решение систем дифференциальных уравнений производится только путем численного решения методом Рунге-Кутты четвертого порядка.

Важным фактором, определяющим состояние поезда, является величина питающего напряжения, которое в процессе движения изменяется. Напряжение на токоприемнике может быть представлено [57]:

$$U_{\text{кc}} = U_{\phi} - \Delta U_c - \Delta U_p, \quad (2.19)$$

где U_{ϕ} – напряжение на фидере тяговой подстанции, В;

ΔU_c – падение напряжения в контактной сети от сопутствующих поездов, В;

ΔU_p – падение напряжения в контактной сети от расчетного поезда, В.

Последняя величина может быть получена в виде:

$$\Delta U_p = I_{\text{э}} z_{\text{кc}}, \quad (2.20)$$

где $I_{\text{э}}$ – ток электровоза, А;

$z_{\text{кc}}$ – полное сопротивление контактной сети и рельсов между электровозом и подстанциями, Ом.

При двусторонней схеме питания:

$$z_{\text{кc}} = \frac{(s - s_{\text{пс}}^k)(s_{\text{пс}}^{k+1} - s)}{s_{\text{пс}}^{k+1} - s_{\text{пс}}^k} \rho, \quad (2.21)$$

где $s_{\text{пс}}^k$ – координата k -ой подстанции, км;

s – координата поезда, км;

ρ – полное сопротивление 1 км контактной сети и рельсов, Ом/км.

Для сетей постоянного тока предполагалось $\rho = 0,043$ Ом/км (два контактных провода МФ-1500, несущий трос М-120, рельсы Р-65), $U_{\phi} = 3300$ В. Падение от сопутствующих поездов не будет учитываться, так как это требует моделирования поездной обстановки при движении конкретного поезда. При исследовании характерных поездных ситуаций, например, при следовании поезда по удалению, будет использоваться указанная методика для каждого поезда. Координаты подстанций берутся из перечня объектов устройств электроснабжения службы электроснабжения Московской железной дороги. Изменение потенциала

контактной сети приводит к изменению тяговых характеристик, что накладывает дополнительные ограничения на область определения управления, т.е. является ограничивающим фактором.

Ранее было указано определяющее значение показаний напольных светофоров и автоматической локомотивной сигнализации непрерывного типа (АЛСН). Очевидно, эти показания зависят от большого числа факторов и в общем случае не могут быть известны. Но не брать сигналы в расчет нельзя. Тем более существуют строго определенные поездные ситуации, например, следование по удалению, когда смена сигналов определяется впереди идущим поездом, что значительно облегчает задачу [42].

2.2 Разработка программы выполнения тяговых расчетов с применением метода динамического программирования для выбора режима движения поезда

После создания математической модели поезда следует перейти к реализации алгоритма метода динамического программирования [54] в виде эффективной численной реализации. Это позволит исследовать процесс решения задачи оптимального тягового расчета и проверить работу алгоритма на практике. При создании алгоритма невозможно учесть многих технических ограничений, поэтому важным шагом является создание работающей программы. На этапе разработки алгоритма сложно учесть его практическую реализуемость, подсчитать требуемое количество памяти, требуемую производительность, произвести оценки возможности его применения в реальном времени и т.д. Ответы на эти вопросы позволят подойти к решению задачи оптимального управления движением в постоянно меняющихся условиях.

Современные системы управления тяговым подвижным составом (ТПС) строятся на базе микропроцессорных устройств. К этим устройствам предъявляются достаточно строгие требования к работе при низких температурах и высокой влажности воздуха, в условиях влияния электромагнитных полей и

механических воздействиях [43, 52]. Тяжелые условия эксплуатации ТПС не позволяют использовать бытовые микропроцессоры, имеющие широкое распространение и высокую производительность. Однако, для экспериментальных целей логично использовать более распространенные аппаратные комплектующие, причем адаптация отлаженной программы займет меньше времени, чем создание ее с нуля для специализированного оборудования. Это объясняется отсутствием ошибок в программной реализации алгоритма. Для написания программы решения задачи оптимального тягового расчета поезда по методу Беллмана, предложенного в главе 1 использовался персональный компьютер на базе x86 совместимого ЦПУ и под управлением 64 битной версии операционной системы Microsoft Windows 10 Home Edition в среде Borland Delphi 10.3.2 Rio. В качестве тестового выступает персональный компьютер на базе мобильного процессора AMD Ryzen3-2200g с оперативной памятью DDR4-19200 объемом 12 Гб, жестким диском SSD NVMe объемом 256 Гб.

Необходимо отметить какие принципы были заложены при программировании: высокая производительность приложения, минимизация использования оперативной памяти, программирование, ориентированное на объекты, гибкость настройки, удобный ввод начальной информации, информативный вывод результатов расчета. Обычно требования высокой производительности и уменьшения объема использованной памяти исключают друг друга. Но здесь имеется в виду оптимизация использования памяти, то есть исключение неоправданного ее использования. Необходимо следить за максимальными требованиями расчетной программы к аппаратному обеспечению компьютера. Важность этого требования покажем на примере. Например, имеется типовой участок железной дороги длиной 200000 м, по которому допускается движение поезда с максимальной скоростью 80 км/ч. На этом участке эксплуатируются электровозы постоянного тока с 15 ходовыми позициями, 15 позициями электрического торможения, 4 ступени пневматического торможения, 4 ступени электропневматического торможения, то есть 39 управлений. Дискретизация по координате производится с шагом 20 метров, по скорости с

шагом 0,1 км/ч, эквивалентные скорости не учитываются, расчеты все ведутся в режиме одинарной точности, то есть таблицы состоят из элементов по 4 байта. Пренебрегая зависимостью максимального числа управлений от параметров движения, получаем таблицу скоростей величиной 10000x800, объем таблицы $8000000 \times 4 = 32000000$ байт. В соответствии с алгоритмом может потребоваться сохранить таблицу режимов, энергий, времени и вспомогательную, то есть $32000000 \times 5 = 160000000$ байт. Эта цифра достаточно мала по сравнению с объемом оперативной памяти, выделяемой на приложение. Если учитывать эквивалентные скорости, то практически все сильно меняется. Таблица скорости не меняется, таблицы режимов, времени, энергии должны быть изменены, то есть увеличены в размерах на количество эквивалентных скоростей. Допустим, число эквивалентных скоростей равно 20 и объем таблиц сразу увеличивается до 3,2 Гб. Также для программы требуется сохранять в памяти траектории в процессе сборки. С учетом принципа Беллмана число таких траекторий значительно меньше, чем в случае полного перебора, однако для ограничения количества траекторий требуется вводить допустимое отклонение времени хода поезда. Каждая траектория будет занимать объем памяти в 40000 байт для заданных условий. Поэтому исходя из имеющегося объема памяти следует ограничивать количество возможных траекторий или увеличивать допустимое отклонение по времени.

Этапы работ для реализации алгоритма динамического программирования:

- создание интерфейса для ввода начальной информации;
- создание базы данных для хранения результатов;
- создание базы данных для хранения начальной информации (характеристик вагонов и локомотивов, профиля пути и т.д.);
- программирование математической модели поезда;
- создание интерфейса для ввода настроек;
- программирование алгоритма;
- создание режима проверки полученных результатов;
- создание интерфейса вывода результатов.

Ввод начальной информации является важным этапом проектирования системы, так как пользователь должен вводить как можно меньше информации. Автоматическая система, которая требует сложной и долгой настройки, не будет удобна при использовании, поэтому при вводе информации необходимо придерживаться следующих основных принципов:

- исключить избыточность вводимой информации;
- обеспечить полноту ввода информации;
- обеспечить автоматический ввод максимального количества информации;
- обеспечить проверку введенной информации.

Последний пункт является наиболее сложным, так как некоторая информация о поезде существует только у машиниста или отсутствует в электронном виде. Например, достаточно сложно определить автоматически количество вагонов, массу поезда, составность поезда и прочее. В этом случае существует зависимость от человеческого фактора, который призвана исключить автоматическая система, а это значит, что задача не будет решена правильно, хотя все остальное будет функционировать верно. Есть два выхода из данной ситуации: при движении производить проверку на основе автоматически полученной информации и рабочей информации, автоматизировать ввод информации о составе. В нашем случае ошибка практически исключена, но, принимая во внимание вышеизложенное, можно сделать вывод о целесообразности включения проверки введенных данных о составе.

Чтобы исключить избыточность вводимой информации и определить, какая информация может быть введена вручную, требуется найти необходимый объем начальной информации. На начальном этапе расчета необходимо получить информацию:

- о пути: профиль, длина, кривые участки пути, тип пути (бесстыковой, звеньевой);
- о локомотиве: тип локомотива, число возможных управлений в тяге, число возможных управлений при электрическом и пневматическом торможении.

- о составе: количество вагонов, тип вагонов, масса вагонов, число тормозных осей, наличие электропневматического тормоза (ЭПТ), тип фрикционных аппаратов;

- о метеорологических условиях: боковой ветер, температура воздуха, атмосферное давление.

- об эксплуатационных условиях: места ограничения скорости (постоянные и временные), время хода или расписание движения (только для остановочных пунктов), расположение тяговых подстанций, координаты блок-участков на перегоне и рельсовых секций на станции (возможно только при наличии информации о маршруте приема на станцию или проследования станции).

Приведенный перечень вводимой информации не позволяет произвести расчет, но является необходимым и достаточным для получения всего требуемого объема начальных данных. Для организации, хранения и быстрого поиска используется реляционная база данных. Начальную информацию можно также назвать опорной, то есть такой, на которую требуется опираться при расчете до поездки. Это связано с тем, что многие характеристики локомотива и состава требуется корректировать в процессе поездки в связи с их разбросом. Например, тяговые характеристики для одного типа локомотивов являются универсальными, то есть применимы для каждого конкретного локомотива этого множества. В связи с этим их использование для данного локомотива требует дополнительного уточнения.

Реализация базы данных хранения результатов является вспомогательной операцией и обусловлена стремлением к удобной форме хранения и поиска информации, а также является важным коммуникационным и агрегирующим звеном в задаче оперативного нормирования энергозатрат на тягу поездов. Этот пункт важен для дальнейшего анализа расчетов и создания библиотеки поездок. Библиотека поездок позволит выбирать уже готовые решения, причем время поиска становится важным фактором. Современные реляционные базы данных позволяют осуществлять поиск за секунды (зависит от объема и сложности базы

данных, а также от особенностей аппаратного обеспечения) для достаточно большого объема данных.

Программирование математической модели поезда, описанной в пункте 2.1, сводится к записи формальных выражений в виде понятном машине и преобразования аналитических выражений в цифровой форме. При программировании математической модели поезда были использованы некоторые правила. Модель создавалась в виде модулей: профиль, локомотив, состав, условия движения и т.д. Для описания подвижного состава строилась объектная иерархическая модель: подвижной состав, локомотив, состав. Объект поезд был выделен особо, потому что является интегральным. Объектно-ориентированный подход оправдан с точки зрения прозрачности, гибкости реализации и позволяет легко дополнять математическую модель поезда. Реализация модели должна быть выполнена таким образом, чтобы проверить корректность ее программирования. Если требуется корректировать настройки модели или начальной информации в интерфейсе программы должны быть предусмотрены соответствующие элементы управления.

Реализация алгоритма является ключевым этапом создания программы, но не основным. Хотя целью создания программы на данном этапе является решение задачи энергооптимального движения поезда, было бы расточительно строить программу с жестким алгоритмом. Поэтому динамическое программирование выделено в отдельный модуль и оформлено в виде отдельного объекта. Так как в главе 1 был приведен общий алгоритм для метода Беллмана, то здесь приведем расширенный алгоритм для программной реализации и подробно опишем нюансы его реализации, принимая во внимание все те оговорки, которые были сделаны ранее в главе 1.

Формирование таблицы возможных состояний производится в несколько этапов:

- определение размеров таблицы;
- выбор режима расчета: непрерывный или с накоплением;
- расчет возможных состояний.

Начальной информацией для формирования таблицы возможных состояний является:

- шаг дискретизации по координате;
- шаг дискретизации по скорости;
- количество управлений;
- допустимая скорость, как функция координаты (вектор допустимой скорости);
- длина пути.

От размера таблицы возможных состояний зависит режим расчета. Если количество элементов не уместится в оперативной памяти, то следует производить расчет в несколько этапов с промежуточным сохранением, полученной информации, то есть с ее постепенным накоплением. В случае соответствия аппаратного обеспечения требованиям программного возможен расчет в непрерывном режиме. Скорость расчета с накоплением, исходя из общих соображений, ниже скорости непрерывного расчета, но здесь надо принять во внимание время расчета. Если время расчета велико по сравнению со временем сохранения информации (зависит от объема информации и аппаратного обеспечения), то время сохранения не влияет на скорость расчета существенно. Для выбора режима расчета требуется определить потребности в оперативной памяти.

Полный требуемый объем оперативной памяти для таблицы возможных состояний вычисляется по следующей формуле:

$$Q_{OP} = N_C \cdot q_{эс} + N_{ТС} \cdot (q_{эв} + q_{эр} + q_{этс} + q_{ээ}), \quad (2.22)$$

где $q_{эв}$ – объем элемента таблицы времени, байт;

$q_{эр}$ – объем элемента таблицы режимов, байт;

$q_{эс}$ – объем элемента таблицы скорости, байт;

$q_{ээ}$ – объем элемента таблицы энергозатрат, байт;

$q_{этс}$ – объем элемента таблицы соответствия состояний, байт;

$N_{ТС}$ – количество элементов таблицы соответствия состояний;

N_C – количество элементов таблицы скорости.

Количество элементов таблицы соответствия состояний находится по следующей формуле:

$$N_{TC} = \frac{S}{\Delta_s} \cdot \frac{v_{max}}{\Delta_v} \cdot M_U, \quad (2.23)$$

где S – длина пути, м;

Δ_s – величина шага по координате, м;

v_{max} – максимальная скорость движения, км/ч;

Δ_v – шаг по скорости, км/ч;

M_U – число управлений.

Здесь сделано допущение, не учитывающее зависимость количества управлений от скорости, которая имеет место при дискретном управлении тягой. При этом количество элементов в таблице будет максимальным.

Количество элементов таблицы режимов, времени и энергозатрат находится аналогично таблице соответствия состояний. Таблица возможных состояний представляет собой трехмерную таблицу, каждая ячейка которой представляет собой множество характеризующее движение поезда на текущем шаге расчета.

В (2.23) сделано допущение о том, что максимальная скорость движения является константой. Это совсем не так из-за существования ограничений скорости постоянных и временных. В связи с этим размер таблицы возможных состояний оказывается меньшим, поэтому следует ввести эквивалентную максимально допустимую скорость:

$$v_{maxэ} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_{di}, \quad (2.24)$$

где v_{di} – i – ое ограничения скорости, км/ч;

n – число ограничений скорости.

С учетом (2.24) перепишем (2.23):

$$N_{TC} = \frac{S}{\Delta_s} \cdot \frac{v_{maxэ}}{\Delta_v} \cdot N_U. \quad (2.25)$$

Для таблицы скорости количество элементов будет определено без учета совпадения состояний:

$$N_C = \frac{S}{\Delta_s} \cdot \frac{v_{maxэ}}{\Delta_v}. \quad (2.25)$$

Объем элемента таблицы зависит от использования типа массива, описывающего таблицу. Тип массива зависит от диапазона изменения величин, например, для описания управлений следует использовать байтовый тип ($q_{эп} = 1$ байт = 256 состояний), для времени следует использовать тип с плавающей точкой одинарной точности ($q_{эв} = 4$ байта) или двойной точности ($q_{эв} = 8$ байт), а для таблицы соответствия состояний можно использовать двухбайтовый тип ($q_{эсс} = 2$ байта = 65536), а для длинных участков четырехбайтовый. Для типичного тягового плеча в 200 000 метров, грузового поезда с 40 управлениями и эквивалентной максимально допустимой скоростью 70 км/ч рассчитаем требуемый объем оперативной памяти:

$$N_{BC} = 3 \cdot \frac{200000}{20} \cdot \frac{70}{0,1} \cdot 40 = 840 \cdot 10^6.$$

$$Q_{оп} = 280 \cdot 10^6 \cdot (4 + 1 + 2) = 1,96 \cdot 10^9 \text{ байт.}$$

Требуемый объем оперативной памяти является достаточно большим для 32-х битных (предельный уровень для 32-х битных систем – 3,5 Гб на одно приложение, при использовании 64-х битных систем это ограничение практически снимается), поэтому следует использовать только 64 битный вариант приложения.

Здесь важно отметить, что при увеличении количества управлений (например, при дискретизации управлений для современного тягового подвижного состава) требуемый объем оперативной памяти будет пропорционально возрастать.

Заполнение таблицы возможных состояний осуществляется согласно алгоритму динамического программирования и в соответствии с заданной математической моделью движения поезда. Фактически выполняются тяговые расчеты для каждого элемента таблицы на протяжении величины шага по координате. Для начала расчета следует задать начальные условия или начальное состояние: начальную скорость, начальное время, начальный режим движения. Заполнение таблиц скорости, режимов, времени хода, энергии и соответствия состояний выполняется одновременно. Таблица соответствия состояний не несет полезной информации о движении поезда, требуется для решения нескольких задач:

- сокращение процессорного времени на перерасчет при изменении критерия оптимизации;
- снижение нагрузки на ЦПУ на этапе сборки возможных траекторий.

К реализации этой таблицы предъявляются следующие требования:

- минимальный объем используемой памяти;
- высокая скорость извлечения информации.

Так как скорость расчета является приоритетом, а одновременно невозможно выполнить два указанных требования, то наиболее рационально снять первое требование. Для ускорения расчета требуется сохранять информацию о рассчитанных состояниях таким образом, чтобы каждый элемент таблицы соответствия был согласован с таблицей режимов, времен хода и энергозатрат, а его содержимое указывало на родительский элемент (ячейка на предыдущем шаге) относительно указываемого (рисунок 2.1).

Начальное значение хранится в ячейке [1,1]. На шаге 2 в ячейку, номер которой соответствует значению скорости, пишется номер ячейки, которая содержит начальную информацию для расчета этой скорости. Так как требуется сохранять информацию и о пересекающихся траекториях (эквивалентные

скорости), то предусмотрено третье измерение таблицы равное количеству управлений на данной скорости.

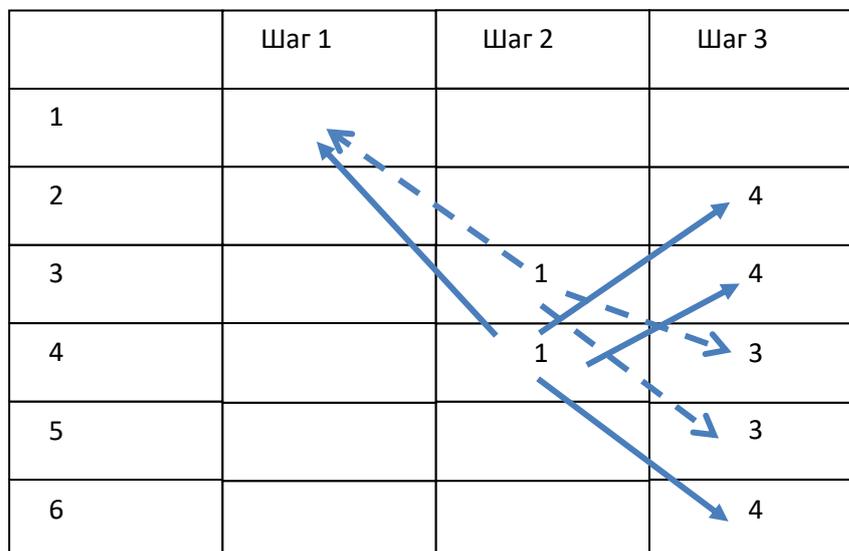


Рисунок 2.1 – Пример формирования таблицы соответствия состояний для двухмерного представления

В таблицу возможных состояний не записываются значения, в процессе расчета которых для данного шага выполняются условия:

$$\begin{aligned}
 v_k &> v_k^{max}, \\
 v_k &< 0, \\
 I_k &> I_{max}, \\
 \tau_k &> \tau_{max} \\
 S_k^{max} &> S_{max},
 \end{aligned}
 \tag{2.26}$$

где v_k – текущее значение скорости, км/ч;

I_k – текущее значение тока, А;

τ_k – текущее значение температуры элемента ТЭД, лимитирующего по температуре;

S_k^{max} – текущее значение максимальной продольной силы в поезде, кН;

v_k^{max} – максимальная допустимая скорость движения на текущем шаге, км/ч;

I_{max} – максимально допустимый ток, А;

τ_{max} – максимально допустимое превышение температуры обмотки ТЭД, °С;

S_{max} – максимально допустимое значение продольной силе в поезде, кН.

Расчет нового значения производится на каждом шаге интегрирования в пределах шага постоянства режима (шага варьирования по координате), поэтому для снижения сложности расчета проверка по вышеуказанным условиям (2.26) производится на каждом шаге интегрирования, кроме значений продольных сил, проверка которых выполняется при смене режима или при переходе на новый элемент профиля. Расчет нового значения для таблицы скорости производится в соответствии с (1.6), ток определяется в соответствии с зависимостью $I(v)$, режим задается априори, время определяется по формуле:

$$t_k = \frac{2\Delta s}{v_k + v_{k-1}}. \quad (2.27)$$

Значения тока являются вспомогательными и поэтому записываются во временные таблицы малого объема.

После того как заполнена таблица возможных состояний, можно приступить к поиску требуемой траектории движения. Критерии поиска траектории движения вводятся вместе с начальной информацией. Можно производить многокритериальный поиск, но ограничимся только энергооптимальной траекторией для заданного времени движения, что определено в (1.13). Для ввода времени движения можно использовать прямой ввод или техническую скорость. Формирование таблицы возможных траекторий производится на основе таблицы соответствия состояния. В таблице возможных траекторий сохраняются порядковые номера элементов таблиц возможных состояний в том порядке, в котором производился расчет.

Необходимо сформировать такие траектории, для которых выполняется (1.13), а остальные удалить. Выбор этих траекторий определяется по принципу Беллмана, то есть при пересечении траекторий на k -том шаге проверяется условие:

$$\begin{aligned}
 E_m &= \sum_{i=1}^k e_i^m, \\
 E_n &= \sum_{i=1}^k e_i^n, \\
 T_m &= \sum_{i=1}^k t_i^m, \\
 T_n &= \sum_{i=1}^k t_i^n, \\
 E_m &< E_n, \text{ при} \\
 |T_m - T_n| &= \Delta t,
 \end{aligned} \tag{2.28}$$

где e_i^m – энергозатраты на i -том шаге для m -той траектории, кВт·ч;

e_i^n – энергозатраты на i -том шаге для n -той траектории, кВт·ч;

E_m – интегральные энергозатраты m -той траектории, кВт·ч;

E_n – интегральные энергозатраты n -той траектории, кВт·ч;

t_i^m – затраты времени на i -том шаге для m -той траектории, ч;

t_i^n – затраты времени на i -том шаге для n -той траектории, ч;

T_m – интегральные временные затраты m -той траектории, ч;

T_n – интегральные временные затраты n -той траектории, ч;

Δt – мягкость по времени, ч.

Если условие (2.28) выполняется, то n -тая траектория исключается из таблицы возможных траекторий.

Метод Беллмана позволяет значительно сократить количество возможных траекторий. Также исключаются траектории, для которых время между режимами торможения менее времени отпуска.

На этапе выбора траектории соответствующей времени хода проверяется условие для каждой из возможных траекторий:

$$\sum_{i=1}^K t_i = T \pm \Delta t, \quad (2.29)$$

где Δt – мягкость по времени, ч;

K – количество шагов;

T – заданное время хода, ч.

Если не найдено ни одной траектории, удовлетворяющей условию (2.29), то требуется изменить мягкость по времени или время хода и вновь произвести поиск без полного пересчета. Мягкость по времени должна выбираться с учетом пропуска поездов. В текущей работе использовалась величина мягкости равная 180 секундам. Если отобрано несколько траекторий, то из них определяется лучшая по критерию наименьших энергозатрат, при совпадении равенстве энергозатрат с учетом следующих критериев:

$$\min(\tau_{max} - \tau_{kmax}), \quad (2.30)$$

где τ_{kmax} – максимальное значение перегрева ТЭД для k -ой траектории;

τ_{max} – максимальное допустимое значение перегрева для данного типа ТЭД;

$$\min(S_{max} - S_{kmax}), \quad (2.31)$$

где S_{kmax} – максимальное значение продольной силы в поезде для k -ой траектории;

S_{max} – максимальное допустимое значение продольной силы поезда.

Количество траекторий будет зависеть от количества условий, накладываемых на эти траектории, поэтому детализация модели движения поезда в этом случае позволит значительно снизить размер таблицы возможных траекторий, причем рост сложности программы от такого увеличения несильный из-за того, что условия проверяются для шага варьирования по координате, который больше шага интегрирования. Точный объем таблицы возможных траекторий сложно оценить без проведения расчета, но требуемый объем памяти на таблицу возможных траекторий не будет ограничивающим из-за дискретности

по скорости, что обеспечивает достаточное количество точек пересечения траекторий. По результатам расчета на участке длиной 10000 км количество возможных траекторий приблизительно равно 4500, для участка длиной 20000 км равно и том же шаге варьирования режима по координате приблизительно 9000. Если изменять величину шага варьирования по координате и не изменять длину участка, то объем таблицы возможных траекторий также будет изменяться линейно.

Изменение шага по скорости также приводит к линейному изменению количества траекторий.

2.3 Исследование программной реализации математической модели поезда на адекватность

Реализация программы является обязательным, но не заключительным этапом на пути к решению задачи энергооптимального ведения поезда в постоянно меняющихся условиях.

На выходе описанной в предыдущем пункте программы получаем вектор режимов движения – дискретную функцию по пути. Так как система поезд является изначально аналоговой, то функция управления должна быть также аналоговой по той причине, что поезд находится каждый момент времени в некотором состоянии, которому соответствует некоторое управление (выбег также считается отдельным управлением). Поэтому требуется перевести функцию управления в аналоговую форму, для этого используем экстраполяцию нулевого порядка (рисунок 2.2)

Какие концептуальные моменты были опущены при создании алгоритма применительно к задаче управления поездом в реальном времени, учет которых позволит применить полученную программу для управления поездом:

- расчет в режиме реального времени;
- ввод в программу информацию об условиях движения в реальном времени;

- корректировка математической модели (в частности, тяговых характеристик, сопротивления движению, токовых и прочее) в соответствии с полученной информацией в процессе управления;
- контроль введенных значений в систему, выявление случаев ввода некорректной информации;
- регистрация параметров движения и работы системы.

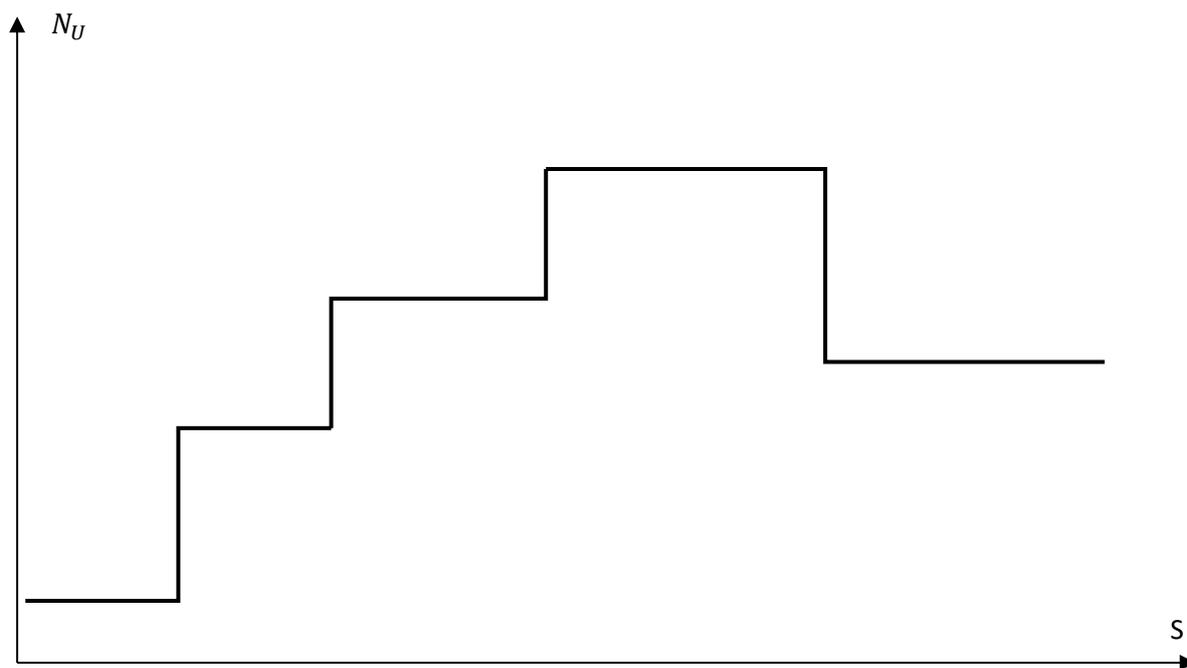


Рисунок 2.2 – Аналоговый вид функции управления

Под режимом реального времени понимается такой режим работы системы управления, при котором операция по управлению поездом должна производиться за строго определенный промежуток времени. В противном случае работа системы признается некорректной и производится перезагрузка системы. Это требование продиктовано физической природой процессов движения поезда. Если операции по управлению будут запаздывать или выполняться ранее предписанного момента времени (или координаты), то это повлияет не только на процесс управления (точность и адекватность), но и на безопасность движения.

Предполагаемая система управления, имеющая в основе описанную программу, также является дискретной системой, поэтому необходимо определить с каким временным шагом будет осуществляться операция по выбору управления

в данный момент. Это время зависит от отклика системы, например, при выборе первой ступени торможения ПТ произойдет задержка при выполнении команды, в основном на срабатывание пневматических вентилях и отработку переходного режима, что должно быть учтено в алгоритме. Также это время будет определяться точностью управления по координате, из-за того, что многие события в процессе движения обусловлены изменением координаты. При скорости 20 м/с запаздывание на переключение управления в 1 с составит 20 м по координате, что не является критичным. Но если будет выбрано большое время цикла работы системы, то есть вероятность получить запаздывание на выдачу решений о смене управления на величину этого запаздывания, что при больших скоростях не позволит адекватно управлять поездом или произойдет снижение качества управления. Чтобы выйти на точность управления в 1 метр, заложенную при расчетах требуется не только учитывать время срабатывания исполнительных устройств (обычно детерминированное), но и учитывать задержку по циклу работы устройства, которая определяется следующим образом, с учетом постоянства скорости в указанный момент:

$$t_{\text{ц}} = \frac{\Delta_s}{v(t)} = \frac{1}{v(t)}, \quad (2.32)$$

где $t_{\text{ц}}$ – время цикла, с;

$v(t)$ – скорость в данный момент, м/с;

Δ_s – погрешность по координате.

Чтобы минимизировать ошибку управления по координате, требуется минимизировать цикл работы для успешного переключения. Но, с другой стороны, следует найти компромисс между требуемой производительностью и точностью управления на больших скоростях с тем расчетом, что можно будет достигнуть требуемой точности событий (например, точной остановки) путем увеличения времени движения на низкой скорости. Поэтому управляют торможением таким образом, чтобы снизить скорость до 20 км/ч, а затем произвести остановку, причем снижение скорости должно выполнено за 400-500 метров до точки остановки [32,

33]. Представляется достаточно сложной задачей остановиться путем применения только первой ступени торможения с точностью до метра.

Сложность расчета не позволит снизить время цикла системы до десятков миллисекунд, то необходимо найти компромиссное значение цикла системы. Также не стоит забывать о том, что требуется совершать и вспомогательные расчеты, опрашивать состояние датчиков. Для некоторых процессов можно повышать частоту циклов, например, для определения скорости и пути, с целью более точного прогнозирования характеристик. Для выбора режима движения поезда целесообразно выбирать время цикла работы системы продолжительностью от 0,25 до 0,5 с. Это позволит выйти на требуемые точности по управлению при скоростях движения 2-4 м/с, а ошибка при больших скоростях пропорционально уменьшится, а значит произвести коррекцию этой ошибки будет проще.

Другим фактором, снижающим адекватность расчетов и качество управления, является погрешность измерения характеристик движения в реальном времени, например, при измерении величины тока, скорости, ускорения, пройденного пути и т.д. Рассмотрение методов измерения физических величин не является целью работы, но важно понимать какие ошибки допускаются датчиками. Если измерение пути производится с погрешностью в 1 метр за счет применения специализированной системы позиционирования [39, 41], то смена режимов движения будет происходить несогласованно с расчетом. Ошибка алгоритма по энергии будет накапливаться и приведет, в конечном счете, к перерасходу. Точность остановки также зависит от точности датчика пути и координаты места остановки, причем от точности остановки зависит безопасность движения на станции [40]. Практически система управления не имеет дела с реальным объектом, а только лишь с его моделью поезда. Чтобы оценить количественно величину ошибки, например, по скорости при торможении можно провести расчет на основании формул ПТР. Для расчета используются следующие начальные данные: пассажирский поезд, состоящий из 20 вагонов массой 1200 т, и грузовой поезд, состоящий из 50 вагонов массой 4200 т, останавливаются путем применения ступеней пневматического торможения с различными начальными скоростями

торможения, отличающимися на незначительную величину. Результаты расчетов сведены в таблицу 2.3. Из таблицы видно, что в результате расчетов путь будет значительно варьироваться, что в реальности вызовет еще больший разброс тормозного пути. Эти выводы подтверждаются точностными характеристиками системы автоматического управления торможением САУТ [1].

Рассмотрим процесс уточнения характеристик при движении поезда. В процессе ведения поезда приходится уточнять несколько характеристик движения в рабочем диапазоне значений: общее сопротивление движению, тяговые характеристики, токовые и прочее. Основное уравнение движения поезда для режима тяги:

$$a = \xi(f_k(v) - w_0(v) - i_3), \quad (2.33)$$

где $f_k(v)$ – удельная сила тяги с учетом составляющей сопротивления движения под током, Н/т;

$w_0(v)$ – основное сопротивление движению поезда с учетом действия факторов окружающей среды без тока, Н/т;

i_3 – эквивалентный уклон, Н/т.

Эквивалентный уклон определяется по следующей формуле:

$$i_3 = \sum_{n=1}^h \frac{m_n}{P + Q} i_n, \quad (2.34)$$

где m_n – вес поезда, приходящийся на n – й элемент профиля, т;

h - количество элементов профиля, на которых находится поезд;

i_n – величина уклона элемента профиля, на котором находится n – я часть поезда, Н/т.

Основное уравнение движения поезда для режима выбега:

$$a = -\xi(w_x(v) + i_3). \quad (2.35)$$

Если учесть тот факт, что параметры профиля пути измерены достаточно точно, а ускорение, скорость и путь измеряются с погрешностями, не превышающими 0,5 %, то указанные уравнения можно свести в систему и решить ее для дискретных значений скорости.

Таблица 2.3 – разброс тормозного пути при различных ошибках при измерении скорости

Тормозной путь, м		Начальная скорость движения, км/ч	Степень торможения
грузовой	пассажирский		
1181	1019	79	1
1214	1047	80	1
1247	1076	81	1
642	547	79	3
657	560	80	3
674	574	81	3
562	474	79	Полное служебное
576	486	80	Полное служебное
590	498	81	Полное служебное

Параметры профиля пути могут отличаться от заявленных (например, из-за ошибки координаты), тогда важно иметь способ их уточнения. Параметры пути могут быть уточнены с помощью акселерометра и датчика скорости с малой погрешностью, например, приемника СНС. Значение ускорения акселерометра:

$$a = a_g + a_x, \quad (2.36)$$

где a_x - ускорение по оси x , $\frac{м}{с^2}$;

a_g - проекция ускорения свободного падения на ось x , $\frac{M}{c^2}$.

Если точно знать ускорение (чем меньше погрешность, тем лучше) по продольной оси поезда, то можно определить уклон в данный момент времени:

$$i = \arcsin \frac{a_g}{g}. \quad (2.37)$$

Чтобы на результат не влияли колебания галопирования нужно проводить осреднение значений акселерометра за время не менее периода колебаний. Так как кузов электровоза может располагаться не в горизонтальной плоскости, то требуется проводить калибровку акселерометра перед поездкой на нулевом уклоне. Требуемая точность акселерометра определяется исходя из требуемой чувствительности к уклону. Если требуется измерить тысячные доли уклона (приблизительно $0,0098 \frac{M}{c^2}$), то акселерометр должен иметь чувствительность порядка 1 В на $1 \frac{M}{c^2}$ и низкий уровень шумов. Акселерометры с такой чувствительностью имеются в продаже – сейсмические акселерометры.

Характеристики электрического торможения уточняются аналогично тяговым характеристикам. Каждая ступень пневматического торможения разделяется на две фазы: установившуюся и неустановившуюся, для которых уточняем зависимость тормозного коэффициента от времени после начала торможения и зависимость коэффициента трения от скорости.

Токовые характеристики при наличии датчиков тока уточняются прямым методом. Точность полученных таким путем токовых характеристик зависит только от погрешностей измерения. Уточнение токовых характеристик является обязательным процессом для каждого конкретного электровоза из-за различия в параметрах ТЭД из-за допусков при изготовлении. Так как токовые характеристики зависят от напряжения в контактном проводе, то их уточнение производится для каждого значения напряжения в контактном проводе (через 0,5 % от номинала в пределах допуска).

Для управления в реальном времени бортовая электронно-вычислительная машина должна обеспечивать выполнение следующего неравенства:

$$t_{\text{ц}} \geq t_{\text{с}} + t_{\text{а}} + t_{\text{р}} + t_{\text{рег}} + t_{\text{т}} + t_{\text{в}}, \quad (2.38)$$

где $t_{\text{с}}$ - время сбора информации, с;

$t_{\text{а}}$ - время анализа собранной информации и корректировка характеристик поезда, с;

$t_{\text{р}}$ - время на принятие решения об управлении на следующий цикл, с;

$t_{\text{рег}}$ - время на регистрацию параметров работы системы и рабочей информации, с.

$t_{\text{т}}$ - время для тестирования узлов системы на исправность, с;

$t_{\text{в}}$ - время на вывод информации.

Регистрация параметров движения и служебной информации во время работы системы необходима для постобработки с целью поиска ошибок в реализации, выявления узких мест в программе и ее улучшения.

Указанные процедуры обязательно выполняются последовательно. Например, сбор информации и последующий анализ не может быть выполнен до принятия решения о следующем управлении, иначе может быть выдано не адекватное управление. Однако, сам сбор информации может производиться с другой постоянной времени, причем постоянная времени может быть дифференцирована относительно различных физических величин. В этом случае данные буферизуются и время на сбор информации означает время на получение собранной информации из буфера. Так как было указано использование централизованной высокопроизводительной системы, то распараллеливание задач производится программно, но так или иначе они выполняются последовательно (если несколько ядер, то последовательно - параллельно) и важно соблюдать неравенство.

Проверка адекватности математической модели, используемой в работе, проводилась на участке Орел – Тула (Тула - Орел) путем сравнения расхода

электроэнергии в реальной поездке с расходом энергии, полученным путем моделирования с учетом имеющейся информации о поездке. Результаты сравнения сведены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Проверка математической модели на адекватность

Участок	Масса поезда, т	Расход энергии по результатам поездки, кВт · ч	Расход энергии по результатам моделирования, кВт · ч	Расхождение, %
Орел-Тула	3116	4670	4590	1,7
Орел-Тула	3310	6700	6646	0,8
Орел-Тула	2147	3700	3685	0,4
Орел-Тула	5981	8356	8305	0,6
Орел-Тула	1649	2812	2792	0,7
Орел-Тула	4634	8205	8155	0,6
Орел-Тула	6420	12054	12000	0,44
Орел-Тула	3835	6717	6665	0,77
Орел-Тула	2711	5370	5323	0,87
Орел-Тула	3838	6191	6156	0,55
Орел-Тула	6478	11227	11193	0,3
Тула-Орел	1810	6400	6361,6	0,6
Тула-Орел	1788	4594	4552	0,9
Тула-Орел	1908	4310	4284	0,6
Тула-Орел	1713	3882	3804	2
Тула-Орел	3296	6629	6562	1
Тула-Орел	5189	8173	8115	0,7

Поездки для сравнения выбирались с учетом разброса масс поезда, но с учетом близких условий движения (ограничения по скорости, метеорологические условия, время хода). Среднее отклонение составляет менее 1 %, что является достаточным для расчетов и обусловлено рядом неучтенных факторов: точность профиля пути, точность измерения величин тока, напряжения и т.д. В результате можно констатировать, что применение детализированной модели поезда (учитывались условия поездки, расстановка подстанций и особенности состава), точных методов интегрирования и мер по повышению адекватности математической модели позволяет в значительной мере снизить методические ошибки и повысить точность интегрального показателя, являющегося целевым – расхода электроэнергии.

2.4 Особенности применения метода динамического программирования в бортовой системе управления поездом

Ранее рассмотренные расчеты относились к категории статических, то есть таких, которые производятся на стационарно размещенных ЭВМ и могут применяться для оперативного нормирования энергозатрат. В этих расчетах не используются потоки информации о движении поезда, лишь в предыдущем разделе был исследован вопрос использования предложенной программы оптимизации движения поезда в условиях реального времени.

Однако неизвестно ничего о применимости классического метода, построенного на базе динамического программирования Беллмана, к управлению поездом в постоянно меняющихся условиях движения. Есть несколько причин усложняющих применимость классических методов в бортовых системах ТПС:

- изменение условий движения, влияющих на начальные параметры расчета (случайные изменения);
- длительное время рабочего цикла системы по сравнению с требуемым временем управления;

- стоимость системы;
- вычислительная сложность алгоритма.

Современные требования к автоматике железнодорожного транспорта достаточно противоречивы. Время рабочего цикла программы должно быть уменьшено с целью повысить точность управления и увеличить количество информации, поступающей в систему. Погрешности датчиков, установленных на электровозах в большинстве своем (например, датчики пути и скорости, датчики путевой сигнализации), не позволяют говорить о высоких точностях при управлении. А отсутствие необходимых датчиков приводит к ухудшению качества работы системы. Постоянно меняющиеся условия движения могут влиять на начальные условия движения (время хода, количество и координаты остановок, ограничения скорости и прочее), некорректный ввод информации также снижает качество управления. На качестве управления сказывается и отсутствие в алгоритме процедуры уточнения характеристик поезда. Это все может привести к тому, что рассчитанная программа не будет выполнена с достаточной для экономии точностью. Требуется постоянно проверять адекватность управления и в случае необходимости корректировать программу энергооптимального ведения поезда. Так как рассчитанная матрица возможных состояний не требует пересчета при изменении скоростей движения и прочих условий в виду априорных вариаций, то весь перерасчет сведется к выбору подходящей траектории из уже сформированного списка. Однако пересчет матрицы требуется в случае значительных несовпадений прогнозных значений параметров движения или зависимостей параметров движения со значениями от датчиков системы после уточнения характеристик поезда.

Каждый пересчет матрицы требует значительных временных затрат (зависит от производительности аппаратного обеспечения) и возможен в реальном времени, если периоды обслуживания будут сравнимы с временем перерасчета. Например, для указанной конфигурации расчет 200 км пути занимает от 30 до 40 минут в зависимости от условий движения. Изменяя мощность аппаратного обеспечения, можно снижать время расчета. Причем аппаратное обеспечение нужно подбирать

таким образом, чтобы обеспечить выполнение неравенства 2.16 и иметь при этом как можно меньшую стоимость. Сложность алгоритма влияет на стоимость аппаратной части с одной стороны и на адекватность, точность, качество управления с другой стороны.

Высокая стоимость оборудования может не позволить экономии электроэнергии окупить вложенные в него средства, поэтому обычно уменьшают сложность алгоритма за счет упрощения математической модели, ухудшая при этом качество работы системы, и называют это поиском компромисса.

Предложенный классический метод оптимизации может быть применен только для стационарного применения, так как требует наличия существенных ресурсов для работы. Причем дальнейшее увеличение производительности вычислительных средств и снижение их стоимости не приведут к целесообразности использования классических методов оптимизации.

Критерием пересчета может являться целесообразность использования текущего оптимального плана. Чтобы проверить это следует решить задачу оптимизации для изменившихся условий и определить степень различия между текущим планом движения и полученным при новом расчете. Критерий смены плана движения:

$$k = \frac{E_c - E_n}{E_c} \cdot 100, \quad (2.39)$$

где E_c – расход энергии за поездку при текущем плане, кВт · ч;

E_n – расход энергии за поездку при новом плане, кВт · ч.

Если выполняется неравенство:

$$k \geq 1,$$

то требуется использовать новый план движения.

Изменение состояний поезда не может идеально соответствовать прогнозу, поэтому если не задать некоторую зону нечувствительности, то пересчет следует делать на каждом шаге. Чтобы уменьшить количество пересчетов следует

отслеживать тенденцию изменения расхода энергии по расчету относительно реального расхода энергии.

2.5 Выводы по разделу 2

1) Математическая модель, описывающая процесс ведения поезда, должна описывать все существенные факторы, влияющие на движение поезда. Сложность модели будет являться ограничивающим фактором применимости метода динамического программирования для оперативного управления поездом. Эта проблема может быть решена путем увеличения производительности вычислителя.

2) Программная реализация метода динамического программирования построена таким образом, чтобы совершать минимум перерасчетов при изменении начальной информации, например, критерия оптимизации или времени хода. Реализованная программа позволяет находить решение оптимальной задачи за приемлемое время за счет применения оригинальных решений по исключению из расчетов возможных траекторий. Применение трехмерных таблиц связей позволило рассматривать эквивалентные состояния и не пересчитывать траектории из-за смены времени хода. Также в процессе разработки ПО формализованы требования к оперативной памяти на расчет, что очень важно для реализации многопоточного приложения – для одновременных параллельных расчетов.

3) Функциональные зависимости силы тяги (тяговые характеристики), сопротивления движению и другие, приведенные в ПТР и других источниках, не являются достаточно точными для конкретного поезда и должны уточняться с помощью информации о процессе движения этого поезда. В результате применения данных, полученных из РПДА, в программе удалось повысить адекватность математической модели до менее 1 % по интегральному показателю расхода электроэнергии. Такая величина является приемлемой для решения задач экономии энергозатрат.

4) Предложенный классический метод оптимизации – динамическое программирование может быть использован только для стационарного применения, так как требует наличия существенных ресурсов для работы. Причем дальнейшее увеличение производительности вычислительных средств и снижение их стоимости не приведут к целесообразности использования этого метода. Поэтому следует провести поиск современного математического аппарата, позволяющего снять ограничения метода динамического программирования, сохранив его положительные стороны.

3 НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД ВЫПОЛНЕНИЯ ТЯГОВЫХ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДА

3.1 Движение поезда в условиях неопределенности

Поезд движется в условиях постоянно меняющихся ограничений и действующих сил, что приводит к ошибкам управления с точки зрения оптимальности движения (справедливо для любого критерия оптимизации). Ошибки прогнозирования параметров вносят свои неточности в процесс ведения поезда, а зачастую приводят к дополнительным пересчетам программы управления. Как было указано ранее, причинами ошибок прогнозирования могут быть:

- погрешности датчиков;
- ошибки в аппроксимации сложно поддающихся формализации процессов или характеристик;
- случайные факторы;
- неучтенные факторы.

Поэтому можно сказать, что движение поезда происходит в условиях неопределенности. В первой главе указывалось, что важно собирать как можно больше информации об условиях движения. Но это не всегда возможно, например, отказ незаменимого узла подвижного состава или неисправность napольного оборудования могут привести к изменению критериев оптимизации (переход от задачи экономии энергии к задаче на быстроедействие). В связи с этим важно не только решать оптимизационную задачу (1.13), но и стремиться решить задачу приближения действительного управления поездом к требуемому оптимальному значению. Сложность состоит в том, что это оптимальное значение становится известным только после поездки.

Сложность также состоит и в том, что оптимальная задача может быть решена только в изначальной формулировке, то есть решение по частям приведет к потере оптимальности. Например, в поездке произошло k смен условий

движения, которые потребовали пересчета траекторий движения, причем из этого числа m смен сопровождались полным пересчетом. В виду того, что время полного пересчета значительно по сравнению с пересчетом траекторий важно оценить потери от разных видов пересчета. Так как $k \geq m$, то есть пересчет траекторий выполняется во всех случаях, отклонение в случае полного пересчета должно быть рассмотрено в чистом виде:

$$\Delta_{\text{э}} = \Delta_{\text{эП}} + \Delta_{\text{эТ}}, \quad (3.1)$$

где $\Delta_{\text{э}}$ - общее отклонение от оптимума, кВт · ч;

$\Delta_{\text{эП}}$ - отклонение от оптимума за счет полного пересчета без учета пересчета траекторий движения, кВт · ч:

$$\Delta_{\text{эП}} = \sum_{i=1}^m (E_{iП} - E_{0Пi}), \quad (3.2)$$

где $E_{iП}$ - энергия, потраченная в результате движения в течение времени пересчета по старому плану движения или с целью соответствия требованиям безопасности движения, кВт · ч;

$E_{0Пi}$ - расход энергии оптимального плана движения для участка пути, соответствующего времени полного пересчета, кВт · ч;

$\Delta_{\text{эТ}}$ - отклонение от оптимума за счет пересчета траекторий, кВт · ч:

$$\Delta_{\text{эТ}} = \sum_{i=1}^k (E_i - E_{0i} - E_{iП}), \quad (3.3)$$

где E_i - расход энергии текущего плана движения без учета времени полного пересчета, кВт · ч;

E_{0i} - расход энергии оптимального плана на том же участке пути, что и расход i -го плана ведения.

Под оптимальным планом движения будет пониматься такой вектор режимов, который является результатом расчета при всех известных условиях движения.

Значительные отклонения от оптимума говорят о неприменимости реализованного решения для управления поездом. Некоторые современные электровозы оборудованы аппаратурой, позволяющей записывать большое количество параметров движения, которые необходимы для расчета. Поэтому оценку оптимальности расхода энергии можно сделать путем имитации движения с использованием записанных данных, то есть в режиме постобработки. Однако, серьезным ограничением является то, что в случае постобработки необходимо подбирать данные таким образом, чтобы управляющие воздействия совпадали с вектором управлений, то есть поездом должны управлять система на основе рассматриваемой программы. Хотя последнее не выполнимо в условиях инициативной разработки, тем не менее, рабочая информация позволяет значительно продвинуться в решении проблем адекватности математической модели и отработки соответствующих участков программы.

Когда говорилось о сложности вычислений программы, то производился расчет только потребной памяти. Также необходимо дать хотя бы приблизительную оценку потребного времени вычислений, потому что именно соответствие режиму реального времени делает систему управления применимой для использования на борту локомотива.

Как было уже сказано ранее в предыдущей главе, системы железнодорожной автоматики должны работать в сложных условиях, что требует промышленного исполнения для аппаратного обеспечения. Если отказаться от требований функциональной безопасности, подразумевая некоторую внешнюю систему безопасности движения (КЛУБ-У), то возможно рассматривать любые аппаратные комплектующие, удовлетворяющие требованиям ГОСТ Р 55364-2012. Но следует иметь в виду то, что бортовое оборудование должно обладать низкой стоимостью. Все расчеты будут сделаны для тестовой платформы, конфигурация которой указана в предыдущей главе. Для нескольких расчетов, отличающихся только

величиной пути, фиксируем время выполнения процедуры построения таблицы возможных перемещений и процедуры построения таблицы возможных траекторий. Расчеты произведем для 2500 м, 5000 м, 10000 м, каждый по 5 раз, чтобы за счет осреднения уменьшить влияние погрешности замеров. Результаты замеров сведены в Таблицу 3.1 с точностью до 1 с.

Таблица 3.1 – Результаты замеров времени расчета

	Время расчета таблицы возможных состояний, с			Время расчета таблицы возможных траекторий, с		
	2500м	5000м	10000м	2500м	5000м	10000м
1	19	49	85	2	4	12
2	20	48	86	2	4	13
3	19	48	87	2	4	12
4	19	49	84	2	4	11
5	18	48	86	2	4	13

Результаты показывают, что зависимость времени расчета таблицы возможных состояний от протяженности пути практически линейная, обусловленная сложностью алгоритма. Зависимость времени расчета таблицы возможных траекторий от протяженности пути не является линейной, так как число траекторий зависит не только от количества элементов в одной таблице, но и от количества эквивалентных скоростей, число которых возрастает от протяженности пути. Рост сложности расчета таблицы возможных траекторий квадратичный и зависит от роста количества эквивалентных скоростей. Для типового тягового плеча 200000 м сложность расчета составит порядка 1000 секунд или 16 минут (при использовании сопоставимого по производительности оборудования), что недопустимо для реального времени. В это время система не остается без управления (действует), тем более расчет для всей протяженности пути требуется производить только в самом начале движения. Однако, такое огромное (по сравнению с временем цикла системы) время расчета не позволяет говорить о

применении этой системы, потому что для 10 полных пересчетов потребуется 160 минут, что составляет четвертую часть времени на поездку. Возможно, система управления и сможет сэкономить часть энергии по сравнению со среднестатистическим машинистом, но даже о приближении к оптимальному значению расхода энергии не может быть и речи.

Следует искать совершенно иной способ получения планов управления при соблюдении требований к методу: низкая стоимость аппаратного обеспечения, малое время пересчета плана движения, возможность корректировки расчета на основе полученной информации.

3.2 Метод выполнения тяговых расчетов с нейросетевым регулятором режима движения поезда

Разработанные методы позволяют решить поставленную задачу с заданной точностью, но не могут быть в этом случае напрямую применены в режиме реального времени, как было указано п. 3.1. Для соблюдения точности разработанные методы должны иметь априорную информацию о движении поезда, но для реального поезда такое условие невыполнимо.

Как уже было сказано, можно обойти эту проблему, используя систему с высокой производительностью, которая позволяла бы совершать несколько пересчетов в секунду.

Плюсы такого подхода – автономность.

А минусами такого подхода являются:

- стоимость системы;
- массогабаритные показатели бортового оборудования и его энергопотребление;
- отсутствие полноты информации.

Существует и другое решение – использование единого стационарного центра управления, который имеет канал связи с локомотивом. Этот подход позволяет реализовать идею распределенной системы. К плюсам можно отнести:

- возможность учета движения соседних поездов при расчете оптимальной программы ведения данного поезда;
- единое информационное пространство;
- низкая стоимость бортового оборудования;
- возможность использования коммуникационного канала для других целей, например, для интервального регулирования.

Минусы:

- создание инфраструктуры для связи поезда с центром управления;
- дорогостоящие центры управления;
- отсутствие автономности работы системы управления поездом;
- необходимость защиты и функциональной безопасности средств связи.

Второй подход является наиболее предпочтительным и близким к системе, существующей в настоящее время на железнодорожном транспорте. Основная сложность этого подхода состоит в реализации распределенной системы. Это и объясняет тот факт, что существующая система управления УСАВП и ее модификации используют первый подход.

Поэтому можно предложить третий путь – система, состоящая из единого центра обработки информации и расчета оптимальных программ ведения поезда и бортовая система, использующая эту информацию в автономном режиме. В этом случае не нужна связи между поездом и центром управления в реальном времени, но такая связь требуется после поездки для передачи информации, полученной в реальном времени. Этот вариант позволяет уйти от высокопроизводительной системы на борту, но сохранить автономность. Также централизованная обработка информации позволит собрать исчерпывающую информацию о конкретном локомотиве, что позволит решить задачу адекватности математической модели.

Однако, существующие алгоритмы не позволяют реализовать такую систему, так как при отказе от пересчетов требуется сохранить достаточно большой объем информации. Для того чтобы понять каким образом разрешить возникшее затруднение необходимо обратиться к анализу ручного управления поездом, исходя из общих рассуждений.

Машинист не использует при управлении поездом зависимости между величинами в явном виде, как это делается в современных системах. К тому же не все характеристики состояния поезда известны машинисту. С ростом опыта машинист может более качественно вести поезд, а его управляющие воздействия становятся инстинктивными и автоматическими (практически мгновенная смена программ движения). Машинист также планирует программу ведения поезда и придерживается ее, однако способ ее получения может быть непонятен даже самому машинисту. Еще одним свойством ручного управления является то, что машинист может перенимать, как и любой человек, успешные примеры ведения поезда, то есть обучаться. Можно ли говорить об оптимальности ведения в случае ручного управления? Машинист может стремиться найти наилучшую с точки зрения энергозатрат программу движения, но только приблизится к действительно наилучшей программе, поэтому в этом смысле нет отличия от технических систем управления поездом.

Конечно, машинист обладает целым рядом свойств, мешающих выполнению основной своей функции, но из всего вышесказанного можно сформулировать требования, которые приведут нас к решению проблемы сокращения времени расчета и сохранения оптимальности его результатов:

- смена оптимальных программ ведения поезда за время, соответствующее реальному времени (так как время цикла работы системы было выбрано 0,5 с, то при пересчете это время не должно быть превышено);
- обучение в процессе работы;
- эволюционная модель обучения;
- обучение на примере в реальном времени;
- ассоциативность;
- возможность самообучения.

Для построения метода решения тяговых расчетов, удовлетворяющей указанным требованиям, целесообразно воспользоваться искусственными нейронными сетями. Искусственная нейронная сеть [8, 19, 18, 60, 61, 62] – это сеть из достаточно простых автоматов искусственных нейронов (рисунок 3.1).

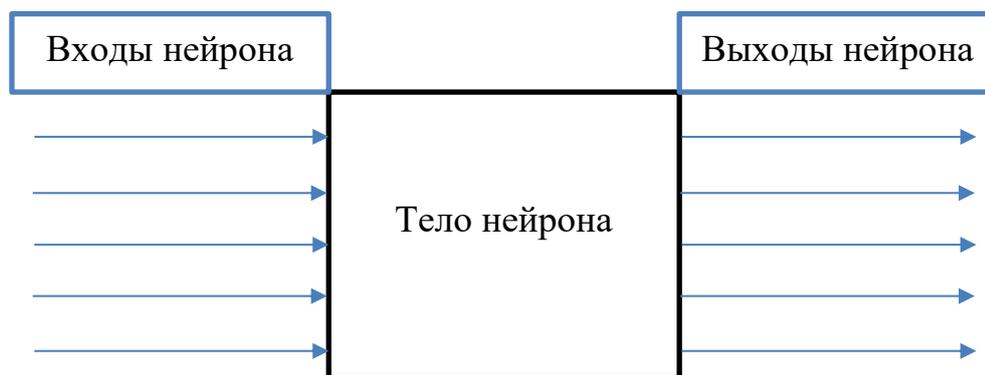


Рисунок 3.1 – Вид искусственного нейрона

Направление искусственных нейронных сетей появилось в 50-е годы прошлого века в теории автоматов [26]. Искусственные нейронные сети являются математической моделью биологических нейронных сетей и обладают некоторыми их свойствами. Нейроны искусственных нейронных сетей организуются по способу, который может соответствовать (или не соответствовать) анатомии мозга. Несмотря на такое поверхностное сходство, искусственные нейронные сети демонстрируют удивительное число свойств, присущих мозгу:

- обучение на основе опыта;
- обобщение предыдущих прецедентов на новые случаи, благодаря своей структуре, а не записанной ранее программе;
- извлечение определяющие свойства из поступающей информации, содержащей шум.

Искусственные нейронные сети (ИНС) позволят обойти проблему большого объема информации, а значит, можно будет реализовать систему с разделением времени на получение оптимальных программ движения и на непосредственно управление движением. Структура такой системы представлена на рисунке 3.2.

Для реализации такой системы не потребуется значительных капитальных вложений, так как каналы связи между депо уже существуют, а реализация беспроводного канала связи между локомотивом и депо имеет низкую стоимость. Бортовая система управления является унифицированной относительно

подвижного состава, кроме исполнительных устройств, и строится на базе промышленного компьютера, сигнального процессора или программируемой логической интегральной схемы.



Рисунок 3.2 – Эталонная структура взаимодействия программ

3.3 Нейросетевой метод для энергооптимального тягового расчета и его программная реализация

В предыдущем пункте были рассмотрены различные подходы к реализации регулятора режима движения поезда в тяговом расчете и выбран метод, на основе которого будет строиться система управления (в частности, ее вычислитель). Главными отличительными свойствами метода ИНС являются возможность обучения и его эволюционная направленность, то есть получение лучших

результатов с течением времени. Необходимо разобраться каким образом достигаются такие свойства.

Под методом ИНС в дальнейшем будет подразумеваться методика решения задачи (1.13) с применением ИНС. Напрямую метод ИНС не позволит получить оптимальную программу движения, как и необученный человек, который только стремится пойти учиться на машиниста. Поэтому важно понимать, что нейросети не заменяют методов оптимизации (по крайней мере не следует рассматривать их с такой точки зрения), а лишь позволяют аппроксимировать поведение изучаемого объекта (в нашем случае желаемое поведение). Поэтому сначала был подробно рассмотрен метод получения оптимальных программ ведения поезда, который затем будет использован для обучения нейросетей. Использование нейросетей позволяет получить систему управления поездом на основе распределенной стационарной сети, которая отличается от распределенной сети реального времени тем, что время на расчет и на использование результатов расчета разделено [55]. К тому же такая система может иметь и дополнительные свойства, которые неизвестны до реализации. Поэтому важно понимать, как устроены нейросети, каким образом они реализуются ИНС, обучаются и могут быть использованы для решения задачи оптимального ведения поезда.

Строятся ИНС из простых элементов – нейронов, которые в общем виде могут быть представлены, как «черный ящик» (рисунок 3.1). Однако, внутри «черного ящика» они устроены несколько сложнее (рисунок 3.3).

Входов искусственного нейрона может быть несколько, причем допускается (могут быть входы и с задержками, но такие нейроны использоваться не будут) только одновременная подача сигнала. На вход сети подается вектор данных, которые каждый элемент которого умножается на соответствующий вес. Затем эти произведения суммируются и результат преобразуется по известному, выбранному заранее, алгоритму, который носит название активационная функция (по аналогии с биологическим нейроном, так как от значения этой функции зависит состояние нейрона). Выход искусственного нейрона имеется только один, он является эффективным, фактических выходов может быть столько, сколько требуется. От

вида активационной функции зависит выходной сигнал нейрона или состояние нейрона. Выход нейрона может быть непрерывным или дискретным.

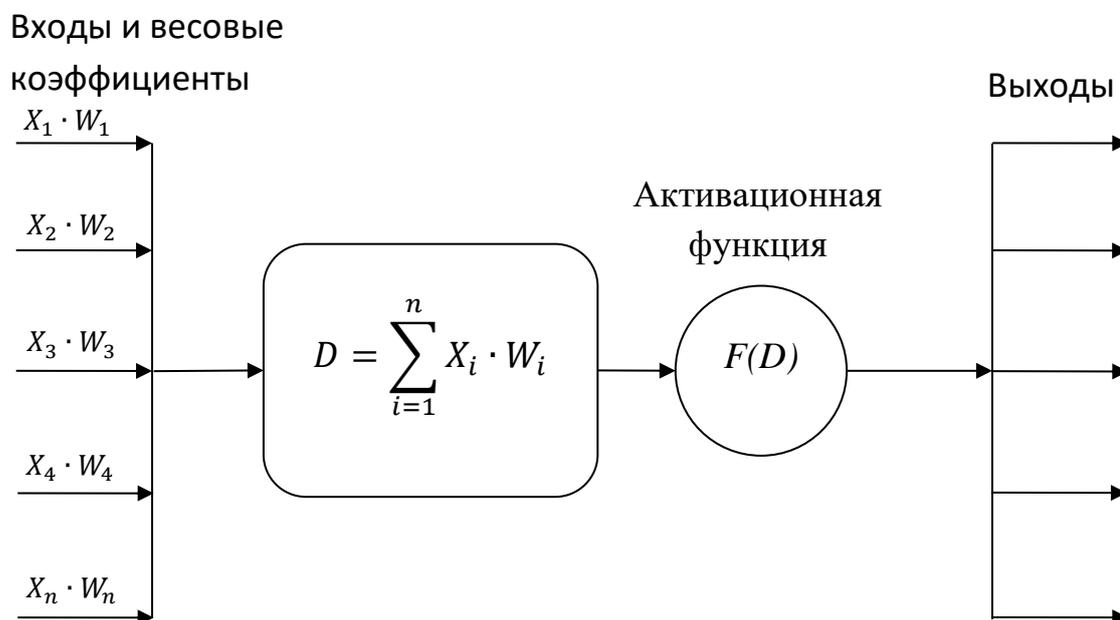


Рисунок 3.3 – Искусственный нейрон

Можно установить зависимость между входом и выходом нейрона в следующей форме:

$$D = \sum_{i=1}^N w_i \cdot x_i, \quad (3.4)$$

$$R = F(D),$$

где w_i - элемент весового вектора нейрона;

x_i - элемент входного вектора нейрона;

D – сумма произведений элементов входного и весового векторов;

F – активационная функция нейрона;

R – выход нейрона.

В зависимости от вида функции нейрон может быть линейным или нелинейным элементом. В нейронной сети могут применяться различные виды нейронов совместно. Нет общих рекомендаций по использованию активационных

функций, которых существует огромное множество. Но некоторые функции такие, как гиперболический тангенс и сигмоидальная функция, получили наибольшее распространение, поэтому их и будут использоваться в дальнейшем. Формализованный вид функций и их производные первого порядка соответственно:

$$F_C = \frac{1}{1 + e^{-D}},$$

$$\frac{dF_C}{dD} = \frac{e^{-D}}{(1 + e^{-D})^2} = \frac{(1 + e^{-D}) - 1}{(1 + e^{-D})^2} = F(1 - F),$$

(3.5)

$$F_T = \frac{e^D - e^{-D}}{e^D + e^{-D}},$$

$$\frac{dF_T}{dD} = \frac{(e^D + e^{-D})^2 - (e^D - e^{-D})^2}{(e^D + e^{-D})^2},$$

где D – сумма произведений элементов входного и весового векторов;

F – активационная функция нейрона.

Графики функций приведены рисунках 3.4 и 3.5.

Не следует рассматривать нейроны с дискретными выходами и линейные нейроны, потому что они проигрывают нелинейным нейронам по скорости обучения и возможностям аппроксимации многомерных функций [62]. К тому же поезд является нелинейной системой, что обуславливает выбор нелинейных нейронов.

Входные данные ИНС, построенной на базе представленных нейронов, должны быть сведены к отрезку $[-8;8]$ для сигмоиды и $[-4;4]$ для гиперболического тангенса. Это операция нормализации входных векторов нейросети.

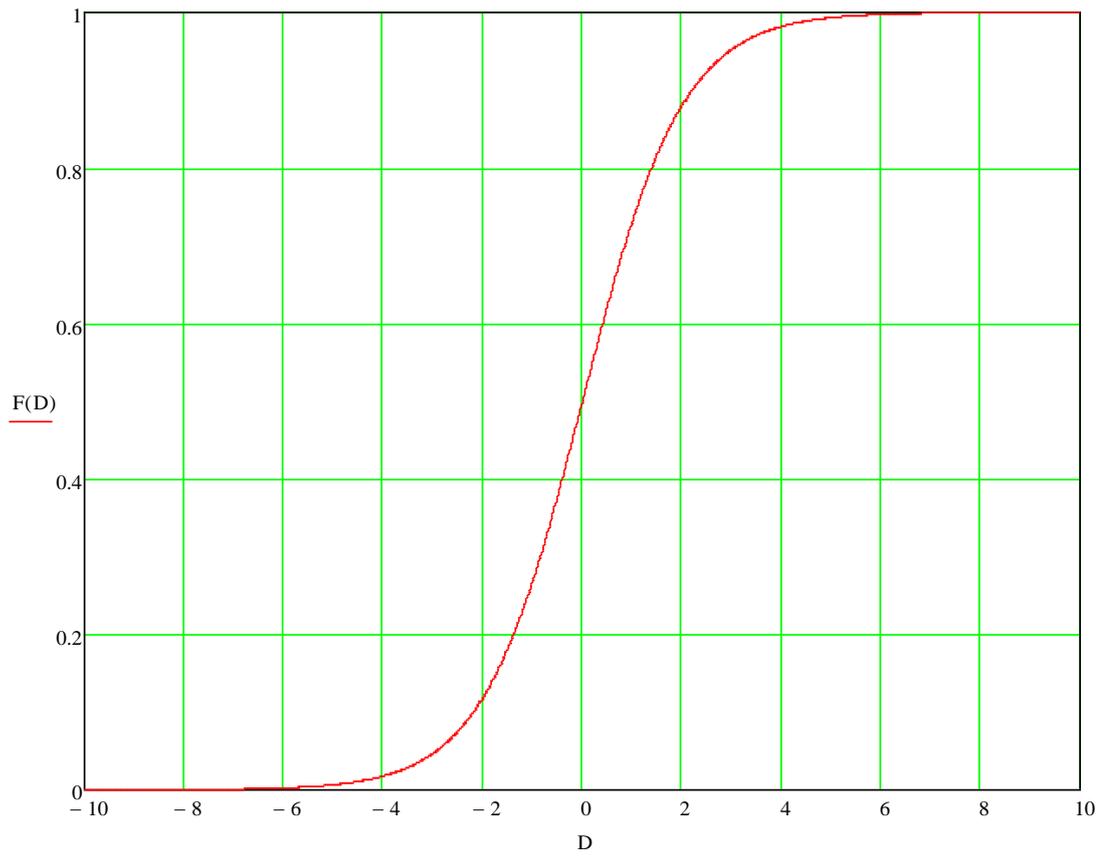


Рисунок 3.4 – График сигмоидальной функции

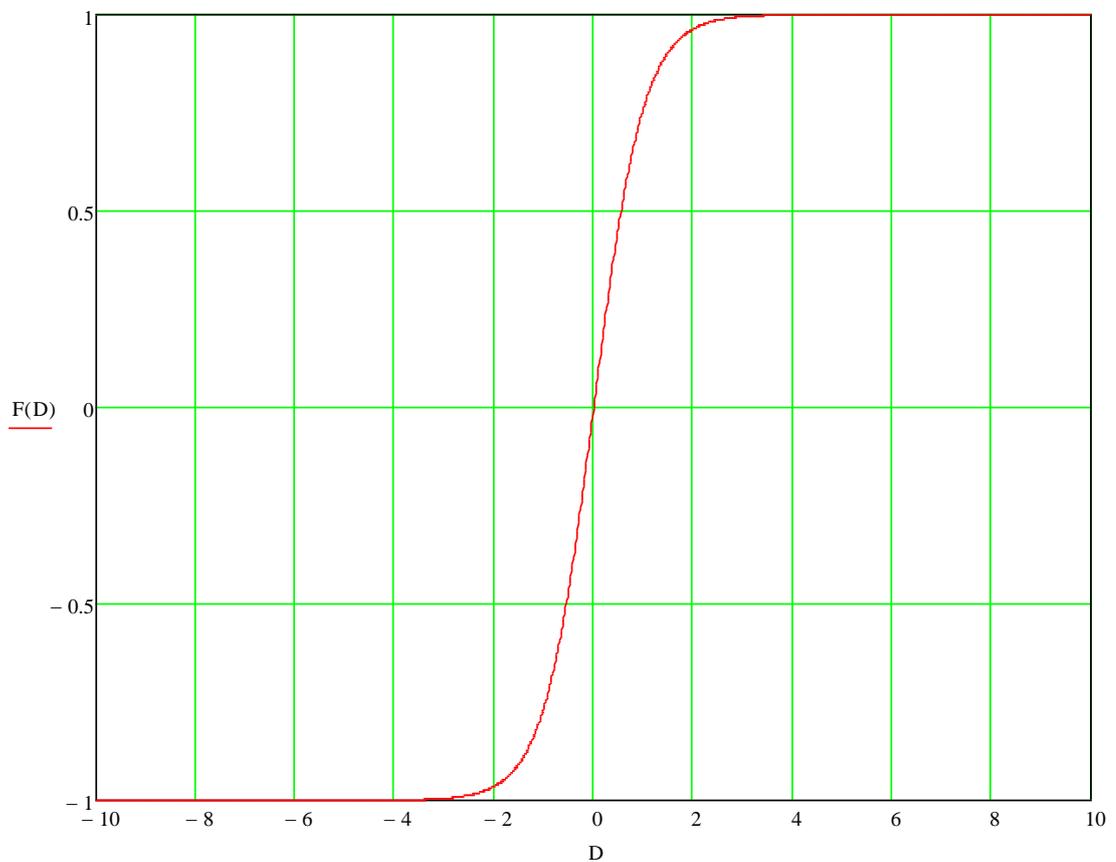


Рисунок 3.5 – График гиперболического тангенса

Для ИНС с сигмоидальными активационными функциями и гиперболическим тангенсом соответственно операция нормализации осуществляется следующим образом:

$$x_k = \frac{8x_k}{x_{kmax}}, \text{ для } x_k > 0$$

$$x_k = \frac{-8|x_k|}{|x_{kmin}|}, \text{ для } x_k < 0$$

(3.6)

$$x_k = \frac{8x_k}{x_{kmax}}, \text{ для } x_k > 0$$

$$x_k = \frac{-8|x_k|}{|x_{kmin}|}, \text{ для } x_k < 0$$

где x_k - текущий вход;

x_{kmax} - максимальное значение текущего входа сети, относительно математического ожидания допустимых значений;

x_{kmin} - минимальное значение текущего входа сети, относительно математического ожидания допустимых значений.

То есть диапазон допустимых значений каждого входа сводится к единичному вектору того же направления и затем пропорционально увеличивается до требуемой величины. Нормализация необходима по причине участков насыщения, которые можно считать участками с равным состоянием, то есть неинформативными. Поэтому вектора входов сводятся к векторам, позволяющим работать на наиболее информативных участках функций без потери свойств насыщения.

Основной строительный элемент сети описан достаточно подробно, для того чтобы приступить к рассмотрению сетевого соединения нейронов. Одиночный нейрон или однослойная сеть из нейронов обладают известными ограничениями [61, 60], наиболее существенное из которых невозможность реализации

исключающего ИЛИ (необходимо минимум 2 слоя). Для решения задач невозможно обойтись без многослойной сети, поэтому следует выбрать структуру построения сети.

Но чтобы приступить к непосредственной разработке ИНС важно прояснить два пункта:

- существование ИНС с заданными свойствами для решения задачи управления поездом;
- существующие методики разработки ИНС.

Первый пункт может быть рассмотрен в несколько иной трактовке – может ли функция n переменных быть представлена или аппроксимирована суперпозицией функций одного переменного.

Ответ получен Колмогоровым [36, 11] для непрерывных функций: каждая непрерывная функция n переменных, заданная на единичном кубе n -мерного пространства, представима в виде:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{q=1}^{2n+1} h_q \left[\sum_{p=1}^n \varphi_p^q(x_p) \right], \quad (3.7)$$

где функции h_q - непрерывны, а функции $\varphi_p^q(x_p)$, кроме того, еще и стандартны, т.е. не зависят от выбора функции f .

Однако, в случае с ИНС возможно говорить только об аппроксимации функции, а не ее точном представлении [11]. Поэтому в [11] Горбань А.Н. доказывает, что нейронные сети позволяют с любой точностью вычислять произвольную непрерывную функцию $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, а следовательно, с их помощью можно сколь угодно точно аппроксимировать функционирование любого непрерывного автомата.

Универсальной методики разработки требуемой ИНС не существует, поэтому можно идти двумя путями: усложнять нейросеть, добавляя нейроны и слои, или упрощать нейросеть, удаляя нейроны и слои. Разработаны алгоритмы,

позволяющие оптимизировать структуру ИНС [18, 19], но эффективность их применения зависит от задачи, и они рассматриваться нами не будут.

В работе будут использованы только слоистые сети, нейроны которых сетей расположены в несколько слоев (Рисунок 3.6).

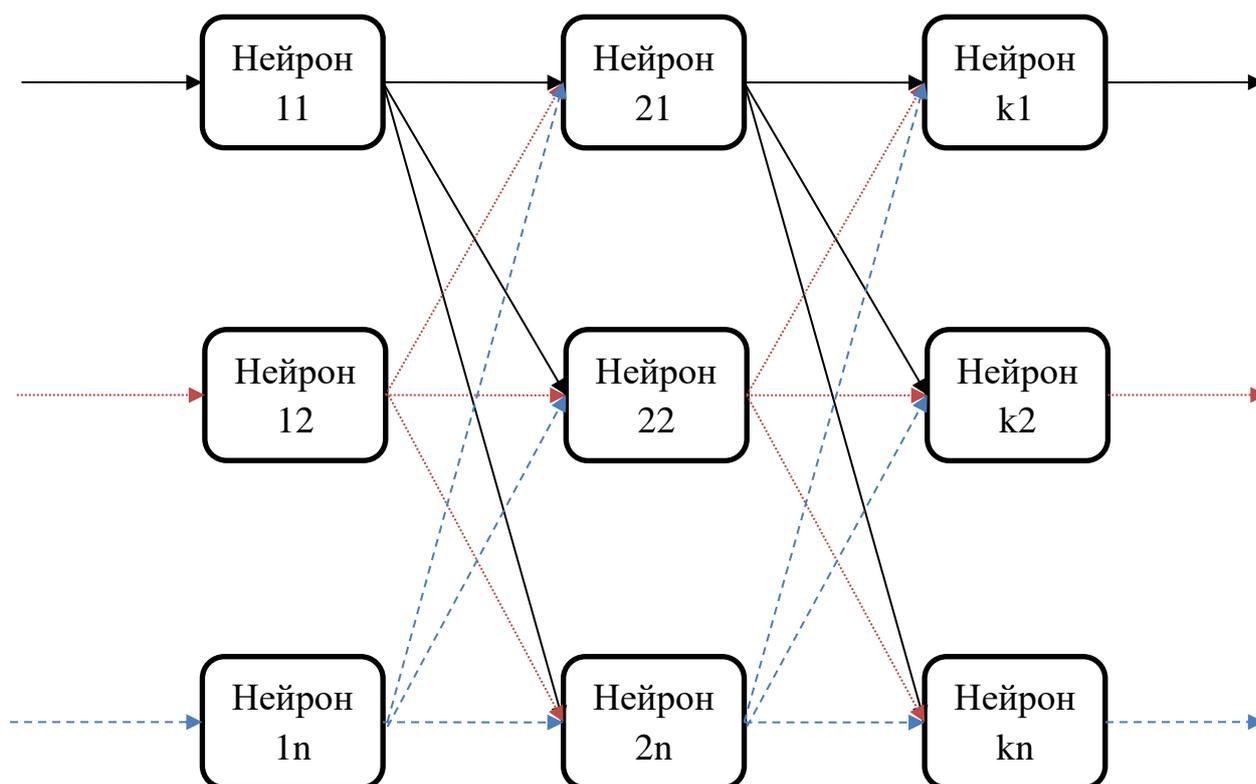


Рисунок 3.6 – Слоистая ИНС с тремя слоями

Нейроны первого слоя получают входные сигналы, преобразуют их и через точки ветвления передают нейронам второго слоя. Далее срабатывает второй слой и т.д. до k -го слоя, который выдает выходные сигналы для интерпретатора и пользователя. Если не оговорено противное, то каждый выходной сигнал i -го слоя подается на вход всех нейронов $i+1$ -го. Число нейронов в каждом слое может быть любым и никак заранее не связано с количеством нейронов в других слоях. Стандартный способ подачи входных сигналов: все нейроны первого слоя получают каждый входной сигнал. Особое распространение получили

трехслойные сети, в которых каждый слой имеет свое наименование: первый - входной, второй - скрытый, третий - выходной.

Сеть с такой структурой, как на рисунке 3.6, выбрана не случайно. Для таких сетей проработан алгоритм обучения, пользующийся заслуженной популярностью. Этот алгоритм получил название алгоритма обратного распространения ошибки из-за того, что подстройка весов происходит с выходного слоя. Алгоритм обучения сети имеет важное значение, как и выбор нейронов сети. Без обучения ИНС не представляет практического значения.

Существует огромное количество различных типов нейронных сетей, для которых разработаны алгоритмы обучения. Тем не менее, выбор может быть обусловлен некоторыми следующими соображениями:

- обязательное наличие алгоритма обучения с учителем;
- по возможности наиболее универсальная сеть;
- функционирование по принципу: образ - оптимальный ответ;
- простота реализации;
- решение нелинейной задачи;
- непрерывный выход (для электровозов с дискретным управлением

может быть использована ИНС с дискретным выходом, но существование электровозов с непрерывным управлением тягой заставляет включить это требование).

Под эти требования не подходят сети прямого распространения, типа сетей Кохонена, которые используются в случае кластеризации образов. Оптимальный план ведения поезда не имеет особых отличий от неоптимальных планов ведения, причем находится достаточно близко к ним. Сети Хопфилда, рекуррентные или сети с обратными связями, радиально-базисные также не удовлетворяют указанным требованиям. Причем выпадают из рассмотрения сети с линейными активационными функциями, так как в этом случае выход сети будет равен:

$$Q = X \cdot \prod_{i=1}^l W_i, \quad (3.8)$$

где X – вектор входов;

W_i – матрица весов i -го слоя нейронов.

Произведение в формуле можно обозначить новым весовым вектором, а значит линейная многослойная ИНС сведется к однослойной.

Поэтому выбор был остановлен на многослойных сетях встречного распространения с нелинейными нейронами.

Алгоритм обучения очень удобно рассмотреть на примере сети с рисунка 3.б.

Для обучения сети был выбран алгоритм обратного распространения ошибки, который для единичного входа функционирует следующим образом:

а) На вход сети должен быть подан некоторый вектор, для которого существует образцовый выход.

б) Сеть функционирует в обычном режиме и формирует выходной вектор.

в) Выход сети и образцовый выход используются для изменения весов сети таким образом, чтобы при подаче текущего входного вектора на выходе сети при ее нормальном функционировании был сформирован образцовый вектор.

Для обучения другому образу необходимо для очередной пары входа-выхода выполнить последовательно пункты а)-в). Цель обучения будет достигнута тогда, когда предъявленное множество входов даст желаемое множество выходов. Процесс обучения связан с нормальным функционированием сети, поэтому необходимо понимать каким образом трехслойная ИНС работает. На вход сети подается входной вектор и вычисляются выходы первого слоя (для примера используется сигмоидальная функция):

$$Q_{1k} = \frac{1}{1 + e^{-\sum_{i=1}^N x_i w_{ki}}}, \quad (3.9)$$

где N – число нейронов входного слоя;

Q_{1k} – выход k -того нейрона;

w_{ki} – вектор весов k -того нейрона,

x_i – входной вектор сети.

Выход скрытого слоя:

$$Q_{ck} = \frac{1}{1 + e^{-\sum_{i=1}^M Q_{1i} w_{ki}}}, \quad (3.10)$$

где M – число нейронов скрытого слоя.

Выход сети:

$$Q_{vk} = \frac{1}{1 + e^{-\sum_{i=1}^T Q_{ck} w_{ki}}}, \text{ при } k \in [1, T], \quad (3.11)$$

где T - число нейронов выходного слоя.

Время функционирования нейросети зависит от времени вычисления активационной функции. Так как время вычисления активационных функций, выбранных нами, зависят от времени вычисления экспоненты, то необходимо найти наиболее быстрый способ определения экспоненты для выбранного ЦПУ. В этом случае следует обратиться к библиотекам математических функций от производителя ЦПУ, которые содержат оптимизированные реализации функций (в частности экспоненты).

Для обучения необходимо, чтобы веса сети были заданы каким-либо образом. Начальные значения весов могут быть получены случайным образом или восстановлены из файла. Также должен быть подготовлен образцовый выход сети O .

Обучение выходного слоя:

$$\begin{aligned} \delta_k &= F' \cdot (O_k - Q_{vk}), \\ \Delta w_{mk} &= \alpha \cdot \delta_k \cdot Q_{vk}, \\ w_{mk} &= w_{0mk} + \Delta w_{mk}, \end{aligned} \quad (3.12)$$

где F' - производная активационной функции k - того нейрона в выходном слое;

Δw_{mk} – поправка к весу k - того нейрона выходного слоя от m - того нейрона скрытого слоя;

α - коэффициент скорости обучения;

w_{0mk} - корректируемое значение веса k - того нейрона выходного слоя от m - того нейрона скрытого слоя;

w_{mk} - откорректированное значение веса k - того нейрона выходного слоя от m - того нейрона скрытого слоя.

Обучение скрытого и выходного слоя выглядит несколько иначе, так как для него не существует образцового выхода:

$$\delta_k = F' \cdot \sum_{i=1}^J \delta_i \cdot w_i, \quad (3.13)$$

где w_i – подстроенные веса последующего (выходного) слоя;

δ_i – подстройки последующего слоя;

$$\begin{aligned} \Delta w_{mk} &= \alpha \cdot \delta_k \cdot Q_k, \\ w_{mk} &= w_{0mk} + \Delta w_{mk}, \end{aligned} \quad (3.14)$$

где Q_k - выход k - того нейрона скрытого слоя.

Метод обучения основан на градиентном спуске [20, 22, 23], теоретические выкладки и обоснование метода опущены и даны только конечные формулы, используемые в программе.

Так как производные активационных функций выражаются через сами функции, то это значительно сокращает время вычислений. Это является одной из основных причин выбора сигмоидальной функции и гиперболического тангенса.

Обучение сети тем более при больших обучающих выборках должно быть оптимизировано для ускорения сходимости алгоритма обратного распространения. Для этого предлагались различные приемы. Например, алгоритм обратного распространения второго порядка [19], он использует вторые производные для более точной оценки требуемой коррекции весов. Этот алгоритм оптимален в том смысле, что невозможно улучшить оценку, используя производные более высокого порядка. Метод требует дополнительных вычислений по сравнению с обратным

распространением первого порядка, и необходимы дальнейшие эксперименты для доказательства оправданности этих затрат. Также производились сравнения скорости обучения сетей с активационными функциями, которые имели различные множества выходов [8], например, $[0;1]$ и $[-1;1]$. В результате было показано, что использование функций с диапазоном выхода $[-1;1]$ дает выигрыш в 30-50 % по времени. Тем не менее отказ от сигмоиды нецелесообразен и расчет будет вестись для всех выбранных активационных функций.

Алгоритм обучения также имеет серьезные недостатки, которые должны быть учтены при обучении.

Паралич сети. В процессе обучения сети значения весов могут в результате коррекции стать очень большими величинами. Это может привести к тому, что все или большинство нейронов будут функционировать при очень больших значениях своего выхода, в области, где производная сжимающей функции очень мала. Так как посылаемая обратно в процессе обучения ошибка пропорциональна этой производной, то процесс обучения может практически замереть. В теоретическом отношении эта проблема плохо изучена. Обычно этого избегают уменьшением размера шага η , но это увеличивает время обучения.

Локальные минимумы. Обратное распространение использует разновидность градиентного спуска, т. е. осуществляет спуск вниз по поверхности ошибки, непрерывно подстраивая веса в направлении к минимуму. Поверхность ошибки сложной сети сильно изрезана и состоит из холмов, долин, складок и оврагов в пространстве высокой размерности. Сеть может попасть в локальный минимум, когда рядом имеется гораздо более глубокий минимум. В точке локального минимума все направления ведут вверх, и сеть неспособна из него выбраться. Статистические методы обучения могут помочь избежать этой ловушки, но они медленны.

Размер шага. Внимательный разбор доказательства сходимости в [61] показывает, что коррекции весов предполагаются бесконечно малыми. Ясно, что это неосуществимо на практике, так как ведет к бесконечному времени обучения. Размер шага должен браться конечным, и в этом вопросе приходится опираться

только на опыт. Если размер шага очень мал, то сходимость слишком медленная, если же очень велик, то может возникнуть паралич или постоянная неустойчивость. В [62] описан адаптивный алгоритм выбора шага, автоматически корректирующий размер шага в процессе обучения.

Временная неустойчивость. Например, если сеть учится распознавать буквы, то нет смысла учить «Б», если при этом забывается «А». Процесс обучения должен быть таким, чтобы сеть обучалась на всем обучающем множестве без пропусков того, что уже выучено. В доказательстве сходимости [62] это условие выполнено, но требуется также, чтобы сети предъявлялись все векторы обучающего множества прежде, чем выполняется коррекция весов. Необходимые изменения весов должны вычисляться на всем множестве, а это требует дополнительной памяти; после ряда таких обучающих циклов веса сойдутся к минимальной ошибке. Этот метод может оказаться бесполезным, если сеть находится в постоянно меняющейся внешней среде, так что второй раз один и тот же вектор может уже не повториться. В этом случае процесс обучения может никогда не сойтись, бесцельно блуждая или сильно осциллируя. В этом смысле обратное распространение не похоже на биологические системы.

Нейросеть, посредством обучения, способна аппроксимировать многомерную функцию на некотором участке с заданной точностью и это свойство будет использоваться для решения задачи оптимального управления поездом. Но следует определить какое место в системе управления будет занимать нейросеть, каким образом может быть обучена и применена нейросеть.

Любая система управления поездом может быть представлена в качестве черного ящика, на вход которого поступает некоторая начальная информация, а на выходе формируется сигнал понятный исполнительному устройству (рисунок 3.7). Посредством исполнительного устройства поезд переводится с одной последовательности состояний на другую.

Входами на рисунке 3.7 выступают все важные факторы, влияющие на процесс принятия решения. Ранее использовался несколько иной подход, в частности при рассмотрении решения проблемы с помощью классического метода

Беллмана. Здесь не разделяются ограничения и внешние воздействия от характеристик системы, а следует придерживаться как можно более общего взгляда на процесс ведения поезда.

Также из рисунка 3.7 непонятно в каком виде выдается сигнал исполнительному устройству. При использовании метода Беллмана получалось большое количество информации: целевая скорость, целевой режим, целевой расход энергии т. д. На каждом шаге должно быть такое количество информации, чтобы прогнозировать следующий шаг. В реальном времени эта цепочка прогнозов могла разойтись с действительным ходом событий и потребовался бы пересчет. В случае с ИНС не требуется подробного описания каждого шага и система управления может быть спроектирована на выдачу режима движения, принятого для данного типа электровоза, например, позиции контроллера.

В процессе обучения веса входов нейронов ИНС будут изменяться таким образом, чтобы выходы ИНС соответствовали с некоторой заданной погрешностью режимам, которые соответствуют входной информации, то есть ИНС должна в результате обучения аппроксимировать систему управления поездом. В рабочем режиме обученная ИНС будет формировать управляющие воздействия близкие к тем, что получены в режиме обучения.

До настоящего момента рассматривалась только функциональная сторона нейросети и практически не рассматривалась структура, кроме ограничения на количество слоев. Однако от структуры нейросети зависит ровно столько же, сколько и от функциональной составляющей. Так как было принято решение использовать только полносвязные сети, имеющие более трех слоев, осталось определить точное количество слоев, нейронов в каждом слое, количество входов и выходов.

Ввиду того что не существует общей методики определения этих структурных параметров сети, то будет использоваться метод последовательных приближений с постепенным увеличением слоев и нейронов в слое.

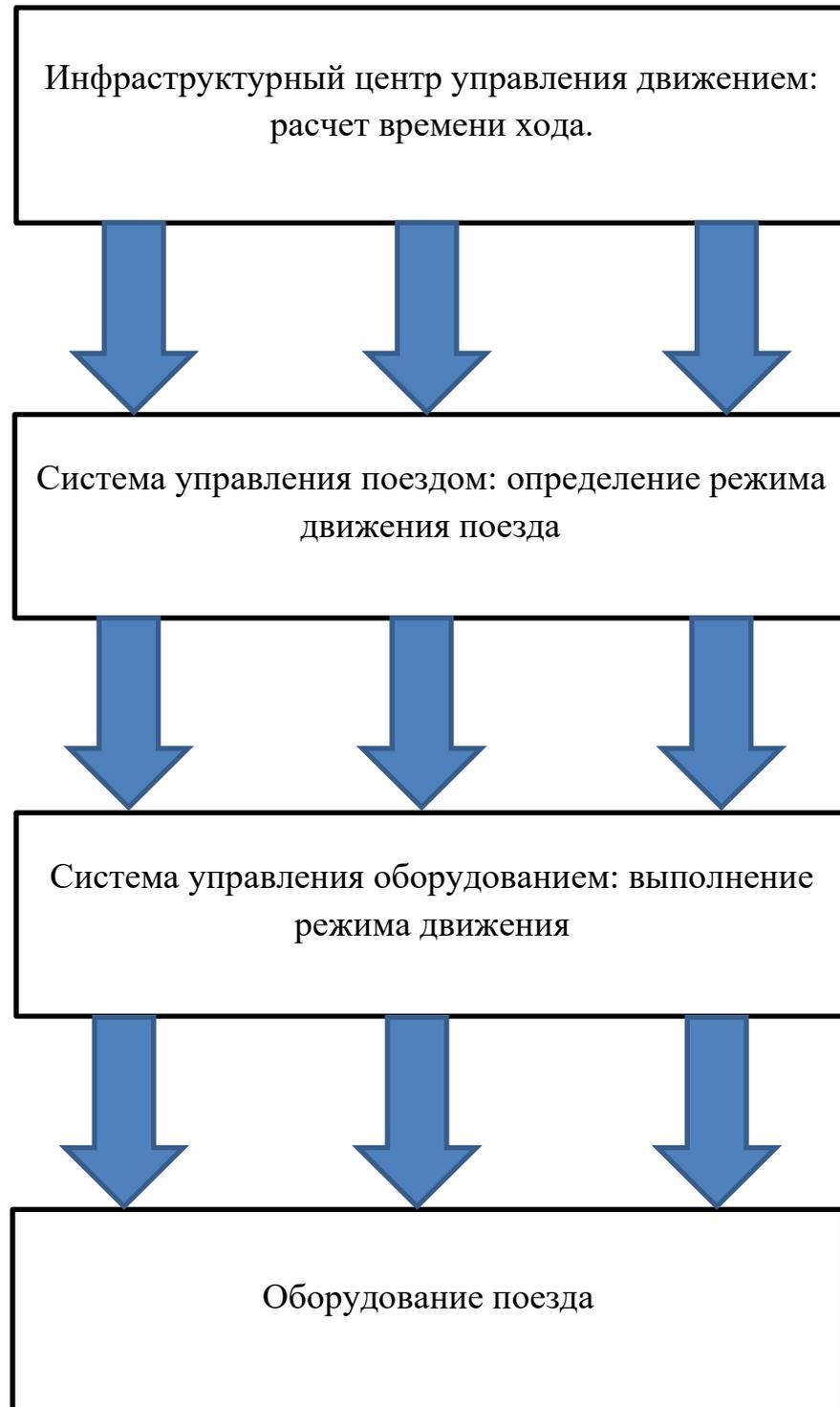


Рисунок 3.7 – Принципиальная схема обобщенной системы управления поездом

Для формирования структуры ИНС используется следующий алгоритм:

- а) выбор структуры ИНС;
- б) создание обучающей выборки (ОВ) и тестирующей выборки (ТВ);
- в) обучение на ОВ;

- г) тестирование на ТВ;
- д) принятие решения о признании сети, удовлетворяющей всем требованиям, или о доработке сети (повторение пунктов а), в), г));
- е) сравнение с классическими методами.

В первую очередь следует определить количество входов сети, а количество слоев и нейронов в каждом слое выбирается в процессе обучения методом последовательного приближения. Число входов ИНС будет зависеть от сложности модели поезда, так нейросеть должна иметь достаточное количество информации на входе. Например, без информации о времени хода система будет не способна различить траектории с различным временем хода. Аналогично и для других характеристик или факторов движения. ИНС должна уметь различать весь спектр ситуаций, которые могут возникнуть в процессе движения, и выдавать актуальные и адекватные решения. В таблице 3.2 приведены входные параметры движения поезда, которые используются ИНС для получения режима движения.

Требуется пояснить, почему были выбраны те или иные входы. Во-первых, нейросеть должна получать информацию о текущем состоянии поезда в процессе движения, что объясняет необходимость входов 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 13. Во-вторых, необходима информация о событиях, которые предусматривают обязательную смену режима 7, 9, 11. В-третьих, не требуется указывать такие входы ИНС, которые не меняются в процессе поездки и могут быть учтены до обучения, например, длина профиля, собственно профиль, масса поезда, тяговые и тормозные характеристики и пр.

На выходе сети должен быть сигнал, соответствующий позиции контроллера машиниста или позиции крана машиниста. Поэтому для всех макрорежимов (тяга, выбег, торможение) выделяем по отдельному нейрону. Можно подходить иначе, выделяя нейрон на каждую позицию контроллера, например, для электровоза ВЛ11 это 15 нейронов для режима тяги, отдельный нейрон на выбег и 4 нейрона на три ступени служебного торможения и полное служебное торможение. Такой подход увеличивает время обучения из-за количества нейронов, поэтому в расчетах не использовался.

Таблица 3.2 – Входы ИНС.

Номер входа ИНС	Содержание входа ИНС
0	Оставшееся время движения относительно запланированного
1	Текущий расход электроэнергии
2	Текущая скорость
3	Текущий ток
4	Текущее управление (позиция контроллера)
5	Текущее напряжение контактной сети
6	Текущее значение допустимой скорости
7	Расстояние до следующего ограничения
8	Текущая координата
9	Расстояние до конца ограничения скорости
10	Текущая температура лимитирующего по нагреву элемента ТЭД
11	Расстояние до запланированной остановки
12	Текущее максимальное расчетное значение продольной силы
13	Текущее сопротивление поезда, уточненное на борту

Таким образом, для обучения требуется эмулировать ИНС следующей конфигурации:

- 14 входов;
- 10 слоев;
- не менее 100 нейронов на слой, кроме выходного;
- 3 нейрона выходного слоя.

После того, как создана требуемая ИНС, необходимо провести ряд проверок:

- возможность обучения нейросети на одном примере;
- возможность обучения нейросети на двух примерах;

- возможность обучения нейросети на ОВ;
- тестирование нейросети.

Проведение, указанных проверок, должно выполняться в строгой последовательности с целью экономии времени.

Проверка возможности обучения на одном примере проводится путем подачи случайной пары вход-выход из обучающей выборки в течение трех циклов с проверкой работы в конце каждого цикла. Для того чтобы сравнивать выход сети с образцовым выходом при обучении и делать вывод о завершении обучения введем следующий критерий:

$$\sum_{k=1}^N (Q_{ok} - O_k)^2 < 0,005, \quad (3.15)$$

где Q_k – выход k - того нейрона выходного слоя;

Q_{ok} – образцовый выход k - того нейрона выходного слоя.

Так как максимальный выход нейрона равен 1, то максимальная суммарная ошибка по выходу не может превышать 0,5 %. Если во всех трех циклах выполняется неравенство (3.15), то можно переходить к следующей проверке.

Проверка возможности обучения сети на двух примерах проводится путем последовательного предъявления сети пары вход-выход, выбранных случайным образом из ОВ. Проверка предназначена для выявления переобучения сети и считается успешной, если обнаружена сходимость одновременно для двух пар вход-выход и выполняется условие (3.15).

Проверка возможности обучения на ОВ проводится аналогично предыдущей проверке только на всей выборке. После выполнения условия (3.15) последовательно для каждой пары вход – выход из ОВ проверка признается успешной.

Тестирование нейросети проводится с целью проверки правильности функционирования обученной ИНС при подаче на вход и выход сети информации

ТВ. В случае выполнения условия (3.15) для всех пар вход – выход из ТВ нейросеть признается готовой для использования.

Невыполнение хотя бы одного вида проверки говорит о том, что ИНС не пригодна к выполнению требуемых функций и должна быть переконфигурирована в сторону усложнения или ОВ должна быть расширена.

Для полной ясности необходимо определить размер и содержимое обучающей, тестирующей выборки. И обучающая и тестирующая выборки содержат пары вход-выход, подходящие для обучения или проверки работоспособности сети. Содержимое ОВ должно быть полностью отлично от содержимого ТВ ввиду того, что тестирование предназначено для проверки работоспособности ИНС в условиях квазислучайных входов. Обучение сети на большой выборке может быть значительным и зависит от структурной сложности ИНС, типа активационной функции, количества обучающих пар вход – эталонный выход. Поэтому следует стремиться снизить время обучения за счет уменьшения ОВ при условии успешного выполнения тестирования. Выбор начального размера ОВ тесно связан с общим предназначением нейросети. Обучение сети должно производиться на траекториях, полученных с помощью реализации метода Беллмана, причем управление в реальном времени должно обеспечиваться за счет быстрого распознавания текущей ситуации. Хотя нейросеть будет применяться для оптимального управления, обучение должно производиться не только на оптимальных траекториях причем следует помнить, что ИНС обладает свойством обобщения, то есть нечувствительностью к малому изменению входа. Поэтому для обучения достаточно взять не все траектории, а только те, которые имеют существенное отличие друг от друга. Критерием различия траекторий может являться интегральный параметр, аналог коэффициента автоковариационной функции при нулевом сдвиге:

$$\delta_{mn} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S |v_i^m - v_i^n|, \quad (3.16)$$

где v^m - вектор скорости m – той траектории;
 v^n - вектор скорости n – той траектории;
 S – длина пути, м.

Величина δ_{mn} является дискретной по причине дискретного изменения траекторий (рисунок 3.8).

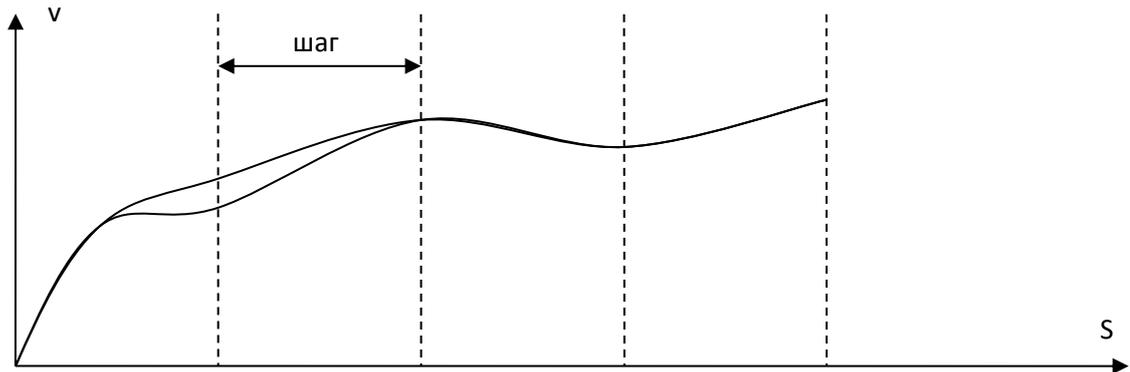


Рисунок 3.8 – Минимальное расхождение кривых скорости

Наименьшее значение δ_{mn} будет при расхождении векторов скорости для всех шагов дискретизации процесса ведения поезда. Наименьшее значение δ_{mn} будет в случае полного совпадения векторов скорости. Величина кванта изменения δ_{mn} является переменной величиной и зависит от изменения скорости в течение шага. Обучение на неоптимальных траекториях позволит использовать ИНС в условиях, отличающихся от расчетных. В противном случае обучение на нескольких оптимальных траекториях не позволит при ошибочном прогнозе адекватно управлять поездом. Такая ИНС не должна пройти тестирование, то есть ИНС не способная быстро менять планы управления не может использоваться для управления поездом.

При решении задачи оптимального ведения поезда с помощью программы, основанной на методе Беллмана, на выходе получаем одну или несколько траекторий движения поезда. При отработке этой траектории может быть расхождение начальных параметров или условий движения, для компенсации которого требуется сменить вектор режимов. В этом случае требуется иметь

информацию об истории движения, которая содержится в интегральных величинах – оставшемся времени хода, затраченной энергии, пройденном пути, и решить новую оптимальную задачу. Эта ситуация (а точнее с класс ситуаций) уже знакома из исследования классического решения задачи оптимального ведения поезда. ИНС, обученная на оптимальных траекториях, даже используя свойство обобщения вряд ли сможет адекватно отреагировать на ситуацию. Поэтому, чтобы убрать элемент случайности, и следует обучать ИНС на траекториях отличных от оптимальных, а в тестирующую выборку включить такие входы, которые имитируют ошибку в начальной информации и в прогнозе ограничений.

Таким образом, обучающая выборка может содержать как одну оптимальную траекторию, так все возможные траектории. Для составления ОВ воспользуемся методом последовательных приближений. При этом должна быть составлена таблица, которая заполняется результатами сравнения траекторий друг с другом, то есть первая траектория последовательно сравнивается со всеми, затем вторая и т.д. Затем выбирается такая пара или пары траекторий, различие между которыми максимально и не учитываются при дальнейших операциях. Среди оставшихся выбираются такие, которые имеют отличие между друг другом и между выбранными траекториями три четверти δ_{mn} максимального коэффициента, то есть $0,75 \cdot \delta_{mn} < \delta^{max}$. После этого можно выполнять обучение по известной схеме. Если ИНС не проходит тестирование успешно, то следует увеличить размер ОВ за счет снижения требований к различию между траекториями, то есть после выбора траекторий с максимальным коэффициентом различия выбирать такие, которые удовлетворяют условию $0,7 \cdot \delta_{mn} < \delta^{max}$. Аналогично поступаем до тех пор, пока не будут задействованы все траектории. Если и в этом случае не будет пройдено тестирование и ИНС не будет переобучаться, то следует дополнить ОВ образцами ТВ и провести тестирование на новой ТВ.

Процесс обучения будет завершен согласно [61], но теоретически может занять длительное время (в случае многих итераций). Практически ИНС в 60 случаях из 100 обучается и проходит тестирование даже на «25 %» ОВ.

Размер ТВ существенно меньше ОВ. В эту выборку входит несколько траекторий, имитирующих отклонение начальной информации, отклонения условий движения. Для тестирующей выборки можно выделить несколько характерных ситуаций:

- отличие тяговых характеристик;
- отличие токовых характеристик;
- отличие тормозных характеристик пневматического торможения;
- отличие сопротивления движению поезда;
- погрешность датчика позиционирования;
- погрешность датчика скорости;
- погрешности в пневматических датчиках;
- погрешность датчика тока;
- погрешность датчика напряжения;
- погрешность измерения массы поезда;
- погрешность измерения длины состава;
- ошибки в вычислении удельных ускоряющей и замедляющей сил в условиях случайного изменения коэффициента сцепления колеса с рельсом;
- непредвиденные ограничения скорости.

Для составления ТВ используется специализированная программа без решения оптимальной задачи.

Нейросеть, прошедшая испытания, может быть использована по назначению для расчета траекторий движения. Для того чтобы понять каким образом применять нейросетевой метод может быть практически использован, требуется произвести сравнение этого метода с уже существующими (метод Беллмана). Это необходимо по нескольким причинам:

- оценка качества управления новым методом;
- выявление недостатков метода;
- устранение недостатков метода путем комплексного подхода к решению задачи получения оптимальных траекторий движения поезда.

3.4 Эффективность применения нейросетевого метода в системах управления тяговым подвижным составом

При постановке задачи создания нового метода, качественно отличающегося от применявшихся ранее, были выделены отрицательные моменты, побудившие искать новое решение. Основным недостатком систем на базе классических методов можно назвать длительность расчета и, в связи с этим, повышенные требования к оборудованию. Нейросетевой метод позволяет избавиться от этого недостатка, что было показано в предыдущей главе. Ранее метод ИНС рассматривался только как расширение классического метода Беллмана, который был описан ранее. Обобщенный алгоритм нейросетевого метода представлен на рисунке 3.9.

Недостатки классического метода элиминируются путем применения высокопроизводительных компьютеров. С помощью нейросетевого метода получается система, которая не требует длительных пересчетов на борту, но это достигается за счет стационарного обучения, которое тоже займет время. Время на стационарное обучение будет зависеть от многих факторов, в том числе от производительности компьютеров, успешности обучения ИНС и т.д. Если не принимать во внимание затрат времени на преобразования ИНС в случае неудачного обучения, то время стационарного обучения сведется к следующему:

$$T_{co} = t_p + t_o + t_{\Pi} \quad (3.17)$$

где t_p – время классического расчета, с;

t_o – время обучения ИНС, с;

t_{Π} – время верификации ИНС, с.

Относительно метода Беллмана или принципа максимума Понтрягина возникают дополнительные временные затраты на стационарное обучение, которые окупаются в процессе движения за счет скорости смены траекторий движения. Также ИНС позволит использовать информацию о движении для обучения с подкреплением. Такое обучение заменяет стадию повышения адекватности

математической модели для динамического программирования и делает возможным учет технического состояния локомотива. Для выполнения обучения с подкреплением должен быть запущен отдельный экземпляр ИНС. В процессе обучения такая сеть может постоянно реплицироваться и применяться в управлении.



Рисунок 3.9 – Обобщенный алгоритм нейросетевого метода

В процессе движения выход ИНС должен на каждом шаге контролироваться для фильтрации возможных выбросов в случае неверного обобщения состояний поезда. Это связано с концепцией ИНС, как черного ящика. Чтобы реализовать такой контроль на борту, необходимо иметь модель поезда. Модель поезда должна быть не проще, чем для классического расчета. Управление ИНС контролируется с помощью определения присутствия прогнозных состояний для следующих десяти циклов расчета в множестве допустимых состояний. При классическом методе управления эти действия излишни, но для нейросетевого метода не являются обременительными и это нельзя считать минусом в данном случае.

Низкая стоимость оборудования также является одним из основных требований к локомотивным бортовым комплексам и сильным аргументом в

пользу нейросетевого метода. При использовании последнего стоимость оборудования будет складываться из дорогой стационарной части и бортового комплекса, который имеет низкую стоимость. Стационарный комплекс, который позволит обучать ИНС для каждого конкретного поезда, например, для каждой из железных дорог требуется всего один и его высокая стоимость распределяется по каждому электровозу, принадлежащему дороге. Общий парк электровозов и тепловозов (без учета маневровых) по данным ОАО «РЖД» составляет порядка 13800 единиц, а число железных дорог филиалов ОАО «РЖД» равно семнадцати, то есть цена стационарного комплекса, приведенная к электровозу, уменьшится на три порядка. Бортовая часть системы не потребует больших затрат из-за низких требований к аппаратным ресурсам. Точные требования к аппаратным ресурсам зависят от структуры сети и вида активационной функции. Сети до 1000 нейронов могут быть реализованы на бюджетных процессорах ARM или в виде виртуальной машины. В случае использования виртуальной машины стоимость оборудования может не учитываться.

К плюсам нейросетевого метода можно также отнести повышение надежности за счет использования менее сложных аппаратных решений, за счет меньшего расхода энергии на собственные нужды, централизованное формирование планов движения, которое минимизирует ручной ввод информации до поездки и т.д.

3.5 Выводы по разделу 3

1) Основными недостатками динамического программирования являются высокие требования к оперативной памяти и производительности ЦПУ ЭВМ для соблюдения режима реального времени не более 1 минуты для бортового применения или для выполнения параллельных расчетов за заданное время для стационарного применения. Понижение детализированности модели поезда будет

приводить к ошибкам расчета и большому количеству корректирующих перерасчетов.

2) Проведенный анализ подходом к построению бортовой системы управления позволяет утверждать, что наиболее предпочтительной архитектурой построения системы управления является система с разделением на стационарную и бортовую части. Это позволит уменьшить потребности бортового оборудования, так как подготовительные процедуры будут выполняться на большой стационарной ЭВМ с улучшенными показателями цена/производительность. Также следует подбирать такую методику тяговых расчетов, в которой можно было бы использовать историческую информацию о движении поезда и конкретного локомотива на заданном участке пути.

3) Предложен нейросетевой метод решения задачи (1.13). Рассмотрено строение ИНС и способы обучения. Предложена структура ИНС с учетом специфики задачи и показано принципиальное выполнение обучения на одной поездке, на двух и более поездках с проведением верификации ИНС после каждого обучения.

4) При использовании метода ИНС относительно метода Беллмана или принципа максимума Понтрягина возникают дополнительные временные затраты на стационарное обучение, которые окупаются в процессе движения за счет скорости смены траекторий движения. ИНС позволяет использовать информацию о движении для обучения с подкреплением. Такое обучение заменяет стадию повышения адекватности математической модели для динамического программирования и делает возможным учет технического состояния локомотива. Для выполнения обучения с подкреплением должен быть запущен отдельный экземпляр ИНС. В процессе обучения такая сеть может постоянно реплицироваться и применяться в управлении.

4 ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО МЕТОДА И ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ В ТЯГОВЫХ РАСЧЕТАХ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

4.1 Применение нейросетевого метода и динамического программирования в стационарных условиях

Использование тяговых расчетов для оперативного нормирования энергоресурсов на тягу поездов является одним из распространенных применений их в практической деятельности. Основными требованиями к системам оперативного нормирования являются: высокая производительность, точность решения, простота использования и обслуживания. Существующая программная реализация тяговых расчетов, разработанная на основании текущих правил тяговых расчетов, в полной мере не соответствует архитектурным требованиям систем оперативного нормирования [17].

Для реализации системы оперативного нормирования энергоресурсов на тягу поездов целесообразно использовать набор программ, который позволяет эффективно использовать вычислительные мощности выбранного сервера или кластера серверов. Это объясняется тем, что оптимальные решения по настоящее время являются достаточно затратными для процессора и для выполнения в пределах установленного времени расчета для одного поезда следует использовать дорогостоящие высокопроизводительные кластеры или применять расчеты на видеокартах (что также является очень дорогим решением с точки зрения масштабирования), так как методы позволяют распараллеливать выполнение подзадач и сократить время на расчет.

В доказательство данного утверждения необходимо сослаться на формулу, применяемую для метода Беллмана, с целью определения потребности в оперативной памяти на один тяговый расчет:

$$N_{TC} = \frac{S}{\Delta_s} \cdot \frac{v_{max}}{\Delta_v} \cdot N_U, \quad (4.1)$$

где S - длина пути;

Δ_s - величина шага дискретизации по координате;

v_{max} - максимальная скорость движения;

Δ_v - шаг по скорости;

N_U - число управлений.

Для типового тягового плеча в 200 км на поездку потребуется только оперативной памяти около 1 Гб, что при поточном расчете потребует серьезных вычислительных мощностей.

Точно следуя принципу Беллмана, программа должна быть разделена на три части: программы подготовки начальной информации, расчетная программа, программа визуализации. Это дополнительно позволяет повысить численную эффективность оперативного нормирования путём разделения задач: актуализация начальной информации об условиях движения и ограничениях, непосредственно проведение расчетов, обработка результатов. Все указанные задачи должны выполняться параллельно небольшим коллективом операторов, которые формируют задание на расчет и обеспечивают ввод начальной информации, если требуется. Так как предполагается, что потребителем информации является локомотивное депо, то результаты работы программного комплекса должны быть доступны непосредственно в конкретном депо. Однако, каждое локомотивное депо имеет ограниченное количество участков обслуживания, определенные серии локомотивов, поэтому задачу подготовки и актуализации начальной информации необходимо решать на более высоком уровне, чем отдельно взятое депо. Таким образом, программный комплекс должен иметь структуру, представленную на рисунке 4.1.

Операторы, решающие задачу подготовки и актуализации начальной информации, должны изначально наполнить базу данных требуемой информацией, а затем необходимо проводить актуализацию этой информации, например, ограничений по скорости, следование по удалению и другие условия движения.

Детерминированные методы оптимизации, такие как принцип максимума Понтрягина или принцип оптимальности Беллмана не предполагают обучение, поэтому не требуют постоянного обновления фактической информации. Однако, такие методы чувствительны к точности начальной информации. В случае, если изменяются характеристики подвижного состава, полученное оптимальное решение не претендует на точность. В отличие от метода классических методов применение метода «черного ящика» позволяет обеспечить непрерывное обучение и повышение точности норм [35].

Такие методы позволяют повышать точность решения в зависимости от поступления текущей информации о поездках. Причем следует стремиться к тому, чтобы максимальная часть информации могла обновляться автоматически из смежных информационных систем, например, метеорологическая, информация о составе и участке движения и т.д.

В качестве программы подготовки начальной информации для расчета целесообразно использовать приложение для работы с электронными таблицами из готовых свободных офисных пакетов, например, LibreOffice Calc на операционной системе Linux, которое является открытым программным обеспечением. Так как, обмен данными между частями комплекса проходят через базу данных (рисунок 4.1), то на этапе подготовки данных следует использовать готовое программное обеспечение, имеющее версии для всех распространенных операционных систем.

Профиль и план пути может быть введен в электронную таблицу в заданном формате, например, профиль: номер по порядку, длина элемента, уклон, план: начало кривой, окончание кривой, радиус кривой.

Затем введенные значения сохраняются в формате текста с разделителями и загружаются базу данных с использованием возможностей импорта, например, в базе данных MySQL существует оператор «LOAD DATA INFILE», который может напрямую загружать данные из файла.

Ввод функциональных зависимостей, выраженных в табличных данных из [46] также возможно реализовать в LibreOffice Calc или Microsoft Excel.

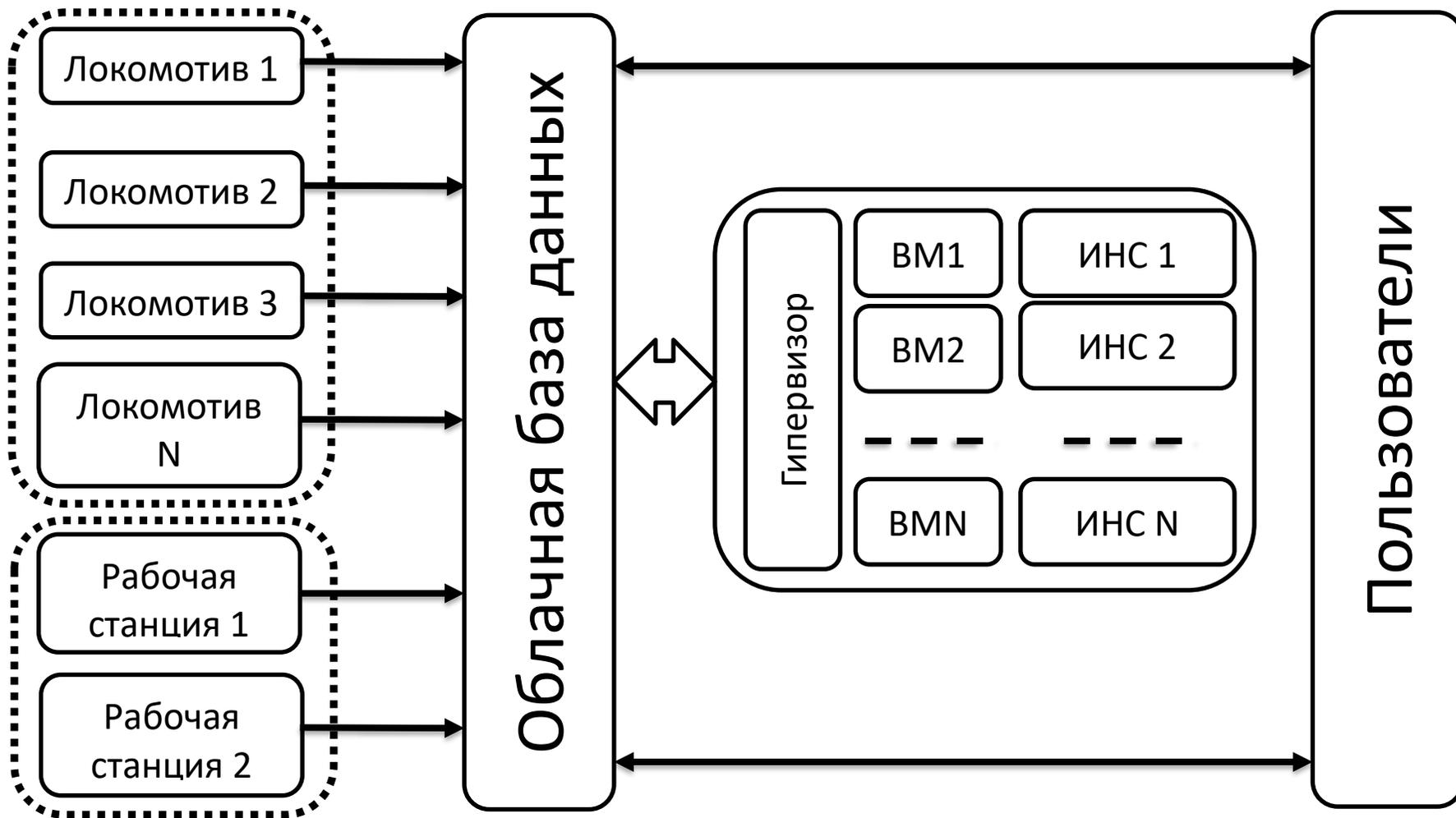


Рисунок 4.1 - Структура программного комплекса системы оперативного нормирования энергозатрат на тягу поездов

Рассмотрим пример получение функциональной зависимости тяговой характеристики ВЛ11, заданной в табличном виде (таблица 4.1). Данные вносятся в электронную таблицу, затем по ним строится диаграмма, затем добавляются линию тренда, которая будет регрессионной. Для лучшего приближения выбираем полиномиальную зависимость не менее седьмого порядка. Результат выполнения процедуры представлен на Рисунке 4.2. Значение коэффициента детерминации показывает высокую точность аппроксимации.

Таблица 4.1 – Тяговая характеристика ВЛ11 для последовательно-параллельного соединения ТЭД и полного возбуждения

Скорость, км/ч	Сила тяги, кН
2,17E+01	5,57E+02
2,23E+01	5,13E+02
2,29E+01	4,68E+02
2,35E+01	4,36E+02
2,41E+01	3,99E+02
2,50E+01	3,55E+02
2,59E+01	3,09E+02
2,65E+01	2,85E+02
2,71E+01	2,61E+02
2,80E+01	2,39E+02
2,89E+01	2,17E+02
2,95E+01	1,96E+02
3,04E+01	1,77E+02
3,13E+01	1,64E+02
3,19E+01	1,54E+02
3,31E+01	1,39E+02
3,40E+01	1,24E+02
3,52E+01	1,14E+02
3,61E+01	1,06E+02
3,70E+01	1,00E+02
3,83E+01	9,31E+01
3,98E+01	8,42E+01
4,10E+01	7,83E+01
4,19E+01	7,53E+01
4,28E+01	7,09E+01
4,37E+01	6,80E+01
4,49E+01	6,50E+01

Коэффициенты уравнения с рисунка 4.2 могут быть перенесены в базу данных путем вставки в заранее обусловленном формате в таблицу базы данных. Таким же образом вводятся и остальные функциональные зависимости локомотива и состава.

Программы в составе комплекса должны взаимодействовать друг с другом посредством базы данных. Это обусловлено тем, что имеются готовые инструменты для просмотра и правки данных, для эффективного многопользовательского доступа к данным. База данных позволяет эффективно манипулировать данными в рамках реляционной алгебры или пользовательских скриптов и обеспечивает надежное структурированное хранение данных, в том числе в режиме кластеризации или шардинга. В качестве такой базы данных использованы MySQL (или аналоги MariaDB, Percona Server) и PostgreSQL. Это свободные системы управления базами данных, которые используются в режиме совместного доступа по сети. Для локального тестирования программы используется локальная база данных SQLite, которая также обеспечивает многопользовательский доступ на локальном уровне. В случае реального использования системы с большим количеством удаленных пользователей целесообразно использовать одну из сетевых реляционных баз данных с размещением на выделенном сервере в облаке. Облако может быть частным в виде собственного сервера или кластера серверов с программным обеспечением на основе операционной системы Linux (OpenStack, Apache Cloudstack) или общедоступным (платформа облачных сервисов от Mail.Ru Group, платформа Microsoft Azure, платформа Amazon Web Services и т.д.).

Блок автоматического тягового расчета также должен быть размещен в облачной среде. Для такого требования есть несколько причин:

- требуемая высокая производительность. В качестве универсального метода оптимизации выбрано динамическое программирование, так как позволяет реализовать детальную модель поезда без ограничений на зависимости между переменными. Динамическое программирование предполагает несколько этапов: разбиение задачи на более простые - матрица возможных состояний поезда, получение и анализ возможных траекторий движения поезда, изменение условий, пересчет матрицы возможных состояний или пересборка траекторий и т.д. Этапы

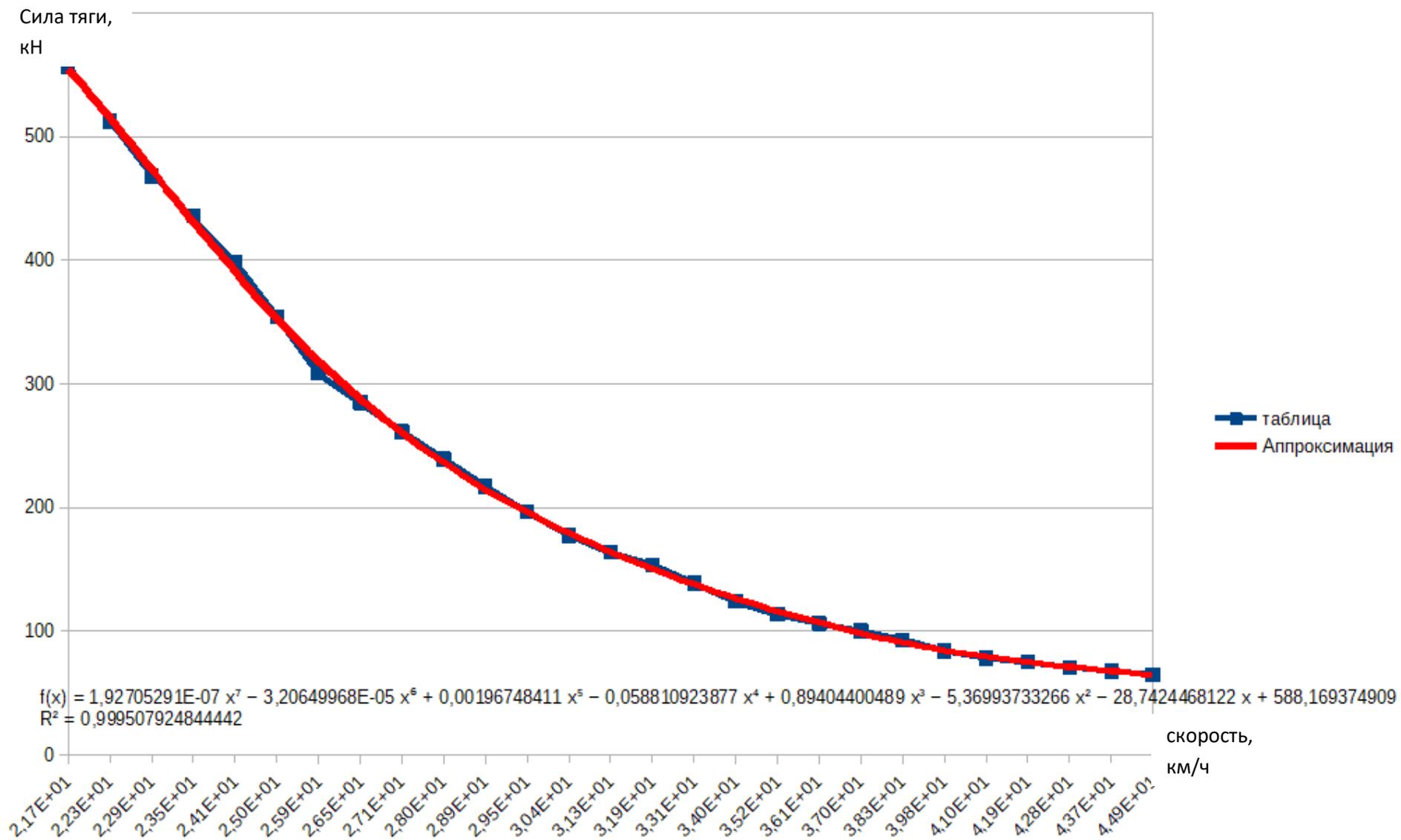


Рисунок 4.2 – Пример аппроксимации тяговой характеристики электровоза ВЛ11 полиномом 7й степени

алгоритма требуют частого интегрирования уравнения движения поезда с учетом многих ограничений (в зависимости от сложности модели), которые могут быть заданы в виде дифференциальных уравнений или даже в виде систем дифференциальных уравнений (в случае учета динамических сил в поезде). Для сокращения времени расчета должны применяться серверы с несколькими многоядерными процессорами, их число должно позволять выдерживать нагрузку от потребителей в случае роста запросов на расчет. С учетом количества грузовых локомотивов (порядка 7500) можно оценить максимальное количество поездов и соответственно количество запросов на расчет кратное количеству поездов. Поэтому требуется максимально масштабируемая система, что обеспечивается облачным решением.

– требования к объему оперативной памяти. Динамическое программирование является поисковым алгоритмом направленного перебора, который для определения решения осуществляет неполный перебор вариантных траекторий, количество которых ограничивается алгоритмически по целому ряду условий. Невозможные варианты перебора отсеиваются на каждом шаге, поэтому не осуществляется полный перебор. Но даже в этом случае при малой величине шага по координате и большой длине тягового плеча количество возможных траекторий составляет число 10^{22} и более. Использование облачной среды позволяет запустить процесс решения внутри виртуальной машины, ресурсами которой можно гибко управлять;

– сетевой доступ - множественный доступ. Высокие требования к аппаратному обеспечению накладывают ограничения на сценарии использования вычислительной программы для большого количества потребителей. При наличии быстрых каналов связи нет необходимости размещать оборудование рядом с конечным пользователем. Поэтому облачное применение программы позволит сэкономить финансовые ресурсы заказчика и консолидировать вычислительную нагрузку.

Прорывным решением по сравнению с классическими методами является метод, позволяющий разделить процессы реализации и получения решения.

Современный технический уровень и математический аппарат позволяют в полной мере использовать методы нелинейной аппроксимации многомерных функций – ИНС.

Необходимость в применении таких структур возникла по причине основных недостатков классических методов: длительное получение оптимального решения, потребность в специальном повышении адекватности начальных данных, априорная модель поезда, не учитывающая конкретные особенности подвижного состава.

Для метода искусственных нейронных сетей потребности в памяти определяются только в режиме обучения, которое может производиться параллельно с работой нейросети и разделено во времени и пространстве, зависят от структуры сети и размера выборок. При 1000 нейронов потребности в памяти не превысят 1 Гб.

В качестве универсального кроссплатформенного средства визуализации результатов расчётов выступает интерфейс веб-приложения, альтернативным вариантом может быть использование отдельного десктопного приложения. Для работы с разработанным на кафедре «Тяговый подвижной состав» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (МИИТ) комплексом было создано приложение с подключением к базе данных. Интерфейс приложения представлен на рисунке 4.3.

Приложение посредством прямого подключения к базе данных извлекает результаты расчетов и отображает на дисплее оператора (машиниста). В прототипированной версии, реализованной на кафедре «Тяговый подвижной состав», выполняется только поиск по уникальному идентификатору поездки для того, чтобы показать реализуемость предлагаемого в работе решения. Если используется сетевая база данных, то поддерживается многопользовательский доступ к нормам в сервере базы данных.

Как видно из рисунка 4.3, интерфейсная часть приложения разделена на две области.

В правой таблице для демонстрации отображены все выполненные

нормирования за текущий сеанс работы, а в левой части содержится более подробная информация о каждой конкретной поездке с фильтрацией по суткам и уникальным номерам поездок в течение суток.

Для сравнения выполнялись нормировочные вариантные расчеты для различных участков пути с различными условиями движения и параметрами поезда, обучение ИНС проводилось на ограниченном числе модельных поездок (1000 поездок).

Для базового расчета выбирался произвольный участок профиля длиной около 50 километров, а поезд состоял из локомотива ВЛ11 и пятидесяти полувагонов полностью и неполностью загруженных. Проводилось десять вариантных расчетов, имитирующих различные ситуации с пропуском поезда на отдельных участках пути за изменения временных ограничений скорости, которые выполнены с различными условиями движения, результаты осреднялись и записывались, как результат одной поездки. Методы менялись циклически, поэтому в поездках 1, 3, 5, 6, 8, 10 применялся метод Беллмана, в поездках 2, 4, 7, 9 выполнялись с помощью ИНС. с полностью идентичными условиями в парах поездок 1-2, 3-4, 6-7, 8-9 для проведения оценки работы методов. Для экономии потребления памяти и ускорения расчетов не приводятся кривые движения в графическом виде.

Результаты расчетов показывают, что время хода поезда выдерживается достаточно точно и разброс этого параметра менее минуты. Цифры, полученные одним и другим методом, являются достаточно близкими, что подтверждает эквивалентность решений и высокое качество управления методом ИНС.

4.2 Применение нейросетевого метода и динамического программирования на борту тягового подвижного состава

До сих пор не говорилось о теоретических результатах при разработке метода ИНС и без обоснования были даны утверждения о низких требованиях к бортовой аппаратуре и выигрыше в управлении в реальном времени.

Показатель	Поездка №1	Поездка №2	Поездка №3	Поездка №4	Поездка №5	Поездка №6	Поездка №7	Поездка №8	Поездка №9	Поездка №10
Энергия, кВт*ч	2723,06	2774,37	2810,64	2810,64	2858,94	2324,89	2443,14	2479,15	2597,81	2423,08
Удельный расход энергии	159,97	162,98	165,12	165,12	167,95	136,58	143,53	145,64	152,61	142,35
Время движения, мин	61,54	61,33	61,61	61,61	61,72	61,59	61,66	61,65	61,66	61,71
Масса поезда, тс	3404,45	3404,45	3404,45	3404,45	3404,45	3404,45	3404,45	3404,45	3404,45	3404,45
Электровоз	ВЛ11									
Тип пути	звеньевой									
Длина пути	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000
Техническая скорость	48,75	48,92	48,70	48,70	48,61	48,71	48,66	48,67	48,65	48,61
Стратегия ведения поезда	Рационализация									
Длина поезда, м	733	733	733	733	733	733	733	733	733	733
Число вагонов	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Боковой ветер, км/ч	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Максимальный ток, А	2918,85	2919,67	2918,79	2918,79	2918,79	2885,15	2918,70	2919,32	2919,32	2900,02
Число смен режима	151	152	157	157	160	124	135	127	134	123
Движение в тяге, %	48	49	50	50	51	42	43	42	44	42
Движение на выбеге, %	17	16	15	15	13	31	28	28	23	29
Движение в режиме торможения, %	35	35	35	35	35	26	28	30	32	29
Уклоны +, % по времени	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Уклоны -, % по времени	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Уклоны +, % по пути	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Уклоны -, % по пути	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Число торможений	16	17	16	16	16	13	13	15	16	15

Рисунок 4.3 – Вывод результатов работы программы (частичная копия экрана) через пользовательское демонстрационное приложение для метода ИНС

Наиболее простой реализацией ИНС является ее программная эмуляция. Для этого создается отдельный класс на языке Delphi, описывающий ИНС из внешней библиотеки FANN. Описание класса для полносвязной сети прямого распространения представлено в таблице 4.2 и таблице 4.3.

Таблица 4.2 – Описание полей класса

Поле	Тип
Число слоев	Целое без знака
Число нейронов по слоям	Целое без знака
Входы	Одномерный массив чисел с плавающей точкой
Выходы	Одномерный массив чисел с плавающей точкой
Весы по слоям и нейронам	Двумерный массив чисел с плавающей точкой
Тип активационной функции по нейронам	Двумерный массив целых чисел без знака
Образцовый выход	Одномерный массив чисел с плавающей точкой
Число входов	Целое без знака
Число выходов	Целое без знака
Параметр активационной функции по нейронам	Двумерный массив чисел с плавающей точкой
Коэффициент обучения	Число с плавающей точкой
Коэффициенты нормировки	Двумерный массив чисел с плавающей точкой
Предел обучения	Число с плавающей точкой

Таблица 4.3 – Описание методов класса

Метод	Входные параметры	Выходные параметры	Назначение
Создание	-	Создано/Ошибка	Создает ИНС для заданных условий
Обучение	-	Результат обучения	Однократное обучение сети
Начальная инициализация весов сети	-	-	
Работа	-	Результат работы	Однократное вычисление выходов по заданным входам
Сохранение ИНС	Имя файла	Файл со структурой ИНС	
Загрузка ИНС	Имя файла	Созданная ИНС	

Реализация класса позволяет создавать требуемое количество отдельных ИНС, обучать их и работать с ними. Для обучения достаточно иметь ОВ и ТВ, которые представляют собой массивы данных. Для работы ИНС необходимо заполнить входной массив и выполнить процедуру работы. Выходной массив будет содержать информацию о режиме работы электровоза.

Язык Delphi не может быть использован для написания программы бортовой системы управления и выбран с учетом удобства разработки в операционных системах Microsoft Windows 10, которые не являются операционными системами реального времени (ОСРВ). В качестве решающего процессора на борту электровоза может быть использовано готовое решение на базе процессоров архитектуры x86/64 или ARM. В этом случае можно выбрать

такие процессоры, которые удовлетворяют требуемому уровню производительности для выполнения условий реального времени и которые могут работать под управлением ОСРВ или без операционных систем, например, Windows CE, freeRTOS и т.д. Требование использования операционной системы не является обязательным, но в современных сложных системах на чипе сложно без нее обойтись. Поэтому для встраиваемой части следует переписать класс на языке C++, а для стационарной части может быть использована реализация на языке Delphi. Класс является ядром для построения программы, но дополнительно должны быть реализованы процедуры уточнения модели, ограничительная процедура, процедуры ввода/вывода информации и т.д. Это может потребовать дополнительных ресурсов от аппаратного обеспечения.

Основное вычислительное время будет тратиться при использовании ИНС на рабочую функцию (время обучения является лимитирующим фактором для стационарной части). Время работы этой функции зависит от структуры сети, но возможно оценить какой процент процессорного времени займет эта функция. Для примера используется несколько сетей с различным количеством слоев, нейронов в слое и активационными функциями, но для одинакового количества входов, выходов. Результаты сведены в таблицу 4.4.

Обязательным условием построения системы управления является наличие следующих датчиков: навигационных, токовых, напряжения, давления, температуры, АЛСН. Под навигационным датчиком понимается система, которая обеспечивает выполнение всех функций, обеспечивающих основной блок информацией о местоположении поезда и текущем состоянии движения, а также связанной с ней: профиль, ограничения скорости, координаты остановок и прочих объектов и т.д. Датчики должны обеспечивать решатель информацией с требуемым темпом, то есть строго выдерживать частоту передачи и длительность передачи во избежание динамических ошибок, о которых говорилось выше.

Таблица 4.4 – Временные показатели функции «Работа ИНС»

Число слоев	Число нейронов в слое	Активационная функция	Время абсолютное, с	Загрузка процессора, %
5	100	Сигмоида	1	3,4
5	100	Гиперболический тангенс	1,2	4,3
10	200	Сигмоида	1,6	5,2
10	200	Гиперболический тангенс	1,8	7,7
15	300	Сигмоида	2	7,3
15	300	Гиперболический тангенс	2,1	9,2

Тяговые расчеты для бортового исполнения на основе динамического программирования будут проигрывать методу ИНС по скорости принятия решений в условиях неопределенности из-за полного пересчета решения, о чем говорилось ранее. Такой существенный недостаток, как вычислительная сложность алгоритма, может быть преодолен только за счет применения более производительного оборудования, что нецелесообразно с точки зрения экономики и сложно выполнимо с точки зрения технической. Также на основе замеров времени расчета и проведения расчетов ИНС в процессе выполнения функции работы установлено, что цикл расчета нейросети является достаточным для реакции на изменения первичной информации расчета.

4.3 Особенности применения нейросетевого метода в системах управления перспективного тягового подвижного состава

Сложившиеся тенденции перехода на работу машиниста в одно лицо, а в последующем на безлюдные технологии, требует усиления роли перспективных

МСУ, как элемента автоматики и диагностики [27, 28]. Для указанных режимов работы бортовые системы управления должны иметь достаточное информационное обеспечение, которое превосходит или как минимум не хуже, чем у машиниста. То есть должна быть предусмотрена диагностика для определения отказа локомотива или его подсистем, МСУ должны проводить анализ визуальной и звуковой информации внешней среды, иметь надежную связь с инфраструктурой.

Реализации поставленных целей требует перехода на новую платформу, которая обеспечит реализацию универсальной МСУ с преимущественно программно-определяемыми функциями и стандартным интерфейсом взаимодействия внутри самой МСУ, между МСУ разных локомотивов и внутри системы «поезд – инфраструктура».

Повышение конкурентоспособности, а значит снижение цены на МСУ, невозможно без привлечения новых разработчиков и создания эффективной конкурентной среды [20].

Для этого следует рассматривать систему на двух уровнях (Рисунок 4.4), которые в свою очередь будут разделены на модули.

Аппаратный модуль будет называться структурным блоком системы. Количество структурных блоков должно быть минимизировано. Для перспективной типовой МСУ следует выделить следующие структурные блоки: блок безопасности движения (ББД), блок центрального вычислителя (БЦВ), блок коммутации (БК1 и БК2), блок интерфейса человек-машина (БИЧМ), блок контроллера жизненного цикла (БЖЦ), блок беспроводных коммуникаций (ББК). Такое количество блоков будет достаточным для применения на всех типах подвижного состава: магистральные, и маневровые локомотивы, моторвагонный подвижной состав, специальный самоходный подвижной состав и др.

Отличительной чертой модульного и блочного исполнения должна стать легкая замена одного блока (модуля) на другой, в том числе и другого производителя. То есть перспективная МСУ должна масштабироваться и

модифицироваться в зависимости от конкретных условий, востребованных функций, типа подвижного состава, энергопотребления и т.д. Для этого структурные блоки должны поддерживать стандартизованный интерфейс взаимодействия (рисунок 4.5). В настоящий момент локомотивные устройства КЛУБ-У, УСАВП и САУТ не отвечают требованиям гибкости и масштабируемости, имеют несколько версий для локомотивов и МВПС различного типа. Попытка объединить указанные системы в единую комплексную систему была принята при разработке ЕКС, но из-за проприетарных технологий не было достигнуто гармонизации работы систем.

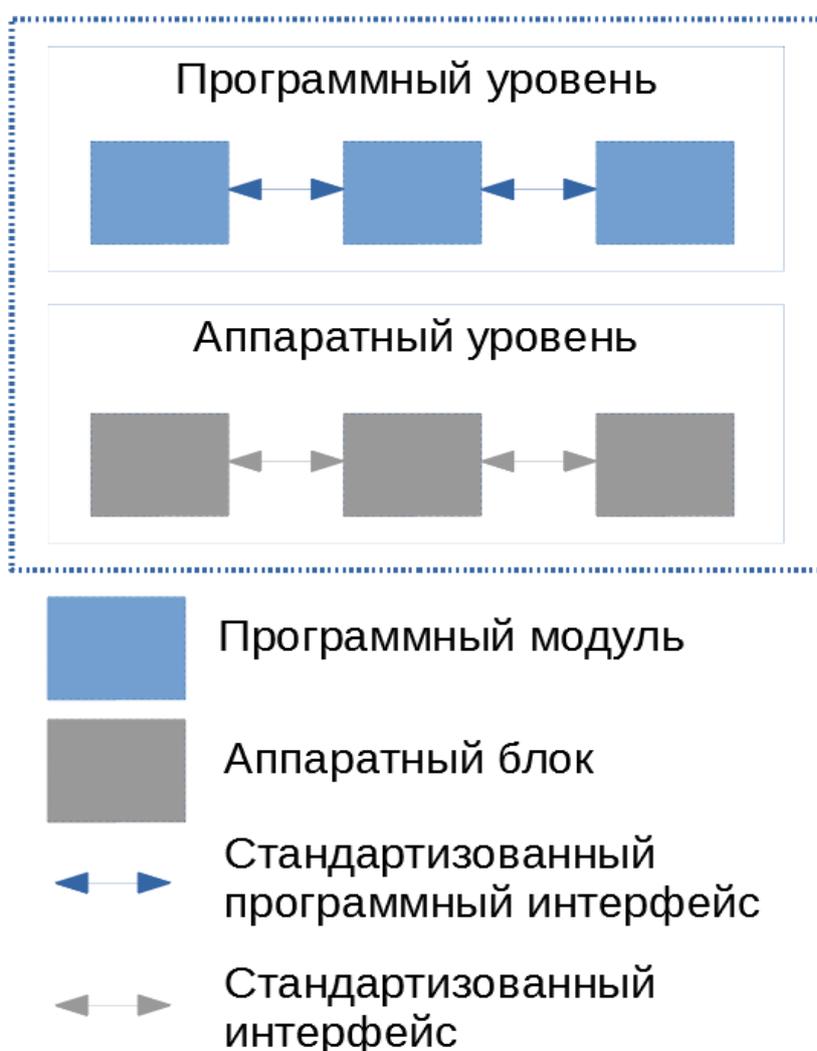
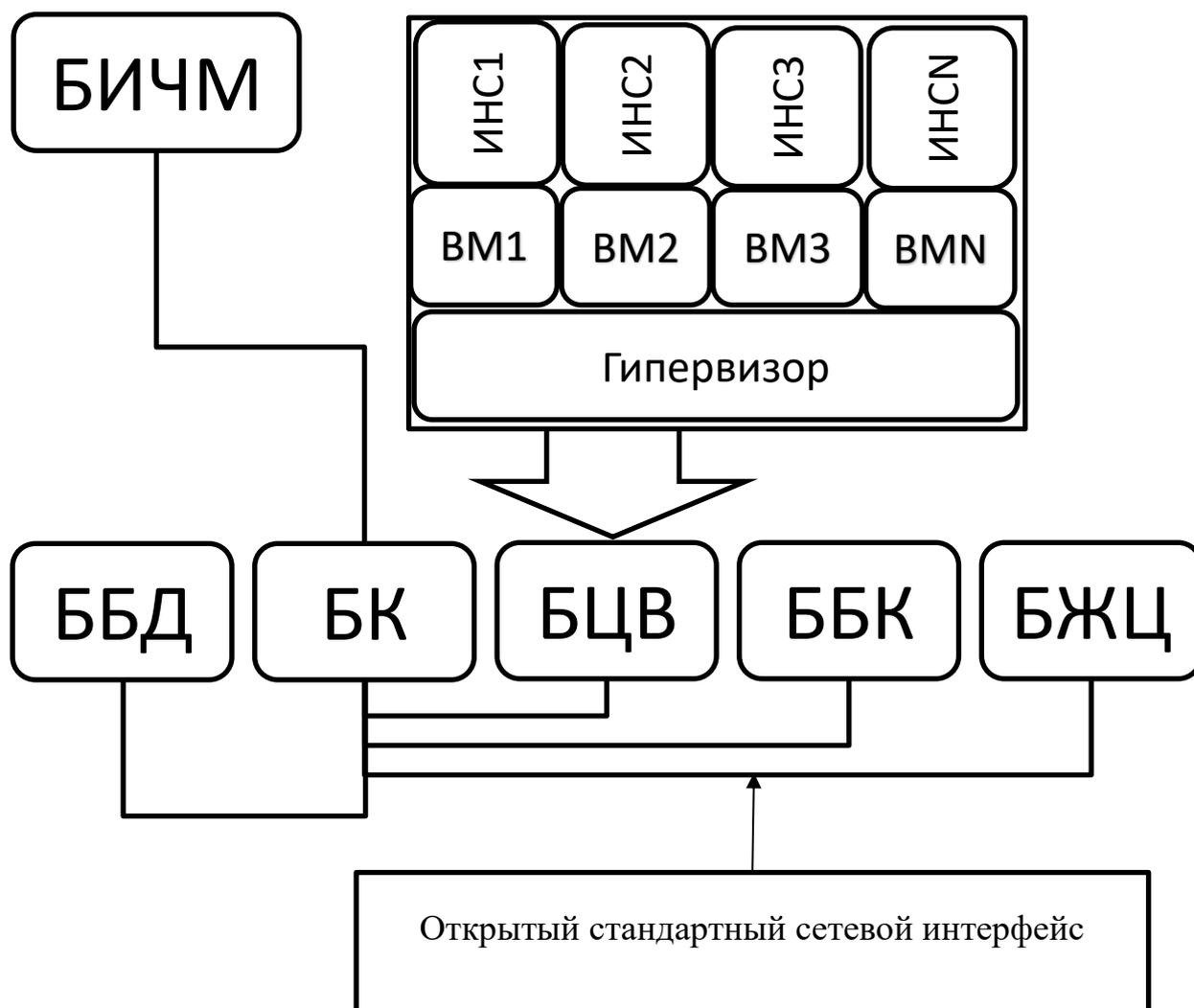


Рисунок 4.4 – Структура МСУ



БИЧМ - блок интерфейса “человек - машина”, ББД - блок безопасности движения, БЦВ - блок центрального вычислителя, БК - блок коммутаторов №1, ББК - блок беспроводных коммуникаций, БЖЦ - блок жизненного цикла
Рисунок 4.5 - Типовой состав аппаратного уровня МСУ

Чтобы обеспечить гибкие изменения и реконфигурацию МСУ, в составе устройства должен быть блок - контроллер жизненного цикла системы, как это сделано во многих серверных решениях. Этот блок выполняется отказоустойчивым и реализует функции конфигурации МСУ с ведением журнала изменений, управление блоками и диагностики блоков с ведением журнала отказов. Конфигурация системы должна производиться в зависимости от включенных в набор блоков автоматически или в ручном режиме, а

обновление ПО блоков должно выполняться в зависимости от текущей конфигурации системы только в автоматическом режиме.

Отличительной чертой парадигмы разработки перспективных МСУ является абстрагирование ПО от аппаратного. Этот базовый принцип позволит значительно повысить конкурентоспособность разработки, а значит снизить эксплуатационные расходы. Программное обеспечение максимально абстрагировано от оборудования путем применения дополнительного программного слоя, который управляет загрузкой операционных систем [49].

Учитывая перспективы общения устройств, для взаимодействия блоков и модулей перспективной МСУ целесообразно выбрать сетевой интерфейс, то есть такой интерфейс, который позволяет организовать обмен информацией в сетях с большим количеством устройств, чтобы уйти от возможных ограничений при обеспечении масштабируемости. Это особенно важно в условиях увеличения информационных единиц на подвижном составе.

Сетевой интерфейс позволит закрыть все уровни взаимодействия на платформе перспективных МСУ. Однако, это обстоятельство наложит на него ограничение в виде удовлетворения требований, полученных от всех уровней информационного взаимодействия. Для систем управления низкого уровня требуется реальное время работы, т.е. предсказуемая задержка управляющего сигнала и сигналов с датчиков. Одновременно с этим, при использовании видеокамер в качестве источников информации (машинное зрение) требуется высокая скорость передачи, для взаимодействия с инфраструктурой требуется возможность работы в глобальной сети и т.д.

Также одним из базовых принципов при выборе интерфейса является его открытость, что исключит использование несовместимых интерфейсов, сократит аппаратную часть. Стандартизация интерфейсов межблочного взаимодействия и межсистемного взаимодействия позволит разрабатывать блоки для МСУ различным независимым разработчикам в рамках единой платформы бортовых устройств, базирующуюся на единой платформе и едином стандартном подходе.

На текущий момент существуют промышленные интерфейсы, частично или полностью подходящие для роли прототипа общесистемного интерфейса, например, Profinet - открытый промышленный стандарт для автоматизации от ассоциации Ethernet PROFIBUS & PROFINET International (PI).

Третьим базовым принципом является отделение функций, требующих функциональной безопасности в отдельный блок - блок безопасности движения. ББД представляет собой обособленный структурный элемент системы, который взаимодействует с остальной системой только в режиме чтения. Этот блок может быть заимствован из существующих МСУ, и может иметь собственные интерфейсы подключения к датчикам. ББД выполняет простые функции, обеспечивающие безопасность движения с учетом требований функциональной безопасности. Новые функции (предиктивная диагностика, контроль за работой тормозов поезда, контроль изменения плотности тормозной магистрали в пути следования, контроль доступа на локомотив персонала и т.д.), направленные на обеспечение безопасности движения и реализуемые в БЦВ. Таким образом, создается двухуровневая иерархическая модель: ББД - БЦВ, в которой при отказе функции безопасности на уровне БЦВ с уровнем полноты безопасности ниже, чем в ББД, происходит проверка на уровне ББД. И вероятность опасного отказа уменьшается, что автоматически повышает безопасность движения.

В перспективных МСУ допускается масштабирование блоков коммутации или центрального вычислителя внутри одного устройства, если это необходимо (на рисунке 4.5 показано два блока коммутации). Если функции системы не могут быть реализованы установкой специфичного блока коммутации или блока центрального вычислителя (например, для задачи, требующей повышенную производительность), то возможно расширение количества блоков путем добавления нового блока, который должен сохранять принципы разработки МПСУ.

Встраивание в описанную архитектуру перспективной МСУ программ для расчета программ на основе ИНС происходит только в виде программного решения и не потребует изменения архитектуры системы, так как программный

уровень является абстрагированным за счет гипервизора от оборудования. Дальнейшие информационные связи обеспечиваются унифицированными уровнями программных интерфейсов между блоками и модулями системы. Такой подход позволяет использовать преимущества компактного размещения ИНС в оперативной памяти и реализовать одновременное параллельное функционирование множества обученных ИНС, а какие-то экземпляры и обучать методом обучения с подкреплением. При архитектуре современных систем управления такая гибкость применения ИНС теряется или их применение невозможно.

4.4 Выводы по разделу 4

1) Использование тяговых расчетов для оперативного нормирования энергоресурсов на тягу поездов является одним из распространенных применений их в практической деятельности. Основными требованиями к системам оперативного нормирования являются: высокая производительность, точность решения, простота использования и обслуживания. Существующая программная реализация тяговых расчетов, разработанная на основании текущих правил тяговых расчетов, в полной мере не соответствует архитектурным требованиям систем оперативного нормирования.

2) Тяговые расчеты для бортового исполнения на основе динамического программирования будут проигрывать методу ИНС по скорости принятия решений в условиях неопределенности из-за полного пересчета решения при одинаковом аппаратном обеспечении. Такой существенный недостаток, как вычислительная сложность алгоритма, может быть преодолен только за счет применения более производительного оборудования, что нецелесообразно с точки зрения экономики и сложно выполнимо с точки зрения технической. Также на основе замеров времени расчета и проведения расчетов ИНС в процессе выполнения функции работы установлено, что цикл расчета

нейросети является достаточным для реакции на изменения первичной информации расчета.

3) Метод ИНС не является таким требовательным к ресурсам, как метод динамического программирования, но из-за программной эмуляции нейронных сетей не может быть использован в бортовых системах на маломощных контроллерах. Поэтому для применения метода требуется пересмотреть архитектуру перспективной МСУ. Отличительной чертой парадигмы разработки перспективных МСУ является абстрагирование ПО от аппаратного. Этот базовый принцип позволит значительно повысить конкурентоспособность разработки, а значит снизить эксплуатационные расходы. Программное обеспечение максимально абстрагировано от оборудования путем применения дополнительного программного слоя, который управляет загрузкой операционных систем. Такая архитектура позволит использовать множество экземпляров нейросетей с различными стратегиями обучения и применять соответствующую в зависимости от условий движения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена задача синтеза нового метода тяговых расчетов для решения стационарных задач, например, оперативного нормирования энергозатрат и для использования в перспективных системах управления поездом с новыми свойствами на основе искусственных нейронных сетей. Разработка этого метода была основана на анализе существующей методологии решения задач оперативного нормирования энергозатрат для экономии энергии и с учетом удовлетворения требований к тяговым расчетам для бортовой системы управления поездом. В основу метода были положены качества, принадлежавшие только биологическим системам:

- возможность обучения;
- ассоциативность;
- накопление опыта;
- нечувствительность к случайным возмущениям;
- и кибер-физическим системам;
- расчет энергооптимального плана движения при выполнении всех заданных ограничений;
- высокая устойчивость алгоритма ведения поезда;
- использование большого объема информации о движении поезда;
- детерминированное поведение.

В работе получены следующие основные результаты:

а) Проведен анализ методов тяговых расчетов в результате чего сделан вывод о целесообразности получения единственного лучшего вектора управлений поезда. Поэтому сформулирована задача оптимального тягового расчета с целью снижения энергозатрат и определен метод ее решения.

б) Подобран современный математический аппарат, наиболее применимый для решения сформулированной оптимальной задачи.

в) Разработан алгоритм и на его основе ПО для выполнения оптимальных тяговых расчетов.

г) Проанализированы результаты тяговых расчетов, выполненных разработанным ПО, в части применимости для практических задач. Определены существенные ограничения разработанного ПО, которые требуют применения поиска новых методов выполнения тяговых расчетов.

д) Разработан новый улучшенный метод выполнения оптимальных тяговых расчетов с повышенной точностью, с меньшими затратами времени и вычислительных ресурсов. Основное преимущество разработанного метода – уменьшение времени регулирования и снижение энергии по отношению к упрощенным моделям, снижение требований к аппаратному обеспечению, как в условиях стационарного использования, так и в условиях работы на борту локомотива, а также непрерывное улучшение решений с помощью дообучения.

е) Проведен сравнительный анализ нового метода выполнения оптимальных тяговых расчетов с методом Беллмана в условиях стационарного использования. Полученные результаты показывают достижение поставленных целей разработки улучшенного метода тяговых расчетов.

ж) Разработан механизм внедрения нового ПО оптимальных тяговых расчетов на основе метода ИНС в перспективные локомотивные системы управления движением поезда. Разработанный метод ИНС позволяет применять унифицированное аппаратное обеспечение для различных типов поездов, а значит органично вписаться в архитектуру перспективных бортовых устройств безопасности, управления и диагностики, что обеспечивает выполнение требований концепции цифровой железной дороги и способствует выполнению показателей долгосрочных планов развития дирекций ОАО «РЖД».

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЛСН – автоматическая локомотивная сигнализация непрерывного действия

ДПС – датчик пути и скорости

ЕКС – единая комплексная система управления и обеспечения безопасности движения на тяговом подвижном составе

ИНС – искусственные нейронные сети

КЛУБ (КЛУБ-У) – комплексное локомотивное устройство безопасности (унифицированное)

МВПС – моторвагонный подвижной состав

МСУ – микропроцессорная система управления

ПО – программное обеспечение

ПС – подвижной состав

ПСТ – полное служебное торможение

ПТ – пневматические автотормоза поезда

ПТР – правила тяговых расчетов

САУТ – система автоматического управления торможением поездов

СНС – спутниковая навигационная система

ТПС – тяговый подвижной состав

УСАВП – унифицированная система автоматизированного ведения поезда

ЦПУ – центральное процессорное устройство

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

ЭПТ – электропневматический тормоз

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аппаратура локомотивная. Система автоматического управления торможением поездов САУТ-ЦМ/485 [Текст] / Технические условия 01Ц.01.00.00 ТУ. – М.: Министерство путей сообщения Российской Федерации, 2002. – 65 с.
2. Астрахан, В.И. Системы автоматики для управления поездами метрополитена [Текст] / В.И. Астрахан, Ю.А. Барышев. – М.: Транспорт, 1989. – 87 с.
3. Астрахан, В.И. Адаптивное управление движением поезда метрополитена [Текст] / В.И. Астрахан, Ю.А. Барышев // Автоматизация управления движением поездов метрополитена : сб. науч. тр. – М.: Транспорт, 1987. – С. 31–43.
4. Баранов, Л.А. Автоматизированные системы управления электроподвижным составом : учебник в 3 ч. Ч. 1. Теория автоматического управления / Л.А. Баранов, А.Н. Савоськин, О.Е. Пудовиков и др.; под ред. Л.А. Баранова и А.Н. Савоськина. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. – 400 с.
5. Баранов, Л.А. Микропроцессорные системы автоведения подвижного состава [Текст] / Л.А. Баранов, Я.М. Головичер, Е.В. Ерофеев, В.М. Максимов; под ред. Л.А. Баранова. – М.: Транспорт, 1990. – 272 с.
6. Баранов, Л.А. Оптимизация управления движением поездов : учеб. пособие [Текст] / Л.А. Баранов, Е.В. Ерофеев, И.С. Мелешин, Л.М. Чинь; под ред. д.т.н., проф. Л.А. Баранова. – М.: МИИТ, 2001. – 164 с.
7. Ветлугин, Б.И. Разработка и исследование устройства прицельного торможения пригородного поезда : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Ветлугин Борис Иванович. – М., 1979. - 154 с. : ил.
8. Галушкин, А.И. Нейронные сети: основы теории. / А.И. Галушкин. - М.: РиС, 2015. - 496 с.

9. Головин, В.И. Исследование алгоритмов и систем автоматического управления тормозами электропоезда при следовании на запрещающий сигнал : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / Головин Владимир Иванович. – Свердловск, 1971. – 171 с.
10. Головичер Я.М. Оптимальное управление тяговым подвижным составом в системах автоведения магистральных железных дорог: дис. ... д-ра. техн. наук: 05.22.07. – М., 1994. – 346 с.
11. Горбань, А.Н. Сибирский журнал вычислительной автоматики, 1998. Т.1, №1. С. 12-24.
12. Гребенюк П.Т., Долганова А.Н., Скворцова А.И. Тяговые расчеты: Справочник / Под ред. П.Т. Гребенюка. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
13. Евдомаха, Г. В. Автоматизация тяговых расчетов, учитывающих динамическую нагруженность поезда: диссертация ... кандидата технических наук : 05.22.07. - Днепропетровск, 1987. - 164 с.
14. Ерофеев Е.В. Алгоритмы централизованного управления поездами метрополитена для системы автоведения. /Автоматическое управление технологическими процессами на транспорте / Юбилейный сб. науч. тр. Вып.892.-М.:МИИТ, 1996.-С. 22-26.
15. Ерофеев Е.В. Выбор оптимального режима ведения поезда на АЦВМ с применением метода динамического программирования//Тр.МИИТ.- 1967,-вып.228, -С. 16-30.
16. Ерофеев Е.В. Определение оптимального режима ведения движения поезда при заданном времени хода// Вестник ВНИИЖТ.- 1969.- №1.- С.54-57.
17. Ерошенко, А. В. Разработка системы оперативного контроля удельного расхода электроэнергии отдельно взятыми поездами на участке магистральной железной дороги постоянного тока : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.22.07 / Ерошенко Александра Викторовна; [Место защиты: Ом. гос. ун-т путей сообщ.]. - Омск, 2008. - 16 с.

18. Заенцев, И.- Нейронные сети: основные модели - Учебное пособие к курсу «Нейронные сети» для студентов 5 курса магистратуры кафедры электроники физического факультета Воронежского Государственного университета. – Воронеж: Воронежский Государственный университет, 1999. – 76 с.
19. Каллан, Р. Нейронные сети: Краткий справочник / Р. Каллан. - М.: Вильямс И.Д., 2017. - 288 с.
20. Капустин, М.Ю. К вопросу об унификации и стандартизации локомотивных микропроцессорных систем [Текст] / М.Ю. Капустин, С.В. Малахов // Локомотивы. Электрический транспорт. XXI век т.2 : материалы VI Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 13-15 ноября 2018 г. - СПб. : ФГБОУ ВО ПГУПС, 2018. - 249 с., С. 67–74.
21. Лазарян В.А., Блохин Е.П., Белик Л.В. О выборе численных методов интегрирования уравнений движения существенно нелинейных одномерных механических систем. – В кн.: Некоторые задачи механики скоростного транспорта. Киев, Наукова думка, 1970, с.125-135.
22. Лисенков, В.М. Системы управления движением поездов на перегонах : учебник для вузов ж.-д. транспорта: в 3 ч. [Текст] / В.М. Лисенков, П.Ф. Бестемьянов, В.Б. Леушин и др.; под ред. В.М. Лисенкова. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2016. Ч. 3. Функции, характеристики и параметры современных систем управления. — 174 с.
23. Лисицын, А.Л. Нестационарные режимы тяги: тяговое обеспечение перевозоч. процесса [Текст] / А.Л. Лисицын, Л.А. Мугинштейн. – М.: Интекст, 1996. – 159 с.
24. Лукашенко, Наталья Дмитриевна. Тяговые расчеты с учетом особенностей движения поездов повышенной массы и длины : диссертация ... кандидата технических наук : 05.22.07 / Моск. ин-т инженеров ж.-д. трансп. - Москва, 1988. - 151 с.

25. Лутманов С. В. Курс лекций по методам оптимизации. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 368 стр.
26. М. Минский, Вычисления и автоматы. М., Мир, 1971, 366 с.
27. М.Ю. Капустин, С.В. Малахов Базовые принципы создания локомотивных устройств безопасности нового поколения [Текст] / Проблемы безопасности на транспорте : Материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. Ч. 1 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Бел. ж. д., Белорус. гос. у-нт трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2019. – 415 с., С. 147-149.
28. Малахов С.В., Капустин М.Ю., Саркисян П.С., Михальчук Н.Л. Развитие локомотивных систем управления и устройств безопасности для решения задач цифровой трансформации локомотивного комплекса. Eltrans 10.0: тезисы докладов Десятого международного симпозиума посвященного 210-летию со дня основания первого транспортного вуза России – Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, 9-11 октября 2019 г., Санкт-Петербург. Часть вторая. – СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2019. – 100 с.
29. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. -М.:Наука, 1969.-384 с.
30. Мугинштейн Л.А., Лисицын А.Л. Нестационарные режимы тяги (Сцепление. Критическая норма массы поезда). – М.: Интекст, 1996. – 176 с.
31. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. – Томск: МП «РАСКО», 1991. – 272 с: ил.
32. Никифоров, Б.Д. Автоматизация управления торможением поездов [Текст] / Б.Д. Никифоров, В.И. Головин, Ю.Г. Кутыев. – М.: Транспорт, 1985. – 263 с.
33. Никифоров, Б.Д. Локомотивная система управления и обеспечения безопасности [Текст] / Б.Д. Никифоров, М.Д. Рабинович, А.А. Хацкелевич, В.М. Абрамов, Л.А. Мугинштейн // Железнодорожный транспорт. – 2004. –

№ 8.

34. Обухов, В. П. Аналитический метод оперативного нормирования расхода электроэнергии на тягу поездов : диссертация ... кандидата технических наук : 05.22.07. - Москва, 2002. – 160 с.
35. Оперативное нормирование энергоресурсов на тягу поездов с использованием метода искусственных нейронных сетей. Малахов С.В., Капустин М.Ю. Мир транспорта. 2020. № 1. С. 158-163.
36. Оптимальное управление. Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 432 с.
37. Орлов, А.В. Совершенствование методов измерения параметров движения поездов : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.08 / Орлов Александр Валерьевич. – М, 2006. – 174 с.
38. Осипов, С.И., Основы тяги поездов : учебник для студентов техникумов и колледжей ж/д тр-та [Текст] / С.И. Осипов, С.С. Осипов. – М.: УМК МПС России, 2000. – 592 с.
39. Пат. 108630 Российская Федерация, МПК G01P 3/00 (2006.01). Система для определения параметров движения подвижного состава [Текст] / Никифоров Б. Д., Малахов С. В., Дёжин Ю. И., Гаврилов Л. Б., Климовских Т. Б.; Патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "АВП Технология". Заявка № 2011111361/28, 28.03.2011. Опубликовано: 20.09.2011 Бюл. № 26, - 7 с.: ил.
40. Пат. 2352487, Российская Федерация, МПК B61L 3/12 (2006.01), B61L 27/00 (2006.01). Способ обеспечения безопасности движения поезда, маневрового состава или одиночного локомотива по станции и на подходах к ней [Текст] / Вайгель А. М., Рабинович М. Д., Никифоров Б. Д., Гаврилов Л. Б., Архипов А. С., Абрамов В. М., Малахов С. В., Соколов А. Н., Шалягин Д. В., Крылов А. Ю.; Заявка 2007143335/11, 23.11.2007. Опубликовано: 20.04.2009 Бюл. № 11, - 10 с.

41. Пат. 2378654, Российская Федерация, МПК G01P 3/64 (2006.01). Локомотивная система определения скорости движения и пройденного пути [Текст] / Дёжин Ю. И., Абрамов В. М., Васин Н. К., Малахов С. В., Никифоров Б. Д., Рабинович М. Д., Соколов А. Н.; Патентообладатель: Закрытое акционерное общество "ОТРАСЛЕВОЙ ЦЕНТР ВНЕДРЕНИЯ НОВОЙ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ" (ЗАО "ОЦВ"). Заявка №2008137772/28, 24.09.2008. Опубликовано: 10.01.2010 Бюл. № 1 – 8 с.
42. Пат. 72669, Российская Федерация, МПК B61L 3/20 (2006.01). Стенд для технологических испытаний устройств автоматической локомотивной сигнализации непрерывного действия (АЛСН) [Текст] / Вайгель А. М., Дудучава М. Б., Кирьяков А. А., Краснолобов С. И., Логинов С. Н., Малахов С. В., Никифоров Б. Д., Поспехов И. А., Правдолюбов А. Э., Рабинович М. Д., Соколов А. Н.; Патентообладатель Патентообладатель(и): Открытое акционерное общество "Российские железные дороги"(ОАО "РЖД"). Заявка № 2007146185/22, 13.12.2007. Опубликовано: 27.04.2008 Бюл. № 12 – 8 с.: ил.
43. Плакс, А. В. Системы управления электрическим подвижным составом [Текст] : учебник для вузов ж.-д. транспорта / Плакс А. В. - Москва : Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, Маршрут, 2005. – 358 с.
44. Правила технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава 2019 год. Последняя редакция. – М.: Моркнига, 2019. – 188 с.
45. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
46. Правила тяговых расчетов для поездной работы. Нормативное производственно-практическое издание. – М.: ОАО «РЖД», 2016. – 515 с.
47. Прикладные задачи динамического программирования [Текст] / Р. Беллман, С. Дрейфус ; Пер. с англ. Н. М. Митрофановой [и др.] ; Под ред. А. А. Первозванского. - Москва : Наука, 1965. – 458 с.

48. Приоритеты в сфере энергосбережения и технического регулирования [Текст] / В. А. Гапанович // Железнодорожный транспорт. - 2009. - № 2. - С. 7-10.
49. Программа для сбора информации с источников в виде промышленных контроллеров СЕРВ-Р Малахов С.В., Капустин М.Ю. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020614528, 14.04.2020.
50. Пудовиков, О.Е. Автоматическое управление скоростью грузового поезда с электровозом, допускающим плавное управление силами тяги и торможения : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.06 / Пудовиков Олег Евгеньевич. – М., 2011. – 291 с.
51. Пудовиков, О.Е. Система автоматического регулирования скорости движения перспективного электропоезда : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Пудовиков Олег Евгеньевич. – М, 2006. – 174 с.
52. Пясик М.С. Энергооптимальная система автоведения электровозов, адаптированная к условиям движения : Дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 : Москва, 2003. – 101 с.
53. Расчеты и испытания тяжеловесных поездов / Под ред. Е.П. Блохина. М.: Транспорт, 1986. – 263 с.
54. Реализация динамического программирования с учетом эффективного пересчета в бортовой системе. Малахов С.В., Капустин М.Ю. Наука и техника транспорта. 2020. № 2. С. 74-80.
55. Редько, В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепции эволюционной кибернетики / В.Г. Редько. - М.: Ленанд, 2019. – 224 с.
56. Розенфельд, В.Е. Теория электрической тяги [Текст] / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров, М.И. Озеров; Под. ред. И.П. Исаева. – М.: Транспорт, 1995. – 294 с.
57. Савоськин, А.Н. Автоматизация электроподвижного состава : учебник для вузов ж.-д. трансп. / А.Н. Савоськин, Л.А. Баранов, В.П. Феоктистов; под. ред. А.Н. Савоськина. – М. Транспорт, 1990. – 311 с.

58. Стратегия научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга) [Электронный ресурс]. URL: https://www.irgups.ru/sites/default/files/irgups/science/document/strategiya_nauchno-tehnologicheskogo_razvitiya_holdinga_rzhd_na_period_do_2025_goda_i_na_perspektivu_do_2030_goda_belaya_kniga_2018.pdf (дата обращения 19.12.2019)
59. Тихомиров В.М. Рассказы о максимумах и минимумах. – 2е изд., исправленное. – М.: МЦМНО, 2006. – 200 с.
60. Усков А. А. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика / А. А. Усков, А. В. Кузьмин. - М. : Горячая линия - Телеком, 2004. – 143 с.
61. Ф.Уоссермен, Нейрокомпьютерная техника. Теория и практика. - М.: Мир, 1992. – 305 с.
62. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. - М.: Диалектика, 2019. – 1104 с.
63. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года [Электронный ресурс]. URL: http://www.rzd-expo.ru/innovation/resource_saving/energeticheskay_efektivnost/enstrat2030.pdf (дата обращения 19.12.2019)
64. Юренко К.И. Принцип максимума Л.С. Понтрягина в задаче оптимального управления движением поезда. Вестник ВЭлНИИ №1-2(79)/2018. С. 147-161.
65. Юренко К.И. Расчёт энергооптимальных режимов движения перспективного подвижного состава методом динамического программирования // Известия вузов. Электромеханика. – 2013. – № 3. – С. 78-82.
66. Юренко К.И., Сапунко в А.Н., Фандеев Е.И. Автоматическое управление тормозами поезда на основе математического аппарата нечёткой логики в системе автоведения // Вестник Вост.- Укр. ун-та им. Вл. Даля.: Луганск. 2012. № 5, Ч. 2. С. 22 – 29.

67. Юренко К.И., Фандеев Е.И. Аппаратно-программный комплекс для моделирования и автоматизированного управления движением поезда // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. № 2. 2012. С. 26 – 31.
68. Юренко, К.И., Фандеев Е.И. Принципы построения и имитационное моделирование систем автоведения электроподвижного состава // Известия ЮФУ. Технические науки. - № 08. – 2016. С. 88-102.
69. Ябко И.А. Численный метод определения энергооптимального управления движением поезда//Железнодорожный транспорт на новом этапе развития. Труды ВНИИЖТ. М.: Интекст, 2003. С. 129 -135.