

И. В. Жуковицкий

ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ СКАТЫВАНИЯ ОТЦЕПОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ



2012

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ,
МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ**

**Днепропетровский национальный университет железнодорожного
транспорта имени академика В. Лазаряна**

И.В. ЖУКОВИЦКИЙ

**ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ
СКАТЫВАНИЯ ОТЦЕПОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ
ГОРКАХ**

Монография

Днепропетровск, 2012

УДК 656.212.5:681.3
ББК 39.275
Ж 86
ISBN 978-966-1507-47-9
Издательство Маковецкий Ю.В.
Днепропетровск, 2012

Рекомендовано к печати решением Ученого совета Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (протокол № 2 от 24.09.2012 года)

Рецензенты

Д-р техн. наук, проф. Виктор Васильевич Ткачев, заведующий кафедрой автоматизации и компьютерных систем Национального горного университета Украины, г. Днепропетровск, Украина
Д-р техн. наук, проф. Геннадий Иванович Загарий, заведующий кафедрой специализированных компьютерных систем Украинской государственной академии железнодорожного транспорта, г. Харьков, Украина

ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ СКАТЫВАНИЯ ОТЦЕПОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ

Ж 86 ЖУКОВИЦКИЙ И.В. ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ СКАТЫВАНИЯ ОТЦЕПОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ: Монография [Текст] / И.В. Жуковицкий / – Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2012. – 203с. – ISBN 978-966-1507-47-9

УДК 656.212.5:681.3
ББК 39.275

Монография посвящена теории и практике разработки цифровых систем управления скоростью скатывания отцепов на сортировочных горках магистрального железнодорожного транспорта.

Книга предназначена для ученых, инженеров, аспирантов, студентов высших учебных заведений железнодорожного транспорта

- © Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, 2012
- © Жуковицкий И.В., 2012
- © Издательство Маковецкий Ю.В. Днепропетровск, 2012

ISBN 978-966-1507-47-9

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОМПЛЕКСА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ СКАТЫВАНИЯ ОТЦЕПОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ.....	9
1.1. Особенности объектов автоматизации и требования к системам управления.....	9
1.2. Анализ состояния и тенденции развития АСУ ТП на сортировочных станциях.....	14
1.3. Концепции построения систем АРС	18
1.4. Анализ структур и алгоритмов управления замедлителями тормозных позиций систем АРС	21
1.4.1. Управление замедлителями по рассогласованию между фактической скоростью отцепа и заданной скоростью его выхода	21
1.4.2. Изменение степени тормозного усилия замедлителя в процессе торможения	27
1.4.3. Торможение с задержкой включения замедлителя.....	31
1.4.4. Задание закона торможения	32
1.4.5. Алгоритмы оптимального управления замедлителями	36
2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЗАМЕДЛИТЕЛЯМИ	39
2.1. Математическая модель процесса торможения отцепа в замедлителях тормозной позиции	39
2.1.1. Дифференциальное уравнение движения отцепа в тормозной позиции	39
2.1.2. Статические характеристики исполнительного органа	40
2.1.3. Динамические характеристики исполнительного органа.....	43
2.2. Функциональная структура цифровой системы управления торможением отцепа замедлителями тормозной позиции	47
2.3. Структурная схема цифровой системы управления	

торможением отцепа замедлителями тормозной позиции	51
2.4 Исследование динамики разомкнутой системы	55
2.4.1. Исследование динамики разомкнутой системы при неизменной ступени торможения.	55
2.4.2. Исследование динамики разомкнутой системы при изменяющейся ступени торможения.....	59
2.5. Стохастическая имитационная модель ЦУС замедлителями ТП	62
2.5.1. Принципы построения стохастической имитационной модели	62
2.5.2. Математическое описание процесса моделирования движения отцепа за квант времени	66
2.5.3. Программная реализация имитационной модели	74
2.5.4. Статистический анализ результатов моделирования.....	75
3. АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ЦУС ЗАМЕДЛИТЕЛЯМИ ТОРМОЗНЫХ ПОЗИЦИЙ	77
3.1. Эвристические алгоритмы управления цифровым регулятором тормозной позиции	77
3.1.1. Требования к алгоритмам управления замедлителями тормозных позиций.....	77
3.1.2. Алгоритм ведения отцепа по рациональной траектории.....	78
3.1.3. Обеспечение максимального времени торможения.....	80
3.1.4. Обеспечение минимального времени торможения.....	82
3.2. Применение метода динамического программирования для расчета оптимальной настройки регулятора	83
3.2.1. Постановка задачи оптимального управления скоростью движения отцепа в тормозной позиции	83
3.2.2. Алгоритм оптимизации параметров настройки цифрового регулятора.....	86
3.2.3. Программная реализация алгоритма	92
3.2.4. Оптимальная настройка регулятора для неоднородной последовательности отцепов.....	103

3.3. Исследование на модели качества работы регулятора	105
3.3.1. Исходные данные для моделирования	105
3.3.2. Определение зависимости точности регулирования от точности измерителя скорости	106
3.3.3. Определение зависимости точности регулирования от массы отцепа	107
3.3.4. Проверка гипотезы о том, что значения матрицы коэффициентов одинаковы для всех классов отцепов, принадлежащих одному столбцу матрицы классов	110
4. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА И РЕГУЛЯТОРА	112
4.1. Методы идентификация ходового сопротивления отцепов	112
4.1.1. Общая постановка задачи	112
4.1.2. Измерение ходового сопротивления «трехточечным» методом на произвольном участке пути	114
4.2. Использование метода статистических решений для повышения точности оценки идентификация ходового сопротивления отцепа	117
4.2.1. Постановка задачи	117
4.2.2. Определение решающей функции	119
4.2.3. Оценка эффективности предложенного способа	121
4.3. Исследование точности измерения скорости и пути в цифровой системе управления скоростью отцепа	122
4.3.1. Принцип измерения скорости отцепа в цифровой системе управления	122
4.3.2. Исследование ошибки квантования по уровню	124
4.3.3. Выбор разрядности счётчика МВвЧИС	127
4.3.4. Идентификация пути, пройденного отцепом	129
5. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЁТА ЗАДАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В СИСТЕМАХ АРС НА СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКЕ	133

5.1. Математическая модель движения отцепа с учетом влияния воздушной среды	133
5.2. Методика определения эквивалентного уклона в имитационной модели скатывания отцепа с горки.....	144
5.3. Вероятностный метод определения скорости выхода отцепов с прицельной тормозной позиции	148
5.4. Адаптивная коррекция задания регулятору тормозной позиции	161
6. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМ АРС НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ МАГИСТРАЛЬНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА	167
6.1. Принципы построения децентрализованных систем АРС для сортировочных горок большой мощности	167
6.2. Система автоматического регулирования скоростью скатывания отцепов на 1-й тормозной позиции сортировочной горки большой мощности.....	174
6.2.1. Назначение и техническая характеристика АРС 1ТП	174
6.2.2. Техническая структура системы АРС 1ТП	175
6.2.3. Организация программного обеспечения	177
6.2.4. Алгоритм функционирования	180
6.2.5. Отличительные особенности системы АРС 1ТП	184
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	186

Введение

Важными транспортными узлами сети железных дорог, в значительной степени определяющими пропускную способность транспортной системы и эффективность ее работы, являются сортировочные станции.

Отличительными особенностями технологического процесса на сортировочных станциях являются: территориальная рассредоточенность по всей станции технологических операций и участков, которые, к тому же, подвержены воздействию внешней среды; стохастический характер воздействия внешней среды в процессе выполнения отдельных технологических операций; лимит времени на принятие решений (реакцию) в ряде технологических операций; высокие требования к надежности выполнения отдельных технологических операций.

Одной из важнейших технологических подсистем сортировочной станции является сортировочная горка. Именно на сортировочной горке производится расформирование состава. Отдельные группы вагонов (отцепы) состава, подлежащего расформированию, отцепляются от него и направляются на соответствующие пути накопления. В Украине принята концепция расформирования составов на сортировочных горках с использованием силы тяжести, когда отцеп скатывается с сортировочной горки на заданный путь накопления под воздействием собственной силы тяжести, а регулирование скорости скатывания осуществляется путем сосредоточенного торможения на двух (а в более развитых системах – на трех или даже четырех) тормозных позициях и применением принципа «прицельного торможения». При этом торможение отцепов на путях накопления в большинстве случаев осуществляется вручную с использованием так называемых «тормозных башмаков». При неточном управлении скоростью скатывания, позади идущий отцеп может догнать впереди идущий («нагон»), а отцеп, достигший пути накопления, может либо недокатиться до «хвоста» формируемого на этом пути состава (образования так называемого «окна»), либо столкнуться с этим составом с недопустимо высокой скоростью.

Автоматизация технологических операций на сортировочной горке позволяет, во-первых, повысить качество технологического процесса и, во-вторых, отказаться от ручного торможения, ликвидировав одну из самых тяжелых и опасных профессий – регулировщика скорости («башмачника»). Однако до настоящего времени задача создания автоматизированной системы управления технологическими процессами на сортировочной горке, удовлетворяющая заданным требованиям, до конца не решена, несмотря на то, что в последнее время созданы ряд систем управления технологическими процессами на сортировочной горке с использованием ЭВМ в контуре управления. Это может быть объяснено тем, что использование ЭВМ в контуре управления требует исследования дополнительных возможностей, которые предоставляет ЭВМ (более совершенные алгоритмы управления и адаптации, использование моделей в составе регуляторов и т.д.), а также особенностей цифровых систем управления (например, погрешностей, вызванных квантованием).

Между тем, использование ЭВМ в контуре управления требует особых подходов – разработке математических моделей, учитывающих квантование по уровню и по времени, разработке новых алгоритмов управления. Именно исследованию возможностей использования ЭВМ в системах управления скатыванием отцепов с сортировочной горки и посвящена данная монография.

Актуальные проблемы совершенствования комплекса систем управления скоростью скатывания отцепов на сортировочных горках

1.1. Особенности объектов автоматизации и требования к системам управления

Основное назначение сортировочной станции, как технологического узла, – расформирование-формирование поездов. То есть из потока K входящих на станцию поездов, каждый из которых состоит из m_i вагонов ($i = 1 \dots K$), формируется выходной поток из R поездов, каждый из которых состоит n_j вагонов ($j = 1 \dots R$). Очевидно, что

$$\sum_{i=1}^K m_i = \sum_{j=1}^R n_j. \quad (1.1)$$

Сортировочная станция объединяет сложные технологические процессы, которые имеют ряд отличительных особенностей (рис. 1.1).

Территориальная рассредоточенность по всей станции технологических операций и участков, которые подвержены воздействию внешней среды. Существует ряд технологий обработки составов на сортировочных станциях. В Украине используются технологии, предполагающие наличие следующих основных технологических зон (рис. 1.2):

- Зона прибытия (парк прибытия). В этой зоне накапливаются

прибывающие на сортировочную станцию поезда, отсюда в определенной последовательности они отправляются на расформирование.

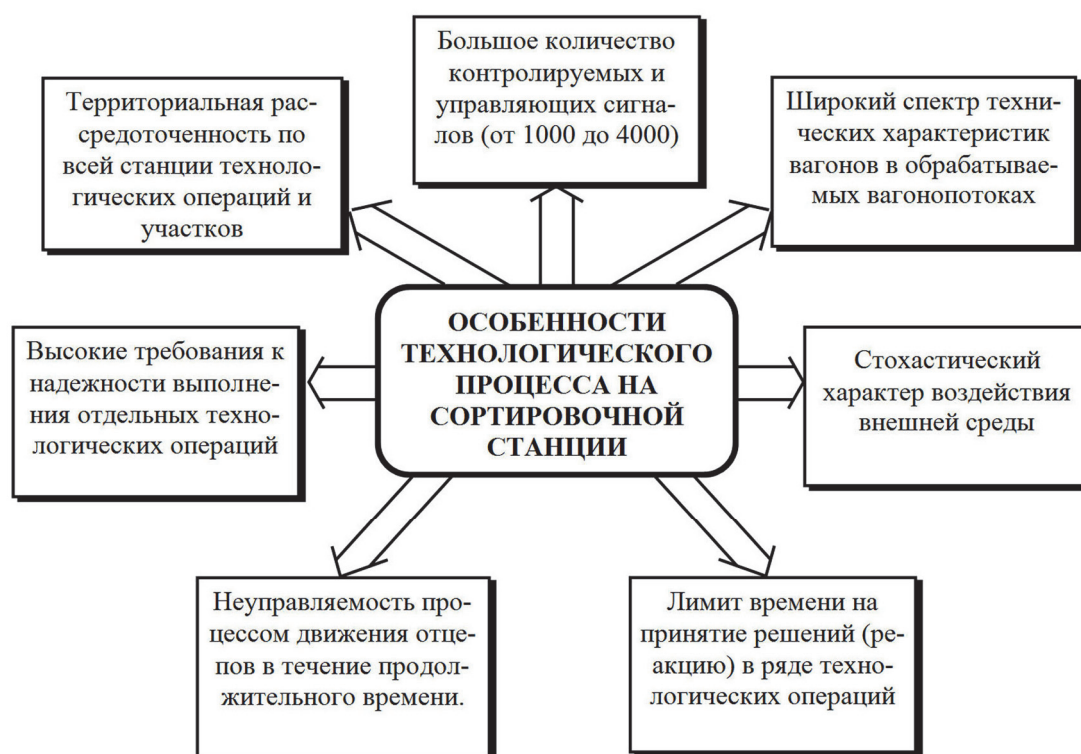


Рис.1.1. Особенности технологического процесса на сортировочной станции

– Зона роспуска (сортировочная горка). Именно на сортировочной горке производится расформирование состава. Из зоны прибытия локомотив надвигает состав на вершину сортировочной горки. Здесь отдельные группы вагонов (отцепы) состава, подлежащего расформированию, отцепляются от него и скатываются на заданные пути накопления (сортировочные пути) под воздействием собственной силы тяжести. По пути скатывания отцеп проходит группу стрелочных переводов (стрелок), положение которых и определяет маршрут скатывания и, в конечном итоге, путь накопления, где формируется состав соответствующего данному отцепу направления.

Регулирование скорости скатывания осуществляется путем сосредоточенного торможения на двух (а в более развитых системах – на трех или даже четырех) тормозных позициях. Цель управления, во-первых, обеспечить необходимый интервал между скатывающимися

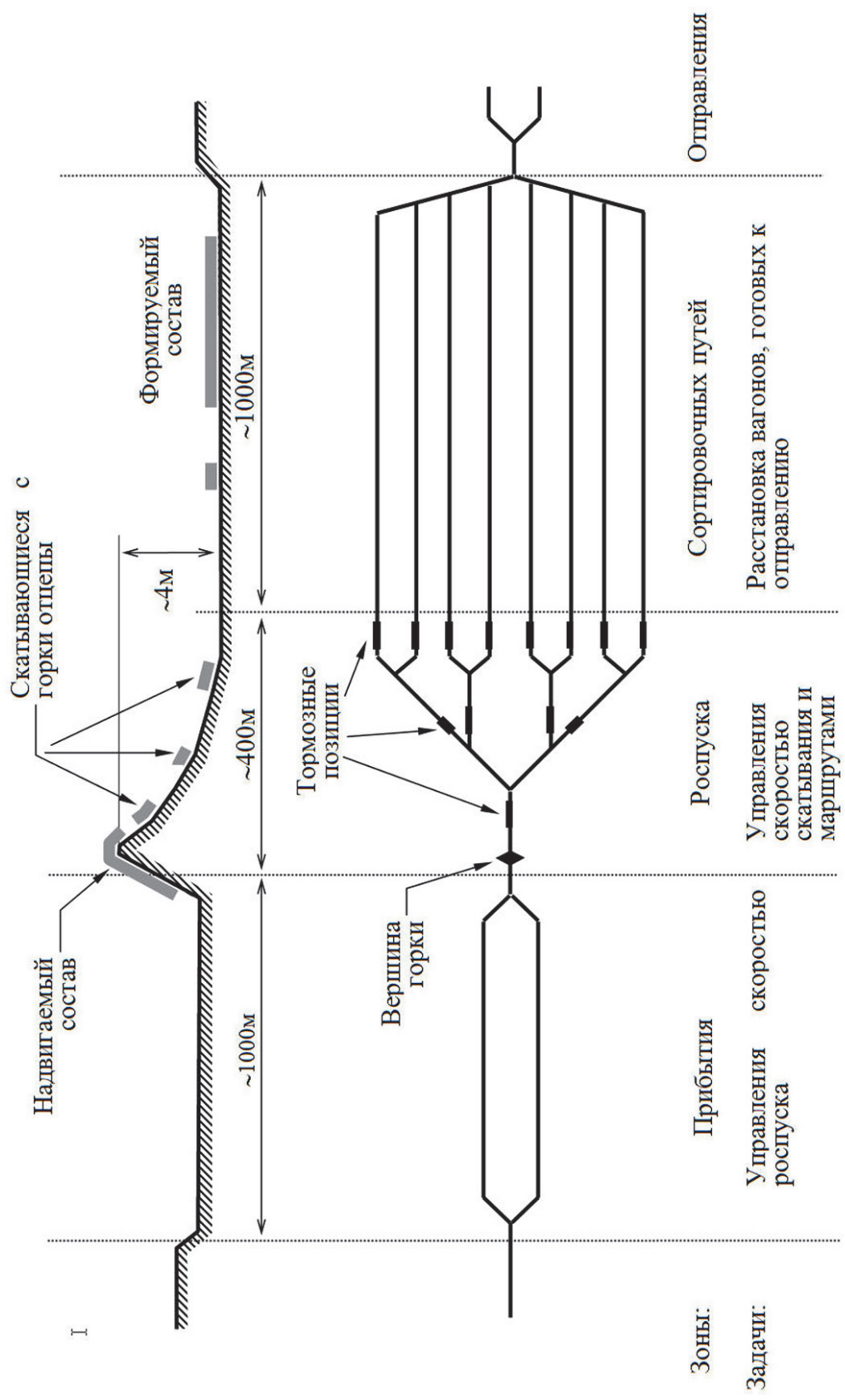


Рис. 1.2. Технологические зоны и задачи управления сортировочным процессом

отцепами, чтобы предотвратить нагон последующим отцепом предыдущего и, во-вторых, обеспечить докатывание отцепа до стоящего на пути накопления состава и соударения с ним со скоростью, не превышающей допустимую (принцип «прицельного торможения»).

– Зона сортировочных путей (путей накопления, сортировочный парк). Здесь формируются составы из отцепов, скатывающихся с сортировочной горки.

– Зона отправления (парк отправления). Сформированные в сортировочном парке составы перемещаются в эту зону, здесь обрабатываются и в определенной очередности отправляются в пункты назначения.

На сортировочных станциях имеются сотни единиц различного напольного оборудования, используемого в технологических процессах: светофоры, стрелочные переводы, датчики, регуляторы скорости и др.; эти устройства подвержены климатическим воздействиям и значительным перегрузкам.

Общее количество контролируемых и управляющих сигналов достигает величины от 1000 до 4000, что по общепринятой классификации позволяет отнести соответствующие автоматизированные системы управления (АСУ) к классу систем повышенной и большой условной информационной мощности, т.е. максимальной сложности.

Обработка вагонопотоков на сортировочных станциях предполагает обработку и формирование значительных потоков входных и выходных документов. Речь идет об информационных потоках, поступающих на сортировочную станцию, отправляемых с сортировочной станции, поступающих с напольного оборудования и извлекаемыми из базы данных системы управления. Требуемый темп обработки входных и формирования выходных документов предопределяет использование для такой обработки средств вычислительной техники.

Высокие требования к надежности выполнения отдельных технологических операций. Эти требования связаны, прежде всего, с безопасностью движения, так как нарушение этих требований может привести к тяжелым последствиям (например, перевод стрелки под движущимся отцепом приводит к сходу отцепа с рельсов, соударение с недопустимо высокой скоростью к повреждению вагонов и груза и т.д.).

Одной из важнейших технологических подсистем сортировочной

станции является сортировочная горка. Отличие этой подсистемы от остальных заключается в наличии функций управления исполнительными устройствами, обеспечивающими реализацию сортировочного процесса с необходимыми показателями качества. Технологические процессы на сортировочной горке имеют следующие особенности:

Неуправляемость процессом движения отцепов в течение продолжительного времени. Отцеп при движении по спускной части горки и по сортировочному пути (до его полной остановки или столкновения с «хвостом» формируемого состава) значительную часть времени движется неуправляемо, а торможение его производится лишь в определенных зонах в пределах тормозных позиций. Эта особенность предопределяет необходимость точного прогноза движения отцепов, что в свою очередь, требует достоверной идентификации их параметров. Кроме того, эта особенность накладывает определенные требования к точности работы систем управления.

Лимит времени на принятие решений (реакцию) в ряде технологических операций (перевод стрелок, торможение отцепов и др.). Эта особенность связана с управлением исполнительными механизмами в реальном масштабе времени и самым тесным образом связана с предыдущей.

Обрабатываемые вагонопотоки имеют широкий спектр технических характеристик вагонов. Данная особенность предопределяет необходимость идентификации этих характеристик для надежного прогноза траектории движения (в пространстве состояний) отцепов. Следует отметить, также, нестационарность этих характеристик. Так, в [22,113] найдена корреляционная зависимость основного сопротивления скатыванию W_0 от координаты пути.

Стохастический характер воздействия внешней среды в процессе выполнения отдельных технологических операций. Внешняя среда оказывает существенное влияние, как на динамику движения отцепа (сопротивления среды, ветра, – а направление и сила ветра в каждый момент непредсказуемы), так и на характеристики отцепов (основное сопротивление движения отцепов зависит от температуры воздуха), а также на статические и динамические характеристики исполнительных органов. Так, например, осадки в виде дождя и снега изменяют коэффициент трения между колесами вагона и тормозными шинами замедлителя, а значит, изменяют их тормозную характеристику.

Вышеперечисленные особенности технологических процессов на сортировочной горке определяют необходимость использования принципов адаптации и самонастройки при создании систем управления этими технологическими процессами, а также развитие алгоритмов идентификации параметров в условиях их нестационарности.

1.2. Анализ состояния и тенденции развития АСУ ТП на сортировочных станциях

Мировая практика показывает, что для управления сортировочными станциями как сложными организационно-технологическими комплексами необходимо использовать все многообразие средств: от оборудования механизации и устройств автоматики до мощных информационно-управляющих вычислительных систем, включающих сложные цифровые модели для управления горочными технологическими процессами, объемные базы данных и машинные алгоритмы, обеспечивающие функционирование систем в реальном масштабе времени.

Автоматизацию сортировочных станций можно рассматривать на двух уровнях: организационного управления и управления технологическими процессами. На первом уровне в настоящее время в Украине практически все задачи решаются с помощью систем КС ЭОД, которые работают на всех крупных сортировочных станциях. КС ЭОД наследовали основные функции своих предшественников – систем АСУ СС [16]. В настоящее время КС ЭОД являются функциональной частью основной отечественной системой управления грузовыми перевозками – АСК ВП УЗ [5] – и реализуют функции обработки информации о прибывающих на станцию поездах, подготовки документов на отправляемые поезда, информационного обслуживания оперативного персонала и передачи информации о поездах, отправляемых со станции. Однако слабым звеном в этих системах является отсутствие оперативной и достоверной информации о реализации технологических процессов расформирования-формирования поездов. Для его устранения необходимо на сортировочной станции автоматизировать управление технологическими (исполнительными)

процессами.

Для автоматизации горочного процесса в СССР были разработаны ряд автоматических и автоматизированных систем. Большой вклад в теорию создания и практического использования таких систем внесли ученые Бобровский В.И., Брылеев А.М., Долаберидзе А.М., Иванченко В.Н., Кравцов Ю.А., Красовский Г.А., Лисенков В.М., Модин Н.К., Муха Ю.А., Нагорный Е.В., Павлов В.Е., Переборов А.С., Сапожников В.А., Сапожников Вл.А., Скабалланович В.С., Сотников Е.А., Тишкин Е.М., Фонарев Н.М., Шафит Е.М., Шелухин В.И., Н.Р. Ющенко и другие.

В развитии систем автоматизации технологических процессов на сортировочной станции было несколько этапов научно-технических преобразований. При этом основное внимание уделялось созданию систем для автоматизации технологических процессов на сортировочной горке. Первые такие системы – АРС ЦНИИ [126], АРС ГТСС [118] (СССР), ряд зарубежных систем [1,3] – для управления скоростью скатывания отцепов с горки, ГАЦ [110] – горочной автоматической централизации (составления маршрутов скатывания) – были выполнены на релейных элементах автоматики. В дальнейшем, модифицированные версии таких систем выполнялись на полупроводниковых и интегральных элементах. При этом в качестве заданных показателей использовались вначале детерминированные, а затем вероятностные критерии: нагоны на спускной части горки (вероятности таких нагонов), ошибка в реализации заданной скорости выхода отцепа из тормозной позиции, скорости соударения отцепов и образование «окон» на сортировочных путях. Однако, как показала практика [71,75], качество работы подобных систем, в особенности систем управления скоростью скатывания отцепов, не отвечало заданным показателям. Так, например, по данным [115], в системе АРС ЦНИИ статистические параметры фактической ошибки реализации заданной скорости выхода отцепов из тормозной позиции составляли: математическое ожидание $M[\Delta V]=0,1\text{м/с}$, среднее квадратическое отклонение $\sigma[\Delta V]=0,62\text{м/с}$ при норме не более $0,25\text{м/с}$. Такие высокие погрешности можно объяснить следующими причинами:

- в подобных системах не учитывался недетерминированный характер процесса торможения и ошибки идентификации параметров как объектов управления (отцепов), так и исполнительных органов (замедлителей тормозных позиций); между тем исследования [12,144]

показывают существенную величину коэффициента вариации (до 30%), как тормозной характеристики замедлителя, так и методов идентификации;

- существующие технические средства не позволяли применять сложные алгоритмы управления, которые учитывали бы в полной мере вышеназванные особенности технологического процесса; это касается, прежде всего, нестационарности процесса управления, вызванной изменением внешних погодных условий (температуры, скорости и направления ветра), изменением (старением) параметров самой горки, а также недостоверности исходных данных (характеристик замедлителей, параметров сортировочной горки);

- недостаточный уровень теоретических исследований в области как структур и алгоритмов работы систем управления, так и идентификации параметров объектов управления и исполнительных органов.

В силу сложности технологического процесса, достаточно высокое качество работы таких систем может быть достигнуто лишь при использовании ЭВМ в контуре управления.

Одними из первых в СССР (еще в конце 60-х годов прошлого столетия) начали заниматься вопросами применения ЭВМ для автоматизации сортировочных станций кафедры электронных вычислительных машин и станций и узлов ДИИТа. Теоретические разработки кафедр, выполненные под руководством профессоров Шафита Е.М., Ющенко Н.Р., доц. Мухи Ю.А. были использованы для создания первой в СССР автоматизированной системы управления расформированием составов на горке на базе ЭВМ – АСУ РСГ [20,116,127] (внедрена на ст. Ясиноватая Донецкой ж.д.), системы управления вагозамедлителями на промышленных предприятиях (система АУСВ-У на ст. Рудная Мариупольского меткомбината им. Ильича, внедрена в 1989г. [48,54,71]), системы АСУ маршрутами движения на горке (АСУ МД) на ст. Пермь-Сортировочная Свердловской ж.д. [64], в ряде других систем.

Важным этапом в автоматизации сортировочных горок в России и в Украине стало внедрение на ряде станций системы КГМ РИИЖТ, разработанной Ростовским институтом железнодорожного транспорта (РИИЖТ) [59,60,61,110].

Крупным шагом в развитии автоматизированных систем управления технологическими процессами на сортировочной станции стало

внедрение автоматизированной системы на станции Москва-Сортировочная.

К сожалению, обработка информационных потоков в парках сортировочной станции производится в большинстве случаев (по крайней мере на сортировочных станциях Украины) вручную. Лишь в 1989 году на ст. Нижнеднепровск-Узел Приднепровской ж.д. была внедрена система ИУК СС (Информационно-Управляющий Комплекс Сортировочной Станции), разработанная кафедрой ЭВМ ДИИ-Та с участием автора [132]. ИУК СС включает подсистемы АСУ ПП (АСУ парка приема), АСУ ПО (АСУ парка отправления) и АСУ РФ (АСУ района формирования). Система предназначена для автоматизации сбора и обработки информации в парках, контроля реализации циклов и операций технологического процесса. ИУК СС позволяет осуществить автоматическое слежение за поездами и составами на всей территории сортировочной станции и формировать в автоматическом режиме и с помощью автоматизированных рабочих мест (АРМов) отчетную документацию и сообщения для АСУ СС.

Обзор систем управления технологическими процессами на сортировочных станциях на базе ЭВМ [7,8,26,31,59,62,68,82,83,84,85,94,96,123,132,133,134,143,144] показывает общие тенденции их развития:

- переход от централизованных систем к децентрализованным на базе многомашинных комплексов и, в дальнейшем, к сетевым технологиям;
- широкое использование микропроцессорных контроллеров для управления отдельными устройствами (стрелками, замедлителями);
- интегрирование систем управления технологическими процессами с системами организационного уровня;
- широкое использование автоматизированных рабочих мест (АРМов) в составе отдельных подсистем.

Между тем, переход к системам управления сортировочным процессам на базе ЭВМ не привел к кардинальному улучшению качества работы систем управления технологическими процессами на сортировочной горке. В первую очередь это касается систем автоматического управления скоростью скатывания отцепов с сортировочной горки (АРС).

1.3. Концепции построения систем АРС

Несмотря на то, что вопросами автоматизации процесса скатывания отцепов на сортировочных горках уже длительное время усиленно занимаются во многих экономически развитых странах мира, эта задача не нашла своего окончательного решения и по настоящее время. Более того, не выработана даже единая концепция построения таких систем. В различных странах придерживаются своих концепций, возможно еще и по причинам особенности развития грузового железнодорожного транспорта в данной стране.

Как правило, системы АРС (автоматического регулирования скорости скатывания отцепов на сортировочной горке) должны решать две задачи. Во-первых, обеспечить необходимый интервал между скатывающимися по спускной горке отцепами (интервальное регулирование). Во-вторых, обеспечить безопасное соударение скатывающихся отцепов с вагонами, стоящими на путях накопления. Именно вторая задача вызывает наибольшие трудности и порождает множество разнообразных путей, предлагаемых для ее решения. Так, в странах СНГ, в США, во Франции для решения этой задачи в системах АРС используют принцип прицельного торможения. Согласно этому принципу отцеп при скатывании с сортировочной горки тормозится на нескольких тормозных позициях (замедлителях) так, чтобы он вошел на предназначенный для него сортировочный путь со скоростью, обеспечивающей безопасное сцепление (со скоростью, не превышающей допустимую) с вагонами, уже стоящими на данном пути. Эти же замедлители должны обеспечить необходимые интервалы между отцепами, следующими друг за другом по спускной части горки (интервальное регулирование). На некоторых сортировочных горках функции интервального и прицельного торможения распределены между отдельными тормозными позициями.

Принцип прицельного торможения используется в АРС, работающих на сортировочных станциях Ясиноватая [127], Красный Лиман Донецкой ж.д. в Украине [59,60,61], Ленинград-сортировочный-Московский [111,133], Клепарово [66], Бекасово в России, Норт-Платт [146], Санта-Фе, Гейтуэйт [147], Флат-Рок [151] в США, Сотвиль [112], Уркад во Франции, Корияма [86,137] в Японии и ряде других.

В системах автоматического управления скоростью скатывания отцепов, использующих принцип прицельного торможения, пока еще не удалось добиться высокого качества работы. Так, в системе АРС-ЦНИИ по данным горочно-испытательной лаборатории ДИИТа количество отцепов, дошедших до состава на пути накопления с допустимой скоростью (0...1,5 м/с) всего лишь 24% [73,116]. Как показали исследования, проведенные на кафедре ЭВМ ДИИТа [103], основной причиной низкого качества систем такого рода является, прежде всего, невысокая точность работы тормозных позиций и значительные ошибки задания регулятору, вызванные, в свою очередь, ошибками идентификации параметров отцепов (сопротивления скатывания). Повышая точность работы тормозных позиций и снижая ошибки идентификации, можно значительно улучшить качество работы систем, использующих принцип прицельного торможения.

Специалисты Германии и Швейцарии считают, что прицельное торможение не может обеспечить того, чтобы все отцепы, входящие на сортировочный путь сцеплялись со стоящими на этом пути вагонами со скоростью, не превышающей допустимую, при одновременном отсутствии «окон» на путях накопления [1,2]. На большинстве автоматизированных сортировочных горок этих стран, на сортировочных путях применяются устройства для осаживания отцепов и различные ускорители. В ФРГ испытывается система Грассмана – цепь маломощных замедлителей, установленных на сортировочном пути с большим уклоном (6...7 %) и система Гарберса – канатно-тяговое устройство непрерывного действия для осаживания вагонов [30]. Подобные системы установлены на сортировочных станциях Машен, Мюнхен-Северный [150].

В нашей стране вопросам использования осаживателей для регулирования скорости скатывания отцепов посвящены работы проф. Долаберидзе А.М. [29,30], проф. Нагорного Е.В. [82], к.т.н. Мухи Ю.А. и др.

Во Франции на станции Амберье применяются автоматические передвижные замедлители, т.е. управляемые тележки, доводящие вагоны на сортировочных путях до соударения (с безопасной скоростью) со стоящими там вагонами.

Системы подобного рода, хотя и обеспечивают безопасную скорость соударения отцепов, не обладают необходимой надежностью, особенно в зимнее время.

Специалисты Великобритании для регулирования скорости скатывания движущих с горки отцепов создали систему Dowty – цепочку уложенных вдоль рельс точечных гидравлических замедлителей и замедлителей-ускорителей [100,136] Такие системы установлены на станциях Тинсли и Весконт. В Японии такая система установлена на сортировочных путях станции Такасаки [137].

Системы типа Dowty с усовершенствованными точечными замедлителями DOR введены в эксплуатацию на сортировочных станциях Скунтхорн и Форресфильд в Австралии, ряде стран Европы.

Эти системы обладают чрезмерно большим количеством напольного оборудования, то снижает их надежность и увеличивает трудоемкость обслуживания. Кроме того, они требуют специального профиля горок.

Кроме того, нашли применение системы, использующие принцип линейного двигателя [19,118,137]. Так, на японских станциях Тояма и Сиогама по сортировочным путям перемещаются тележки ускорители-замедлители отцепов, в которых применен линейный двигатель.

В Швейцарии на станции Базель-Муттенц испытывается система ускорения отцепов на сортировочных путях с помощью электромагнитного поля, вызываемого прохождением тока большой величины через колеса вагонов.

К недостаткам систем такого рода следует отнести то, что они потребляют большое количество электроэнергии.

Предложены и некоторые другие способы автоматизации регулирования скорости скатывания отцепов с горки, такие, например, как торможение собственной системой тормозов, которые не нашли применения вследствие ряда недостатков.

В Украине и России преимущественное распространение получили системы АРС, использующие принцип сосредоточенного торможения. Сосредоточенное управление скоростью скатывания отцепов требует, в первую очередь, разработку систем управления тормозными позициями, которые бы обеспечивали требуемые показатели качества реализации целевой функции.

Обзор замедлителей, которые используются в тормозных позициях, приведен, например, в [11]/

Расчет целевой функции управления тормозными позициями в настоящее время производится с использованием математических и имитационных моделей скатывания группы отцепов с сортировочной

горки.

Любая модель может быть успешно использована лишь при наличии достоверных исходных данных о параметрах объекта и регулятора. В модели свободного скатывания отцепов важнейшим параметром является собственное сопротивление скатывания отцепа, называемое также ходовыми свойствами отцепа W_0 . Проведенный анализ показал, что в настоящее время известны методы идентификации этого параметра лишь на специальных измерительных участках, на постоянном уклоне [63,91,92,93,127]. Однако известно, что величина W_0 изменяется по мере скатывания отцепа [22,114]. Поэтому необходимо идентифицировать ее неоднократно вне специальных измерительных участков.

В процессе управления замедлителями тормозной позиции необходимо идентифицировать координаты скорости и пути отцепа. Использование для этой цели ЭВМ требует использования специальных методов измерения, а также исследования влияния квантования по времени и уровню. Кроме того следует идентифицировать значение тормозной характеристики замедлителя, которая, как показывают исследования, имеет существенный статистический разброс.

1.4. Анализ структур и алгоритмов управления замедлителями тормозных позиций систем АРС

1.4.1. Управление замедлителями по рассогласованию между фактической скоростью отцепа и заданной скоростью его выхода

Данный алгоритм – один из первых алгоритмов, которые применялись при автоматизации управления замедлителями. Сущность его состоит в том, что отцеп при входе на замедлитель тормозится до тех пор, пока разность между его скоростью V_{ϕ} , измеренной одним из возможных способов, и заданной скоростью V_3 выхода отцепа из замедлителя не станет меньше некоторого порогового значения ΔV , по-

сле чего замедлитель растормаживается [1,6,28,166].

Так как замедлитель обладает значительной инерционностью, то в момент начала оттормаживания скорость отцепа должна быть выше заданной на определенную величину ΔV . Эта величина определяется как произведение интенсивности торможения на постоянную времени инерционности замедлителя [1,28,121, т.е. команда на прекращение торможения выдается в тот момент, когда выполняется условие:

$$V_3 - V_\phi = a_3 \Delta t, \quad (1.2)$$

где Δt – время переходного процесса (растормаживания замедлителя);

a_3 – среднее замедление отцепа (интенсивность торможения) за этот промежуток времени.

Интенсивность торможения определяют либо путем внесистемных расчетов, тогда величина ΔV – это константа (для замедлителей весового типа), либо набор констант по типам отцепов (для замедлителей нажимного типа). В некоторых системах замедление отцепа определяют путем дифференцирования сигнала скорости от радиолокационного скоростемера (РЛС) [18,130,140,152], который чаще всего используется в качестве измерителя скорости в системах АРС.

Подобное устройство управления замедлителями применено в системе АРС-ГТСС [120]. Структурная схема этого устройства приведена на рис. 1.3. Здесь Y_1 – частота-аналог фактической скорости отцепа O , Y_2 – напряжение-аналог скорости, а Y_3 – напряжение-аналог производной по скорости отцепа умноженной на сумму постоянных времени всех компонентов устройства управления. На выходе сумматора Σ образуется величина ε_1 пропорциональная сумме $X_0 + \tau \frac{dY_0}{dt}$,

где X_0 – заданная скорость выхода. Частота-аналог ε_2 этой величины сравнивается с Y_1 – частотой-аналогом фактической скорости отцепа. В результате формируется сигнал $\varepsilon = \text{sign}(\varepsilon_2 - Y_1)$, управляющий работой (подающий команды на включение или оттормаживание) замедлителя (ВЗ).

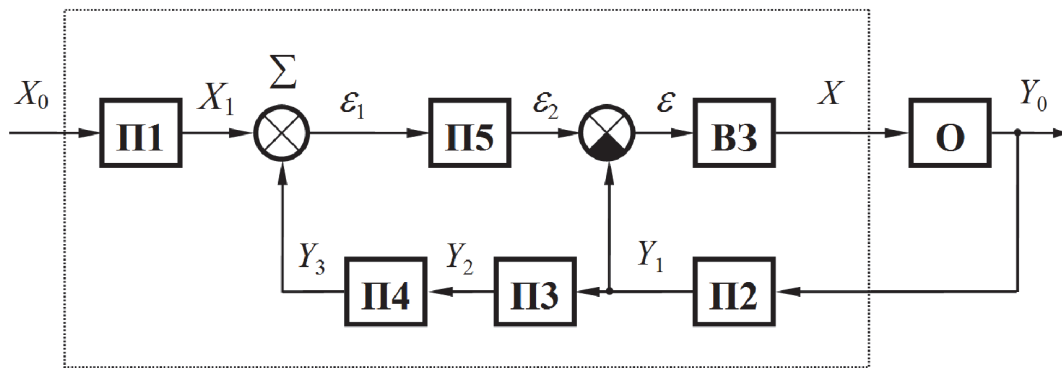


Рис. 1.3. Устройство управления замедлителем системы АРС-ГТСС

В некоторых системах АРС степень торможения замедлителя может быть постоянна в течение всего времени торможения и зависеть от веса тормозимого отцепа (для невесовых замедлителей). Такая схема автоматического управления (рис. 1.4) применяется, например, на станции Ольденберг (ФРГ) [89]. Здесь перед замедлителем установлен весомер, сигнал которого пропорциональный осевой нагрузке, управляет тормозным усилием замедлителя таким образом, чтобы вагоны не выжимались тормозными балками и чтобы полностью использовалась активная длина замедлителя.

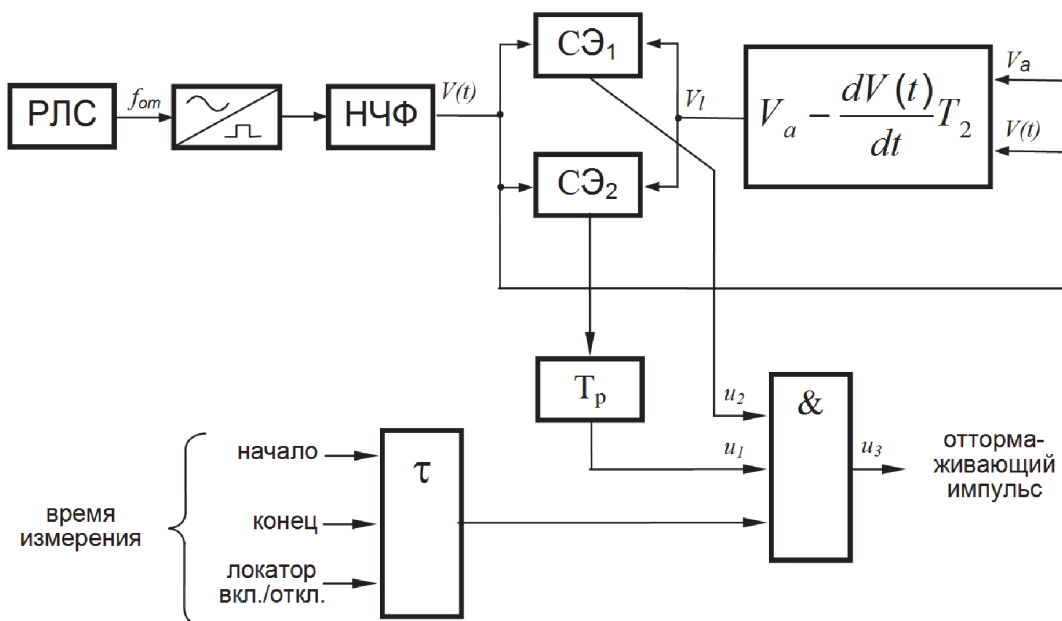


Рис.1.4. Структурная схема управления замедлителем, применяемая на станции Ольденберг (Германия)

Электронная система управления замедлителем с помощью индуктивного датчика поддерживает постоянную, для данной ступени торможения, ширину тормозного желоба, что должно обеспечивать постоянство тормозного усилия.

Низкочастотный сигнал $f_{от}$ РЛС преобразуется в напряжение пропорциональное фактической скорости отцепа. Моделирующий элемент, вырабатывает напряжение, пропорциональное скорости оттормаживания:

$$V_l = V_a - \frac{dV(t)}{dt} T_r, \quad (1.3)$$

где V_a – заданная скорость выхода отцепа из замедлителя;

T_r – время реакции замедлителя.

Два компаратора СЭ₁ и СЭ₂ сравнивают величины $V(t)$ и V_l . Компаратор СЭ₂ срабатывает при $V(t) = V_l + \Delta V$. Его выходной сигнал подается на схему выдержки времени, которая вырабатывает сигнал u_1 только в том случае, если время в течение которого величина $V(t)$ остается ниже уровня $V_l + \Delta V$ будет больше времени T_p . Величина ΔV определяется по максимальной величине тормозного замедления и по величине T_p :

$$\Delta V = - \left(\frac{dV}{dt} \right)_{\max} T_p. \quad (1.4)$$

Компаратор СЭ₁ выдает сигнал u_2 при $V(t) = V_l$. Этот сигнал проходит через схему только при наличии сигнала u_1 . Это исключает влияние случайных помех длительностью меньше T_p (50 ms) при определении момента оттормаживания.

Во всех описанных выше системах АРС в качестве измерителя скорости отцепа использовался радиолокационный скоростемер (РЛС) – устройство сложное, дорогое, требующее высококвалифицированного обслуживания.

Известны также системы АРС, работающие по вышеописанному принципу, в которых скорость измеряется по вибрации специального рельса с насечками [156,157,159,163], по времени прохождения колеса отцепа между двумя точечными датчиками [2,121,160,162].

Так, например, на станции Дижон-Переньи (Франция) для определения скорости отцепа установлены магнитные педали точечного действия, которые расположены вдоль головок рельсов внутри замедлителя на одинаковых расстояниях (20 см) одна от другой [121]. Замедлитель растормаживается, если время, в течение которого колесо отцепа проходит между двумя соседними датчиками, больше заданного, соответствующего скорости выхода отцепа из замедлителя.

Исследователи США рекомендуют способ определения скорости отцепа при помощи точечных магнитных датчиков применять на малых сортировочных горках, где применение дорогих РЛС экономически не оправдано [160,162]. Эту рекомендацию можно принять и для систем автоматического управления скоростью скатывания порожних вагонов от вагоноопрокидывателя, т.к. перерабатывающая способность вагоноопрокидывателя невысока и, во всяком случае, не превышает перерабатывающей способности малых сортировочных горок.

Основным источником ошибок в системах по рассогласованию между фактической скоростью отцепа и заданной скоростью его выхода являются автоколебания (рис.1.5), которые возникают в процессе торможения длинного отцепа на ускоряющем уклоне и которые прерываются в момент выхода последней оси отцепа из замедлителя. В результате фактическая скорость V_{ϕ} отличается от заданной V_3 на некоторую величину δV .

Исследования, проведенные в [131], показали, что, во-первых, это устойчивые автоколебания и, во-вторых, максимальная погрешность регулирования может быть определена, как сумма двух составляющих:

$$\delta V_m = \delta V^0 \pm \delta V_m^* \quad (1.5)$$

где δV^0 – постоянная составляющая ошибки регулирования (смещение центра автоколебаний по отношению к V_3);

δV_m^* – максимальная динамическая ошибка регулирования (амплитуда автоколебаний).

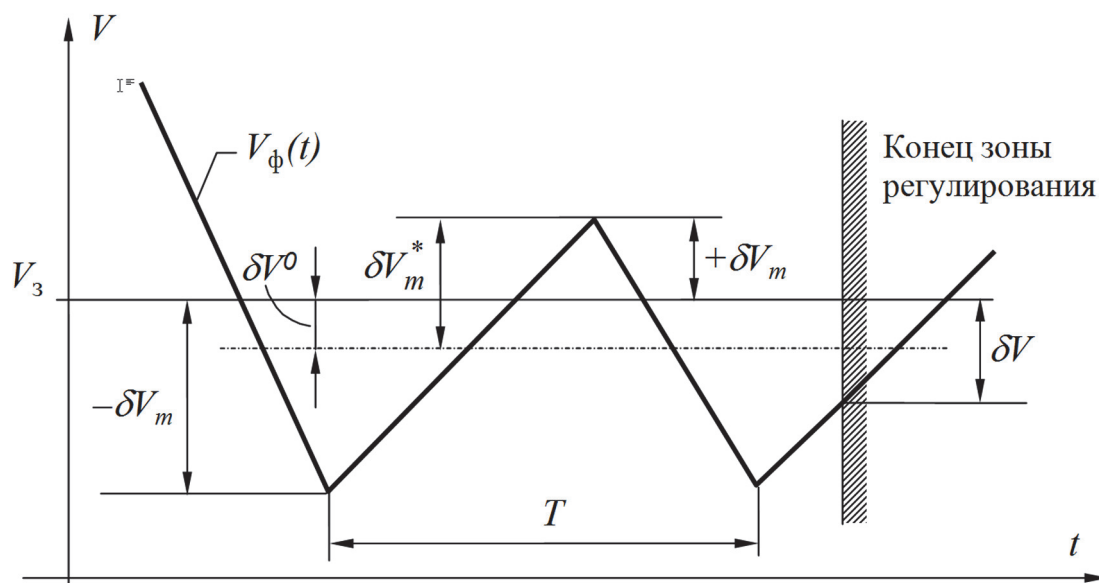


Рис.1.5. Автоколебания в зоне регулирования

На качество регулирования также влияют большие погрешности в вычислении производной по скорости (вследствие неточности измерения самой скорости и наличия высокочастотных помех в тракте РЛС), ограниченное количество управляющих воздействий (включить замедлитель – отключить замедлитель). Следствием этих недостатков является низкая точность работы таких систем. Так, система АРС-ГТСС обеспечивает, по данным из [76], отклонение математического ожидания скорости выхода отцепов от заданной – 0,16 м/с при среднеквадратической ошибке 0,6 м/с.

Для увеличения точности работы таких систем разработаны специальные методы, предполагающие использовать ЭВМ для управления замедлителем. Так, в [109] предложено заложить в память ЭВМ таблицу поправок к заданным скоростям выхода, рассчитанных путем внесистемного моделирования для различных категорий отцепов. Такие поправки должны, по мнению авторов, компенсировать постоянную составляющую ошибки регулирования.

В [58] такие поправки предлагается вводить с использованием системного моделирования в ЭВМ процесса торможения каждого конкретного отцепов. При моделировании используется метод гармонической реализации. Кроме того, в этой работе предлагается ввести в закон регулирования производную от ошибки. На рис. 1.6 представлена функциональная схема предложенной системы. На этом ри-

сунке: u'_3 – аналог заданной скорости выхода отцепа из замедлителя с вычисленной поправкой; ДЭ – дифференцирующий элемент; БС – блок сравнения; ПП – пневмопривод; З – замедлитель; О – отцеп и ЧЭ – чувствительный элемент (РЛС).

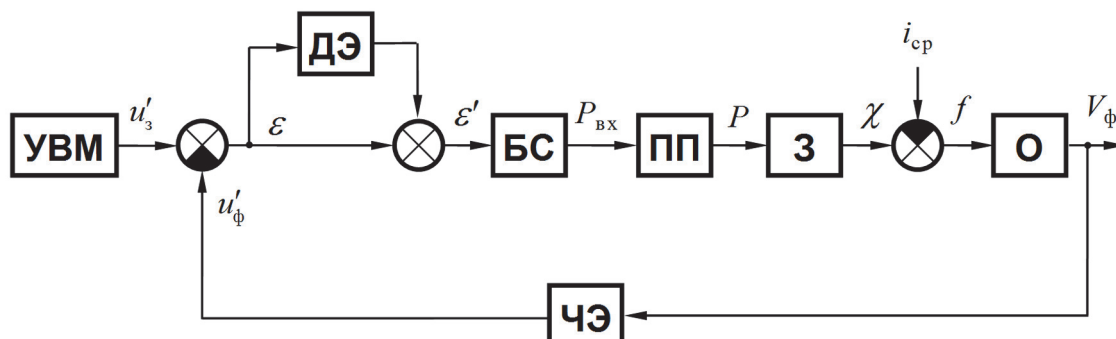


Рис.1.6. Функциональная схема системы автоматического управления замедлителем с регулированием по производной от ошибки и с применением управляющей ЭВМ

Имеются также работы [130], где указаны способы повышения точности измерений скоростей и ускорений РЛС с помощью цифровых фильтров на базе ЦВМ.

Однако, все эти методы не устраняют самих автоколебаний, амплитуда которых может превышать допустимую ошибку регулирования. Кроме того, большинство методов исследования таких систем не учитывают стохастический характер процесса торможения.

1.4.2. Изменение степени тормозного усилия замедлителя в процессе торможения

В [135] указывается, что оптимальный механизм управления замедлителем должен автоматически уменьшать тормозное усилие замедлителя по мере снижения скорости отцепа, т.к. погрешность в скорости выхода отцепов линейно зависит от сил торможения. Такой алгоритм (снижение тормозного усилия замедлителя по мере уменьшения скорости отцепа) применяется во многих АРС.

Так, в системе АРС ЦНИИ замедлитель переключается на более низкую ступень торможения, если разность между фактической и заданной скоростями отцепа станет меньше некоторой величины [127].

В Великобритании станции Торонто и Мангейм оборудованы системами автоматического управления вагонозамедлителями (рис.1.7).

В этих системах вычитаются квадраты скоростей фактической (V_{ϕ}) и вычисленной ($V_{в}$) и разность их через ограничитель веса поступает в следящее устройство, регулирующее подачу сжатого воздуха через впускные и выпускные клапаны. Таким образом, тормозное усилие здесь пропорционально избытку кинетической энергии отцеп.

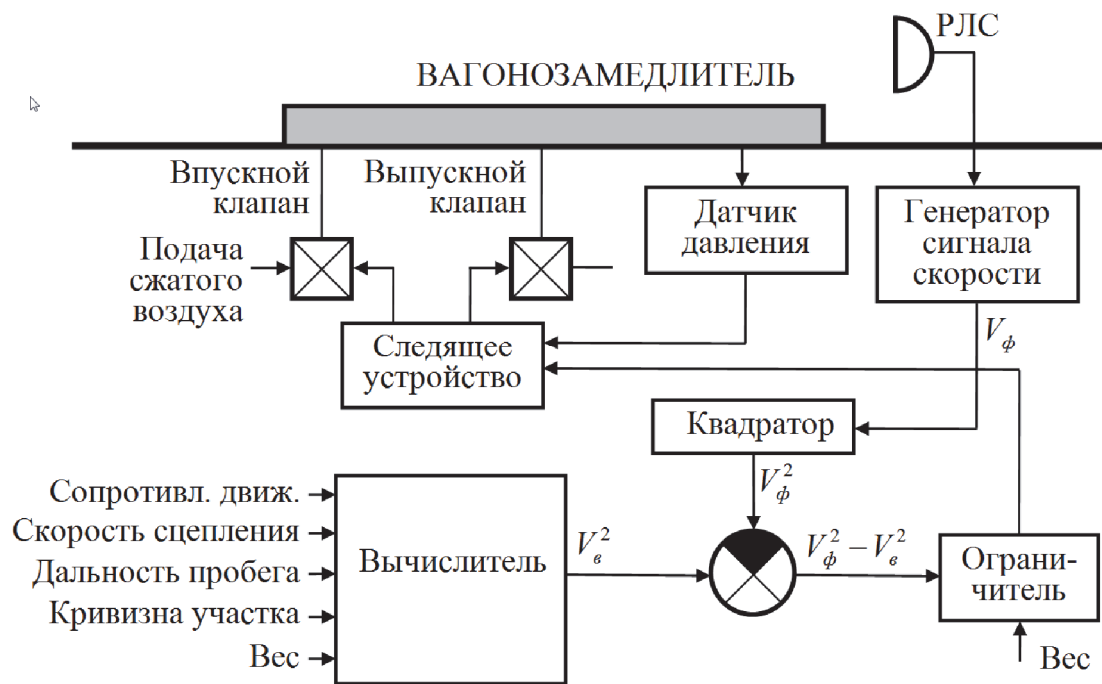


Рис. 1.7. Функциональная схема управления замедлителем на станциях Торонто и Мангейм (Великобритания)

В США запатентована система автоматического управления замедлителем нажимного типа [158], в которой замедлитель переходит на последовательно уменьшающиеся ступени торможения по мере уменьшения скорости тормозимого отцеп. Уменьшение степени торможения выполняется при помощи группы реле скорости AS, BS, CS (рис.1.8). Эти реле скорости управляется в соответствии с разностью между фактической скоростью тормозимого отцеп, измеряемой РЛС, и заданной скоростью выхода отцеп из замедлителя, вычисленной аналоговым компьютером.

В системе имеется также обратная связь по ускорению (замедлению), получаемого путем дифференцирования сигнала РЛС. Это по-

зволяет учитывать инерционность замедлителя.

Так, переключение с высокой степени торможения на среднюю происходит в точке С (рис.1.9), при скорости отцепа равной сумме DV_c – величине эмпирически определенной для заданной скорости выхода – и некоторого отрезка скорости, пропорционального замедлению отцепа.

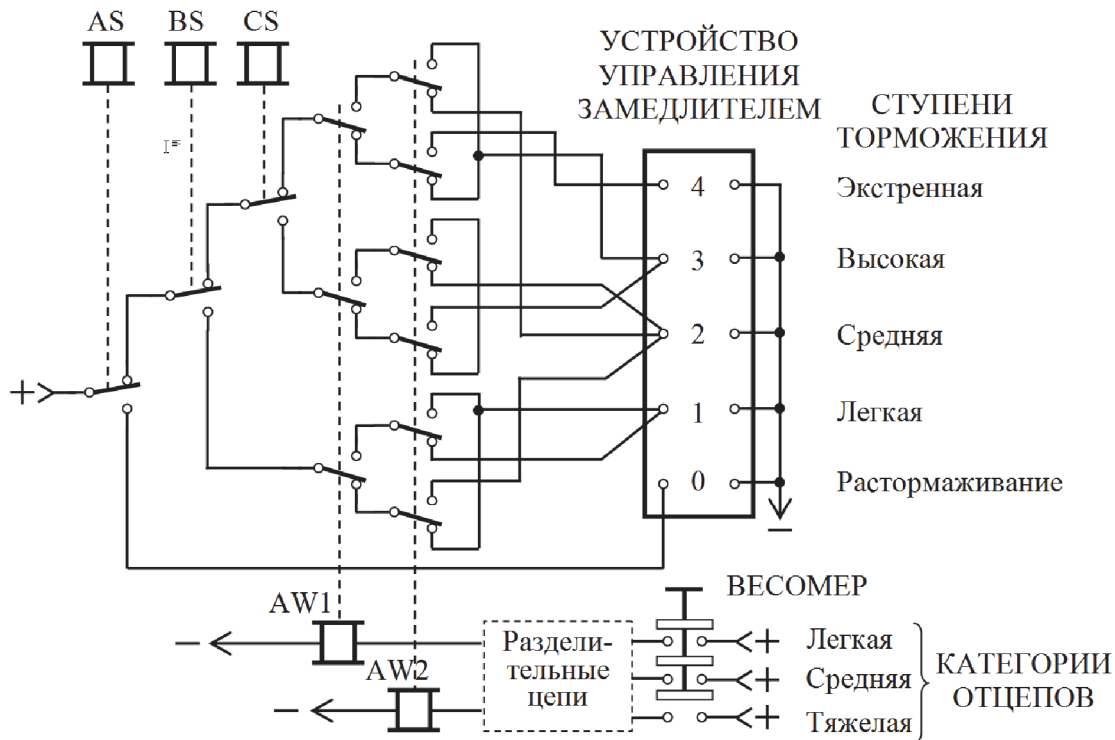


Рис.1.8. Схема управления замедлителем, обеспечивающая последовательное уменьшение тормозного усилия.

Реле скорости в комбинации с реле веса связаны с реле управления замедлителем. В зависимости от веса тормозимого отцепа может быть различная исходная ступень торможения при последовательном отпадании реле скорости.

В [162] предложен алгоритм управления замедлителем, в котором ступени торможения замедлителя последовательно изменяются от высшей к низшей по мере увеличения времени прохождения колеса отцепа между двумя соседними точечными магнитными датчиками, определенное количество которых установлено вдоль рельсов в замедлителе.

В [138,139] также предлагается уменьшать ступень торможения

замедлителя постепенно по мере продвижения отцепа в тормозной позиции. При этом предлагается рассчитывать моменты переключения с учетом измеренного значения замедления тормозимого отцепа.

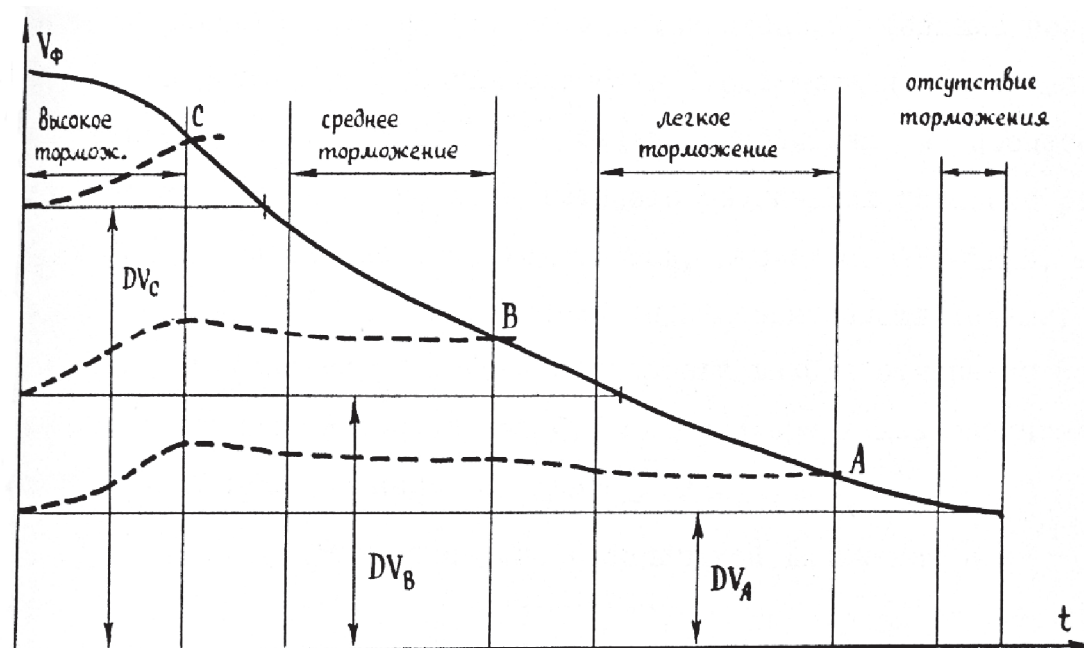


Рис.1.9. Динамика работы системы управления замедлителем при последовательном уменьшении тормозного усилия замедлителя.

В целом, в системах с изменением степени тормозного усилия замедлителя в процессе торможения можно добиться более высокой точности управления, чем в системах с использованием только одной ступени торможения, вследствие большей гибкости управления. Однако, все остальные недостатки, присущие системам с управлением по рассогласованию (наличие автоколебаний, большие погрешности при дифференцировании скорости) остаются и в системах с изменением степени тормозного усилия замедлителя в процессе торможения. Из-за этого существенного увеличения точности работы замедлителей не происходит. Так, в системе АРС-ЦНИИ, в которой используется данный принцип управления замедлителями, математическое ожидание отклонения фактической скорости выхода отцепа из замедлителя от заданной составляет 0,1 м/с при среднеквадратической ошибке 0,62 м/с (данные из [116]).

1.4.3. Торможение с задержкой включения замедлителя

При расчете ситуаций, складывающихся на сортировочной горке, выяснилось, что во многих случаях необходимо, чтобы отцеп проходил тормозную позицию за минимально возможное время [88]. При этом потребовалось ввести в алгоритмы управления замедлителями задержку момента их включения.

Предложено несколько алгоритмов расчета задержки включения замедлителя.

Так, в [88] рекомендуется вводить поправки на задержку включения в зависимости от суммарного веса отцепа, нелинейно увеличивая задержку с уменьшением веса отцепа. Порожные вагоны при этом, тормозятся с полной задержкой включения замедлителей («в последний момент»).

В [28] предлагается включать замедлитель при достижении отцепом скорости $V_{\text{вкл}}$, при измеренной входной и заданной выходной скорости. Формула расчета $V_{\text{вкл}}$ учитывает вес каждого вагона в отцепе, переменный профиль пути, на котором находится отцеп в процессе торможения, длину отцепа, тормозную характеристику замедлителя.

На сортировочной станции Базель-Муттенц II (Швейцария) парковые тормозные позиции (16 метровые электродинамические замедлители) управляются по принципу задержки момента включения [143]. Кинетическая энергия отцепа постоянно сравнивается с тормозной энергией еще остающейся в замедлителе. Когда обе эти величины сравниваются, замедлитель включается.

Энергетическое уравнение решает ЦВМ типа Сименс 306. В это уравнение кроме измеряемой скорости входа и суммарного веса отцепа, входит расстояние, пройденное каждой осью отцепа в замедлителе, которое измеряется РЛС.

В [169] предлагается устройство управления замедлителем, которое в зависимости от кинетической энергии отцепа выбирает момент включения так, чтобы при достижении отцепом заданной скорости все оси отцепа уже вышли бы из замедлителя. При этом участок торможения разбит на ряд тормозных отрезков. На границе отрезков устанавливаются рельсовые педали, с помощью которых определяется скорость отцепа и количество пройденных осей. По этой информации, а также, по требуемой скорости выхода устройство управления

на основе таблицы торможения для каждого конкретного участка выбирает интенсивность торможения и включает замедлитель на соответствующую ступень торможения.

В [168] предлагается устройство, которое также включает замедлитель с запаздыванием. Однако, здесь отсутствует обратная связь по скорости. После входа отцеп в расторможенный замедлитель коммутационные устройства, которые управляются сигналами от рельсовых педалей, расположенных впереди и позади замедлителя, изменяют зависящую от запаса кинетической энергии отцепу характеристику замедлителя, выраженную определенными уравнениями. Характеристика изменяется пропорционально истекающему времени и соответственно количеству осей, находящихся в замедлителе. Когда изменяемая характеристика достигает определенной величины, замедлитель включается.

Необходимо отметить, что исключение обратной связи по скорости не может не ухудшать точности работы систем, вследствие недетерминированности тормозной характеристики замедлителя.

В целом же, применение алгоритмов с задержкой времени включения замедлителя уменьшает вероятность возникновения автоколебаний (хотя и не исключает возможность их возникновения) за счет достижения заданной скорости только в конце зоны торможения.

Однако, в некоторых случаях отцеп может не успеть вытормозиться до заданной скорости.

Следует также отметить, что применение алгоритмов с задержкой включения замедлителя требует использования вычислительных устройств (как правило, ЭВМ).

1.4.4. Задание закона торможения

Алгоритм задания закона торможения в системах автоматического регулирования скорости первоначально использовался для автоматического управления движением и торможением поездов [4,125,164]. В большинстве этих систем вычислительное устройство по скорости в начале и в конце какого-либо участка и по длине этого участка рассчитывает кривую торможения $V(S)$. В определенных точках пути фактическая скорость поезда сравнивается со скоростью на кривой торможения (в некоторых алгоритмах сравнение происходит непрерывно) и по величине

не рассогласования выбирается режим торможения поезда таким образом, чтобы фактическая кривая $V_{\phi}(S)$ максимально приблизилась к расчетной.

Идеи использования подобных алгоритмов для управления работой замедлителей при торможении отцепов высказывались в работах [90,152].

Разработка конкретных алгоритмов и устройств, использующих этот принцип для управления работой замедлителей, показала, что в качестве вычислительного устройства и регулятора в контуре управления целесообразно использовать ЦВМ.

В [155] разработан алгоритм управления замедлителем, в котором ЦВМ рассчитывает режим торможения отцепа, представляющий собой прямую $V^2(S)$ (рис. 1.10), соединяющую точки $V_{вх}^2$ и $V_{вых}^2$ (т.е. задается постоянное по всей длине тормозной позиции замедление отцепа). Предложенный в [155] алгоритм использует эту прямую, как линию переключения.

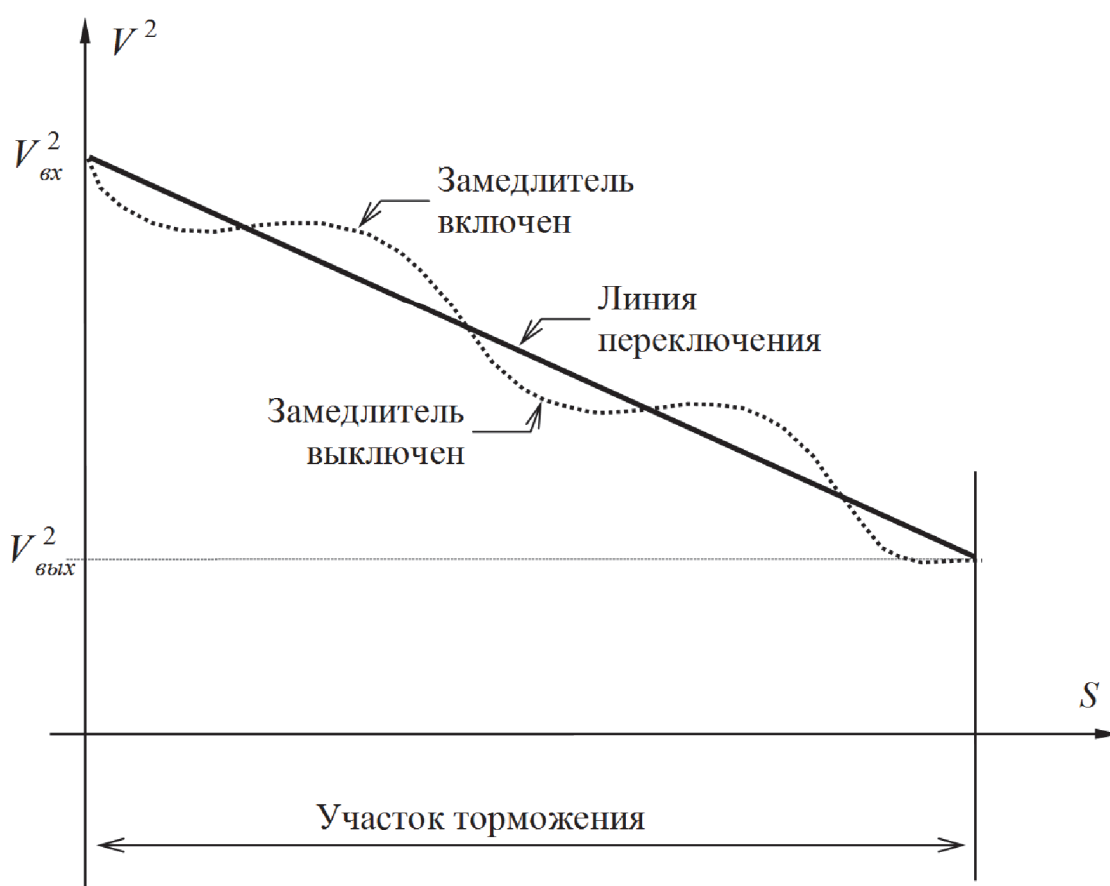


Рис.1.10. Задание закона торможения отцепа в замедлителе и фактическое движение вагона в замедлителе

После того, как отцеп вошел на заторможенный замедлитель, с интервалом $1/4$ секунды считывается, измеряемая радиолокационным скоростемером, скорость отцепа и рассчитывается месторасположение отцепа в замедлителе. Затем ЦВМ рассчитывает позицию и скорость отцепа с определенным опережением во времени, зависящим от состояния замедлителя в данный момент времени. Если предсказанная координата лежит над линией переключения, то замедлителю дается команда на торможение (степень торможения зависит от веса отцепа). В противном случае дается команда на оттормаживание замедлителя.

К недостаткам такого алгоритма следует, вероятно, отнести наличие множества переключений замедлителя, при которых происходит расход сжатого воздуха и электроэнергии. К достоинствам – обратную связь по скорости, состоянию замедлителя и месторасположению отцепа в замедлителе, что должно улучшить точность работы системы.

Следует отметить, что идею подобного алгоритма предложил проф. Павлов В.Е. и Красовский Г.А. в [90].

Другой алгоритм с заданием закона торможения предложен в [152], где для расчета режимов торможения используется комплекс из 5 вычислительных программ, хранящихся в памяти ЦВМ. Эти программы рассчитывают режим торможения отцепа для различных сочетаний измеренных при прохождении над датчиками входных, заданных выходных скоростей и весовых категорий отцепов. Управляющая программа, заложенная в эту же ЭВМ, реализует рассчитанный алгоритм. Заметим, что измеритель скорости в контуре управления отсутствует (рис. 1.11).

На рис. 1.12 графически показана прямая – теоретическая зависимость $V(S)$ в замедлителе. Линейный характер зависимости был выбран, как простейший в аппаратной реализации. Кроме того он отвечает одной из целей управления – наиболее полное использование всей длины замедлителя.

Так как фактическое изменение скорости нелинейно, то, чтобы получить линейную зависимость нужно постоянно изменять силу торможения. ЦВМ вначале определяет точки (в данном примере точки 1, 2, 3), в которых надо замедлитель переключать на более низкую степень торможения, чтобы обеспечить заданную скорость выхода $V_{\text{вых}}$. Затем рассчитывается время, в течение которого замедлитель

должен быть включен на соответствующую ступень торможения. Рассчитанные значения посылаются в промежуточное ЗУ.

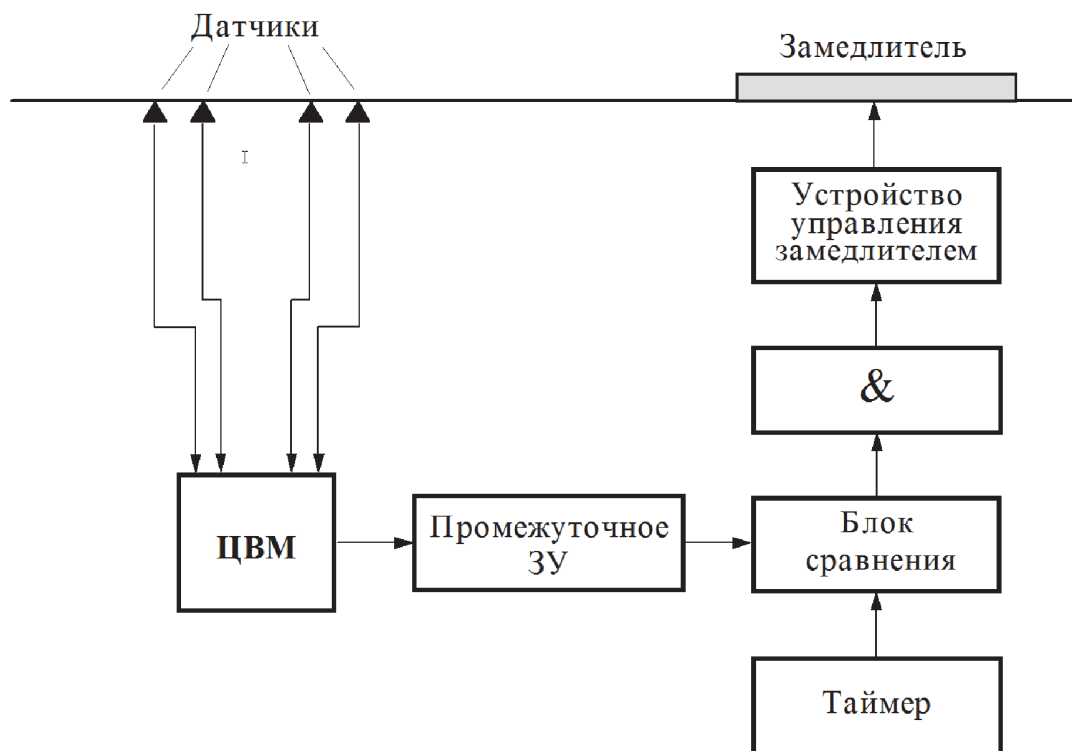


Рис. 1.11. Функциональная схема управления замедлителем с использованием ЭВМ, рассчитывающей закон торможения (без измерителя скорости)

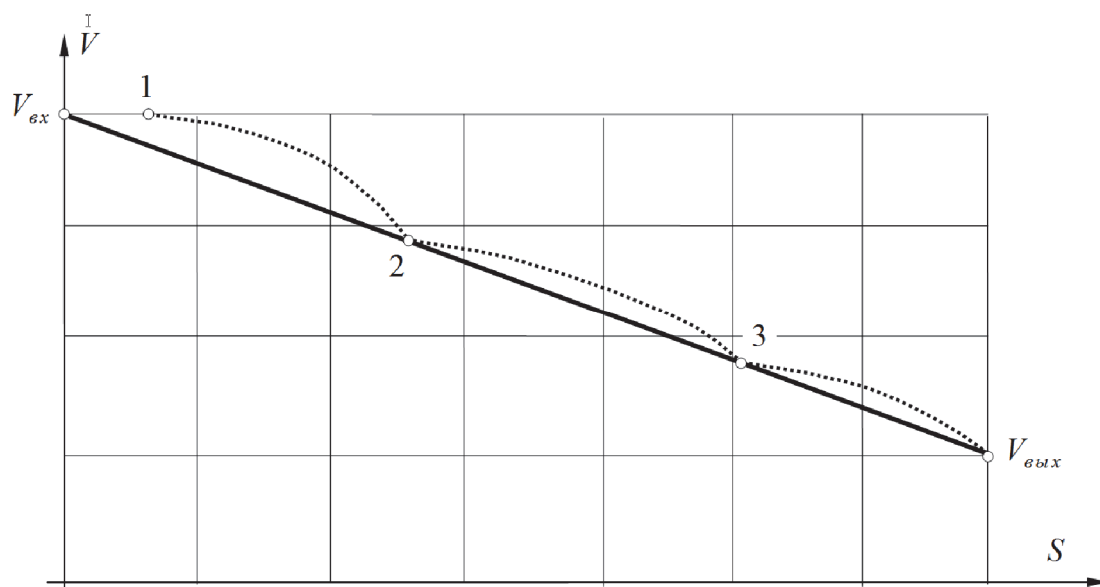


Рис.1.12. Пример расчета на ЭВМ режима торможения отцепа

При входе отцепа на замедлитель запускается таймер. Блок сравнения определяет, сравнивая показания таймера и промежуточного ЗУ, моменты включения той или иной ступени торможения замедлителя. В эти моменты времени схема пропускает команды из промежуточного ЗУ в устройство управления замедлителем.

Несмотря на довольно сложный алгоритм расчета режима торможения отцепа и использование ЦВМ для такого расчета, отсутствие обратной связи по скорости, вероятно, значительно снизит точность работы системы.

1.4.5. Алгоритмы оптимального управления замедлителями

В ЦНИИ МПС при участии Фонарева Е.М., Модина Н.К., Мелещука П.А., Ваванова Ю.В. разработаны алгоритмы и устройства оптимального управления двухпозиционной тормозной позицией с вагозамедлителями весового типа применительно к системе АРС-ЦНИИ. При этом за критерий оптимальности принят минимум времени занятия отцепом тормозной позиции.

В [66,69,70] показано, что оптимальным по данному критерию является способ поочередного оттормаживания замедлителей на основе информации об измеренной интенсивности торможения, скоростях входа отцепа на замедлители и заданной скорости выхода отцепа из тормозной позиции.

В зоне торможения отцепа двумя замедлителями L_{T1+2} можно вычислить скорость $V_{от1}$, в момент достижения которой первый замедлитель нужно растормозить, такую, что с замедлением a_{32} , при торможении только вторым замедлителем, отцеп достигнет скорости $V_{вых}$ к концу участка L_{T1+2} . При этом, время занятия отцепом тормозной позиции сокращается по сравнению с вариантом, когда отцеп тормозится двумя замедлителями с интенсивностью a_{31+2} до момента достижения отцепом скорости $V_{вых}$.

Величины a_{31+2} и a_{32} , необходимые для вычисления скорости $V_{от1}$, определяются на основании корреляционных зависимостей по измеренной интенсивности торможения первой тележки отцепа в первом замедлителе.

Для длинных отцепов (4 вагона и выше) установлено, что мини-

мальное время. занятия тормозной позиций обеспечивается в том случае, когда с момента вступления на тормозную позицию и до прохождения определенного расстояния отцеп вообще не тормозится, а затем осуществляется торможение одновременно двумя замедлителями до тех пор, пока скорость отцепа не снизится до заданной с поправкой, учитывающей инерционность замедлителя.

Величина интенсивности торможения длинных отцепов, которая необходима для вычисления пути $S_{оп}$ прохождения отцепа в тормозной позиции при выключенных замедлителях, принимается средняя, так как изменение интенсивности торможения длинных отцепов достаточно мало.

Авторы отмечают, что данные алгоритмы оптимального управления замедлителями при торможении различных по длине отцепов обеспечивают доведение скорости отцепов до заданной только при их выходе с тормозной позиции. Этим исключается многократное срабатывание замедлителей, что приводит к экономии электроэнергии.

На основании данного алгоритма разработано устройство оптимального управления замедлителями (УОУЗ), внедренное на сортировочной станции Клепарово Львовской железной дороги.

Адаптивные алгоритмы вытормаживания отцепов в горочном замедлителе разработаны В. И. Шелухиным [138,139,141,142]

Классификация алгоритмов управления, применяемых в системах АРС, приведена на рис. 1.13.

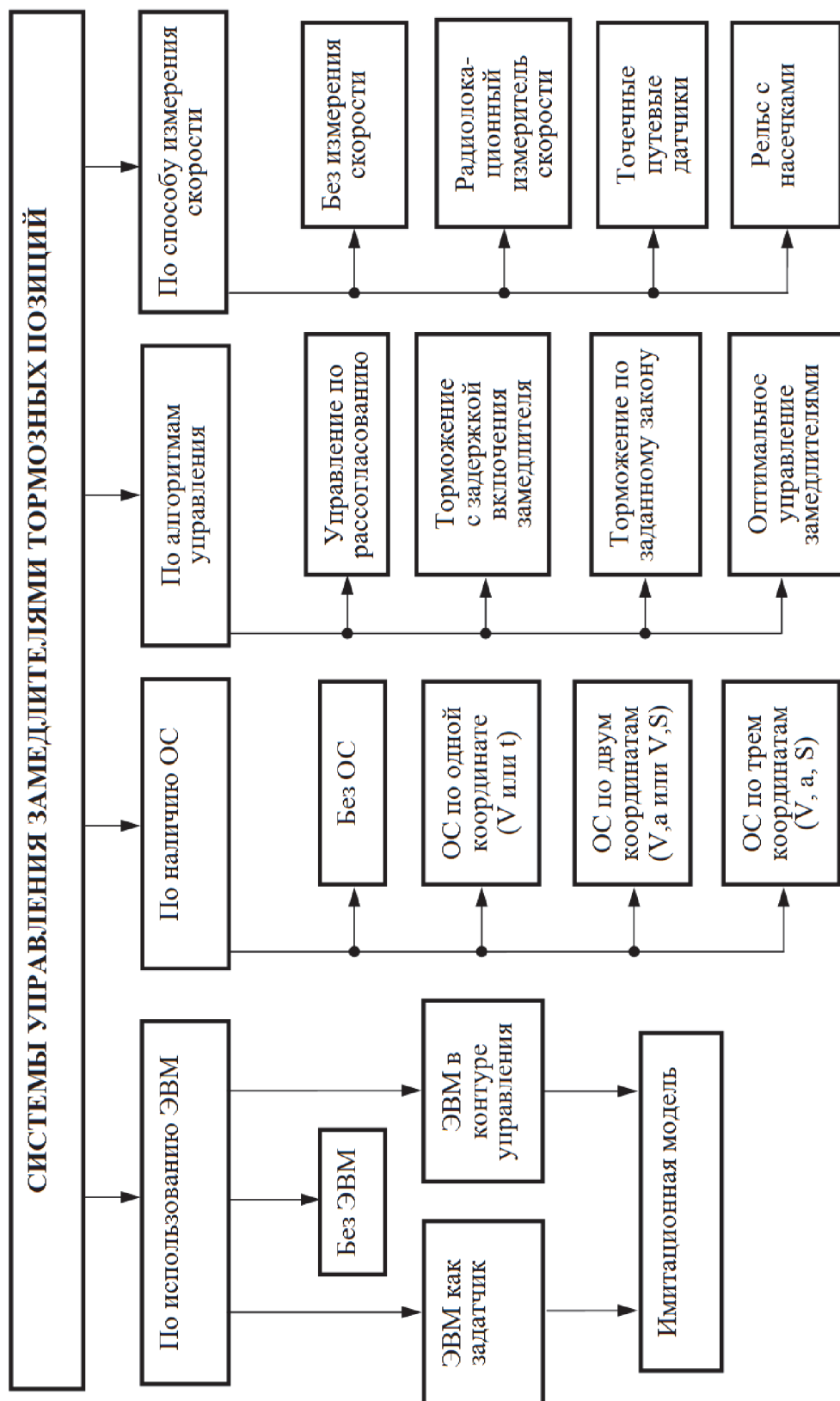


Рис. 1.13. Классификация систем управления замедлителями тормозных позиций по различным признакам

Методика исследования цифровых систем управления замедлителями

2.1. Математическая модель процесса торможения отцепа в замедлителях тормозной позиции

2.1.1. Дифференциальное уравнение движения отцепа в тормозной позиции

Движение отцепа в замедлителях тормозной позиции описывается известным дифференциальным уравнением:

$$m \frac{d^2 S}{dt^2} = \sum_j F_j, \quad (2.1)$$

где m – масса отцепа;

S – пройденный путь;

$\sum_j F_j$ – сумма сил, действующих на отцеп.

В горочных расчётах [11,14] принято использовать удельные силы, т.е. силы, приходящиеся на 1000 единиц веса отцепа. С учётом этого уравнение (2.1) может быть записано в виде:

$$a = g' [i - (W_O + W_{CB} + W_T)] \cdot 10^{-3}, \quad (2.2)$$

где a – ускорение движения отцепа;

g' – ускорение свободного падения с учётом инерции вращающихся масс отцепа;

i – уклон, по которому движется отцеп, в тысячных (удельная составляющая силы тяжести отцепа направленная по направлению движения);

W_0 – основное удельное сопротивление движению отцепа;

W_{CB} – удельное сопротивление движению отцепа от воздействия воздушной среды и ветра;

W_T – удельное значение тормозной силы замедлителя.

Отметим, что на отцеп кроме сил, учтённых в (2.1), действуют ряд других сил (от кривых, стрелок и т.д.) [79,114], которые не оказывают практического влияния на процесс торможения отцепа в замедлителе.

Обычно тормозная позиция расположена на постоянном уклоне, основное удельное сопротивление движению отцепа (по крайней мере, на участке торможения) для конкретного отцепа может быть принято постоянным. Учитывая то, что $W_{CB} \ll W_T$ сопротивление от воздействия воздушной среды на участке торможения можно также считать постоянным.

2.1.2. Статические характеристики исполнительного органа

Экспериментальные [12,81] и теоретические [12,87,145] исследования позволяют сделать допущения, что величина удельной тормозной силы прямо пропорционально числу одновременно тормозимых осей отцепа, т.е.

$$W_T = N \cdot W'_T, \quad (2.3)$$

где N – число одновременно тормозимых осей отцепа;

W'_T – удельное тормозное усилие на вагон, создаваемое при торможении одной оси, постоянное по всей длине замедлителя (для одной и той же ступени торможения замедлителя).

В эксплуатационных условиях для определения тормозной характеристики замедлителя измеряют (и приводят в справочниках) обычно величину H^* , называемую тормозной мощностью или погашаемой энергетической высотой (звездочкой обозначим величины, получен-

ные для эталонного вагона на эталонном замедлителе). При этом очевидно соотношение:

$$Q^* H^* = N^* F'_T l_p^*, \quad (2.4)$$

где F'_T – сила, действующая на одну ось отцепы (предполагаем, что для всех замедлителей данного типа и для всех отцепов она одинакова);

l_p^* – рабочая длина эталонного замедлителя;

Q^* – вес эталонного вагона;

N^* – количество осей эталонного вагона.

Для эталонного вагона:

$$W_T^{*'} = \frac{F'_T}{Q^*} \cdot 10^3 = \frac{H^*}{N^* \cdot l_p^*} \cdot 10^3. \quad (2.5)$$

Для фактического вагона весом Q_ϕ , с учётом того, что сила, действующая на одну ось не изменилась, величина удельной тормозной силы, действующая на одну ось, может быть вычислена по формуле:

$$W_T' = \frac{F'_T}{Q_\phi} \cdot 10^3 = \frac{H^*}{N^* \cdot l_p^*} \cdot \frac{Q^*}{Q_\phi} \cdot 10^3. \quad (2.6)$$

Для замедлителей нажимного типа тормозная мощность H зависит от силы нажатия тормозных балок на колесо вагона, которая, в свою очередь, определяется давлением P воздуха (для замедлителей пневматического типа) или тормозной жидкости (для замедлителей гидравлического типа) в тормозных цилиндрах. Экспериментальные исследования [12,13,145] показывают, что эта зависимость выражается формулой:

$$H = \begin{cases} 0, & \text{при } P < P_0; \\ A \cdot P^B + G, & \text{при } P_0 \leq P \leq P_{\max}, \end{cases} \quad (2.7)$$

где P_{\max} – максимальное значение давления в цилиндрах замедлителя;

P_0 – давление, при котором шины замедлителя соприкасаются с колёсами вагона, не оказывая при этом тормозящего воздействия;

A, B, G – эмпирически найденные коэффициенты, зависящие, в большей степени, от типа замедлителя и, в меньшей степени, от типа вагона. Значения A, B, G для разных типов замедлителей и разных типов вагонов приведены, например, в [12].

Подставляя (2.7) в (2.6), а результат в (2.3), получим:

$$W_T = k \frac{N}{Q_\phi} (AP^B + G), \quad (2.8)$$

где $k = \frac{Q_{ЭГ}}{N_{ЭГ} l_p} \times 10^3$ – константа.

Учитывая, что масса отцепа $m_\phi = Q_\phi / g'$, найдём при подстановке (2.8) в (2.2):

$$a = g' [i - (W_0 + W_{CB})] \times 10^{-3} - k \frac{N}{m_\phi} (AP^B + G). \quad (2.9)$$

Тормозная мощность замедлителя H – случайная величина, закон распределения которой может быть интерпретирован, как нормальный. Экспериментально найденные статистические параметры этого закона – математическое ожидание M_H и среднее квадратическое отклонение σ_H – при торможении эталонного вагона на максимальной ступени торможения – приведены, например, в [12]. Так как в (2.7) $A \gg G$, то допустимо считать, что в правой части формул (2.7), (2.8) случайной является лишь величина A . Используя теоремы о числовых характеристиках [21], можно найти математическое ожидание M_A и среднее квадратическое отклонение σ_A случайного коэффициента A из (2.7):

$$M_A = \frac{M_{H^*} - G}{P_{\max}^B}, \quad (2.10)$$

$$\sigma_A = \frac{\sigma_{H^*} - G}{P_{\max}^B}. \quad (2.11)$$

Числовые характеристики случайной величины a – ускорения движения отцепы в замедлителях тормозной позиции, с учётом того, что $F_T \gg F_i$ и $F_T \gg F_{W0}$, можно записать:

$$M_a = g'[M_i - (M_{W0} + M_{CB})] \times 10^{-3} - k \frac{N}{m_\phi} (M_A P^B + G), \quad (2.12)$$

$$\sigma_a = k \frac{N}{m_\phi} (\sigma_A P^B + G). \quad (2.13)$$

2.1.3. Динамические характеристики исполнительного органа

Изменения давления в тормозных цилиндрах замедлителя при переключении последнего с одной ступени торможения на другую определяет динамические характеристики замедлителя. Рассмотрим их более подробно для замедлителей нажимного типа с пневмоприводом.

Согласно [12,145] после подачи команды на включение замедлителя (подачи сигнала на тормозной электропневмоклапан (ЭПК)) давление в цилиндрах расторможенного замедлителя нажимного типа изменяется по закону, упрощенный вид которого представлен на рис. 2.1.

Процесс изменения давления в цилиндрах замедлителя можно разбить на ряд периодов [12,145].

1) Период от момента поступления сигнала на тормозной ЭПК до момента начала нарастания давления в цилиндрах замедлителя (t_{z2}).

2) Период от момента начала нарастания давления в цилиндрах замедлителя до момента соприкосновения тормозных шин замедлителя с колёсами тормозимого вагона (t_{00}).

3) Период нарастания давления в цилиндрах замедлителя до своего максимального значения (t_2).

Периоды 1) и 2) могут быть учтены, как «чистое» запаздывание, так как торможения вагона в эти периоды не происходит.

В период t_2 закон изменения давления воздуха в цилиндрах замедлителя может быть аппроксимирован экспонентой [12,145]:

$$P(t) = P_{\max} - (P_{\max} - P_0)e^{-\frac{t}{\tau_T}}, \quad (2.14)$$

где P_{\max} – максимальное значение давления в цилиндрах замедлителя;

P_0 – давление, при котором шины замедлителя соприкасаются с колёсами вагона, не оказывая при этом тормозящего воздействия;

τ_T – постоянная времени, найденная экспериментально для конкретного типа замедлителя.

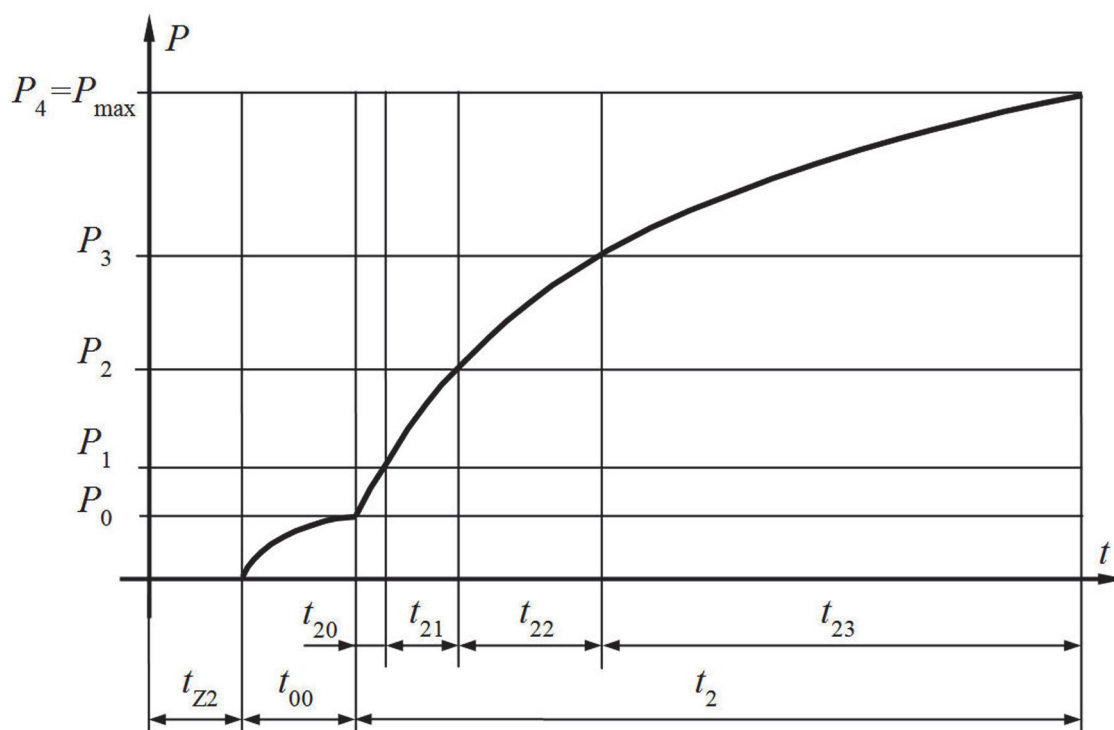


Рис. 2.1. Изменение давления в цилиндрах замедлителя при подаче управляющего сигнала на тормозной ЭПК

Если подать сигнал на оттормаживающий ЭПК при максимальном давлении воздуха в цилиндрах замедлителя, то давление в цилиндрах будет меняться так, как показано на рис. 2.2.

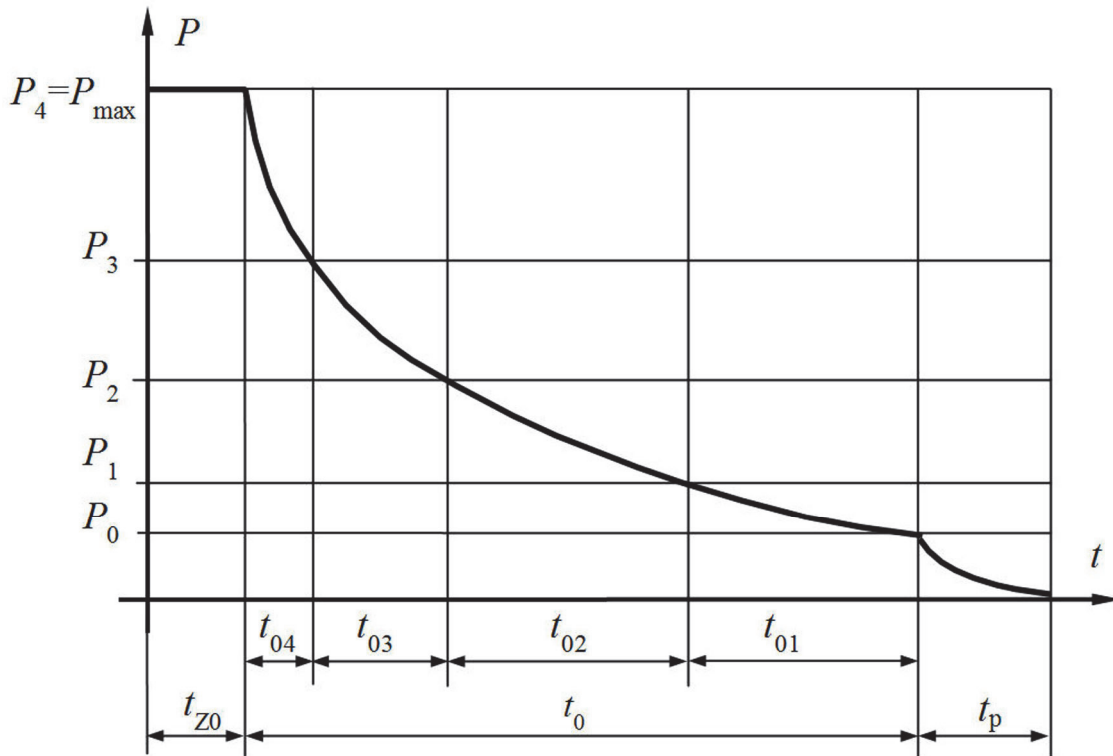


Рис. 2.2. Изменение давления в цилиндрах замедлителя при подаче управляющего сигнала на оттормаживающий ЭПК

При этом весь процесс изменения давления в цилиндрах замедлителя можно разбить на ряд периодов [12,145].

1) Период от момента поступления сигнала на вход оттормаживающего ЭПК до момента начала уменьшения давления в цилиндрах замедлителя (t_{z0}).

2) Период от момента начала уменьшения давления в цилиндрах замедлителя до момента прекращения соприкосновения тормозных шин замедлителя с колёсами тормозимого вагона (t_0).

3) Период «распадания» замедлителя (t_p).

1-й период является «чистым» запаздыванием, так как никакого воздействия на вагон управляющий сигнал в это время не оказывает.

Закон изменения давления воздуха в цилиндрах замедлителя во втором периоде может быть аппроксимирован экспонентой [12,145]:

$$P(t) = P_{\max} e^{-\frac{t}{\tau_0}}, \quad (2.15)$$

где τ_0 – экспериментально найденная [145] постоянная времени.

Полагая, что в пневмоприводе отсутствуют утечки воздуха через уплотнения можно считать, что на определённой ступени торможения k поддерживается постоянное давление P_k . При подаче команды на изменение ступени торможения, давление после времени «чистого» запаздывания изменяется в течение времени переходного процесса до величины, соответствующей выбранной ступени торможения и, далее, вновь поддерживается постоянным.

Считая, что давление изменяется по экспоненте (рис. 2.1 или рис. 2.2) время перехода на соседнюю ступень торможения (исключая «чистое» запаздывание) можно рассчитать по формулам:

– при переходе на более высокую ступень:

$$t_{2k} = \tau_T \ln \frac{P_{\max} - P_k}{P_{\max} - P_{k+1}}, \quad (k=0..3) \quad (2.16)$$

$$t_{24} = t_2 - \sum_{k=0}^2 t_{2k}. \quad (2.17)$$

– при переходе с k -й ступени на более низкую ступень:

$$t_{0k} = \tau_0 \ln \frac{P_k}{P_{k-1}}, \quad (2.18)$$

В расчётах полагаем $P_4 = P_{\max}$.

2.2. Функциональная структура цифровой системы управления торможением отцепа замедлителями тормозной позиции

Система управления торможением отцепа замедлителями тормозной позиции является составной частью (подсистемой) системы автоматического управления скоростью скатывания отцепа с сортировочной горки (АРС). Задача данной подсистемы – обеспечить выход отцепа с тормозной позиции с заранее заданной скоростью $V_{\text{зад}}$, определённой другой подсистемой.

Типичная структура цифровой системы управления торможением отцепа замедлителями тормозной позиции показана на рис. 2.3. Участок тормозной позиции оборудован вагонозамедлителями (ВЗ1 и ВЗ2). На сортировочных горках Украины распространение получили пневматические замедлители [127], в которых тормозные балки сжимают колёса отцепа посредством усилия со стороны пневмопривода. В качестве перспективных также можно рассматривать гидравлические замедлители [81], в которых для сжатия тормозных балок используется гидропривод. Устройство управления замедлителем (УУЗ) обеспечивает ступенчатое изменение усилия нажатия тормозных балок (ступени торможения). Для этой цели предусмотрен локальный (встроенный в конструкцию пневмопривода) регулятор давления манометрический (РДМ). Известны также регуляторы с непрерывным управлением изменения давления.

Выдача команд на УУЗ (выбор ступени торможения) производится цифровым регулятором на базе управляющего микроконтроллера. В качестве сигнала обратной связи в этом регуляторе используется измеренное значение скорости отцепа. Такое измерение производится одним или двумя радиолокационными скоростемерами (РЛС1 и РЛС2). Фиксация моментов входа и выхода отцепа из ТП, подсчет количества осей отцепа, находящихся на ТП, производится точечными путевыми датчиками ПД1, ПД2, ПД3, а также рельсовыми цепями РЦ1 и РЦ2. Управление замедлителями производится через пульт оператора, на который выводится информация о ходе торможения. Сигналы с пульта оператора поступают на устройства управления замедлителями УУЗ1 и УУЗ2, которые обеспечивают

включение замедлителей на выбранную ступень торможения. Алгоритмы работы регулятора будут обсуждаться ниже.

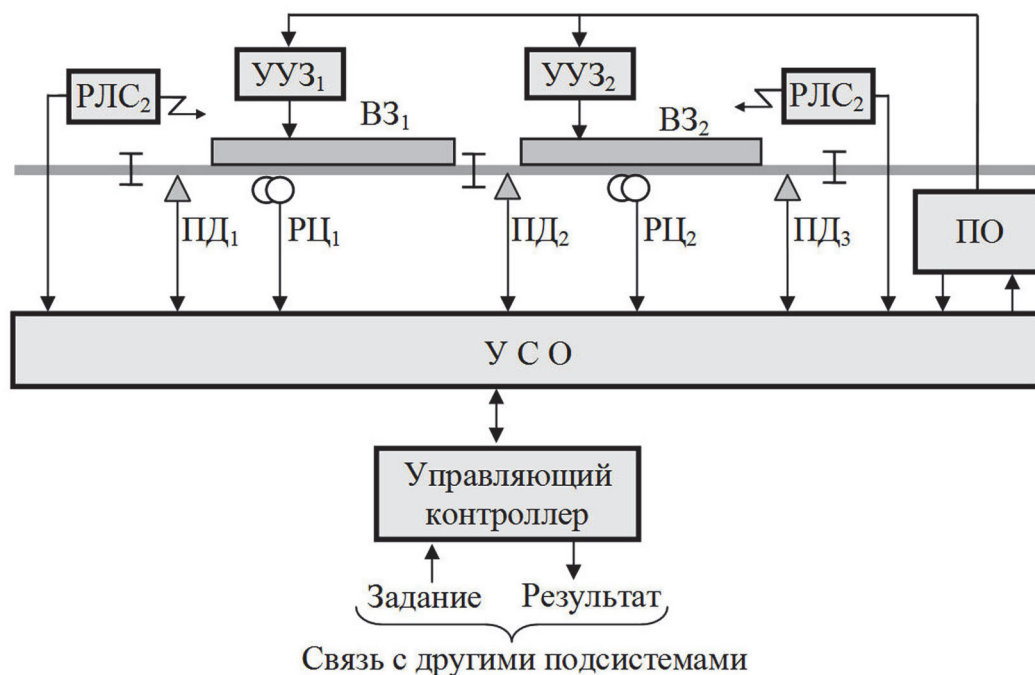


Рис. 2.3. Техническая структура участка тормозной позиции

Связь напольного оборудования, а также пульта оператора с контроллером осуществляется через устройства связи с объектом (УСО).

Контроллер регулятора связан с другими подсистемами, принимает от них информацию о заданной скорости выхода из ТП, рекомендуемом режиме торможения и передает другим подсистемам информацию о результатах торможения.

Функциональная схема такой системы автоматического управления приведена на рис. 2.4.

На объект управления ОУ (отцеп) действует управляющее воздействие – тормозное усилие балок замедлителя F_{WT} и возмущающие воздействия: F_i – составляющая силы тяжести, ускоряющая отцеп на уклоне i , F_W – силы сопротивления скатыванию. Выходная координата отцепа – скорость, которая измеряется блоком измерения скорости БИС (радиолокационные измерители скорости) и в цифровой форме $V^*[n]$ поступает на блок задания ступеней торможения (БЗСТ). Другая выходная координата объекта управления – путь, косвенно изме-

рется счетчиком количества осей СКО (путевые датчики) и поступает на БЗСТ в цифровой форме $K^*[n]$.

Блок задания ступеней торможения БЗСТ представляет собой вычислитель (управляющий контроллер). На его вход кроме сигналов обратной связи $V^*[n]$ и $K^*[n]$ поступает информация из других подсистем: параметры тормозимого отцепа и его заданная скорости выхода с тормозной позиции $V_{зад}$. На основании всей этой информации БЗСТ вырабатывает сигналы управления замедлителем – вектор ступеней торможения \mathbf{U} . Компоненты этого вектора – отдельные ступени торможения – цифровые элементы, которые могут принимать значения (0,1). В составе вектора один и только один элемент принимает значение 1, а остальные – значения 0. Количество ступеней торможения определяется конкретным типом замедлителя. Традиционно в большинстве типов замедлителей пять ступеней торможения, включая нулевую или оттормаживающую U_0 и максимальную U_T . Впрочем, известны модели замедлителей и с большим количеством ступеней торможения.

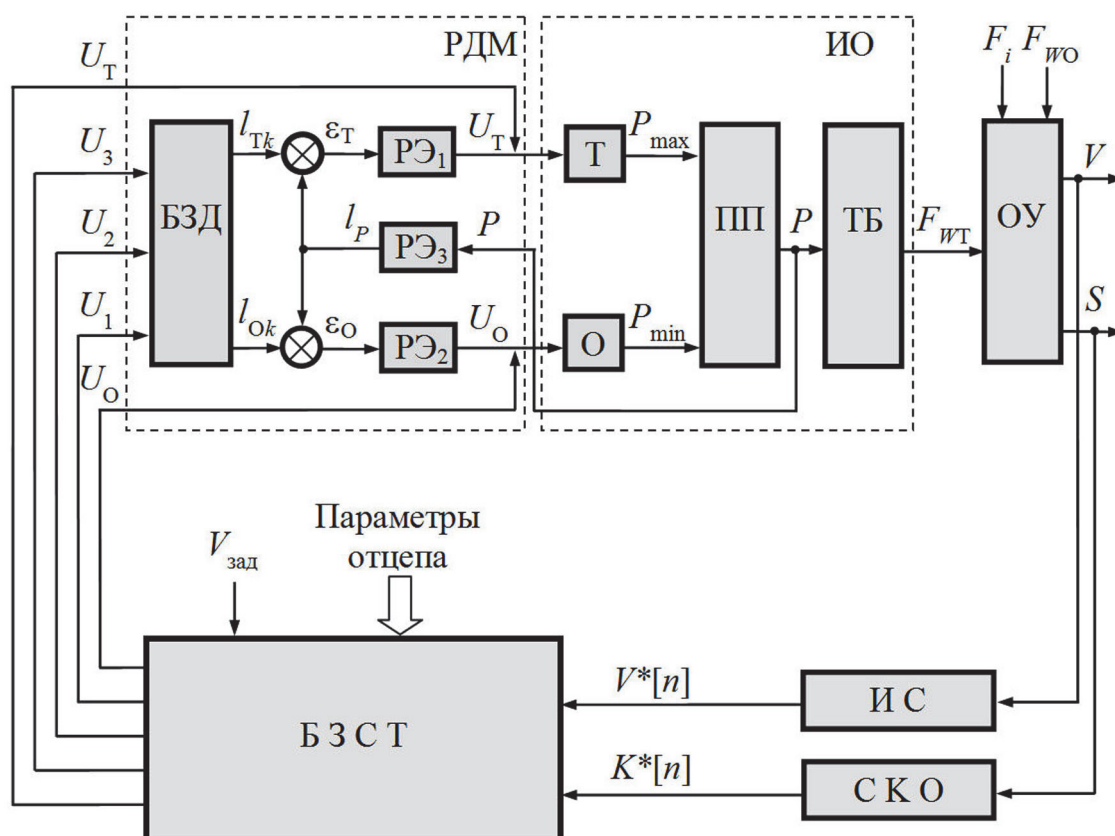


Рис. 2.4. Функциональная схема системы АРС

Замедлитель в данной системе управления является исполнительным органом (ИО). Его выходной сигнал – тормозное усилие $F_{ИТ}$ – формируется тормозными балками (блок ТБ), сжимающими колёса отцепы за счёт усилия сжатого воздуха в цилиндрах замедлителя (давление P на входе ТБ). Давление, в свою очередь, вырабатывается сжатым воздухом, который накапливается в воздухоборнике (на функциональной схеме представлен как пневмопривод ПП). Воздухоборник же может быть подсоединён либо к магистрали сжатого воздуха P_{\max} через тормозной электропневмоклапан Т, либо к наружному воздуху P_{\min} через оттормаживающий электропневмоклапан О. Управление этими электропневмоклапанами (ЭПК) производится локальным регулятором давления манометрическим – РДМ.

РДМ предназначен для поддержания в воздухоборнике давления, соответствующего выбранной ступени торможения. Сигналы ступеней торможения U_O и U_T поступают соответственно на оттормаживающий О и тормозной Т электропневмоклапан, минуя РДМ. Сигналы же U_1, U_2, U_3 поступают на вход блока задания давления (БЗД). Этот блок является релейным преобразующим звеном, вырабатывающим сигналы l_{Tk} и l_{Ok} . ($k=1,2,3$ – номер сигнала U_k , принявшего значение «1» или, другими словами, выбранная БЗСТ ступень торможения). Величины l_{Tk} и l_{Ok} представляют собой координаты k -й группы гибких контактов (две пары), через которые могут подключаться тормозной Т и оттормаживающий О электропневмоклапан соответственно.

Сигналы l_{Tk} и l_{Ok} сравниваются с величиной l_p , являющейся аналогом давления P в цилиндрах замедлителя и представляющей собой перемещение конца изогнутой упругой трубки, соединённой с воздухоборником. Разностные сигналы ε_T и ε_O с элементов сравнения поступают на релейные элементы РЭ₁ и РЭ₂. На выходе релейного элемента появляются сигналы U_T , если $\varepsilon_T < 0$ или U_O , если $\varepsilon_O > 0$.

Так, если давление, соответствующее выбранной ступени торможения, меньше, чем в цилиндрах замедлителя, то и $\varepsilon_T = (l_{Tk} - l_p) < 0$. На выходе РЭ₁ появится сигнал U_T , который откроет тормозной ЭПК Т. Давление на выходе ПП будет увеличиваться до тех пор, пока величина l_p , пропорциональная P , не сравняется с l_{Tk} , после чего сигнал U_T примет нулевое значение, тормозной ЭПК закроется и давление P перестанет увеличиваться.

Аналогично происходит работа РДМ при выборе ступени торможения, соответствующее давление которой меньше, чем в цилиндрах замедлителя.

Блок задания ступеней торможения может работать по различным алгоритмам. Часть этих алгоритмов описана в главе 1, часть будет предложена ниже.

2.3. Структурная схема цифровой системы управления торможением отцепом замедлителями тормозной позиции

Структурная схема рассматриваемой системы изображена на рис. 2.5. Объект управления (отцеп) здесь представлен двумя интегрирующими звеньями, преобразующими суммарное воздействие F_{Σ} в скорость $V(t)$ и путь $S(t)$. Релейный элемент РЭ₂ преобразует путь, пройденный отцепом в тормозной позиции (ТП) в количество тормозимых осей $N^*(t)$. РЭ₂ соответствует группе путевых точечных датчиков, установленных на входе и выходе из тормозной позиции. Координата скорости измеряется радиолокационным измерителем скорости (РЛС). На данной структурной схеме представлен один из вариантов использования РЛС. На сигнал скорости $V(t)$ накладывается аддитивная помеха h . Смешанный сигнал проходит усилительное звено K_1 , сигнал с выхода которого $V_n(t)$ поступает на АЦП, представленный на схеме релейным элементом РЭ₃. Измеренные значения $V^*(t)$ и $N^*(t)$ преобразуются идеальными импульсными элементами первого рода ИЭ₁ и ИЭ₂ в решетчатые цифровые функции $V^*[n]$ и $N^*[n]$, что соответствует их дискретному опросу с периодом T , и поступают на вход ЦВМ, представленную звеном $D(Z)$. На выходе ЦВМ формируется цифровой решетчатый сигнал управления $U[n]$, который поступает на вход идеального импульсного элемента ИЭ₃. Этот элемент генерирует с периодом T последовательность $U^*[n]$ бесконечно коротких импульсов типа δ -функции, площадь которых пропорциональна сигналу $U(t)$ в моменты времени $t=nT$. Далее сигнал с задержкой, вызванной временем обработки входных сигналов в ЦВМ, поступает на экстраполятор нулевого порядка.

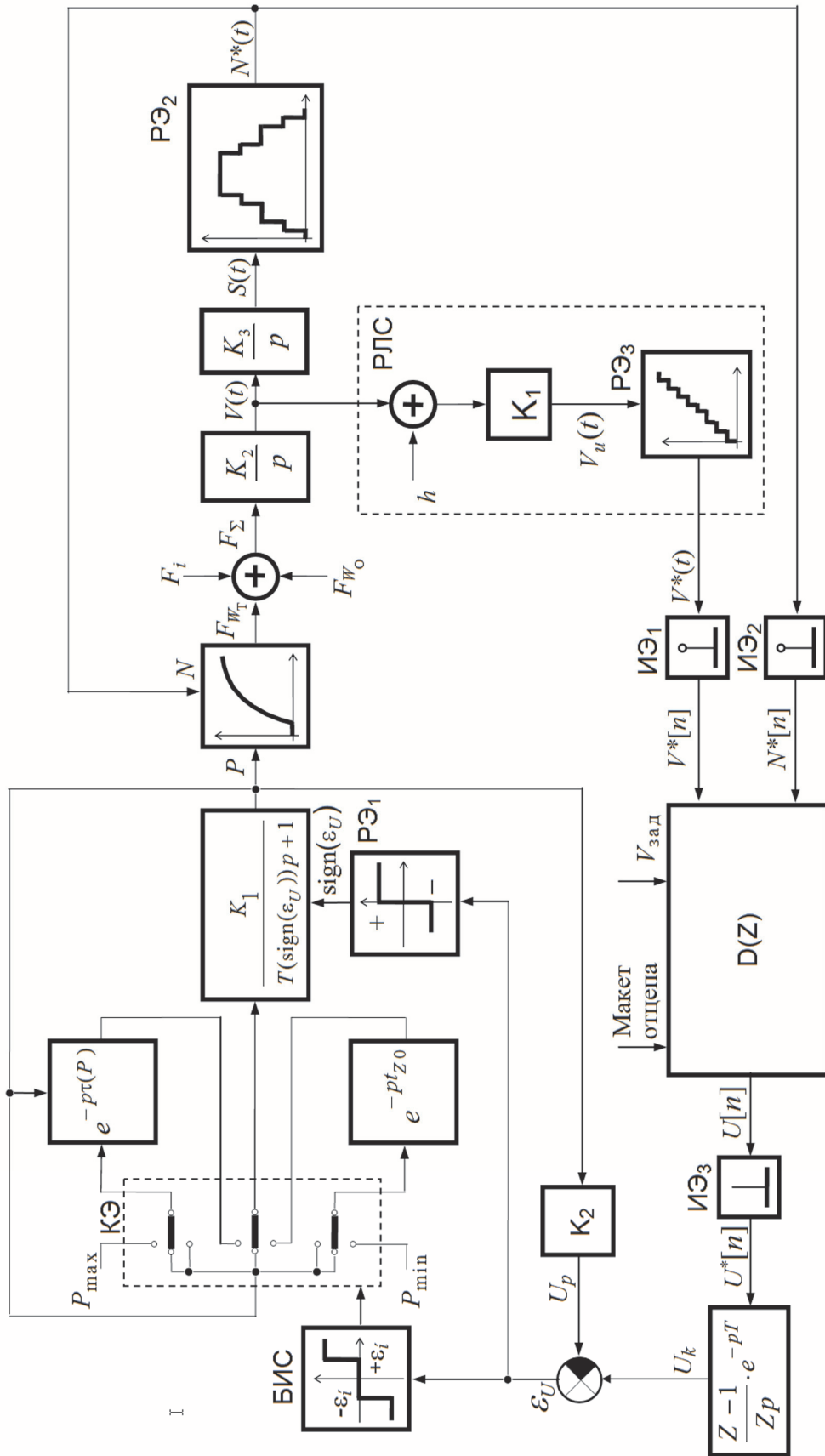


Рис. 2.5. Структурная схема цифровой системы управления торможением отцепла замедлителями тормозной позиции

Сигнал U_k с выхода экстраполятора поступает на регулятор давления, который на структурной схеме показан, как совокупность ряда звеньев:

- линейного преобразующего элемента K_2 , осуществляющего преобразование давления P в сигнал U_P ;
- элемента сравнения, который сравнивает сигналы U_k и U_P и выдаёт сигнал рассогласования ε_U ;
- релейного элемента РЭ₁, вырабатывающего сигнал $\text{sign}(\varepsilon_U)$;
- блока изменения структуры (БИС), управляющего работой ключевых элементов (КЭ).

БИС осуществляет подключение электропневмоклапанов, которые на схеме показаны, как элементы задержки, к входу пневмопривода, который показан как апериодическое звено с переменным параметром $T=f(\text{sign}(\varepsilon_U))$. Если $\varepsilon_U > +\varepsilon_n$ ($\pm\varepsilon_n$ – граница зоны нечувствительности БИС), то ключевой элемент подключит к входу тормозного ЭПК давление P_{\max} , а к выходу его – пневмопривод.

Давление P на выходе пневмопривода с задержкой времени $\tau(P)$ (причём $\tau(P)=t_{z2}$, если $P > P_0$ и $\tau(P)=t_{z2}+t_{00}$, если $P \leq P_0$) начинает увеличиваться по закону (2.14), ликвидируя рассогласование ε_U . Когда ε_U достигнет величины $+\varepsilon_n$, ключевой элемент подключит входы ЭПК и пневмопривода к давлению P на выходе последнего. Пневмопривод оказывается замкнутым положительной ОС и преобразуется в интегрирующее звено. Поскольку на вход этого интегрирующего звена ничего не поступает, то его выходной сигнал P остаётся постоянным. Если же $\varepsilon_U < -\varepsilon_n$, то ключевой элемент подключит пневмопривод к выходу оттормаживающего ЭПК, а на вход последнего подключит давление P_{\min} . С задержкой t_{z0} давление P на выходе пневмопривода начнёт уменьшаться по закону (2.15) до тех пор, пока рассогласование ε_U не станет по абсолютной величине меньше ε_n . С выхода пневмопривода давление P поступает на тормозные балки замедлителя, которые показаны на схеме, как нелинейный преобразователь с зоной нечувствительности, крутизна характеристики которого случайна, а её математическое ожидание зависит от числа N тормозимых пар колёс отцепа.

В целом данная цифровая система управления является стохастической, существенно нелинейной импульсно-релейной системой с переменной структурой, переменными параметрами и запаздывани-

ем. Исследование таких систем аналитическими методами встречает ряд затруднений и невозможно без существенных упрощений и линеаризации.

Примем допущение, что в течение времени перехода замедлителя от одной ступени торможения к другой на замедлитель не будут подаваться управляющие воздействия (в реальных системах управления замедлителями ТП и при ручном управлении это ограничение, как правило, выполняется безусловно), т.е.:

$$\Delta t_u > t_{k1,k2}, \quad (2.19)$$

где Δt_u – интервал между подачами команд управления;

$t_{k1,k2}$ – время переходного процесса в замедлителе при переключении его с $k1$ -й ступени торможения на $k2$ -ю.

При таком допущении замедлитель можно представить в виде конечного автомата (рис.2.6).



Рис. 2.6. Диаграмма состояний замедлителя

Состояние такого автомата представляет ступень торможения. Переход из одного состояния в другое происходит под воздействием управляющего сигнала $u_i \in U$ ($i=0,1,2$). Пусть $U=(u_0, u_1, u_2)$, где u_1 – управляющее воздействие, не приводящее к смене состояния, а u_0 и u_2 – управляющие воздействия, переводящие замедлитель на соседнюю ступень торможения¹. Такое допущение позволяет при исследовании динамики данной системы ограничиться исследованием дина-

¹ Данное ограничение введено лишь для упрощения задачи, а в полной постановке множество управляющих воздействий может быть представлено в виде матрицы переходов «от любой ступени к любой ступени».

мики разомкнутой части системы: РДМ, замедлителя и объекта управления (отцепа) при произвольных командах управления $u_i \in \mathbf{U}$, так как в момент подачи команды управления система будет находиться в установившемся режиме.

2.4. Исследование динамики разомкнутой системы

2.4.1. Исследование динамики разомкнутой системы при неизменной степени торможения.

Алгоритмы управления и моделирования требуют описания процесса движения отцепа в тормозной позиции с учетом стохастичности тормозной характеристики замедлителя. Ряд исследований показывают, что для конкретного отцепа величина тормозной характеристики замедлителя в расчете на одну ось имеет тенденцию к увеличению в процессе торможения, т.е. связана с координатой пути корреляционной зависимостью. Эта корреляционная зависимость была учтена автором при расчете коэффициентов тормозной характеристики замедлителя по участкам торможения. Показано, что на участке торможения относительно небольшой длины (3...5м) эту корреляционную зависимость можно не учитывать. Между тем, с учетом того, что количество тормозимых осей изменяется ступенчато аналитическое исследование процесса торможения целесообразно проводить на участках небольшой длины ΔS (используя в дальнейшем, например, метод припасовывания).

Рассмотрим процесс торможения отцепа на участке в пространстве состояний «путь (S) – скорость (V) – степень торможения (C)». Пусть в некоторой точке (S_n, V_i, C_k) пространства состояния выбрано управление u_1 (степень торможения не изменилась). Тогда в конце участка ΔS скорость V_{i+1} на линии $(S_n + \Delta S, C_k)$ определяется по элементарной формуле

$$V_{i+1} = \sqrt{V_i^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta S}, \quad (2.20)$$

где a – ускорение отцепа на данном участке.

Выше было показано, что ускорение отцепа можно рассматривать как случайную величину, распределённую по нормальному закону $f(a)$ со статистическими параметрами M_a и σ_a . Закон распределения $g(V_{i+1})$ скорости V_{i+1} в конце участка ΔS можно найти, используя известную [21] зависимость:

$$g(V_{i+1}) = f(\psi(V_{i+1})) |\psi''(V_{i+1})|, \quad (2.21)$$

где $\psi(V_{i+1})$ – функция, обратная (2.20), т.е.

$$\psi(V_{i+1}) = \frac{V_{i+1}^2 - V_i^2}{2 \Delta S}. \quad (2.22)$$

Выполнив необходимые преобразования, получим:

$$g(V_{i+1}) = \frac{V_{i+1}}{\sigma_a \Delta S \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(V_{i+1}^2 - V_i^2 - 2 \Delta S M_a)^2}{8 \Delta S^2 \sigma_a^2} \right\}. \quad (2.23)$$

Если ΔS достаточно мало, то можно попытаться применить метод линеаризации для нахождения числовых характеристик закона распределения (2.23). Разложив в ряд Тейлора функцию (2.20) $V_{i+1} = \varphi(a)$ в окрестностях точки $a=M_a$ и, отбросив члены разложения второго порядка и выше, получим:

$$V_{i+1} = \varphi(M_a) + \varphi'(M_a) (a - M_a), \quad (2.24)$$

$$M[V_{i+1}] \approx \varphi(M_a) = \sqrt{V_i^2 + 2M_a \Delta S}, \quad (2.25)$$

$$\sigma[V_{i+1}] \approx |\varphi'(M_a)| \sigma_a = \frac{\sigma_a \Delta S}{\sqrt{V_i^2 + 2M_a \Delta S}} = \frac{\sigma_a \Delta S}{M[V_{i+1}]}. \quad (2.26)$$

Для оценки погрешности определим квадратичный (третий) член разложения функции (2.20) в ряд Тейлора для $M(V_{i+1})$ и $\sigma(V_{i+1})$:

$$\delta M(V_{i+1}) = \frac{1}{2} \varphi''(M_a) D_a = -\frac{\Delta S^2 D_a}{\sqrt{(V_i^2 + 2M_a \Delta S)^3}}, \quad (2.27)$$

$$\delta \sigma(V_{i+1}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \varphi''(M_a) \sigma_a^2 = \sqrt{2} \delta M(V_{i+1}). \quad (2.28)$$

Можно использовать относительную погрешность:

$$\delta M(V_{i+1})^* = \text{abs} \left(\frac{\delta M(V_{i+1})}{M(V_{i+1})} \right) = \text{abs} \left(\frac{\Delta S^2 D_a}{(V_i^2 + 2M_a \Delta S)^2} \right), \quad (2.29)$$

$$\delta \sigma(V_e)^* = \text{abs} \left(\frac{\delta \sigma(V_e)}{\sigma(V_e)} \right) = \text{abs} \left(\frac{\Delta X \sigma_a}{\sqrt{2(V_j^2 + 2m_a \Delta X)}} \right). \quad (2.30)$$

Графические зависимости абсолютной и относительной погрешности $\delta M(V_{i+1})$ математического ожидания скорости выхода от длины участка торможения ΔS при некоторых типичных значениях скорости входа на участок торможения V_i и статистических параметрах M_a и σ_a замедления отцепы приведены на рис. 2.7, 2.8. Видно, что при выбранной длине участка торможения до 2м линейаризация функции $\varphi(a)$ вносит несущественную погрешность (на уровне долей процента). Таким образом, применение метода линейаризации в данном случае вполне допустимо.

Формулу (2.23), в таком случае, можно заменить на формулу нормального закона распределения с параметрами (2.25) и (2.26).

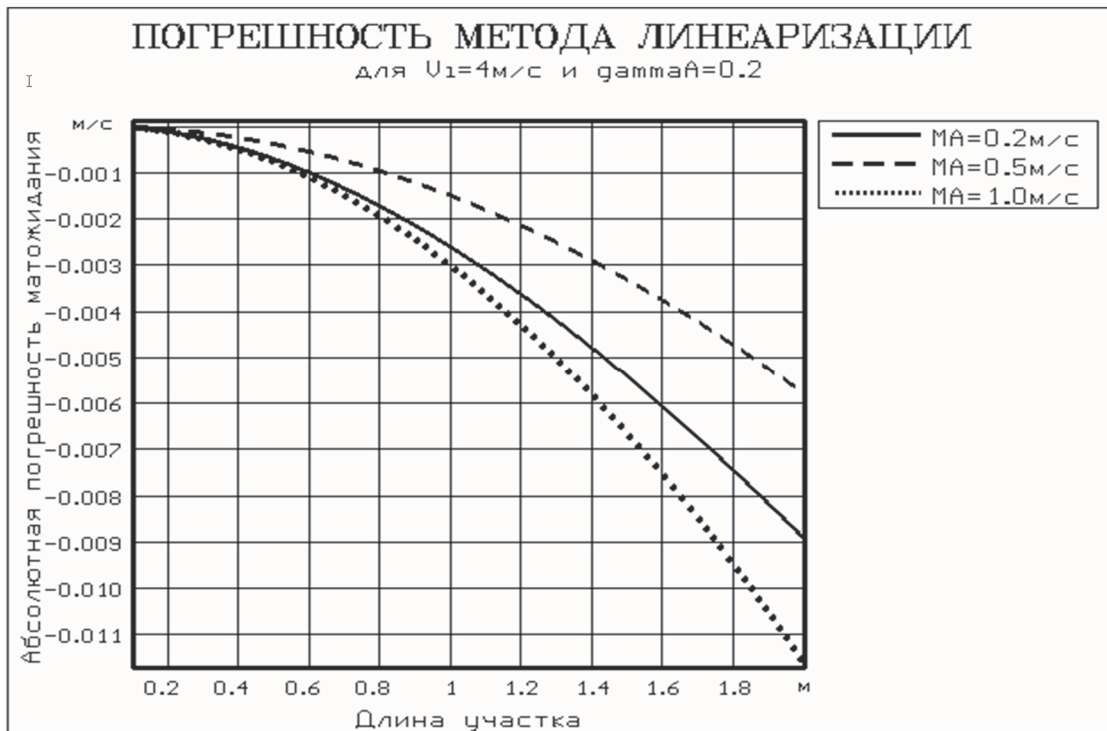


Рис. 2.7. Абсолютная погрешность метода линеаризации

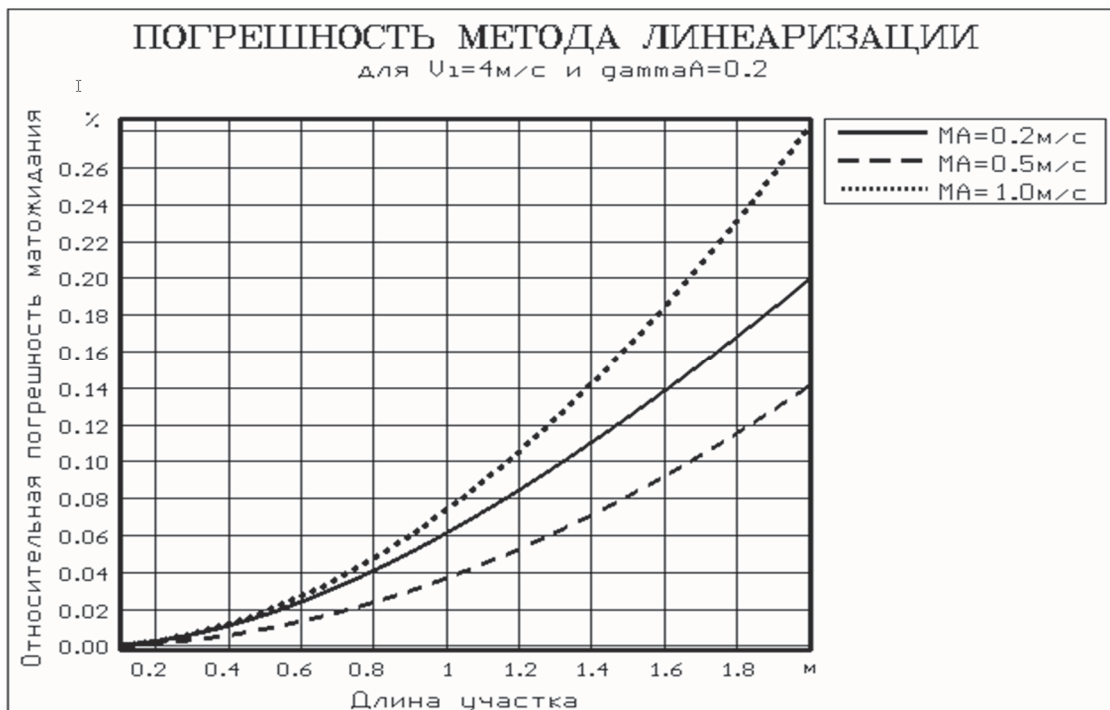


Рис. 2.8. Относительная погрешность метода линеаризации

2.4.2. Исследование динамики разомкнутой системы при изменяющейся ступени торможения

Пусть в некоторой точке (S_n, V_i, C_k) пространства состояния выбрано управление u_0 (ступень торможения уменьшилась с k на $k-1$). По окончании переходного процесса отцеп перейдёт в точку (S_e, V_e, C_{k-1}) , где V_e, S_e – случайные величины. Линеаризуя тормозную характеристику замедлителя (рис. 2.9), можно найти:

$$V_e = V_i + a_k \left(\tau_0 + \frac{\tau_{Pk}}{2} \right) + a_{k-1} \frac{\tau_{Pk}}{2}, \quad (2.31)$$

где τ_0 и τ_{Pk} – времена «чистого» запаздывания и собственно переходного процесса соответственно;

a_k и a_{k-1} – ускорения отцепа для k -й и $(k-1)$ -й ступеней торможения.

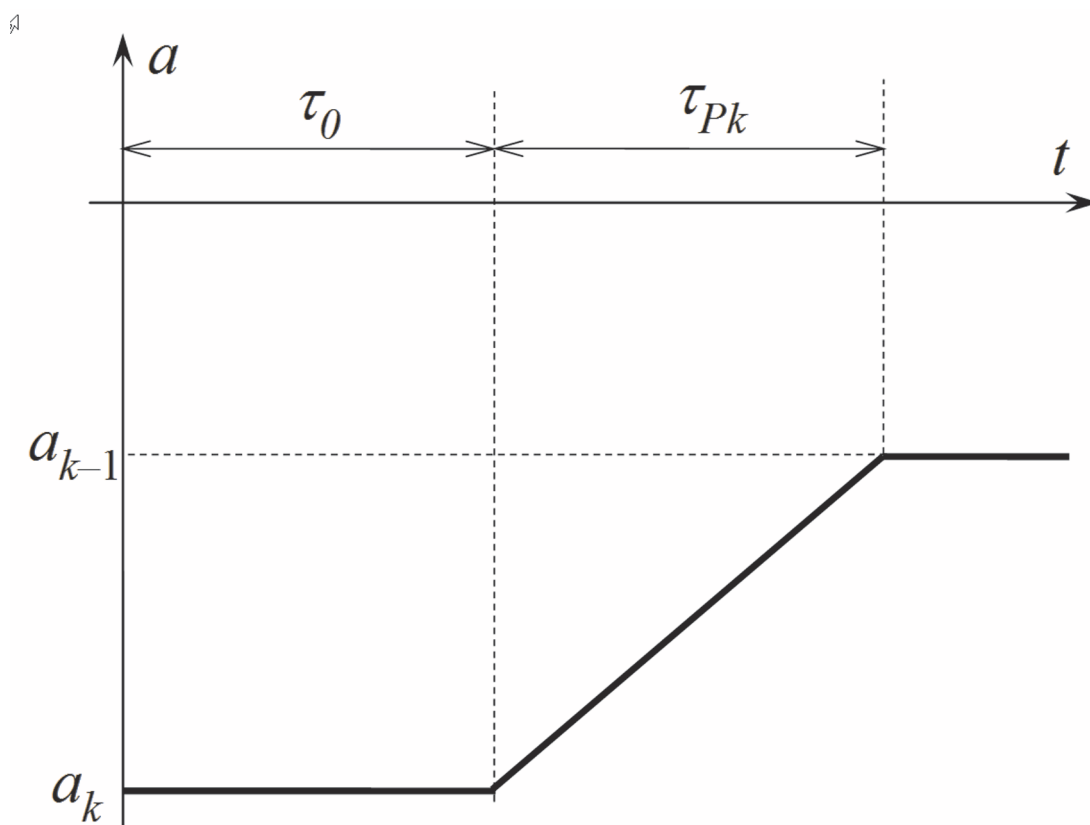


Рис. 2.9. Линеаризация тормозной характеристики замедлителя при переходном процессе

Из 2.2 следует:

$$a_k = g'[i - (W_o + W_{CB} + W_{Tk})] \cdot 10^{-3}. \quad (2.32)$$

Здесь W_{Tk} – удельное тормозное усилие замедлителя – случайная величина, определяемая формулой:

$$W_{Tk} = \frac{N}{Q_\phi} (A^* P_k^{B^*} + G^*), \quad (2.33)$$

где: N – количество тормозимых осей отцепа;

Q_ϕ – фактическая масса отцепа (т);

P_k – давление воздуха в цилиндрах замедлителя при включенной k -й ступени торможения (ати);

A^* , B^* , G^* – экспериментально найденные коэффициенты для эталонного отцепа на эталонном замедлителе [12,145].

Так как $A^* \gg G^*$, то удобно считать, что случайной величиной в правой части (2.33) является A^* . Выделяя в правой части (2.33) случайную составляющую, получим:

$$a_k = R - Z_k A^*, \quad (2.34)$$

где

$$R = g'[I - (W_o + W_{CB} + \frac{N}{Q_\phi} G^*)] \cdot 10^{-3}, \quad (2.35)$$

$$Z_k = g' \frac{N}{Q_\phi} P_k^{B^*} \cdot 10^{-3}. \quad (2.36)$$

Подставив (2.34) в (2.21) и выполнив необходимые преобразования, получим:

$$V_e = r_0 - r_1 A^*, \quad (2.37)$$

где:

$$r_0 = V_0 + R(\tau_0 + \tau_{Pk}), \quad (2.38)$$

$$r_1 = Z_k \left(\tau_0 + \frac{\tau_{Pk}}{2} \right) + Z_{k-1} \frac{\tau_{Pk}}{2}. \quad (2.39)$$

Используя метод припасовывания, можно найти координату S_e по формуле:

$$S_e = S_0 + S_0 \cdot (\tau_0 + \tau_{Pk}) + \left[\frac{a_k}{2} (\tau_0 + \tau_{Pk})^2 - \frac{a_k - a_{k-1}}{6} \tau_{Pk}^2 \right]. \quad (2.40)$$

Учитывая (2.32), (2.33) и, выделяя случайную составляющую A^* , получим:

$$S_e = r_2 - r_3 A^*, \quad (2.41)$$

где:

$$r_2 = S_0 + V_0 (\tau_0 + \tau_{Pk}) + \frac{1}{2} R (\tau_0 + \tau_{Pk})^2 \quad (2.42)$$

$$r_3 = \frac{1}{2} Z_k (\tau_0 + \tau_{Pk})^2 + \frac{1}{6} (Z_k - Z_{k-1}) \tau_{Pk}^2. \quad (2.43)$$

Так как функции (2.37) и (2.41) линейны относительно нормально распределённой случайной величины A^* , то функции распределения V_e и S_e подчинены нормальному закону с параметрами

$$M[V_e] = -r_1 M_A + r_2, \quad (2.44)$$

$$\sigma[V_e] = |r_1| \sigma_A, \quad (2.45)$$

$$M[S_e] = -r_3 M_A + r_2, \quad (2.46)$$

$$\sigma[S_e] = |r_3| \sigma_A. \quad (2.47)$$

При переходе на более высокую степень торможения формулы для нахождения V_e , S_e и их статистических параметров аналогичны формулам (2.31), (2.40)...(2.47). Лишь переменные r_1 , r_2 , r_3 , r_4 в этих формулах следует заменить на r_1^* , r_2^* , r_3^* , r_4^* соответственно. Здесь

$$r_0^* = V_0 + R(\tau_Z + \tau_{Tk}), \quad (2.48)$$

$$r_1^* = Z_k(\tau_Z + \frac{\tau_{Tk}}{2}) + Z_{k-1} \frac{\tau_{Tk}}{2}, \quad (2.49)$$

$$r_2^* = X_0 + V_0 \cdot (\tau_Z + \tau_{Tk}) + \frac{1}{2} R \cdot (\tau_Z + \tau_{Tk})^2, \quad (2.50)$$

$$r_3^* = \frac{1}{2} Z_k (\tau_Z + \tau_{Tk})^2 + \frac{1}{6} (Z_k - Z_{k+1}) \tau_{Tk}^2. \quad (2.51)$$

2.5. Стохастическая имитационная модель ЦУС замедлителями ТП

2.5.1. Принципы построения стохастической имитационной модели

Для проверки эффективности различных алгоритмов работы регулятора была разработана имитационная модель работы регулятора замедлителей ТП. В имитационной модели использовались принципы организации структуры регулятора и математическая модель процесса торможения отцепа в замедлителях тормозной позиции, изложенные в разделах 2.1 и 2.2. Обычно при моделировании дифферен-

циальное уравнение движения отцепа (2.1) заменяют разностным рекуррентным уравнением:

$$V[n] = f(V[n-1], \sum_k F_k[n-1]). \quad (2.52)$$

При этом процесс движения отцепа рассматривают как дискретный (n в (2.52) – номер дискреты), состоящий либо из множества элементарных перемещений ΔS (см., например, [75,78,79]), либо из множества элементарных отрезков времени Δt (см., например, [10]). Внутри каждой дискреты сумма сил, действующих на отцеп, представляется постоянной.

В разработанной имитационной модели используется временной принцип моделирования – процесс движения отцепа рассматривается как процесс, состоящий из множества временных дискрет. В процессе моделирования принимаются следующие допущения:

- тормозная характеристика замедлителя случайная величина, распределенная по нормальному закону;
- в пределах одной реализации тормозная характеристика неслучайна;
- в течение дискреты времени моделирования Δt число тормозимых осей постоянно;
- для управления замедлителем используют измеренные значения параметров отцепа (ходовое сопротивление, скорость и т.д.);
- ошибка измерения распределена по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием.

Общая схема моделирования приведена на рис. 2.10.

В качестве исходных данных (блок 2) используются:

- тип и количество замедлителей тормозной позиции (предполагается, что статические параметры замедлителей однозначно определяются их типом);
- тип, масса и количество вагонов в тормозимом отцепе;
- статистические параметры скорости входа отцепа в тормозную позицию;
- заданная скорость выхода отцепа из тормозной позиции;
- статистические характеристики ошибки измерителя скорости;
- используемый алгоритм управления;

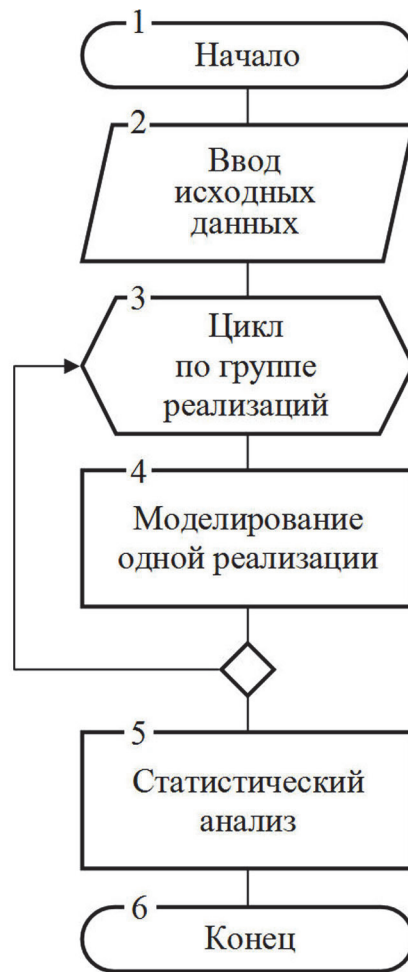


Рис. 2.10. Схема алгоритма моделирования торможения группы отцепов в тормозной позиции

– требуемое количество реализаций.

После цикла по всем реализациям (блоки 3...4) производится статистический анализ результатов моделирования (подробности статистического анализа будут приведены ниже).

Каждая реализация моделирования (рис. 2.11) включает в себя следующие этапы.

Вначале (блок 2) с помощью датчика псевдослучайных чисел разыгрываются конкретные значения случайных величин, которые они принимают в данной реализации – тормозной характеристики замедлителя и скорости входа отцепа в тормозную позицию. Задаются (блок 3) начальные значения координат пространства состояний – пути ($S=0$) и ступени торможения (определяется весовой категорией отцепа), а также времени ($t=0$).

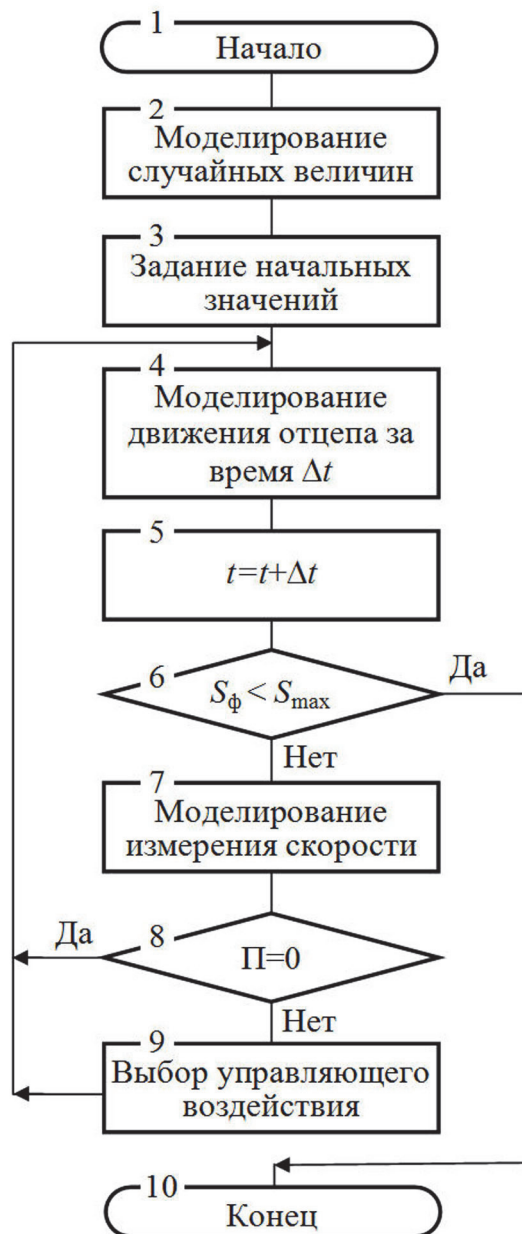


Рис. 2.11. Схема алгоритма моделирования одной реализации

В блоках 4...9 производится пошаговое моделирование процесса торможения отцепа в замедлителях тормозной позиции до момента выхода его за пределы зоны торможения (это проверяется в блоке 6).

В пределах каждого шага моделируется перемещение отцепа в пространстве состояний за время Δt (математическое описание этого процесса приведено в 2.4.2). Результат этого моделирования – значения фактических координат скорости (V_ϕ), пути (S_ϕ) и давления (P_ϕ) в конце данного шага моделирования.

Если координата пути не превысила максимально возможную (по условию выхода отцепа из зоны торможения), то производится моделирование (розыгрыш с помощью датчика псевдослучайных чисел) процесса идентификации координат отцепа ($V_{изм}$ и $S_{изм}$). Выбор управляющего воздействия (блок 9) производится лишь в том случае, если в замедлителях ТП завершён переходный процесс (признак переходного процесса Π равен нулю). При этом процесс выбора управляющего воздействия определяется заданным типом алгоритма управления (задается перед началом моделирования).

Результатом каждой реализации является фактическая скорость выхода отцепа из тормозной позиции, ошибка регулирования, а также время регулирования. Все эти результаты запоминаются, чтобы по окончании моделирования всех реализаций произвести их статистическую обработку.

2.5.2. Математическое описание процесса моделирования движения отцепа за квант времени

Выбор управляющего воздействия производится в начале каждого кванта времени. Однако время запаздывания и длительность переходного процесса при изменении ступени торможения могут не соответствовать целому числу периодов квантования, что усложняет расчет процесса движения отцепа. При этом возможны несколько вариантов выбора периодов квантования.

А. Переменная величина Δt (рис. 2.12).

На участках без переходного процесса величина Δt постоянна и равна Δt_0 . На участках с переходным процессом $\Delta t = \text{var}$ с длительностью, соответствующей фазам переходного процесса: $\Delta t_1 = \tau_0$; $\Delta t_2 = \tau_{ij}$, где τ_0 – время запаздывания; τ_{ij} – время перехода с i -й на j -ю ступень торможения.

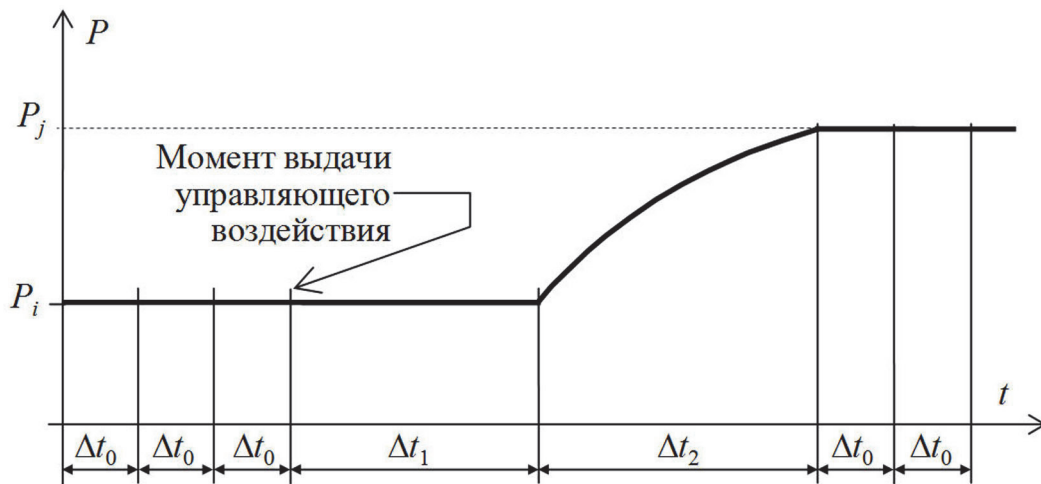


Рис. 2.12. Выбора шага квантования. Вариант А

Б. Переменная величина Δt с ограничением (рис. 2.13).

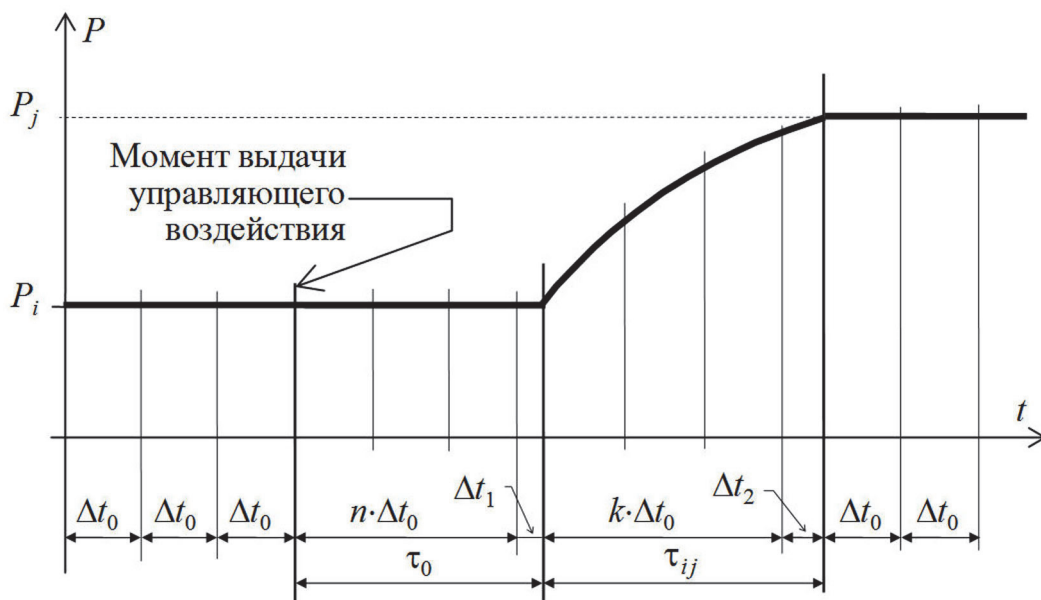


Рис. 2.13. Выбора шага квантования. Вариант Б

Здесь вводится ограничение: $\Delta t \leq \Delta t_0$. При этом на участке запаздывания τ_0 n временных квантов $\Delta t = \Delta t_0$ и один временной квант $\Delta t = \tau_0 - n \cdot \Delta t_0$, а на участке собственно переходного процесса τ_{ij} размещается k временных квантов $\Delta t = \Delta t_0$ и один временной квант $\Delta t = \tau_{ij} - k \cdot \Delta t_0$.

В. Постоянный шаг квантования (рис.2.14).

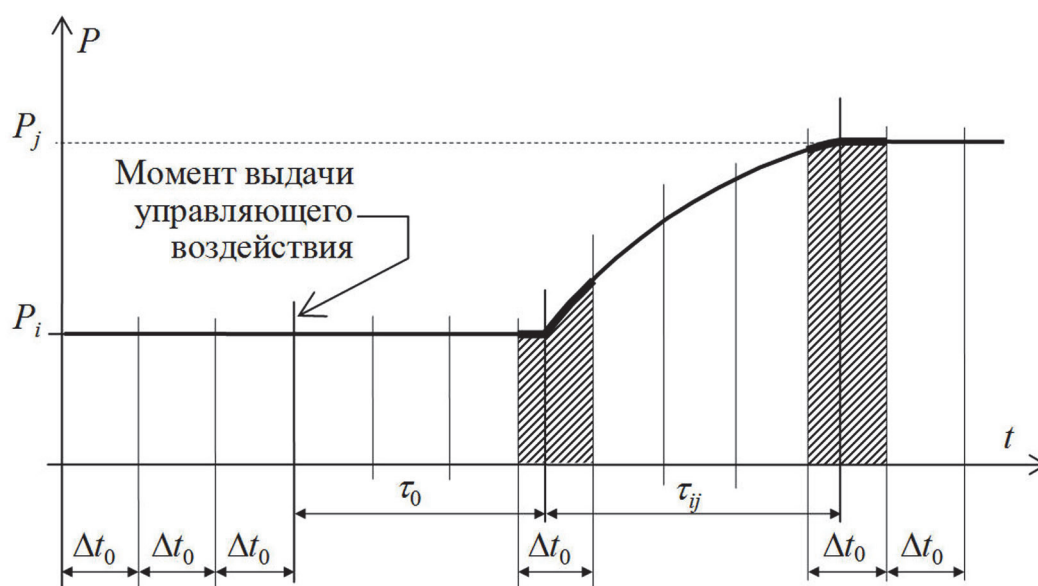


Рис. 2.14. Выбора шага квантования. Вариант В

Внутри некоторых шагов квантования может происходить смена фаз переходного процесса. Эти разрывы усложняют расчеты движения внутри данных шагов.

Для оценки варианта выбора шага квантования произведен сравнительный анализ этих вариантов (табл. 2.1). Анализ показывает, что наиболее качественное моделирование движения оцепа в ТП при различных режимах работы замедлителей ТП может быть произведено при постоянном шаге квантования по времени. Этот вариант, однако, требует более сложных вычислительных процедур, по сравнению с другими вариантами выбора шага квантования.

Рассмотрим движение отцепа на участке переходного процесса. Как уже было сказано выше, в течение переходного процесса давление в цилиндрах замедлителя изменяется от P_i к P_j за некоторый отрезок времени T_{ij} . Закон изменения давления описывается зависимостями (2.14, 2.15). Изменение давления предопределяет изменение ускорения отцепа, зависимость которого от давления определена в (2.9).

Сравнительный анализ вариантов принципа выбора шага квантования времени при моделировании процесса торможения отцепа в ТП

Вариант	Достоинства	Недостатки
А. Переменная величина шага квантования Δt	Внутри шага Δt закон изменения ускорения постоянен, что упрощает расчеты. Величина Δt может принимать ограниченное количество значений.	Отдельные значения Δt достаточно велики (более чем полсекунды). За это время отцеп проходит достаточно большое расстояние в зоне торможения (несколько метров) и предположение о постоянном количестве тормозимых осей в пределах шага квантования может внести существенную погрешность в расчеты
Б. Переменная величина шага квантования Δt с ограничением.	Внутри шага Δt закон изменения ускорения постоянен, что упрощает расчеты. Величину Δt можно выбрать достаточно малую, чтобы предположение о постоянном количестве тормозимых осей внутри шага квантования не вносило существенной погрешности.	Вносит серьезные ограничения на синхронизацию работы нескольких замедлителей тормозной позиции (в общем случае на отдельные замедлители ТП могут подаваться разные команды управления, что приводит к рассинхронизации переходных процессов).
В. Постоянный шаг квантования Δt	Величину Δt можно выбрать достаточно малую, чтобы предположение о постоянном количестве тормозимых осей внутри шага квантования не вносило бы существенной погрешности. Обеспечивается синхронизация моделирования работы нескольких замедлителей ТП даже при подаче на них разных сигналов управления.	Внутри шага Δt может наблюдаться «перелом» тормозной характеристики замедлителя, что усложняет расчеты движения отцепа внутри этого шага (если, конечно, не использовать существенных упрощений).

Если полагать, что степень торможения изменяется на ± 1 (т.е. изменение давления незначительно), то можно без внесения существенной погрешности¹ линеаризовать зависимость ускорения a от времени:

$$a(t) = a_i + \frac{a_j - a_i}{T_{ij}} \cdot t. \quad (2.53)$$

С учетом такой линеаризации найдем зависимости, определяющие изменения координат отцепа за квант времени Δt при различных вариантах начала и завершения переходного процесса в пределах этого кванта.

Вариант 1. Фаза перехода от постоянного к изменяющемуся тормозному усилию (рис. 2.15).

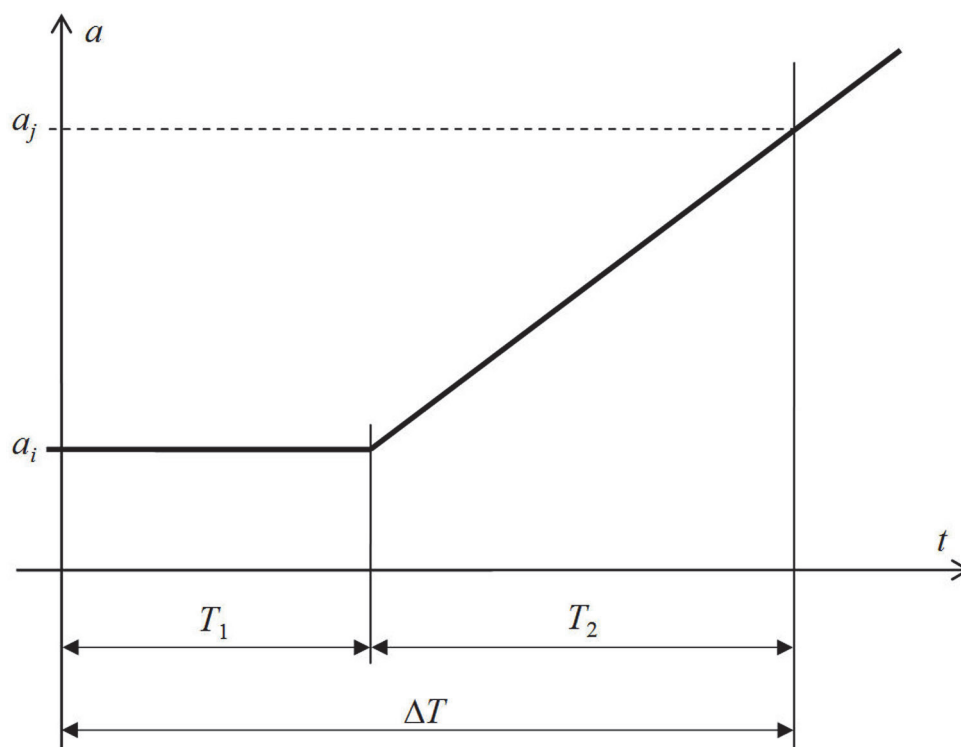


Рис. 2.15. Фазы переходного процесса внутри кванта Δt . Вариант 1

¹ Исследования показывают, что вносимая при этом погрешность в определении изменения координат отцепа за квант времени Δt не превышает одного процента

Используя метод припасовывания, найдем изменение ΔV скорости за время Δt :

$$\Delta V = a_i T_1 + \int_0^{T_2} a(t) dt. \quad (2.54)$$

Подставляя (2.53) в (2.54) легко можно найти

$$\Delta V = \frac{1}{2} [a_i (1 + \rho_1) + a_j (1 - \rho_1)] \cdot \Delta t, \quad (2.55)$$

где

$$\rho_1 = \frac{T_1}{\Delta t}. \quad (2.56)$$

Определим

$$\Delta V = a_{v1} \Delta t, \quad (2.57)$$

где

$$a_{v1} = \frac{a_i (1 + \rho_1) + a_j (1 - \rho_1)}{2}. \quad (2.58)$$

Изменение пути ΔS за это же время можно найти, проинтегрировав (2.54):

$$\Delta S = V_0 T_2 - a_i \left(T_1 + \frac{T_2^2}{3} \right) - a_j \frac{T_2^2}{6}. \quad (2.59)$$

Выполнив необходимые преобразования, получим:

$$\Delta S = V_0 \Delta t - \frac{a_{s1} \Delta T_2^2}{2}, \quad (2.60)$$

где

$$a_{s1} = a_i + \frac{1}{3}(a_j - a_i)(1 - \rho_1)^2. \quad (2.61)$$

Вариант 2. Фаза перехода от изменяющегося к постоянному тормозному усилию (рис. 2.16).

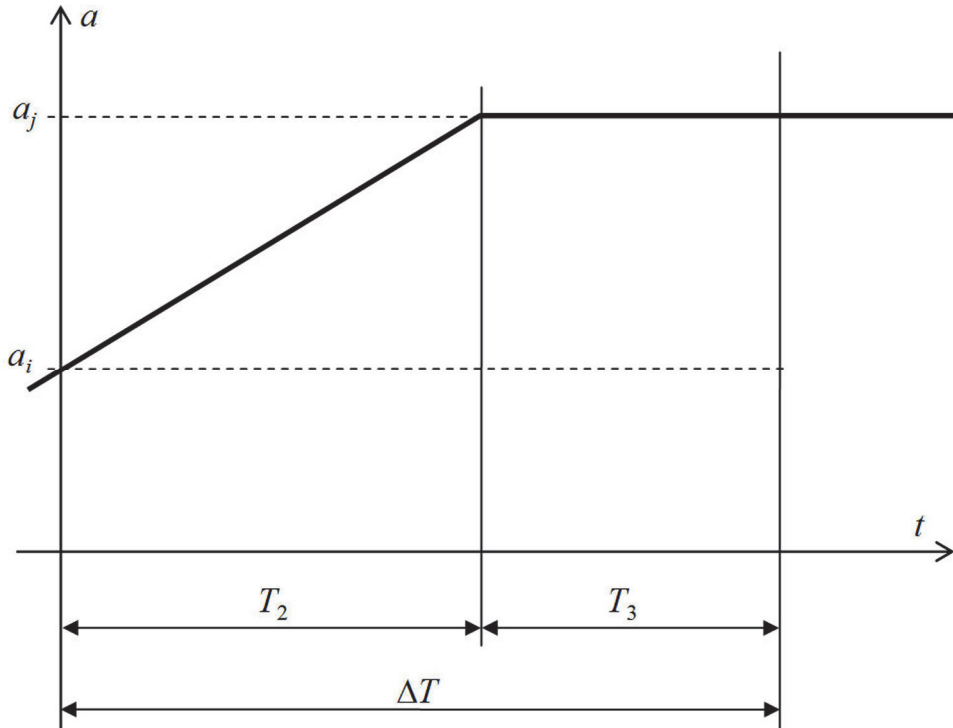


Рис. 2.16. Фаз переходного процесса внутри кванта Δt . Вариант 2

Для случая перехода от изменяющегося тормозного усилия к постоянному внутри кванта Δt можно, аналогично (2.54)...(2.60), получить зависимости:

$$\Delta V = a_{v2} \cdot \Delta t, \quad (2.62)$$

$$\Delta S = V_0 \Delta t - \frac{a_{s2} \Delta T_2^2}{2}, \quad (2.63)$$

где

$$a_{v2} = \frac{a_i(1-\rho_3) + a_j(1+\rho_3)}{2}, \quad (2.64)$$

$$a_{s2} = a_i + \frac{1}{3}(a_j - a_i)(1 + \rho_3 + \rho_3^2), \quad (2.65)$$

$$\rho_3 = \frac{T_3}{\Delta t}. \quad (2.66)$$

Вариант 3. Начало и конец переходного процесса внутри кванта Δt (рис.2.17).

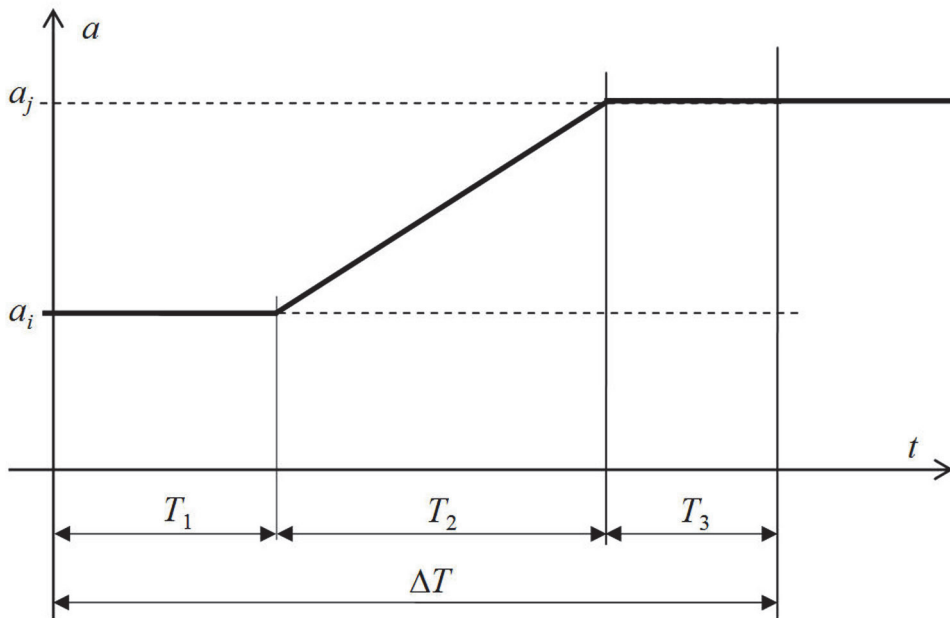


Рис. 2.17. Фаз переходного процесса внутри кванта Δt . Вариант 3

Аналогично вариантам 1 и 2 находим:

$$\Delta V = a_{v3} \cdot \Delta t, \quad (2.67)$$

$$\Delta S = V_0 \Delta t - \frac{a_{s3} \Delta T^2}{2}, \quad (2.68)$$

где

$$a_{v3} = \frac{a_i [1 + (\rho_1 - \rho_3)] + a_j [1 - (\rho_1 - \rho_3)]}{2}, \quad (2.69)$$

$$a_{s3} = a_i + \frac{1}{3}(a_j - a_i)[(1 - \rho_1)(1 - \rho_1 + \rho_3) + \rho_3^2], \quad (2.70)$$

Видно, что формулы (2.58), (2.61) и (2.64), (2.65) являются частными случаями формул (2.68), (2.70). Таким образом, вариант 3 фаз переходного процесса является наиболее общим, охватывающим варианты 1 и 2.

Очевидно, что при отсутствии переходного процесса в пределах кванта Δt движение отцепы описывается зависимостями (2.67)...(2.70) при значении $\rho_1 = \rho_3 = 0$.

2.5.3. Программная реализация имитационной модели

Программно имитационная модель была реализована на языке Паскаль с использованием объектно-ориентированной технологии. Отдельными объектами были описаны: вагон, отцеп, замедлитель, тормозная позиция, регулятор тормозной позиции, измеритель скорости. Использование принципов объектно-ориентированного программирования позволили, во-первых, четко отделить процесс моделирования движения отцепы от моделирования работы регулятора (последний был реализован в виде отдельного объекта, внутри которого сосредоточены в виде методов алгоритмы управления замедлителем) и, во-вторых, достаточно легко производить замену типов отцепов, структуры регулятора и алгоритмов его работы.

Средства машинной графики, используемые в модели, позволяют отслеживать на экране в реальном масштабе времени траекторию движения отцепы в замедлителе – $V(S)$ (рис. 2.18), наблюдая при этом изменения тормозной характеристики замедлителя и моменты выдачи управляющих воздействий (выбранной степени торможения).

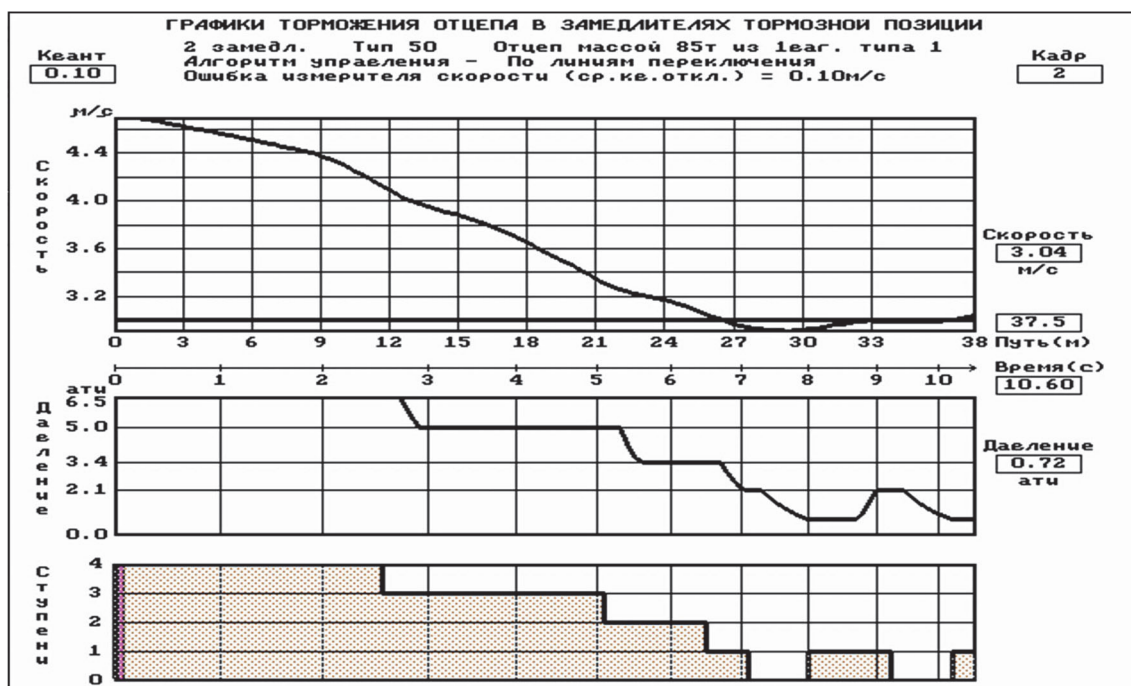


Рис. 2.18. Графическая интерпретация одной реализации торможения отцепа в тормозной позиции на имитационной модели

2.5.4. Статистический анализ результатов моделирования

В результате моделирования заданного количества реализаций K формируется массив результатов – ошибки регулятора (отклонения фактической скорости выхода отцепа из тормозной позиции от заданной). Эти данные подвергаются стандартной статистической обработке: вычисляются оценки математического ожидания и среднего квадратического отклонения, вычисляются другие параметры закона распределения – коэффициент асимметрии, эксцесс. Полученные характеристики позволяют идентифицировать закон распределения полученных величин. В частности, используя критерий χ^2 [21,102] проверялась гипотеза о том, что ошибки регулирования распределены по нормальному закону.

Средствами машинной графики представляются статистические характеристики итогов моделирования: гистограммы, законы распределения целевых параметров (рис. 2.19).

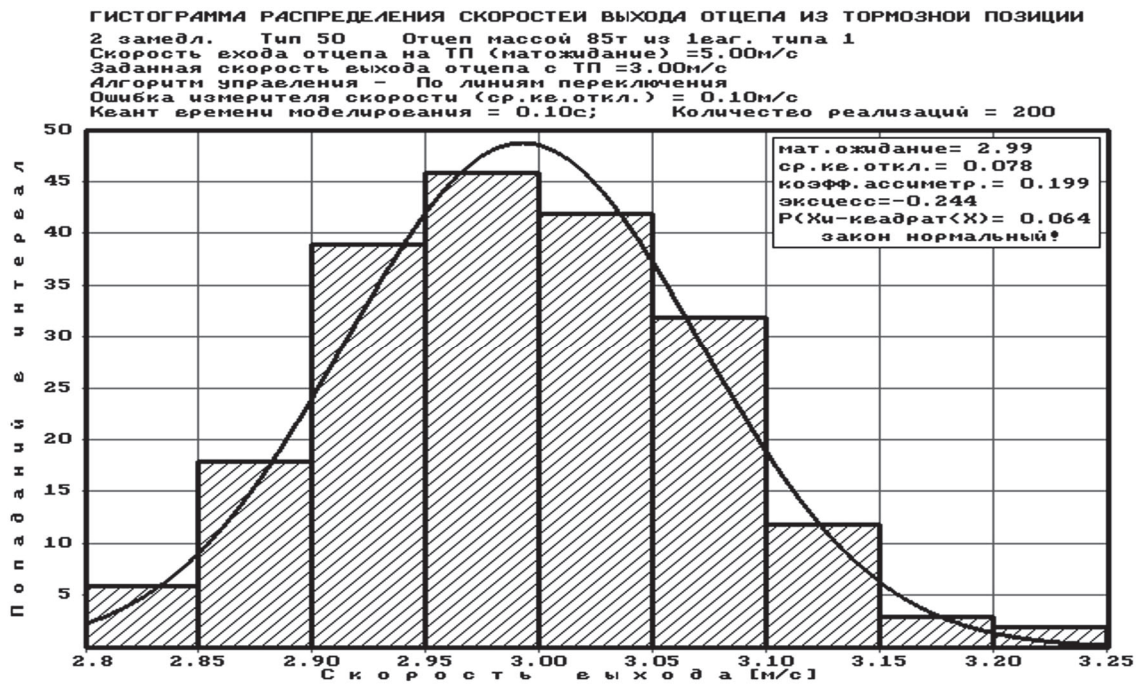


Рис. 2.19. Пример вывода статистических характеристик итогов моделирования

Алгоритмические основы построения ЦУС замедлителями тормозных позиций

3.1. Эвристические алгоритмы управления цифровым регулятором тормозной позиции

3.1.1. Требования к алгоритмам управления замедлителями тормозных позиций

Как уже было показано выше, система управления замедлителями ТП является существенно нелинейной и стохастичной, что делает задачу обеспечения заданных показателей качества весьма сложной. В современных отечественных системах АРС эта задача не решена. Одна из причин этого состоит в упрощенных алгоритмах управления замедлителями. Применение ЭВМ в контуре управления позволяет значительно усовершенствовать эти алгоритмы и повысить качество работы системы управления.

Важнейшим показателем, определяющим качество работы данной системы, является её точность. Так как эта система стохастическая, то под точностью понимают величину среднего квадратичного отклонения σ_V фактической ($V_{\text{ф}}$) скорости выхода отцепа с тормозной позиции от её заданного ($V_{\text{зад}}$) значения. Это значение регламентировано в документах [116], определяющих требования к подобным системам.

В зависимости от ситуации на спускной части горки, кроме требования к ограничению ошибки регулирования (ошибки реализации

скорости выхода отцепа из ТП), могут возникнуть дополнительные требования ко времени занятия отцепом интервальной ТП. Так, при малом интервале между смежными отцепами первый отцеп в паре целесообразно выпустить из замедлителя как можно быстрее (но со скоростью, не превышающей, по крайней мере, ту, которая обеспечит не превышение допустимой скорости входа этого отцепа на замедлитель следующей ТП). Следующий отцеп пары следует задержать в замедлителе как можно дольше, чтобы обеспечить необходимый интервал между ним и предыдущим отцепом, но, вместе с тем, выпустить его с достаточно высокой скоростью, чтобы облегчить условия торможения следующему за ним отцепу.

К системе управления замедлителями ТП могут предъявляться и другие требования, связанные, например, с уменьшением расхода электроэнергии и сжатого воздуха путём уменьшения количества переключений замедлителей в процессе торможения.

Эвристические алгоритмы учитывают, как правило, лишь один из вышеназванных критериев.

3.1.2. Алгоритм ведения отцепа по рациональной траектории

Данный алгоритм предусматривает регулирование величины тормозного усилия с целью обеспечения рациональной траектории $V(S)$ движения отцепа в ТП и растормаживание замедлителя при минимальном тормозном усилии в зоне, где замедление, зависящее от числа тормозимых осей, имеет постоянную величину. При этом, вся зона торможения (рис. 3.0) разбивается на два участка. Первый – участок управления траекторией движения, второй – участок растормаживания. Задача управления на первом участке – при минимально необходимом тормозном усилии замедлителей обеспечить выход отцепа на участок растормаживания со скоростью $V=V_{\text{зад}}+\Delta V$. Задача управления на участке растормаживания – обеспечить после растормаживания выход отцепа из замедлителя со скоростью $V=V_{\text{зад}}+\Delta V_{\varepsilon}$, причем $|\Delta V_{\varepsilon}|<\varepsilon$, где ε – допустимая ошибка регулирования.

При описании алгоритма управления будем использовать следующие обозначения: C_0 – нулевая ступень торможения (растормуженное состояние замедлителя); C_1 – минимальная по условиям вы-

тормаживания отцепа данной массы ступень торможения; C_2 – максимально допустимая по условию отсутствия выжимания колес отцепа ступень торможения. Как было сказано выше, траектория движения отцепа на первом участке торможения должна стремиться к траектории движения отцепа к заданной точке при минимально необходимой ступени торможения. Однако, вследствие недетерминированности тормозной характеристики замедлителя и случайных ошибок измерения, движение по заданной траектории связано с многократными переключениями ступеней торможения замедлителя. Чтобы избежать этого, целесообразно рассматривать не заданную траекторию, а заданный «коридор» (рис.3.0). Управлять (выбирать ступени торможения) следует так, чтобы после окончания перехода с C_2 -й на C_1 -ю ступень торможения «попадать» в середину «коридора». Обратим внимание на то, что траектория границ «коридора» зависит от интенсивности торможения (которая косвенно определяется включенной ступенью торможения).

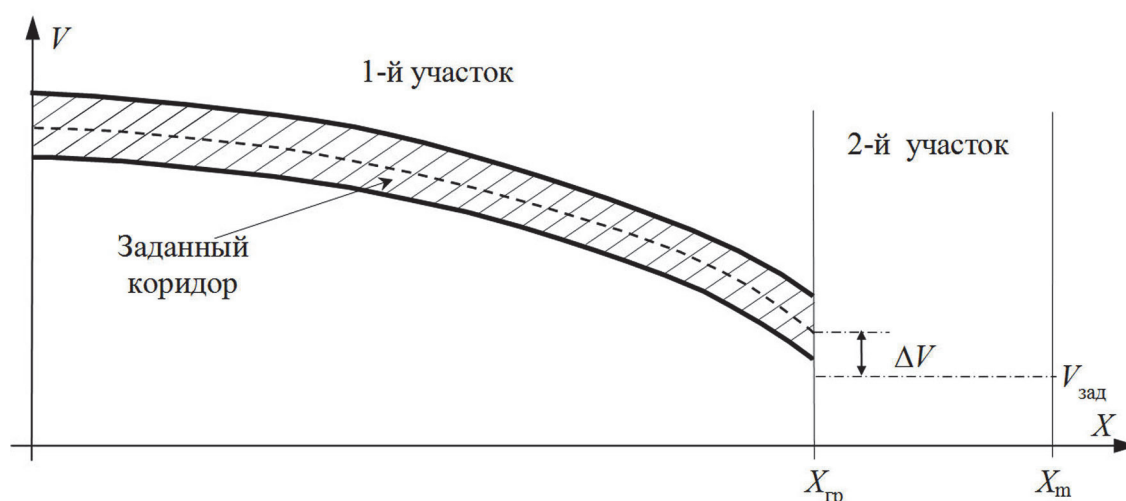


Рис. 3.1. Ведение отцепа по рациональному «коридору»

Пусть известна траектория $V_{C1}(X)$ движения отцепа, проходящая через середину «коридора» — это может быть траектория движения отцепа при включённой C_1 -й ступени торможения замедлителя, заканчивающаяся в точке $(X_{гр}, V_{зад} + \Delta V)$.

Для того, чтобы попасть на эту траекторию после переключения с C_2 -й на C_1 -ю ступень торможения, необходимо осуществить это торможение в точке $V_{C2C1}(X^*)$ (рис.3.0). Видно, что:

$$V_{C_2C_1}(X^*) = V_{C_1}(X^* + \Delta S_{C_1C_2}) + \Delta V_{C_1C_2}. \quad (3.1)$$

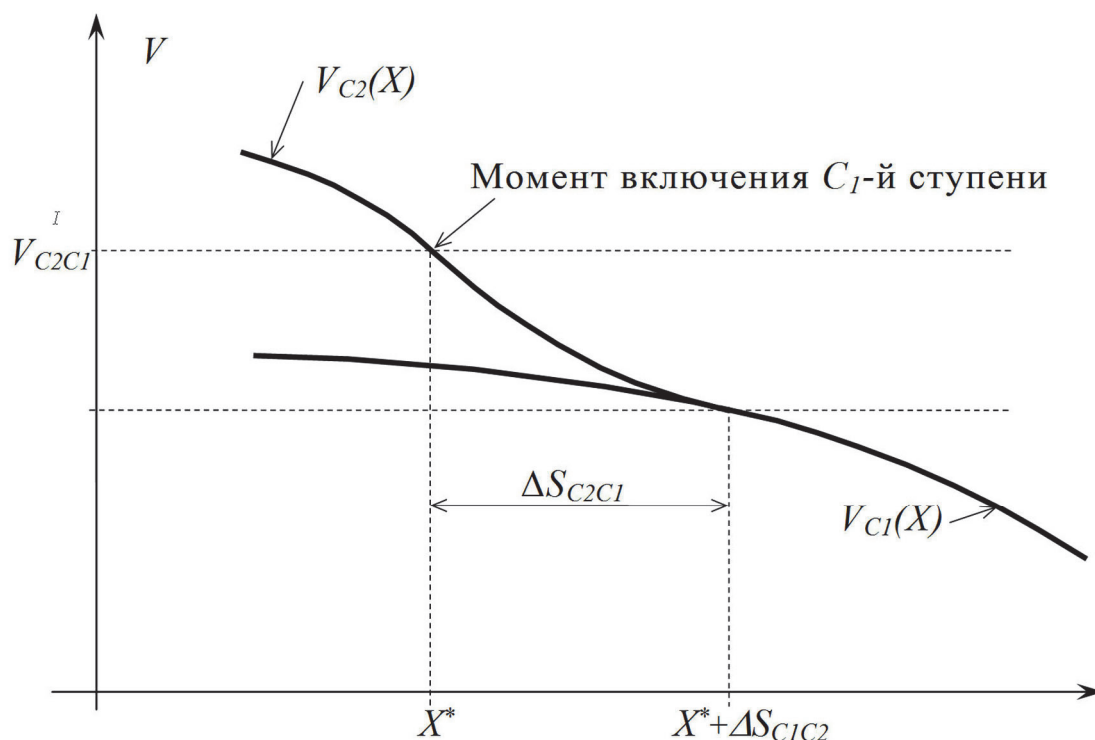


Рис. 3.2. Выбор момента включения C_1 -й ступени торможения

Аналогично, при переходе с C_2 -й на C_1 -ю ступень торможения:

$$V_{C_0C_1}(X^*) = V_{C_1}(X^* + \Delta S_{C_1C_2}) + \Delta V_{C_1C_2}. \quad (3.1)$$

Зависимости $V_{C_2C_1}(X)$ и $V_{C_0C_1}(X)$ для $0 < X < X_{гр}$ могут быть приняты за верхнюю и нижнюю границы «коридора» для C_2 -й и C_1 -й ступеней торможения соответственно.

3.1.3. Обеспечение максимального времени торможения

Здесь очевидна необходимость скорейшего достижения скорости $V_{зад}$ путем использования максимально допустимой ступени торможения C_2 замедлителя. Однако чтобы избежать автоколебаний целесообразно стремиться не к скорости $V_{зад}$, а к траектории $V_{C_0}(X)$, заканчивающуюся в точке $V_{зад}$ (рис. 3.3). Для уменьшения ошибки регулирования необходимо в точке $V_{C_2C_1}(X_2)$ переключить замедлитель

на ступень торможения C_1 ($C_1 < C_2$). Для вывода к траектории $V_{C_0}(X)$ на точку $V_{C_0}(X_1)$ необходимо растормозить замедлитель в точке $V_{C_1C_0}(X_1)$.

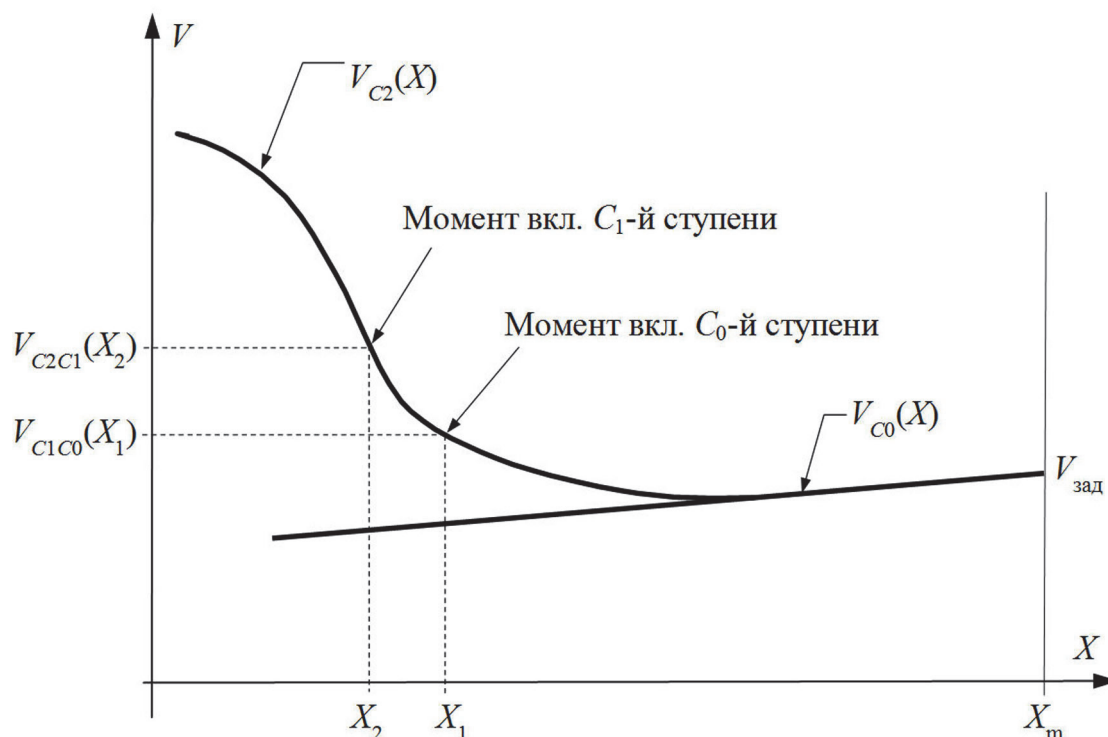


Рис. 3.3. Моменты переключения замедлителя, обеспечивающие максимальное время торможения.

Аналогично (3.2):

$$V_{C_1C_0}(X_1) = V_{C_0}(X_1 + \Delta S_{C_1C_0}) + \Delta V_{C_1C_0}. \quad (3.2)$$

Величину $V_{C_2C_1}(X_2)$ целесообразно выбрать по формуле:

$$V_{C_2C_1}(X_2) = V_{C_1C_0}(X_2 + \Delta S_{C_2C_1}) + \Delta V_{C_2C_1} + \Delta V^*, \quad (3.3)$$

где ΔV^* выбирается в результате натурального или машинного эксперимента.

3.1.4. Обеспечение минимального времени торможения

Здесь возможно использование метода «торможение в последний момент» для вывода траектории на участок растормаживания. Момент включения замедлителя для перехода на траекторию $V_{C2}(X)$ выбирается из условия:

$$V_{C0C2}(X_1) = V_{C2}(X_1 + \Delta S_{C0C1}) + \Delta V_{C0C1}. \quad (3.4)$$

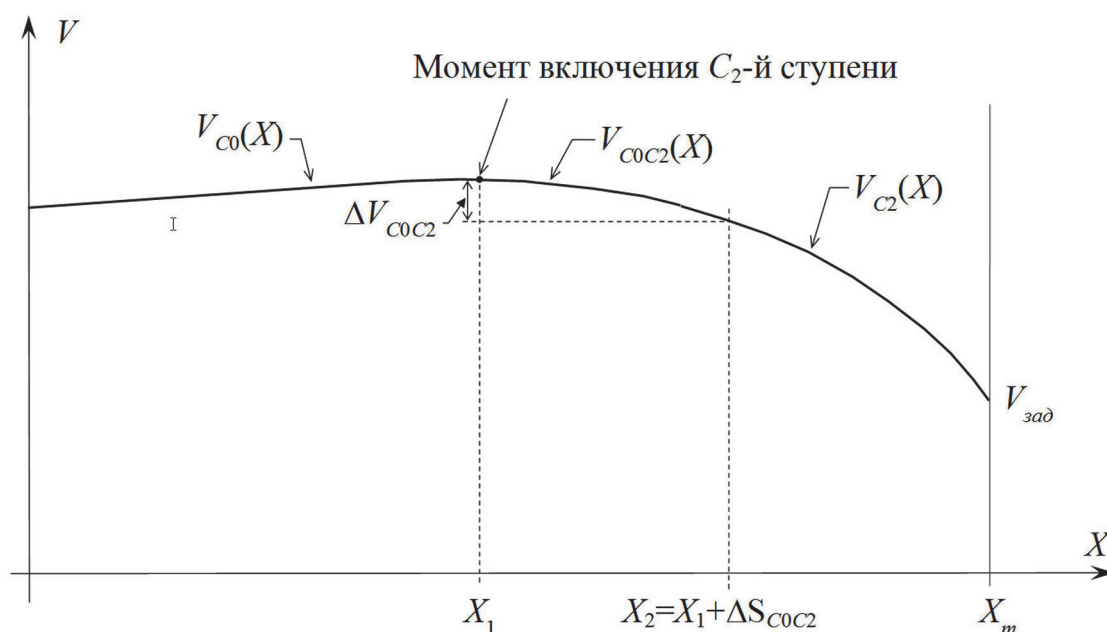


Рис. 3.4. Моменты переключения замедлителя, обеспечивающие минимальное время торможения

Так как после включения ступени C_2 корректировка траектории движения отцепа возможна только односторонняя (переход на более низкую ступень), то при ошибке прогнозирования интенсивности торможения на C_2 -й ступени возможно недотормаживание, которое уже нельзя скорректировать. Для повышения точности прогноза траектории целесообразно использовать элементы дуального управления. Для этого при входе первой тележки отцепа в заторможенный замедлитель необходимо измерить за ограниченный отрезок времени $\Delta t_{и}$ интенсивность торможения отцепа и только потом, если позволяет запас мощности замедлителей тормозной позиции, растормозить

их. Кроме того, при прогнозировании интенсивности торможения на C_2 -й ступени следует сделать поправку на возможную неточность прогноза.

Результаты моделирования на имитационной модели процесса торможения отцепов в ТП показали, что точность работы системы при таком конструировании алгоритмов не всегда отвечает заданным требованиям. Таким образом, очевидной становится задача использования методов оптимизации для выбора параметров настройки регулятора тормозной позиции.

3.2. Применение метода динамического программирования для расчета оптимальной настройки регулятора

3.2.1. Постановка задачи оптимального управления скоростью движения отцепа в тормозной позиции

Общий вид уравнения движения системы с учетом квантования по времени можно записать, заменив в уравнении (2.2) производную обратной разностью:

$$V[n] = V[n-1] + F(V[n-1], P[n-1], S[n-1]A, u[n-1]), \quad (3.6)$$

где A – случайный коэффициент, определяющий связь между давлением P и тормозной характеристикой замедлителя.

Для идентификации тормозной характеристики замедлителя и величины A требуются довольно сложные алгоритмы идентификации, обсуждаемые в главе 4. На первом этапе оптимизации мы не будем считать наблюдаемой величину A и поведение системы будем рассматривать в пространстве состояний с координатами (V, P, S) .

Движения отцепа на участке торможения будем рассматривать в ограниченном пространстве состояния $\Omega_{\text{доп}}$:

$$\begin{cases} 0 \leq V \leq V_{\max}, & (3.7) \\ 0 \leq S \leq L_T, & (3.8) \\ 0 \leq P \leq P_{\max}, & (3.9) \end{cases}$$

где V – скорость отцепа в пределах зоны торможения;

S – координата пути отцепа в пределах зоны торможения;

P – давление воздуха в тормозных цилиндрах замедлителей тормозной позиции;

V_{\max} – максимально возможная для данного типа замедлителей скорость движения отцепа по условиям отсутствия вытормаживания;

L_T – длина всей зоны торможения;

P_{\max} – максимальное для данного типа замедлителей давление в тормозных цилиндрах.

Кроме того введем еще одно ограничение:

$$t_u \geq t_{\text{trans}}, \quad (3.10)$$

где t_u – интервал времени между подачами команд управления;

t_{trans} – время, необходимое для завершения переходного процесса в замедлителе после подачи команды управления.

Данное ограничение, используемое практически во всех системах управления замедлителями ТП, позволяет заменить расчеты переходных процессов замкнутой системы расчетами динамики разомкнутой системы управления.

Так как система недетерминирована, то при любом, в том числе и оптимальном, управлении отцеп с той или иной долей вероятности может оказаться в любой точке пространства состояния $\Omega_{\text{доп}}$. Поэтому оптимальное управление следует искать для всех точек пространства состояния $\Omega_{\text{доп}}$. Совокупность рядом лежащих точек с одинаковым управлением (управления в данной системе дискретные) могут образовывать область оптимального управления для данного компонента вектора управления.

Примем гипотезу, что области оптимального управления внутри пространства $\Omega_{\text{доп}}$ не пересекаются. Тогда под параметрами настройки САУ будем понимать уравнения $V_{\text{гр}}^H(S, P)$ и $V_{\text{гр}}^B(S, P)$, которые описывают поверхности, разделяющие пространство допусти-

мых состояний $\Omega_{\text{доп}}$ на три непересекающиеся области, внутри каждой из которых выбирается соответствующее этой области управление $u \in (u_0, u_1, u_2)$. Так как выбор управляющего воздействия возможен лишь при дискретных значениях P , соответствующих k -й ступени торможения, то на вышеупомянутых поверхностях достаточно будет найти лишь уравнения кривых $V_{\text{гpk}}^{\text{H}}(S)$ и $V_{\text{гpk}}^{\text{B}}(S)$. При этом условие выбора управляющего воздействия в процессе управления запишется следующим образом:

$$u(V, S, P_k) = \begin{cases} u_0 & \text{если } V < V_{\text{гpk}}^{\text{H}}, \\ u_1 & \text{если } V_{\text{гpk}}^{\text{H}} < V < V_{\text{гpk}}^{\text{B}}, \\ u_2 & \text{если } V < V_{\text{гpk}}^{\text{B}}. \end{cases} \quad (3.11)$$

При выборе критерия оптимальности следует, в общем случае, учитывать несколько факторов, определяющих экономические затраты в процессе роспуска отцепов на горке. Так, в работах [106,122,124] показано, что увеличение точности работы парковых тормозных позиций значительно снижает экономические затраты на ремонт вагонов, связанный с их «боем» при столкновении с завышенными скоростями и на ликвидацию «окон».

Для интервальных тормозных позиций точность также имеет существенное значение, но, как показано в [69,70], снижение времени занятия отцепом тормозной позиции позволяет увеличить скорость роспуска, что повышает производительность работы сортировочной горки.

На экономические затраты в процессе роспуска влияют и такие факторы, как расход электроэнергии и сжатого воздуха, что косвенно определяется количеством переключений (и, особенно, выключений) замедлителей ТП, приходящихся на один тормозимый отцеп.

Таким образом, в качестве критерия оптимальности должен выступать некоторый интегральный показатель, учитывающий все вышперечисленные факторы. Вид этого интегрального показателя в некоторой степени определяется выбранным методом оптимизации. В первом приближении примем, что основой критерия оптимальности для системы управления скоростью отцепов в ТП должна стать точность работы ТП. Так как процесс торможения недетерминиро-

ван, то под точностью работы ТП будем понимать среднее квадратическое отклонение σ_{VE} фактической скорости выхода V_E отцепы из ТП от заданной скорости выхода V_C :

$$\sigma_{VE} = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} (V_E - V_C)^2 g(V_E) dV_E} \quad (3.12)$$

где $g(V_E)$ – плотность распределения скорости выхода V_E .

За критерий оптимальности ε примем минимум величины σ_{VE} .

При выборе метода оптимизации следует учесть следующее:

- движение отцепы в ТП может быть описано рекуррентным уравнением (3.6);

- если принять допущение, что в системе не происходит накопление информации об управляемом объекте (отцепе), то в таком случае управление в данный момент времени будет зависеть лишь от состояния объекта в этот же самый момент времени и не зависеть от «предыстории» системы;

- состояние объекта в каждый момент времени случайно в силу недетерминированности тормозной характеристики замедлителя и скорости входа отцепы на замедлитель, поэтому оптимальное управление следует искать для всех точек допустимой области $\Omega_{\text{доп}}$ пространства состояний;

- функция F в правой части уравнения (3.6) непрерывна в связи с наличием в системе существенных нелинейностей.

Принимая во внимание вышесказанное применим для оптимизации параметров настройки данной САУ дискретный вариант метода динамического программирования.

3.2.2. Алгоритм оптимизации параметров настройки цифрового регулятора

Произведём квантование координат пространства состояния $\Omega_{\text{доп}}$ системы. Координата P естественным образом разбита на дискреты P_k ($k=0\dots k_{\text{max}}$), которые соответствуют ступеням торможения замедлителя. Координату скорости V разобьём на ряд одинаковых дискрет, размер которых δ_V должен быть сопоставим с погрешностью измери-

теля скорости. Границы между дискретами обозначим V_i ($i=0\dots i_{\max}$). Координату пути S разобьём на ряд одинаковых дискрет, размер которых δ_S определим опытным путём. Границы между дискретами обозначим S_n ($n=0\dots n_{\max}$).

Оптимизацию будем производить по шагам – квантам пути – в направлении обратном естественному движению отцепя. Первый шаг соответствует дискрете $S_{n_{\max}}$, а последний – S_0 .

Для первого шага полагаем, что оптимальным является управление u_1 (ступень торможения не изменяется), так как при выбранной достаточно малой величине δ_S переходной процесс не успеет закончиться до выхода отцепя из тормозной позиции. Расчет целевой функции для первого шага производится по формуле:

$$\varepsilon_{1,k,i}^* = \sigma_{1,k,i}^{u_1} = \sqrt{\sum_{m=i_1}^{i_2} \mathcal{P}_{0,k,m} \cdot (V_m - V_C)^2}, \quad (3.13)$$

где $\mathcal{P}_{0,k,m}$ – вероятность того, что координата скорости отцепя при выходе его из тормозной позиции находится в пределах $V_m - 0,5 \cdot \delta_V \dots V_m + 0,5 \cdot \delta_V$ при k -й ступени торможения;

i_1, i_2 – индексы нижней и верхней дискрет скоростей отцепя при выходе его из тормозной позиции, вероятность перехода на которые из точки (S_1, P_k, V_i) существенна (существенность вероятности оценивалась по правилу «трёх сигм»).

Обобщенная схема алгоритма n -го шага оптимизации приведена на рис. 3.5.

На n -м шаге для каждой точки (S_n, P_k, V_i) отыскиваем управление $U_{n,k,i}$, обеспечивающее минимальное значение среднего квадратического отклонения ошибки скорости выхода отцепя из замедлителя $\varepsilon_{n,k,i}^* = \min\{\sigma_{n,k,i}^{u_0}, \sigma_{n,k,i}^{u_1}, \sigma_{n,k,i}^{u_2}\}$. Для отыскания $\sigma_{n,k,i}^{u_r}$ ($r=0,1,2$) используются результаты предыдущих шагов с учётом стохастичности процесса движения¹:

$$\sigma_{n,k,i}^{u_r} = \int_{-\infty}^{+\infty} g_n^{u_r}(V) \varepsilon^*(V) dV, \quad (3.14)$$

¹ Строго говоря, это математическое ожидание среднего квадратического отклонения

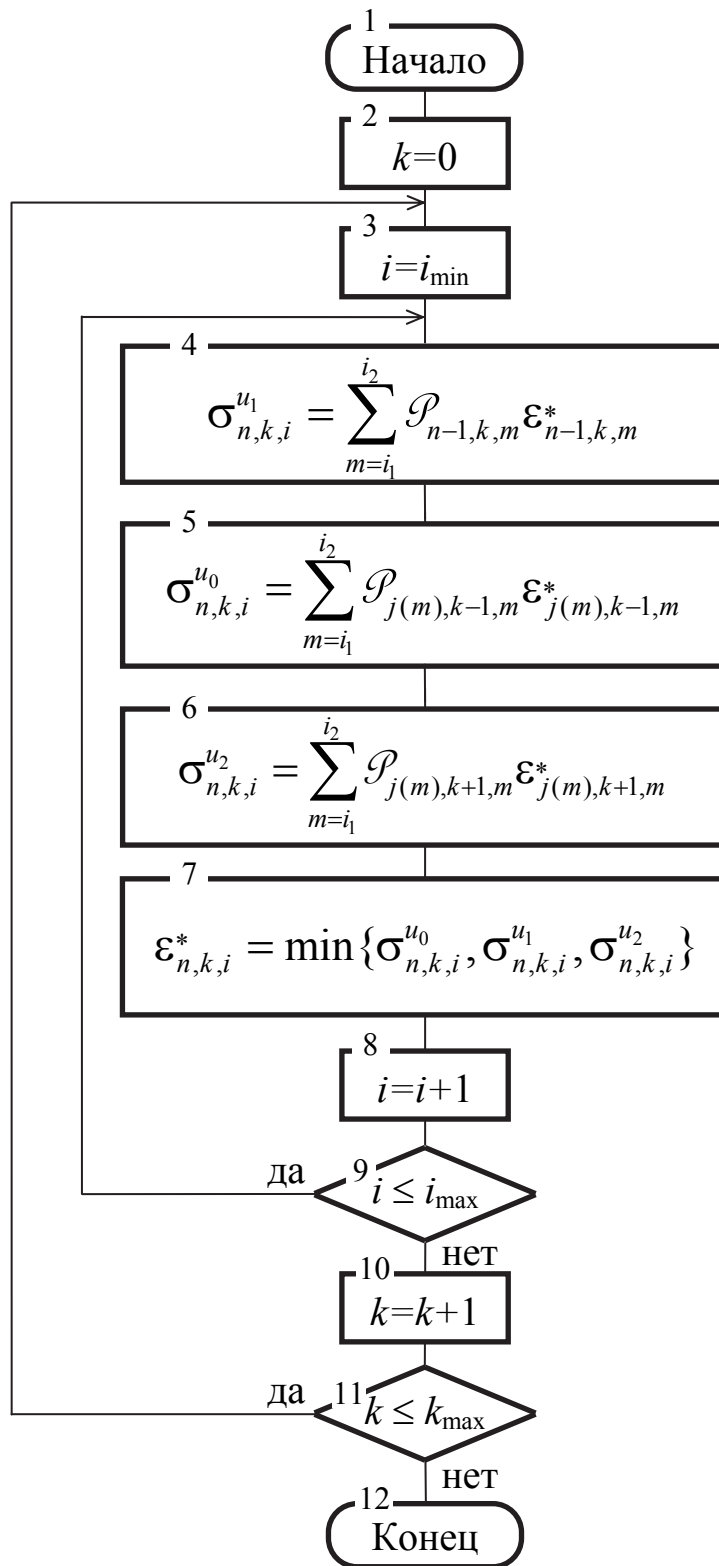


Рис. 3.5. Алгоритм n -го шага оптимизации

где $g^{u_r}(V)$ – плотность распределения скорости отцепа в конце n -го шага для управления u_r .

Предположим, что при значении скорости отцепа в пределах $V_m - 0,5 \cdot \delta_V \dots V_m + 0,5 \cdot \delta_V$ при k -й ступени торможения значение ε^* неизменно (рис. 3.6). При этом формула (3.14) для u_1 (неизменная ступень торможения, рис. 3.7) примет вид:

$$\sigma_{n,k,i}^{u_1} = \sum_{m=i_1}^{i_2} \mathcal{P}_{n-1,k,m} \varepsilon_{n-1,k,m}^* , \quad (3.15)$$

где $\mathcal{P}_{n-1,k,m}$ – вероятность того, что координата скорости отцепа в начале предыдущего $(n-1)$ -го шага находится в пределах $V_m - 0,5 \cdot \delta_V \dots V_m + 0,5 \cdot \delta_V$ при k -й ступени торможения;

$\varepsilon_{n-1,k,m}^*$ – значение целевой функции для точки (S_{n-1}, P_k, V_m) , найденное на предыдущем шаге оптимизации (рис. 3.6);

i_1, i_2 – индексы нижней и верхней дискрет скоростей в начале предыдущего шага, вероятность перехода на которые из точки (S_{n-1}, P_k, V_m) существенна (существенность вероятности оценивалась по правилу «трёх сигм»).

С учетом выкладок, сделанных в п. 2.4., распределение скорости $g^{u_r}(V)$ в конце участка можно считать нормальным. При этом вычисление $\mathcal{P}_{n-1,k,m}$ в (3.15) может быть произведено по формуле:

$$\mathcal{P}_{n-1,k,m} = \frac{1}{\sigma_V \sqrt{2\pi}} \int_{V_i+0.5\delta_V}^{V_i+0.5\delta_V} e^{-\frac{(V-m_V)^2}{2\sigma_V^2}} dV . \quad (3.16)$$

Здесь m_V и σ_V – параметры плотности $g^{u_r}(V)$ нормального распределения скорости отцепа в конце n -го шага, полученные в п. 2.4 – формулы (2.25), (2.26) для неизменной ступени торможения на участке, (2.44), (2.45) для случая перехода замедлителей ТП на соседнюю ступень торможения.

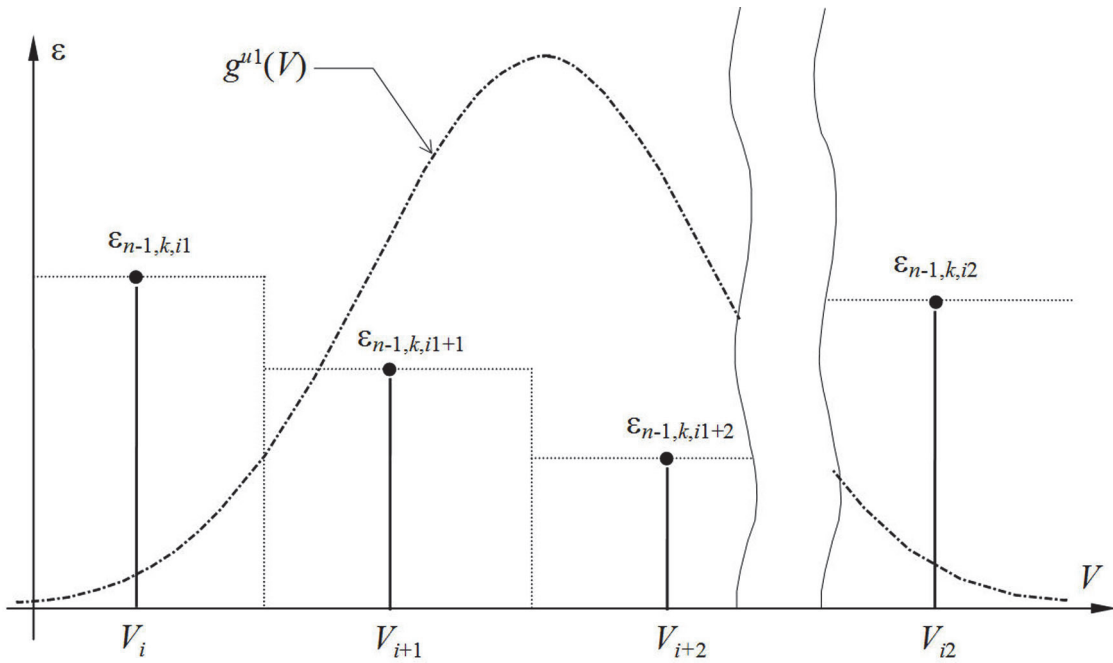


Рис. 3.6. Значения целевой функции, найденные на $(n-1)$ -м шаге при k -ой ступени торможения. Показано распределение скорости, полученное на n -м шаге при управлении u_1 .

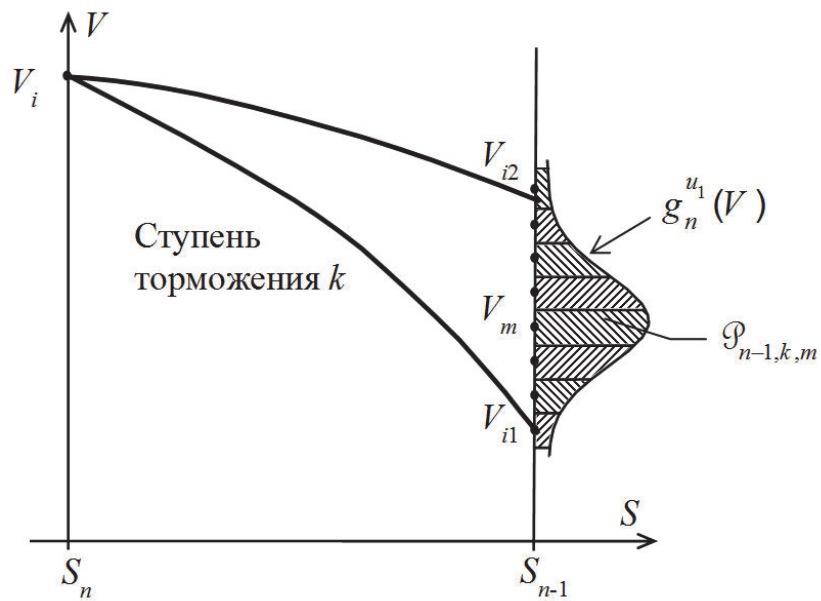


Рис. 3.7. Распределение скорости в конце n -го шага при неизменной ступени торможения

Интеграл здесь может быть вычислен с помощью одного из численных методов. В конкретной реализации был применен метод разложения подынтегрального выражения в ряд Тейлора.

Для управлений u_0 и u_2 (рис. 3.8) значение целевой функции рассчитывается не в пределах дискреты пути, как для u_1 , а в пределах времени переходного процесса $\Delta t_k^{u_r}$ (переход с k -й ступени торможения на соседнюю при управлении u_r). При этом значение целевой функции определяется по формуле:

$$\sigma_{n,k_1,i}^{u_r} = \sum_{m=i_1}^{i_2} \mathcal{P}_{n(m),k_2,m} \cdot \varepsilon_{n(m),k_2,m}^* \quad (3.17)$$

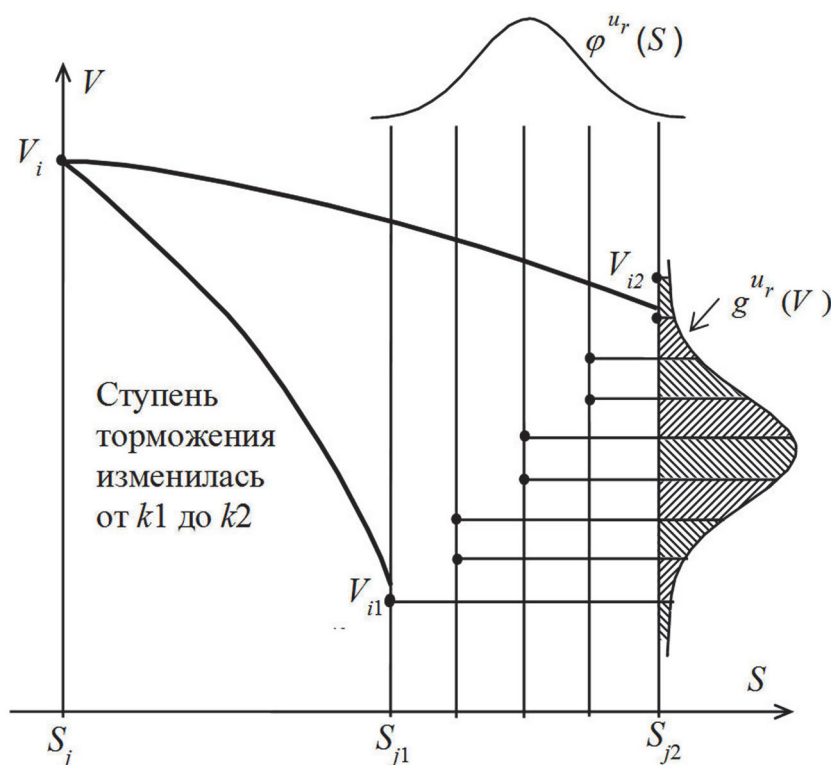


Рис. 3.8. Распределение скорости и пути в конце n -го шага при изменении степени торможения

Из рис. 3.8 видно, что каждой дискрете скорости V_m в конце переходного процесса соответствует дискрета пути $S_n(V_m)$.

Так как в формуле (3.17) дискрета пути n зависит от скорости (дискреты скорости m), то требуется определить соответствие ме-

жду ними. Соответствие скорости V_e и пути S_e в конце переходного процесса определяется неслучайной функцией, которая может быть найдена из (2.37) и (2.41):

$$S_e = r_4 + r_5 V_e, \quad (3.18)$$

где

$$r_4 = r_2 - \frac{r_3 r_0}{r_1}, \quad (3.19)$$

$$r_5 = \frac{r_3}{r_1}, \quad (3.20)$$

r_0, r_1, r_2, r_3 – определены в (2.38), (2.39), (2.42), (2.43) для случая затормаживания и в (2.48)...(2.51) для случая растормаживания замедлителя.

Дополнительно введем следующие искусственные ограничения. Условимся считать запрещенным управление u_r ($r \in \{0, 2\}$) в точке (n, k_1, m) если по завершению переходного процесса хотя бы одна дискрета пути $S_n(V_m)$ в (3.17), находится за пределами зоны торможения.

3.2.3. Программная реализация алгоритма

Алгоритм расчета оптимальной настройки регулятора тормозной позиции, использующий метод динамического программирования, был реализован в виде объектно-ориентированной программы на языке Паскаль.

Отдельные шаги алгоритма оптимизации демонстрирует рис. 3.9. Здесь показан сглаженный набор точек $\sigma_{n,k}^{u_r}(V_i)$ для $r=0,1,2$, полученный на одном из шагов n для некоторой ступени торможения k . Сглаженные значения $\varepsilon_{n,k}^*(V_i) = \min \{ \sigma_{n,k}^{u_0}(V_i), \sigma_{n,k}^{u_1}(V_i), \sigma_{n,k}^{u_2}(V_i) \}$ выделены жирной линией. Именно эти значения будут использованы для дальнейших расчётов на последующих шагах.

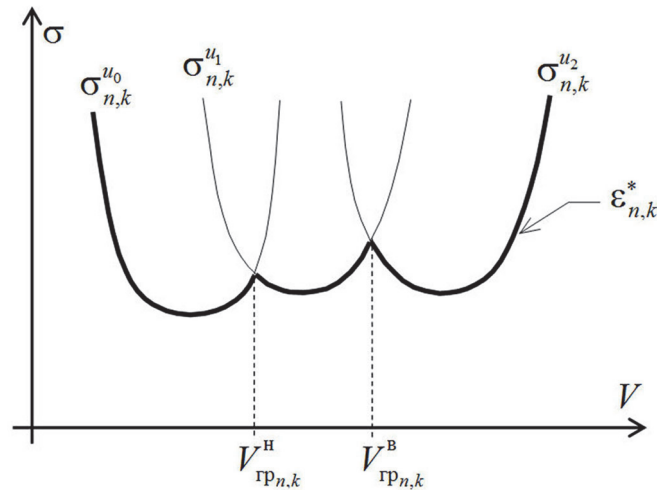


Рис. 3.9. Определение точек граничных кривых на n -м шаге для k -й ступени торможения.

Пересечение $\sigma_{n,k}^{u_0}(V_i)$ с $\sigma_{n,k}^{u_1}(V_i)$ и $\sigma_{n,k}^{u_1}(V_i)$ с $\sigma_{n,k}^{u_2}(V_i)$ определяют «точки переключения» $V_{грn,k}^H$ и $V_{грn,k}^B$, принадлежащие граничным поверхностям, используемым в алгоритме управления (3.11).

В процессе расчётов было выяснено, что зависимости $\sigma^{u_r}(V)$ имеют вид выпуклой функции с одним минимумом (рис. 3.9) лишь на нескольких первых шагах оптимизации. На последующих шагах у этих функций, во-первых, появляются несколько экстремумов и, во-вторых, эти функции пересекаются между собой более одного раза (рис. 3.10 – поясняющий принцип и рис. 3.11...3.14 – реальные результаты работы оптимизирующей программы).

Кроме того, найдены области пространства состояния, внутри которых результат управления (значение целевой функции) практически не зависит от выбора управляющего воздействия. Такую область, внутри которой ошибка управления (целевая функция) меньше некоторого наперёд заданного значения при нескольких значениях управляющего воздействия (в частном случае – при любом управляющем воздействии) назовём **«областью безразличного управления»**.

Для целей управления целесообразно задавать точки переключения, проходящие в районе середины областей «безразличности», так как при этом уменьшается влияние ошибок идентификации координат (V, S) отцепя.

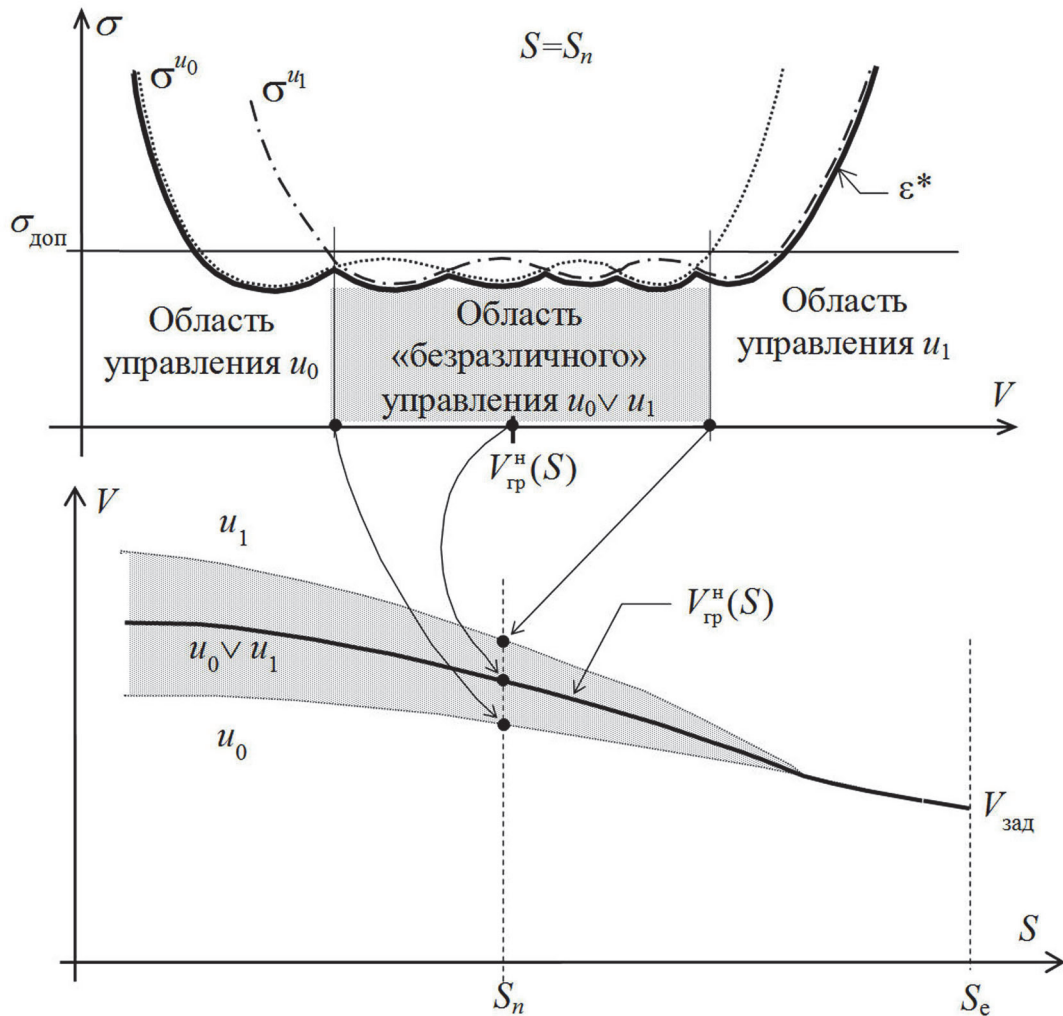


Рис. 3.10. Появление области безразличного управления и формирование линии переключения для ступени торможения k

Совокупность точек $V_{гр,n,k}^H$ и $V_{гр,n,k}^B$ ($n=1\dots R, k=0\dots 4$) для всех R шагов алгоритма оптимизации образуют «матрицы переключений»:

$$\mathbf{V}_{гр}^H = \begin{pmatrix} V_{гр11}^H & V_{гр12}^H & V_{гр13}^H & V_{гр14}^H \\ V_{гр21}^H & V_{гр22}^H & V_{гр23}^H & V_{гр24}^H \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{грR1}^H & V_{грR2}^H & V_{грR3}^H & V_{грR4}^H \end{pmatrix}, \quad (3.21)$$

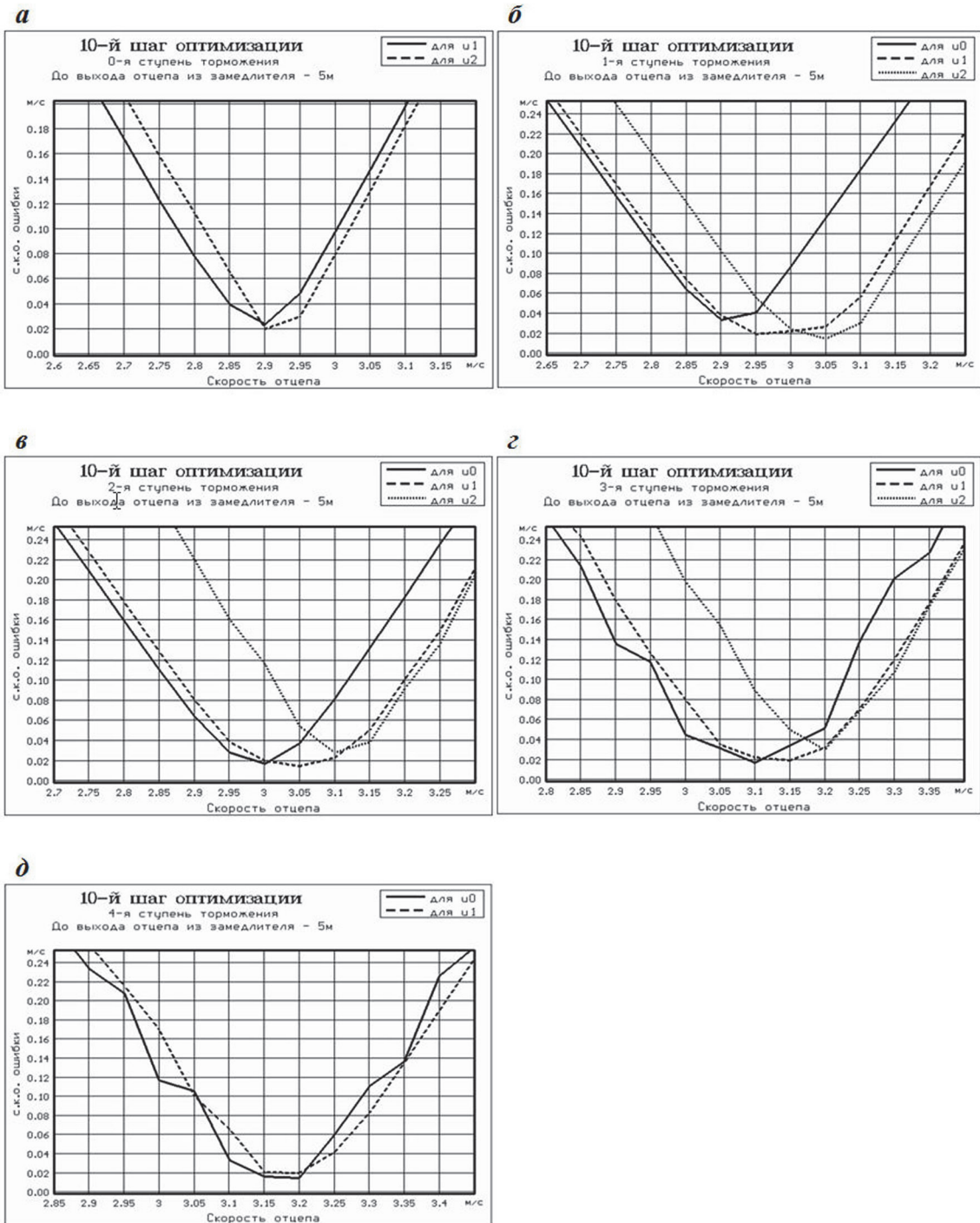


Рис. 3.11. Результаты 10-го шага оптимизации:
а – 0-я ступень; **б** – 1-я ступень; **в** – 2-я ступень; **г** – 3-я ступень;
д – 4-я ступень;

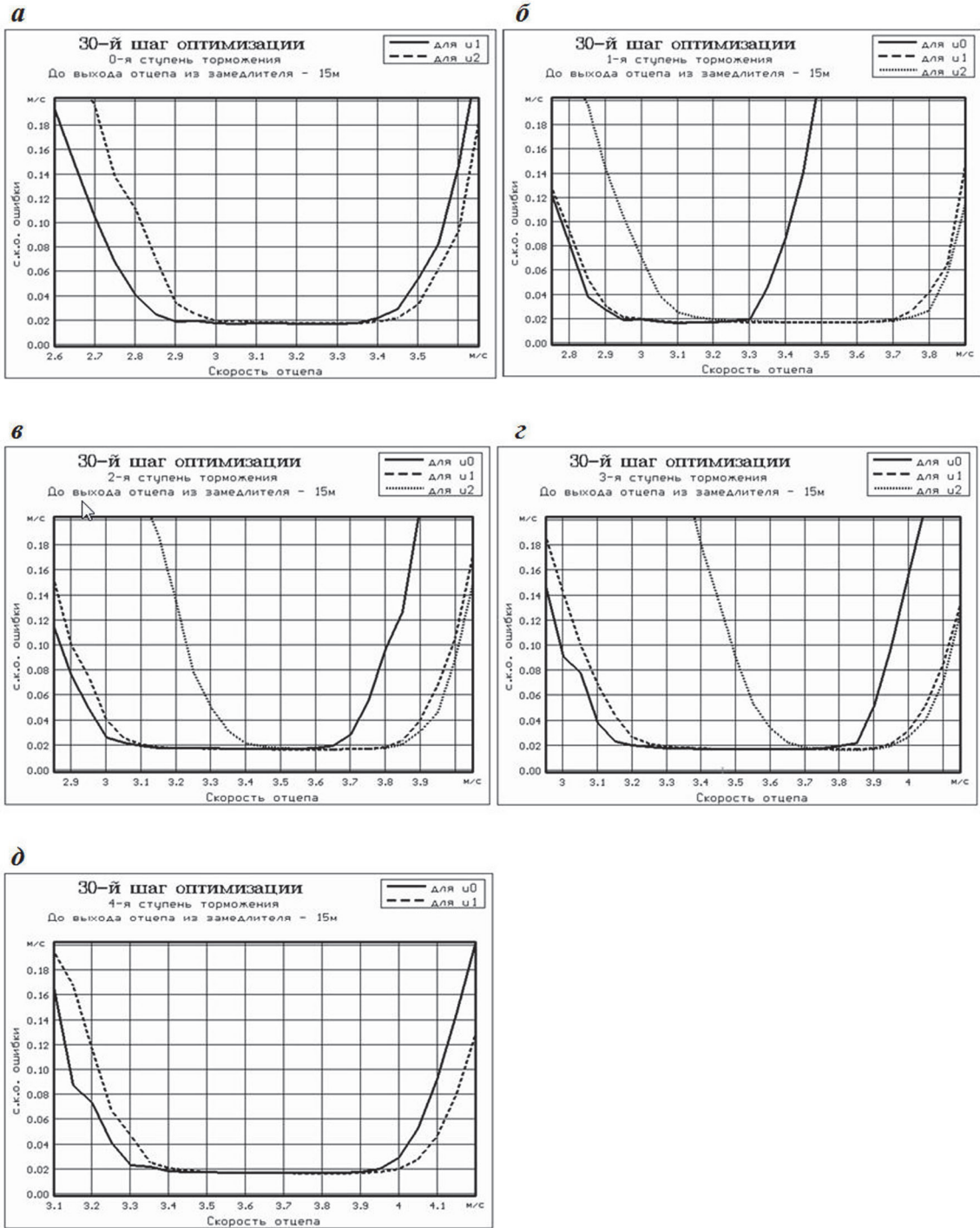


Рис. 3.12. Результаты 30-го шага оптимизации:
а – 0-я ступень; **б** – 1-я ступень; **в** – 2-я ступень; **г** – 3-я ступень;
д – 4-я ступень;

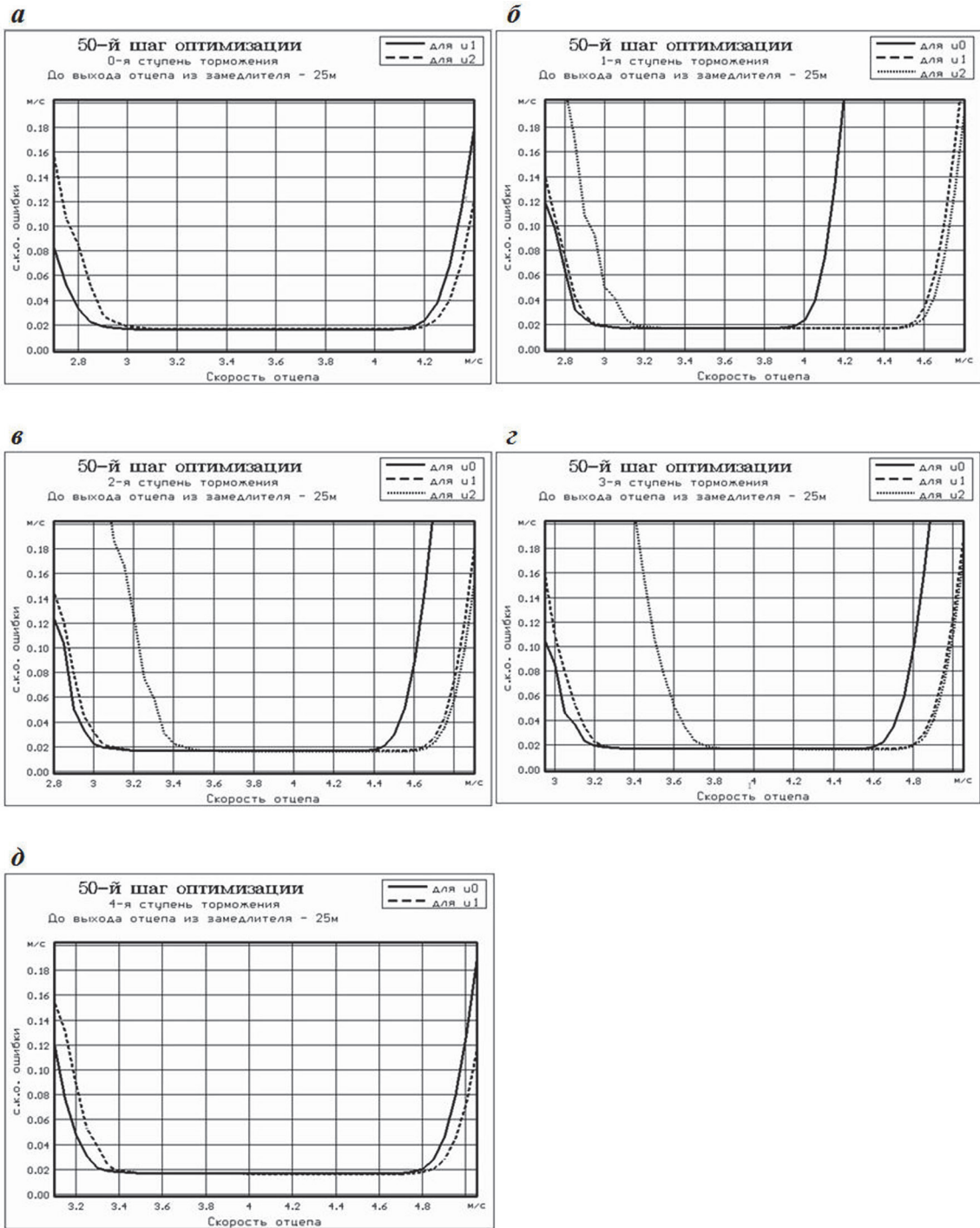


Рис. 3.13. Результаты 50-го шага оптимизации:
а – 0-я ступень; *б* – 1-я ступень; *в* – 2-я ступень; *г* – 3-я ступень;
д – 4-я ступень;

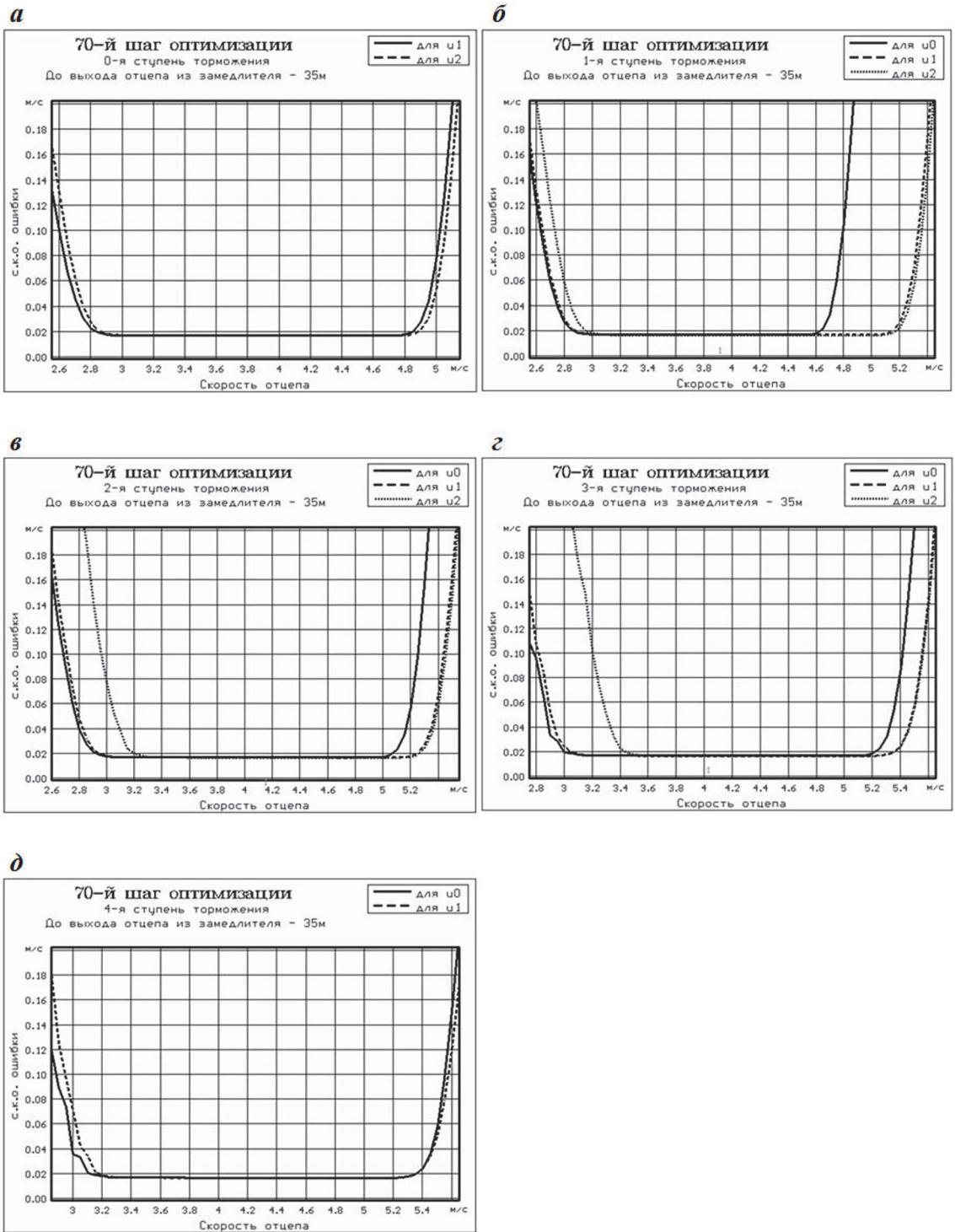


Рис. 3.14. Результаты 70-го шага оптимизации
а – 0-я ступень; *б* – 1-я ступень; *в* – 2-я ступень; *г* – 3-я ступень;
д – 4-я ступень;

$$\mathbf{V}_{\Gamma P}^B = \begin{pmatrix} V_{\Gamma P10}^B & V_{\Gamma P11}^B & V_{\Gamma P12}^B & V_{\Gamma P13}^B \\ V_{\Gamma P20}^B & V_{\Gamma P21}^B & V_{\Gamma P22}^B & V_{\Gamma P23}^B \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{\Gamma PR0}^B & V_{\Gamma PR1}^B & V_{\Gamma PR2}^B & V_{\Gamma PR3}^B \end{pmatrix}. \quad (3.22)$$

Для получения из совокупности точек $\mathbf{V}_{\Gamma P}^H$ и $\mathbf{V}_{\Gamma P}^B$ набора линий переключения, целесообразно сгладить совокупности точек, представляющих столбцы этих матриц, полиномами r -й степени. Рис. 3.10 демонстрирует принцип построения одной из линий переключения.

Уравнения линий переключения могут быть представлены в виде:

$$V_{\Gamma Pk}^H(S) = \alpha_{0k} + \alpha_{1k}S + \alpha_{2k}S^2 + \dots + \alpha_{rk}S^r, \quad (3.23)$$

$$V_{\Gamma Pk}^B(S) = \beta_{0k} + \beta_{1k}S + \beta_{2k}S^2 + \dots + \beta_{rk}S^r, \quad (3.24)$$

где $k=0\dots 4$ – степень торможения.

Удобно представить эти уравнения в матричной форме:

$$\mathbf{V}_{\Gamma P}^H = \boldsymbol{\alpha}\mathbf{S}, \quad (3.25)$$

$$\mathbf{V}_{\Gamma P}^B = \boldsymbol{\beta}\mathbf{S}, \quad (3.26)$$

где

$$\boldsymbol{\alpha} = \begin{pmatrix} \alpha_{01} & \alpha_{11} & \dots & \alpha_{r1} \\ \alpha_{02} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{r2} \\ \alpha_{03} & \alpha_{13} & \dots & \alpha_{r3} \\ \alpha_{04} & \alpha_{14} & \dots & \alpha_{r4} \end{pmatrix}, \quad (3.27)$$

$$\diamond \beta = \begin{pmatrix} \beta_{01} & \beta_{11} & \cdots & \beta_{r1} \\ \beta_{02} & \beta_{12} & \cdots & \beta_{r2} \\ \beta_{03} & \beta_{13} & \cdots & \beta_{r3} \\ \beta_{04} & \beta_{14} & \cdots & \beta_{r4} \end{pmatrix}, \quad (3.28)$$

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S^0 \\ S^1 \\ \cdots \\ S^r \end{pmatrix}. \quad (3.29)$$

Исследования показывают, что для практических целей линии переключения достаточно представить в виде полиномов 3-й степени. Таким образом, параметры настройки регулятора будут представлены матрицами коэффициентов вышеупомянутых полиномов.

В таблице 3.1 приведены значения коэффициентов этих полиномов, полученные при расчете оптимальной настройки регулятора для отцепа из одного вагона массой 85т для заданной скорости выхода отцепа из ТП 3м/с. Графическая интерпретация этих полиномов показана на рис. 3.15...3.19.

Таблица 3.1.

Значения коэффициентов полиномов линий переключения

k	α_{0k}	α_{1k} $\times 10^{-2}$	α_{2k} $\times 10^{-3}$	α_{3k} $\times 10^{-5}$	β_{0k}	β_{1k} $\times 10^{-2}$	β_{2k} $\times 10^{-3}$	β_{3k} $\times 10^{-5}$
0					2,672	2,822	-1,328	2,048
1	2,740	3,822	-1,560	1,868	4,911	-3,570	-2,951	6,883
2	2,883	6,012	-2,383	2,169	5,339	-2,337	-3,464	6,384
3	3,060	7,848	-3,087	2,352	5,485	-1,648	-3,690	6,203
4	4,237	2,630	-3,180	4,224				

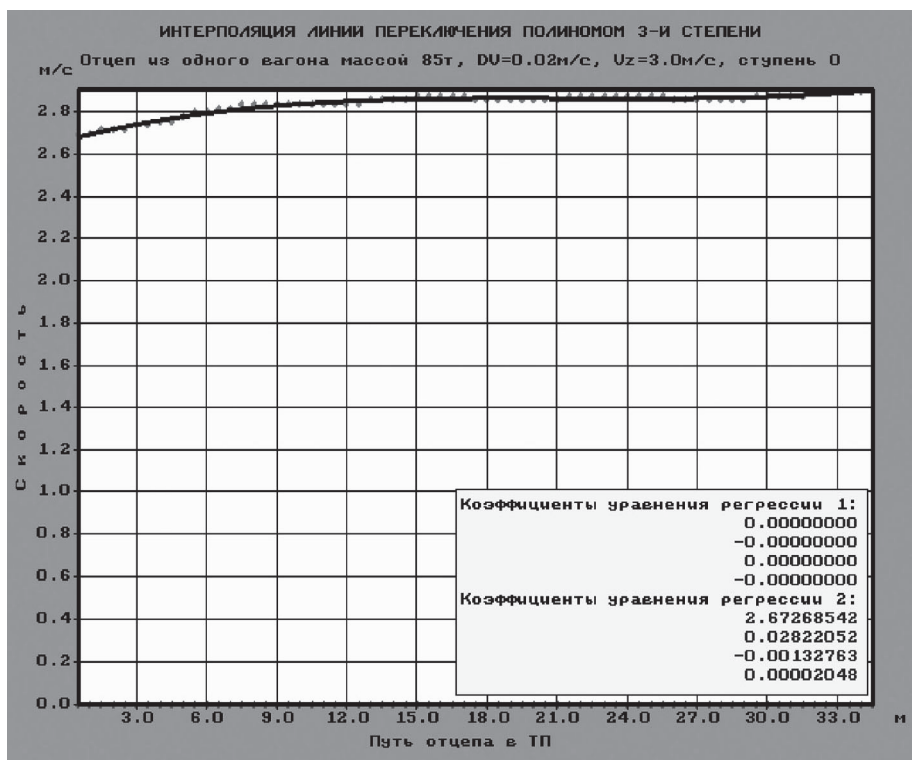


Рис. 3.15. График линий переключения для 0-й ступени торможения

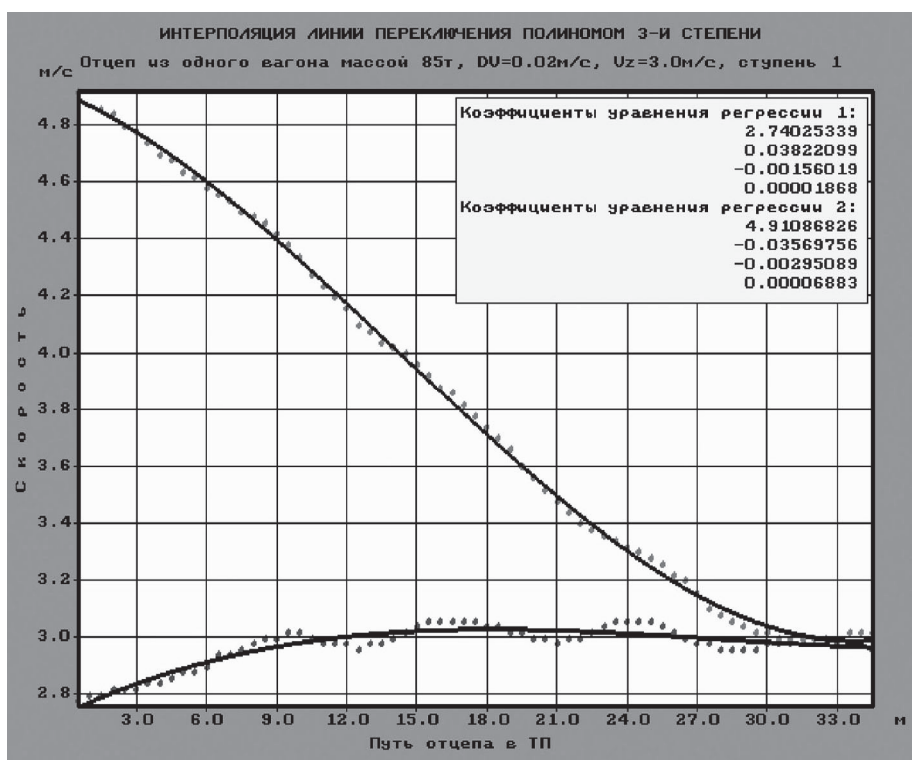


Рис. 3.16. График линий переключения для 1-й ступени торможения

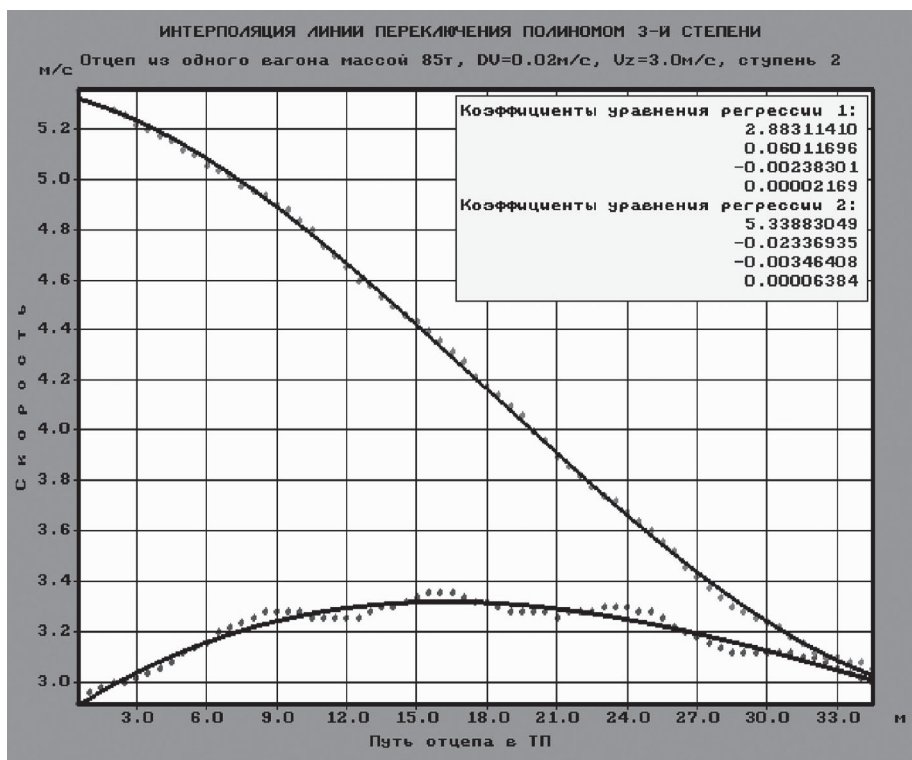


Рис. 3.17. График линий переключения для 2-й ступени торможения

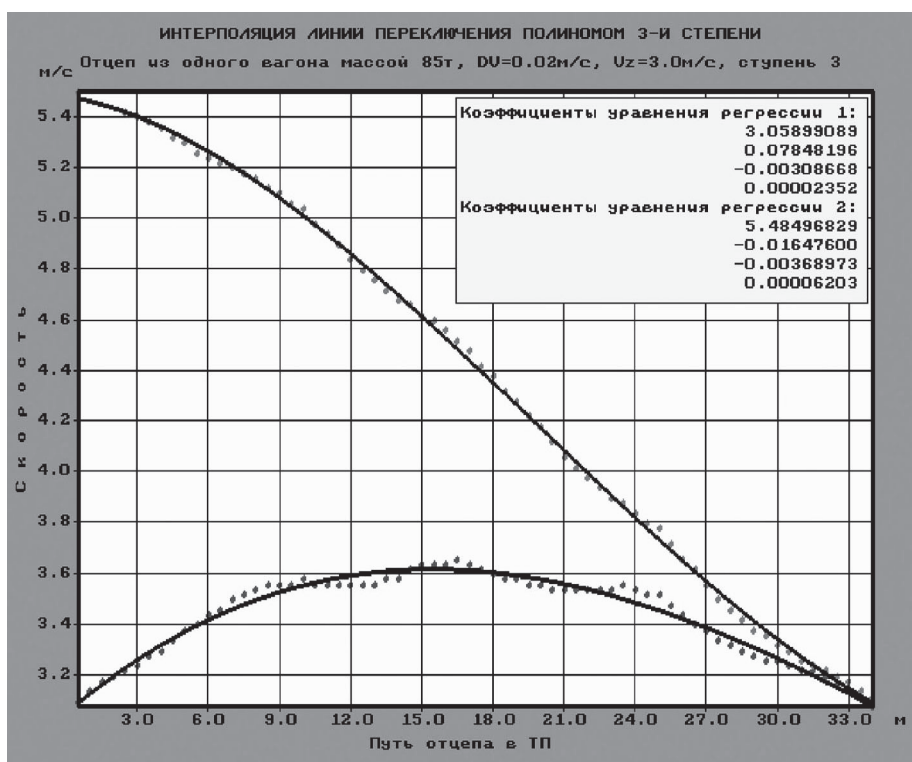


Рис. 3.18. График линий переключения для 3-й ступени торможения

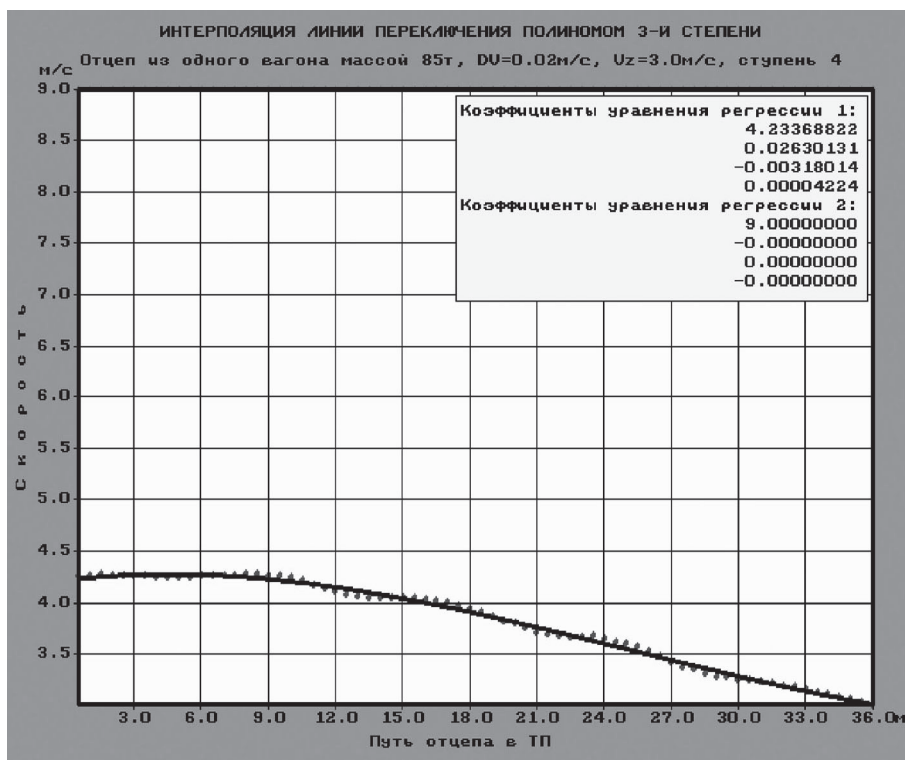


Рис. 3.19. График линий переключения для 4-й ступени торможения

3.2.4. Оптимальная настройка регулятора для неоднородной последовательности отцепов

Рассмотренный выше метод оптимальной настройки регулятора предполагал, что торможению подлежат отцепы одного типа. В действительности же торможению подлежат отцепы разных типов. При этом важнейшими признаками, по которым различаются отцепы, являются длина и масса отцепа. В общем случае необходимо разбить отцепы на ряд классов, при этом каждому классу поставить в соответствие определенный диапазон длины (в упрощенной постановке – количество вагонов в отцепе) и массы отцепа из всего допустимого диапазона – т.е. сформировать матрицу классов K в соответствии с табл. 3.2.

Здесь n_0 – количество вагонов в отцепе; m – масса отцепа; m_i – граница класса по диапазону масс. Отцеп принадлежит к классу K_{ji} если он состоит из j вагонов и имеет массу в диапазоне $m_{i-1} < m < m_i$.

Матрица классов

n_0	m_1	m_2	...	m_i	...	$m_{i\max}$
1	$K_{1,1}$	$K_{1,2}$	...	$K_{1,i}$	...	$K_{1,i\max}$
2	$K_{2,1}$	$K_{2,2}$	...	$K_{2,i}$	...	$K_{2,i\max}$
...
j	$K_{j,1}$	$K_{j,2}$	...	$K_{j,i}$	...	$K_{j,i\max}$
...
n_{\max}	$K_{n_{\max},1}$	$K_{n_{\max},2}$	...	$K_{n_{\max},i}$	...	$K_{n_{\max},i\max}$

В процессе разбивки отцепов на классы важной является задача определения дискретности диапазона m , так как это определяет дополнительную погрешность управления. Такая задача может быть решена путем внесистемного моделирования, которое может определить влияние ошибки дискретизации m на общую ошибку регулирования. Вопрос этот рассмотрен в 3.3.

Для каждого класса отцепов m_{ji} следует отыскать матрицы коэффициентов α_{ji} , β_{ji} полиномов линий переключения. Эти матрицы следует хранить в памяти управляющей ЭВМ. В процессе управления отцеп перед входом на тормозную позицию должен быть классифицирован в соответствии с табл. 3.2. Далее из набора матриц коэффициентов выбираются матрицы, соответствующие классу данного отцепа. Коэффициенты из этих матриц используются для расчета значений $V_{\Gamma n,k}^H$ и $V_{\Gamma n,k}^B$ линий переключения (3.23) и (3.24) на каждом шаге управления и выбора управляющего воздействия в соответствии с (3.11).

С целью упрощения алгоритма управления и введем следующую гипотезу.

Гипотеза. Значения коэффициентов одинаковы для всех классов отцепов, принадлежащих одному столбцу матрицы классов.

Основанием для выдвижения такой гипотезы является тот очевидный факт, что отрезки линий переключения на конечном участке траектории движения (начиная с момента выхода последнего вагона отцепа из замедлителя) идентичны для отцепов одного веса, но с различным количеством вагонов в отцепе.

Если эта гипотеза верна, то количество классов отцепов сокращается в N_{\max} раз (N_{\max} – максимальное количество вагонов в отцепе, которое рассматривается при создании матрицы классов), а матрица классов преобразуется в вектор классов:

$$\mathbf{K}=(K_1, K_2, \dots, K_i, \dots, K_{i_{\max}}). \quad (3.30)$$

Коэффициенты одноименных полиномов, (компоненты векторов α и β), соответствующие различным классам (по признаку массы) отцепов могут быть в свою очередь интерполированы полиномами p -й степени:

$$\alpha_{ck} = \xi_{0ck} + \xi_{1ck}m + \xi_{2ck}m^2 + \dots + \xi_{pck}m^p, \quad (3.31)$$

$$\beta_{ck} = \zeta_{0ck} + \zeta_{1ck}m + \zeta_{2ck}m^2 + \dots + \zeta_{pck}m^p, \quad (3.32)$$

где $c=0\dots r$ – номер коэффициента в полиномах (3.23), (3.24);

$k=0\dots 4$ – ступень торможения;

m – масса отцепа.

3.3. Исследование на модели качества работы регулятора

3.3.1. Исходные данные для моделирования

Разработанная (п. 2.4.4) имитационная модель может быть использована для исследования работы регулятора тормозной позиции. Так, на модели было проведено исследование работы регулятора, алгоритм работы которого описан зависимостями (3.6), а расчет параметров настройки был выполнен с использованием метода динамического программирования (п. 3.2).

Во всех экспериментах были приняты следующие исходные данные:

- исполнительный орган – тормозная позиция из двух замедлителей нажимного типа;
- заданная скорость выхода отцепа из замедлителя – 3 м/с;
- математическое ожидание ошибки измерителя скорости равно нулю;

3.3.2. Определение зависимости точности регулирования от точности измерителя скорости

Этот эксперимент проводился в предположении, что ошибка измерителя скорости распределена по нормальному закону. Исходные данные эксперимента:

- объект управления – отцеп из одного четырехосного вагона массой 85т;
- коэффициент вариации тормозной характеристики – 20 %;
- количество реализаций для получения каждой точки эксперимента – 500.

Результат эксперимента сведен в табл. 3.3

Таблица 3.3.

Результаты эксперимента по определению зависимости точности регулирования от точности измерителя скорости

С.к.о. ошибки РИС σ_ε (м/с)	Математическое ожидание фактической скорости выхода \tilde{M}_{VE} (м/с)	С.к.о. фактической скорости выхода $\tilde{\sigma}_{VE}$ (м/с)	С.к.о. ошибки регулятора $\tilde{\sigma}_{VE}^*$ (м/с)
0	3,04	0,116	0,123
0,1	3,03	0,136	0,139
0,2	3,03	0,197	0,199
0,3	3,02	0,239	0,240
0,4	3,01	0,279	0,279

Полученные в результате эксперимента точки были интерполированы полиномом 2-го порядка. В результате получена зависимость:

$$\tilde{\sigma}_{VE}^* = 0.117 + 0.336\sigma_{\varepsilon} + 0.193\sigma_{\varepsilon}^2 \quad (3.33)$$

Графики зависимости (3.33) и набор точек табл. 3.3 приведены на рис. 3.20.

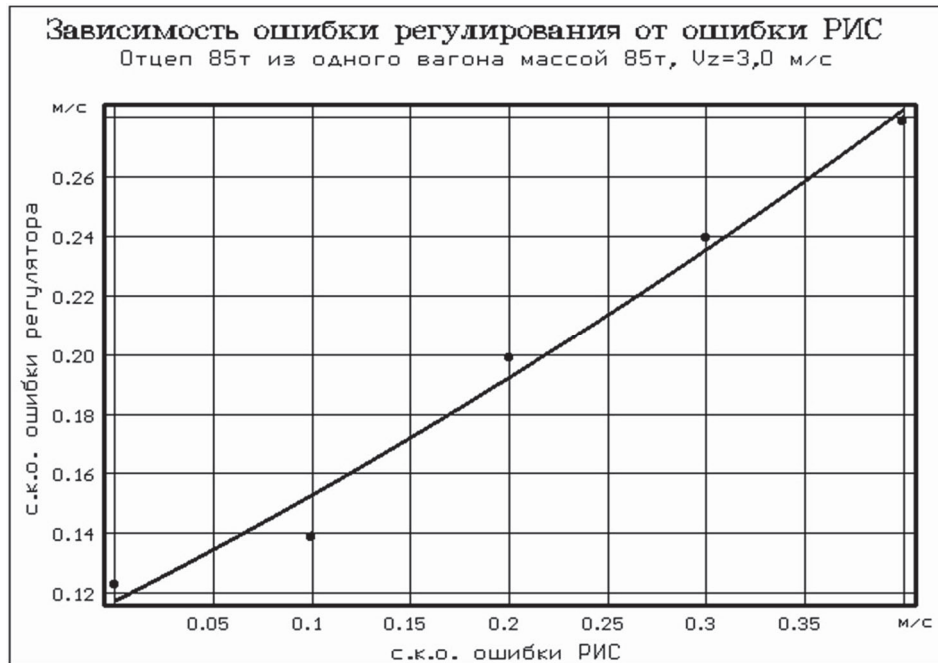


Рис.3.20. Зависимости точности регулирования от точности измерителя скорости

Из (3.33) и рис. 3.20 видно, что при $\sigma_{\varepsilon} > 0,18$ м/с погрешность регулятора меньше погрешности измерителя скорости. Это можно объяснить наличием областей безразличного управления, которые компенсируют ошибку измерителя.

3.3.3. Определение зависимости точности регулирования от массы отцепа

Исходные данные эксперимента:

- расчет линий переключения (настройка регулятора) выполнен для отцепа из одного четырехосного вагона массой 85 т;
- коэффициент вариации тормозной характеристики – 10 %;
- ошибка измерителя скорости (с.к.о.) – 0,2 м/с;

– количество реализаций для получения каждой точки эксперимента – 500.

Результат эксперимента сведен в табл. 3.4.

Таблица 3.4.

Результаты эксперимента по определению зависимости точности регулирования от массы отцепа

Фактическая масса отцепа m (т)	Математическое ожидание фактической скорости выхода \tilde{M}_{VE} (м/с)	С.к.о. фактической скорости выхода $\tilde{\sigma}_{VE}$ (м/с)	С.к.о. ошибки регулятора $\tilde{\sigma}_{VE}^*$ (м/с)
30	2,59	0,098	0,422
50	2,82	0,133	0,224
55	2,87	0,133	0,186
60	2,88	0,129	0,176
65	2,92	0,136	0,158
70	2,95	0,139	0,148
75	2,98	0,141	0,142
80	2,98	0,134	0,135
85	2,99	0,145	0,145
90	3,02	0,148	0,149
95	3,05	0,146	0,154
100	3,11	0,178	0,209
105	3,18	0,181	0,255

Полученные в результате эксперимента точки были интерполированы полиномами 2-го и 3-го порядков. В результате получены зависимости:

$$\tilde{M}_{VE} = 2,3 + 0,017m + 0,000037m^2, \quad (3.34)$$

$$\tilde{M}_{VE} = 1,67 + 0,046m - 0,00058m^2 + 0,0000027m^3, \quad (3.35)$$

$$\tilde{\sigma}_{VE}^* = 0,95 - 0,021m + 0,00014m^2. \quad (3.36)$$

Графики зависимостей (3.34)...(3.36) и набор точек табл. 3.4 приведены на рис. 3.21...3.23.

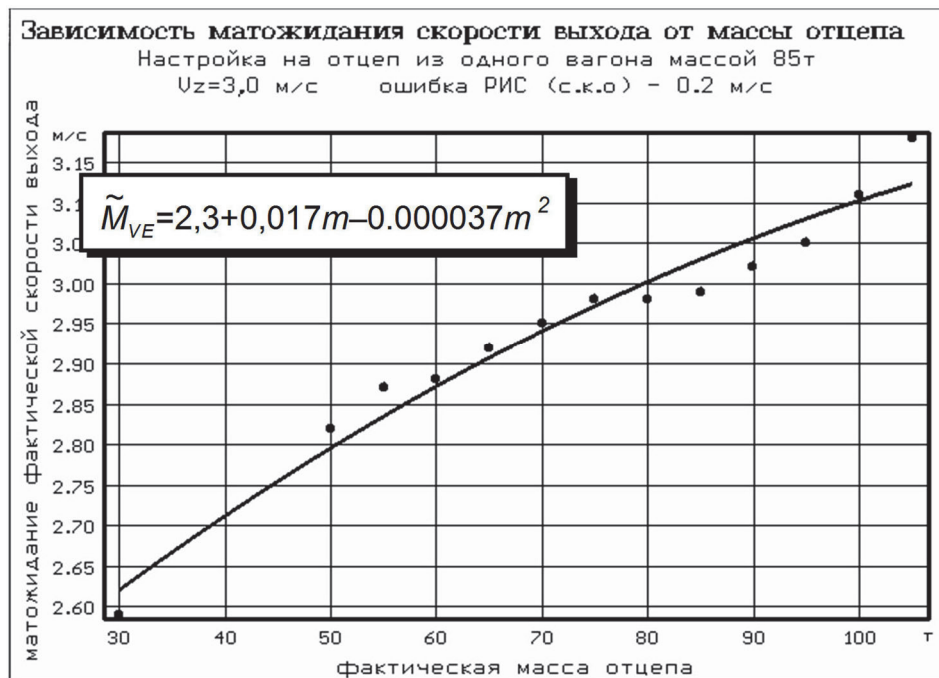


Рис. 3.21. Интерполяция зависимости $M_{VE}(m)$ полиномом 2-й степени

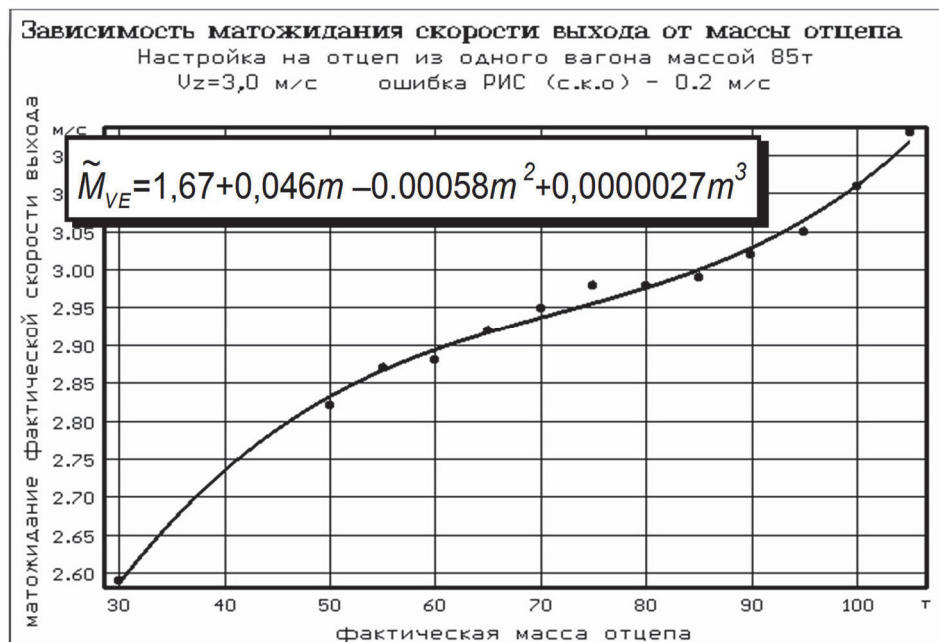


Рис. 3.22. Интерполяция зависимости $M_{VE}(m)$ полиномом 3-й степени

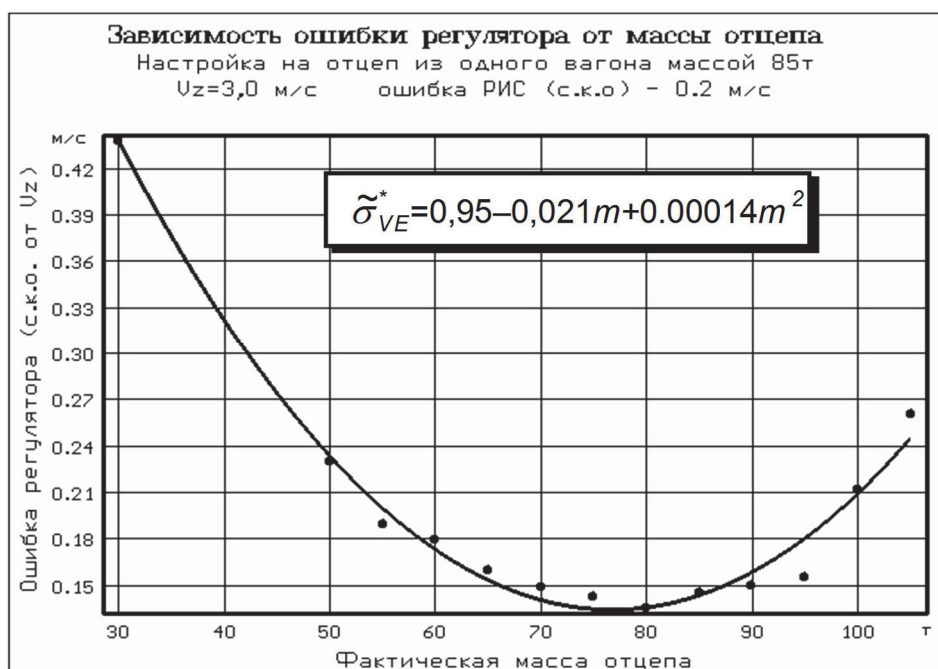


Рис. 3.23. Интерполяция зависимости $\sigma_{vE}(m)$ полиномом 2-й степени

Данное исследование позволяет дать рекомендации по разбивке отцепов на классы (см. п. 3.2.6, табл. 3.2), в соответствии с их принадлежностью к определенному диапазону масс. Для такой разбивки необходимо задаться максимально допустимой погрешностью регулятора. Так, например, при максимально допустимой погрешности регулятора 0,2 м/с класс отцепов, для которых приемлем расчет параметров регулятора применительно к отцепу массой 85 т, находится в диапазоне 54...98 т.

3.3.4. Проверка гипотезы о том, что значения матрицы коэффициентов одинаковы для всех классов отцепов, принадлежащих одному столбцу матрицы классов

Исходные данные эксперимента:

- расчет линий переключения (настройка регулятора) выполнен для отцепа из одного четырехосного вагона массой 85 т;
- моделирование производилось для различного количества четырехосных вагонов в отцепе, суммарная масса которых 85 т;
- коэффициент вариации тормозной характеристики – 15 %;
- ошибка измерителя скорости (с.к.о.) – 0,1 м/с;

– количество реализаций для получения каждой точки эксперимента – 500.

Результат эксперимента сведен в табл. 3.5.

Таблица 3.5.

Результат эксперимента по определению зависимости качества работы регулятора от количества вагонов в отцепе (масса отцепа постоянна)

Вагоны в отцепе	Математическое ожидание фактической скорости выхода \tilde{M}_{VE} (м/с)	С.к.о. фактической скорости выхода $\tilde{\sigma}_{VE}$ (м/с)	С.к.о. ошибки регулятора $\tilde{\sigma}_{VE}^*$ (м/с)
1 вагон (85т)	3,03	0,137	0,140
2 вагона (45т+40т)	2,94	0,110	0,125
3 вагона (25т+30т+30т)	3,05	0,132	0,141
4 вагона (25т+20т+20т+20т)	2,86	0,0088	0,140

Эксперимент показывает, что ошибка регулирования (в стохастическом смысле) для разного количества вагонов в отцепе практически не изменяется, если суммарная масса вагонов в отцепе постоянна. Это подтверждает состоятельность предложенной гипотезы.

Разработка принципов идентификации параметров объекта и регулятора

4.1. Методы идентификация ходового сопротивления отцепов

4.1.1. Общая постановка задачи

Для расчета задания регулятору тормозной позиции и системе задания скорости роспуска необходимо знать оценки ходового сопротивления отцепов. Существует ряд методов получения этих оценок [80,92,127]. Наибольшее распространение получили:

1) *Косвенный метод*, при котором ходовое сопротивление отцепа оценивается по его весовой категории (нагрузке на ось), получить которую можно, как по документам, сопровождающим отцеп, так и по результатам измерения весовой категории на специальном измерительном устройстве. Так как к измерителю весовой категории (весомеру) применяются, обычно, невысокие требования по точности измерения нагрузки на ось (5...6 градаций), то сложность и стоимость такого измерителя невысока. Однако оценки ходовое сопротивление отцепа, полученные с использованием этого метода, отличаются очень невысокой точностью (коэффициент вариации достигает нескольких десятков процентов).

2) *Использование измерительных участков*. Как известно, при движении оцепа, обладающего ходовым сопротивлением W , на пря-

молинейном участке пути с постоянны уклоном i его ускорение a равно:

$$a = g'(i-W) \cdot 10^{-3}, \quad (4.1)$$

где g' – ускорение свободного падения с учетом инерции вращающихся масс (например, для порожних вагонов $g' = 9,1 \text{ м/с}^2$).

Таким образом, измерив каким либо способом ускорение отцепа на этом участке можно легко определить ходовое сопротивление отцепа по формуле:

$$W = i - \frac{10^3}{g'} a. \quad (4.2)$$

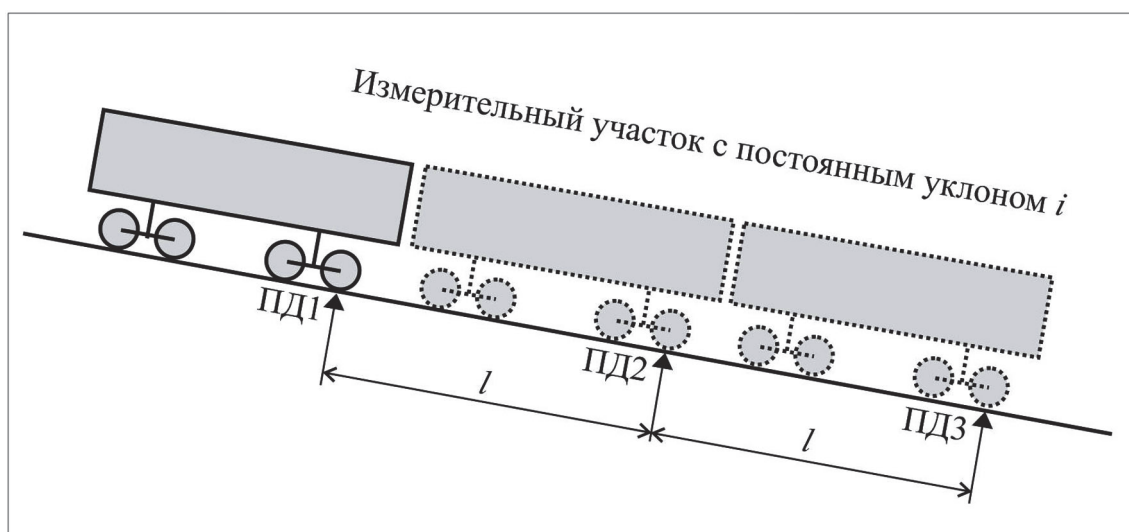


Рис. 4.1. Участок пути с постоянным уклоном для измерения ходового сопротивления отцепов «трехточечным» методом

Для измерения ускорения отцепа обычно используются специальные измерительные участки. Наибольшее распространение получил, так называемый «трехточечный» метод измерения ходового сопротивления отцепа (рис. 4.1). При использовании этого метода на прямолинейном участке с постоянным уклоном устанавливают три точечных путевых датчика на одинаковом расстоянии l друг от друга. Фиксируя моменты наезда переднего колеса отцепа на эти датчики, определяют времена t_1 и t_2 прохождения отцепом расстояния между

первым-вторым и вторым-третьим датчиками соответственно. Используя несложные выводы можно получить формулу вычисления ходового сопротивления отцепа:

$$W = i - 2l \frac{t_1 - t_2}{g' t_1 t_2 (t_1 + t_2)} 10^3. \quad (4.1)$$

Теоретические и экспериментальные исследования [91] показывают, что погрешности определения ходового сопротивления отцепа по (4.1) увеличиваются с увеличением уклона, на котором расположен измерительный участок, и с уменьшением размеров этого участка. Таким образом, целесообразно использовать участки измерения ходового сопротивления на малых уклонах и делать их достаточно большими (несколько десятков метров). Кроме того, целесообразно проводить измерения ходового сопротивления отцепа несколько раз по ходу его движения от вершины горки до остановки на путях накопления. Эта целесообразность диктуется, во-первых, тем, что в условиях невысокой точности измерения возможно повышение точности путем многократных измерений и, во-вторых, тем, что по ходу скатывания отцепа с горки его ходовое сопротивление меняется [114]. Однако изготовление вдоль пути скатывания отцепа нескольких участков с постоянным уклоном сопряжено с рядом сложностей, не говоря уже о том, что профиль пути имеет тенденцию постепенно и самопроизвольно изменяться. Поэтому нужной представляется задача определения ходового сопротивления на измерительном участке с переменным (но известным профилем) с участками измерения произвольной (и также известной) длины (рис.4.0).

4.1.2. Измерение ходового сопротивления «трехточечным» методом на произвольном участке пути

Примем, что на участке измерения между первым и вторым путевыми точечными датчиками (ПД1 и ПД2 – первый участок) отцеп движется по постоянному уклону i_1 (реально – это средний уклон), а между вторым и третьим (ПД2 и ПД3 – второй участок) – по постоянному уклону i_2 . Тогда движение отцепа по измерительному участку может быть описано системой алгебраических уравнений:

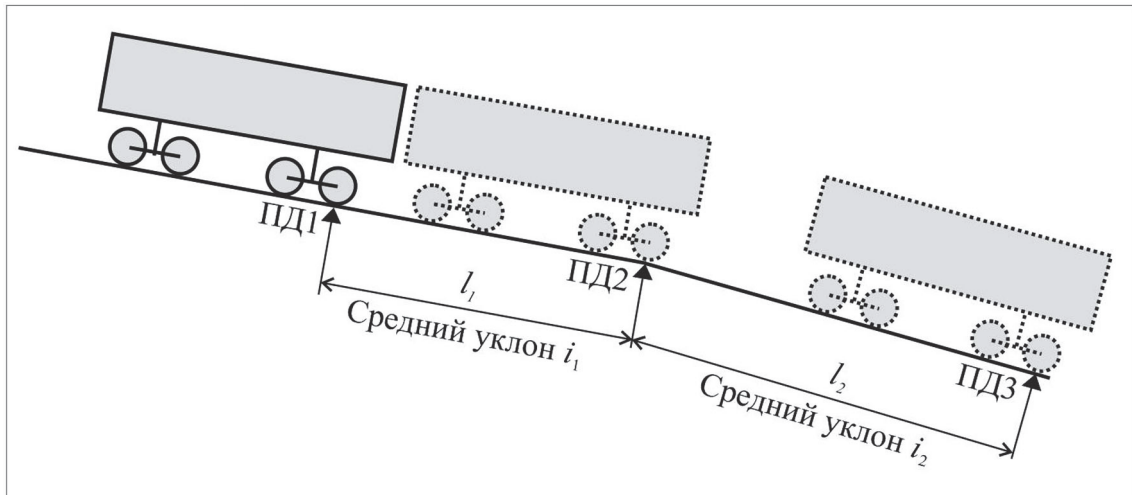


Рис. 4.2. Произвольный участок пути для измерения ходового сопротивления отцепов «трехточечным» методом

$$a_1 = g \cdot 10^{-3} (i_1 - W), \quad (4.4)$$

$$a_2 = g \cdot 10^{-3} (i_2 - W), \quad (4.5)$$

$$V_1 = V_0 + a_1 t_1, \quad (4.6)$$

$$V_2 = V_1 + a_2 t_2, \quad (4.7)$$

$$V_1^2 = V_0^2 + 2a_1 l_1, \quad (4.8)$$

$$V_2^2 = V_1^2 + 2a_2 l_2. \quad (4.9)$$

Здесь:

a_1 и a_2 – ускорение отцепа на первом и втором участках соответственно;

t_1 и t_2 – время движения отцепа по первому и второму участку соответственно;

V_0 – скорость входа отцепа на первый участок;

V_1 – скорость входа отцепа на второй участок;
 V_2 – скорость выхода отцепа со второго участка.
 Решая данную систему уравнений, получим:

$$W = 2 \frac{(l_1 t_2 - l_2 t_1) 10^3}{g' t_1 t_2 (t_1 + t_2)} + \frac{i_1 t_1 + i_2 t_2}{t_1 + t_2}. \quad (4.10)$$

Видно, что для случая $i_1 = i_2 = i$ и $l_1 = l_2 = l$ формула (4.10) преобразуется в формулу (4.3).

Очевидно, что и в (4.3), и в (4.10) W – это суммарное ходовое сопротивление отцепа, включающее в себя как основное ходовое сопротивление, которое необходимо идентифицировать, так и остальные составляющие. Если предположить, что измерение ходового сопротивления производится на прямом участке пути между стрелками, то в качестве «остальных составляющих» необходимо учитывать лишь сопротивление от воздушной среды-ветра. Рассмотрим случай отсутствия ветра. В этом случае

$$W_{\text{св}} = kV^2. \quad (4.11)$$

Учитывая то, что изменение скорости в пределах измерительного участка незначительно, можно записать:

$$W_{\text{св}} = kV_{\text{ср}}^2 = k \left(\frac{V_0 + V_2}{2} \right)^2, \quad (4.12)$$

где $V_{\text{ср}}$ – среднее значение скорости на участке измерения,

k – коэффициент воздушного сопротивления, определяемый типом отцепа.

Из системы уравнений (4.4)...(4.9) можно найти:

$$V_0 = \frac{l_1}{t_1} - \frac{g' 10^{-3} (i_1 - W) t_1}{2}, \quad (4.13)$$

$$V_2 = \frac{l_1}{t_1} + \frac{g' 10^{-3} (i_1 - W) t_1}{2} + g' 10^{-3} (i_2 - W) t_2. \quad (4.14)$$

Эти данные можно использовать для уточнения результатов работы второй, третьей и четвертой (при наличии таковой) тормозной позиций в случае использования точечных путевых датчиков на спускной части горки и на путях накопления.

4.2. Использование метода статистических решений для повышения точности оценки идентификация ходового сопротивления отцепа

4.2.1. Постановка задачи

Как известно, точность определения основного сопротивления W движению отцепов существенно влияет на показатели качества автоматизированного процесса расформирования составов на сортировочных горках, в частности, на длины «окон» и скорости соударения отцепов. В автоматизированных системах управления принят способ определения W для коротких одно-, двухвагонных отцепов на основе измерения их ускорения на специальных измерительных участках на спускной части горки. По результатам этих измерений может быть рассчитано значение W_1 основного сопротивления на спускной части горки. Значение W_2 на сортировочном пути может прогнозироваться [114] с учетом изменения основного сопротивления движению по мере скатывания отцепа с горки.

Теоретические исследования [91,121] и натурные испытания [93,114] показывают, что погрешности определения этим способом величины W оказываются весьма значительными. В большинстве работ, посвященных этому вопросу, рассматривается возможность повышения точности оценки W либо за счет совершенствования технических средств измерения ускорения отцепов, либо путем изменения технической структуры системы.

Очевидно, что определенный резерв повышения точности оценки величины W представляет априорная информация о среднем значении m_w основного сопротивления движению отцепов данного типа.

Значения m_W для отцепов различных весовых категорий с разными типами буксового узла и при разных значениях температуры, установленные на основе многочисленных опытов, имеются в [114]. Задача состоит в выборе соотношения, в соответствии с которым можно получить наиболее достоверную оценку W^* основного сопротивления движению отцепа, используя значение m_W и величину W_n , определенную на основе измерений и прогнозирования. Задачи такого типа рассматриваются в теории статистических решений [126]. Согласно принятой в [126] терминологии зависимость вида $W^*=F(W_n)$ называется решающей функцией. Понимая под достоверной оценкой наиболее вероятное значение W , придем к критерию оптимальности решающей функции, называемому критерием максимума апостериорной вероятности, который формально может быть записан в виде выражения

$$W^* \rightarrow \max \{f(W/W_n)\}. \quad (4.15)$$

Согласно [126] функция распределения апостериорной вероятности $f(W/W_n)$ может быть выражена формулой:

$$f(W/W_n) = \frac{\phi(W)\phi(W_n/W)}{\psi(W_n)} \quad (4.16)$$

через априорные функции распределения фактического и оценочного значений основного сопротивления движению (соответственно $\phi(W)$ и $\psi(W_n)$) и функцию распределения $f(W/W_n)$ (функцию правдоподобия).

Как уже указывалось, характеристики функции $\phi(W)$ (математическое ожидание m_W и среднее квадратическое отклонение σ_W) установлены для отцепов различных типов экспериментально. Характеристики распределений $\psi(W_n)$ и $f(W/W_n)$ могут быть установлены, если известны параметры функции $f(\Delta W)$ оценки W_n . При этих условиях задача сводится к отысканию на основе (4.16) функции $W^*=F(W_n)$, удовлетворяющей условию (4.15).

4.2.2. Определение решающей функции

Рассмотрим случай, когда распределения $\varphi(W)$ и $f(\Delta W)$ нормальны, причем $m_{\Delta W}=0$, а значение $\sigma_{\Delta W}$ не зависит от W . Тогда функции распределения $\varphi(W)$, $\psi(W_n)$ и $f(W/W_n)$ могут быть заданы формулами:

$$f(W) = \frac{1}{\sigma_W \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(m_W - W)^2}{2\sigma_W^2} \right\}, \quad (4.17)$$

$$\psi(W_n) = \frac{1}{\sigma_{W_n} \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(m_{W_n} - W_n)^2}{2\sigma_{W_n}^2} \right\}, \quad (4.18)$$

$$\varphi(W_n/W) = \frac{1}{\sigma_{\Delta W} \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(W_n - W)^2}{2\sigma_{\Delta W}^2} \right\}, \quad (4.19)$$

где m_W и σ_W – соответственно математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение величины W отцепов данного типа;

m_{W_n} и σ_{W_n} – соответственно математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение величины W_n отцепов данного типа, причем

$$m_{W_n} = m_W; \quad (4.20)$$

$$\sigma_{W_n} = \sqrt{\sigma_W^2 + \sigma_{\Delta W}^2}; \quad (4.21)$$

$\sigma_{\Delta W}$ – среднее квадратическое отклонение погрешности ΔW оценки W_n .

Подставив формулы (4.17), (4.18), (4.19) в (4.16) и выполнив необходимые преобразования, получим:

$$\varphi(W/W_n) = \frac{1}{\frac{\sigma_W \sigma_{\Delta W}}{\sqrt{\sigma_W^2 + \sigma_{\Delta W}^2}} \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ - \frac{\left(W - \frac{(\sigma_W^2 W_n + \sigma_{\Delta W}^2 m_W)}{\sigma_W^2 + \sigma_{\Delta W}^2} \right)^2}{2 \frac{\sigma_W^2 \sigma_{\Delta W}^2}{\sigma_W^2 + \sigma_{\Delta W}^2}} \right\} \quad (4.22)$$

Как видно, распределение $\varphi(W/W_n)$ также нормальное с математическим ожиданием

$$M[\varphi(W/W_n)] = \frac{\sigma_W^2 W_n + \sigma_{\Delta W}^2 m_W}{\sigma_W^2 + \sigma_{\Delta W}^2} \quad (4.23)$$

и средним квадратическим отклонением

$$\sigma[\varphi(W/W_n)] = \frac{\sigma_W \sigma_{\Delta W}}{\sqrt{\sigma_W^2 + \sigma_{\Delta W}^2}}. \quad (4.24)$$

Поскольку для нормального закона очевидно совпадение положения максимума функции и ее математического ожидания, оптимальную по критерию максимума апостериорной вероятности решающую функцию можно записать в виде

$$W^* = \gamma_W m_W + (1 - \gamma_W) W_n, \quad (4.25)$$

где

$$\gamma_W = \frac{\sigma_{\Delta W}^2}{\sigma_W^2 + \sigma_{\Delta W}^2}. \quad (4.26)$$

Таким образом, если принять гипотезу о нормальности распределения W и ΔW , оптимальной будет оценка W^* , полученная усреднением значений, определенных по результатам измерения (W_n) и на основе априорной информации (m_W). При этом значения весовых коэффициентов γ_W и $(1 - \gamma_W)$ зависят от соотношения σ_W и $\sigma_{\Delta W}$.

Отметим что согласно данным [114] распределения $\varphi(W)$ для разных типов отцепов действительно близки к нормальному. К сожалению, распределение $f(\Delta W)$ изучено значительно слабее. Практически в литературе отсутствуют данные о его характере. Гипотеза о нормальности этого распределения может основываться лишь на самых общих соображениях о том, что погрешность ΔW является следствием нескольких независимых случайных факторов.

Оговоримся, что при более сложном, чем рассмотренное выше, задании функции $f(\Delta W)$ получение решающей функции может быть выполнено численно.

4.2.3. Оценка эффективности предложенного способа

Прежде всего, отметим, что очевидно

$$\sigma_{W/W_{\Pi}} = \frac{\sigma_W \sigma_{\Delta W}}{\sqrt{\sigma_W^2 + \sigma_{\Delta W}^2}} < \sigma_W \quad (4.27)$$

и

$$\sigma_{W/W_{\Pi}} < \sigma_{\Delta W} \cdot \quad (4.28)$$

Уменьшение величины $\frac{\sigma_{W/W_{\Pi}}}{\sigma_{\Delta W}}$ при различных значениях σ_W показано на рис. 4.3.

Отметим, что формулы (4.25) и (4.26) могут быть использованы для повышения точности оценки идентификация не только ходового сопротивления, но и других параметров объекта и регулятора.

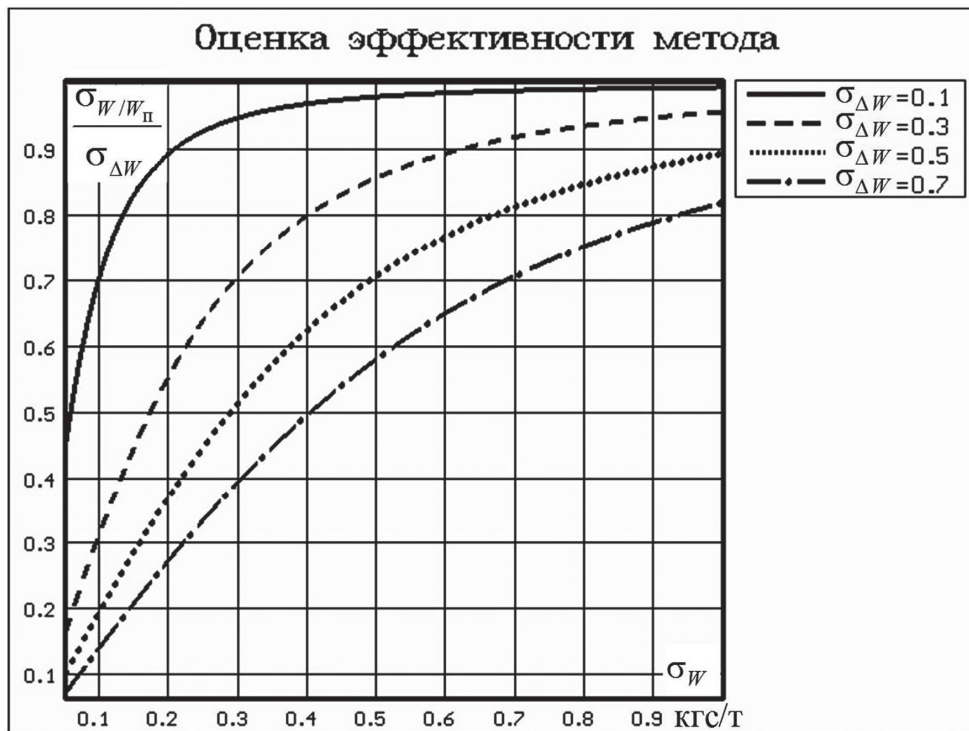


Рис. 4.3. Повышение точности оценки величины W при различных значениях ошибки прогнозирования.

4.3. Исследование точности измерения скорости и пути в цифровой системе управления скоростью отцепа

4.3.1. Принцип измерения скорости отцепа в цифровой системе управления

Во многих системах управления на сортировочной горке для измерения скоростей движущихся отцепов применяют радиолокационные скоростемеры (РЛС) [18,140]. В этих скоростемерах используется эффект Доплера. Выделенная разностная частота f , пропорциональная измеряемой скорости V , преобразуется встроенным в РЛС цифро-аналоговым преобразователем в напряжение U_f . Обычно у РЛС име-

ется также и частотный выход (рис. 4.4). Однако в большинстве систем АРС для ввода информации о скорости отцепа используется аналоговый выход РЛС, сигнал с которого через аналого-цифровой преобразователь вводят в ЭВМ. Недостатком такого подхода является использование двойного преобразования ЦАП-АЦП, что приводит, во-первых, к увеличению ошибки измерения и, во-вторых, к увеличению времени запаздывания.

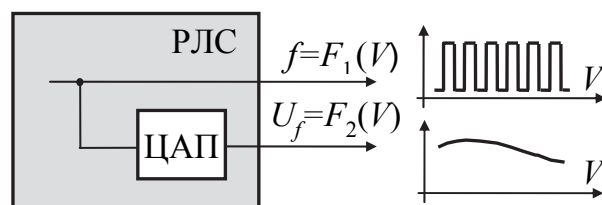


Рис. 4.4. Выходы РЛС

В разработанной автором системе АРС для ввода информации о скорости отцепа используется частотный выход РЛС, сигнал с которого через модуль ввода частотных сигналов поступает в ЭВМ (рис. 4.5).

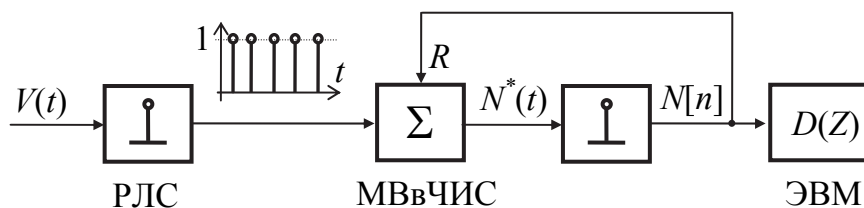


Рис. 4.5. Структурная схема измерителя скорости

Частотный сигнал с выхода РЛС можно представить как совокупность единичных значений решетчатой функции $1(t)$ с переменным периодом следования. Эти сигналы суммируются в модуле ввода числоимпульсных сигналов МВвЧИС, который на структурной схеме представлен в виде сумматора. Содержание МВвЧИС вводится в ЭВМ как цифровое значение с постоянным периодом T , равным периоду выдачи управляющих сигналов на замедлитель. Обработывающая программа сбрасывает содержимое МВвЧИС сигналом R (временем обработки в ЭВМ мы пренебрегаем). Таким образом, в течение периода T в сумматоре (МВвЧИС) накапливается количество импульсов N , пропорциональное частоте f сигналов скорости движения отцепа:

$$N = f \cdot T. \quad (4.29)$$

А так как скорость отцепа V пропорциональна доплеровской частоте ($V=kf$), то по количеству импульсов N , поступивших в сумматор за время T можно определить скорость:

$$V_{\text{изм}} = \frac{k \cdot N}{T}. \quad (4.30)$$

4.3.2. Исследование ошибки квантования по уровню

При вышеописанном способе измерения скорости возникает погрешность (рис. 4.6), связанная с квантованием по уровню (вводить в ЭВМ можно только целое число N).

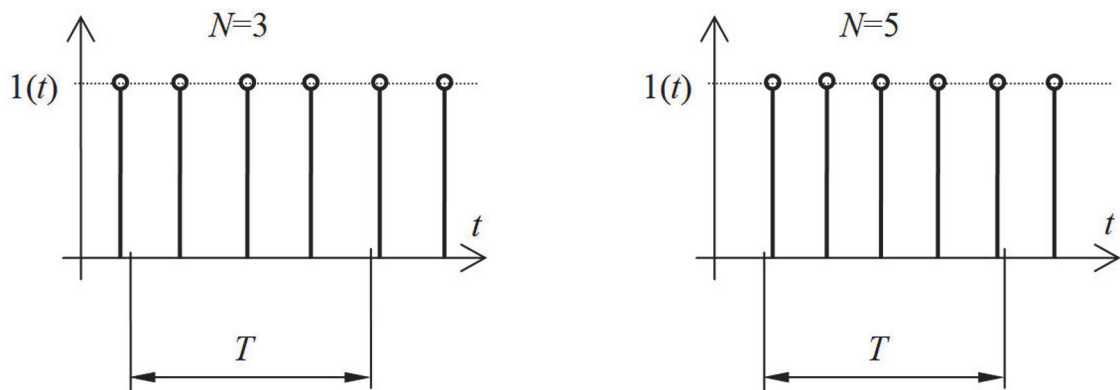


Рис. 4.6. Погрешность квантования по уровню.

Если измеренное значение скорости определяется формулой (4.30), то фактическое значение скорости V_{ϕ} равно:

$$V_{\phi} = k \frac{N + \delta_{\text{п}}}{T}. \quad (4.31)$$

где $\delta_{\text{п}}$ – дробная часть суммарного количества периодов доплеровского сигнала f за время T .

Из рис. 4.6 видно, что $-1 < \delta_{\Pi} < 1$. Можно предположить, что δ_{Π} случайная величина, распределённая по равномерному закону:

$$\varphi(\delta_{\Pi}) = \begin{cases} \frac{1}{2} & \text{при } -1 \leq \delta_{\Pi} \leq 1; \\ 0 & \text{при } \delta_{\Pi} < -1 \text{ или } \delta_{\Pi} > 1; \end{cases} \quad (4.32)$$

с математическим ожиданием равным нулю и дисперсией

$$D_{\delta} = \int_{-1}^{+1} \delta_{\Pi}^2 \cdot \varphi(\delta_{\Pi}) d\delta_{\Pi} = \int_{-1}^{+1} \frac{\delta_{\Pi}^2}{2} d\delta_{\Pi} = \frac{1}{3}. \quad (4.33)$$

Полагая, что значения δ_{Π} в каждом такте опроса МВвЧИС независимы, найдём [9] корреляционную функцию $K_{\delta}[m]$ и спектральную плотность $S_{\delta}(z)$ шума квантования по уровню:

$$K_{\delta}[m] = K[0] \cdot \delta_0[m] = D_{\delta} \cdot \delta_0[m] = \frac{1}{3} \cdot \delta_0[m], \quad (4.34)$$

$$S_{\delta}(z) = D_{\delta} = \frac{1}{3}. \quad (4.35)$$

Здесь $\delta_0[m]$ – единичная импульсная функция, равная единице при $m=0$ и равная нулю при $m \neq 0$.

Таким образом, в подсистеме измерения скорости (рис. 4.4) эффект квантования по уровню можно учитывать в виде шума $\delta_{\Pi}(t)$, корреляционная функция и спектральная плотность которого определяются формулами (4.33)...(4.34).

Абсолютная погрешность измерения скорости, связанная с квантованием по уровню:

$$\delta_V^{\text{абс}} = V_{\text{изм}} - V_{\phi} = k \frac{\delta_{\Pi}}{T}, \quad (4.36)$$

также случайная величина, распределённая по равномерному закону:

$$\varphi(\delta_V^{abc}) = \begin{cases} \frac{k}{2T} & \text{при } -\frac{k}{T} \leq \delta_V^{abc} \leq \frac{k}{T}; \\ 0 & \text{при } \delta_V^{abc} < -\frac{k}{T} \text{ или } \delta_V^{abc} > \frac{k}{T}; \end{cases} \quad (4.37)$$

с математическим ожиданием равным нулю и максимальным значением

$$|\delta_V^{abc}|_{\max} = k \frac{|\delta_{\Pi}|_{\max}}{T}. \quad (4.38)$$

На рис. 4.7 показана зависимость максимальной абсолютной ошибки измерения скорости, вызванной квантования по уровню, от периода квантования по времени T при $k=0,004$ (паспортное значение РИС 4В).

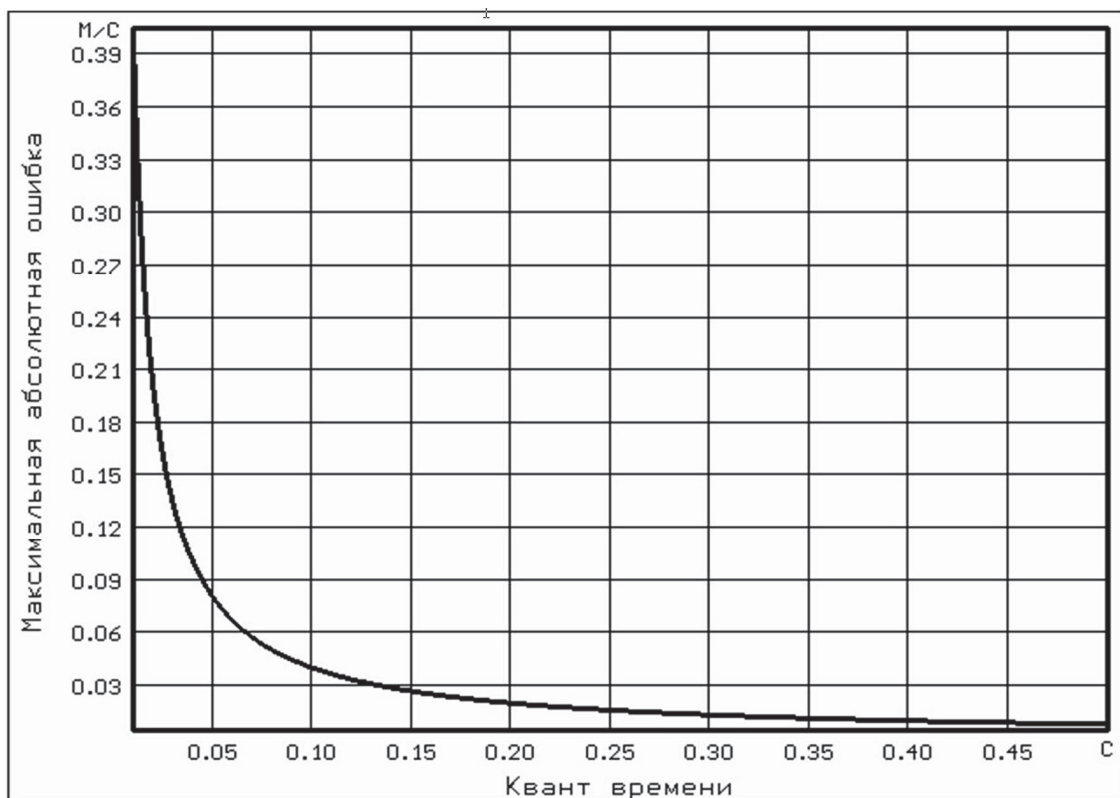


Рис. 4.7. Зависимость максимальной абсолютной ошибки измерения скорости от периода квантования по времени.

Зависимость относительной погрешности измерения скорости, вызванной квантованием по уровню, от фактического значения скорости для различных значений кванта времени T показана на рис. 4.8.

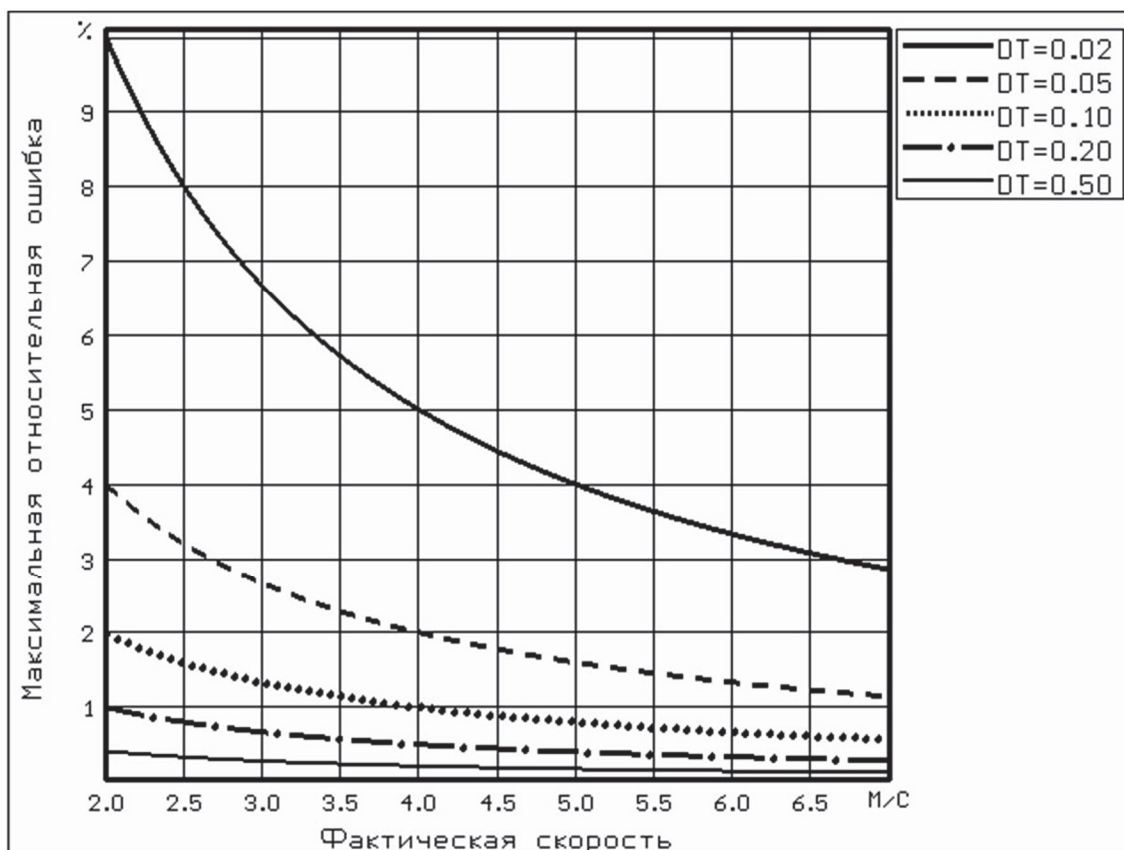


Рис. 4.8. Зависимость максимальной относительной ошибки измерения скорости от фактического значения скорости для различных периодов квантования T

4.3.3. Выбор разрядности счётчика МВВЧИС

Необходимое количество разрядов $R_{сч}$ счётчика МВВЧИС определяется максимальным количеством N_{max} периодов доплеровской частоты за период опроса T :

$$R_{сч} = E \{ \log_2(N_{max}) \}, \quad (4.39)$$

где $E \{ \alpha \}$ – округлённое до ближайшего большего целого значение α .
Из (4.39) следует:

$$N_{\max} = \frac{V_{\max}}{T}. \quad (4.40)$$

Зависимость N_{\max} от V_{\max} для некоторых значений T показана на рис. 4.9.

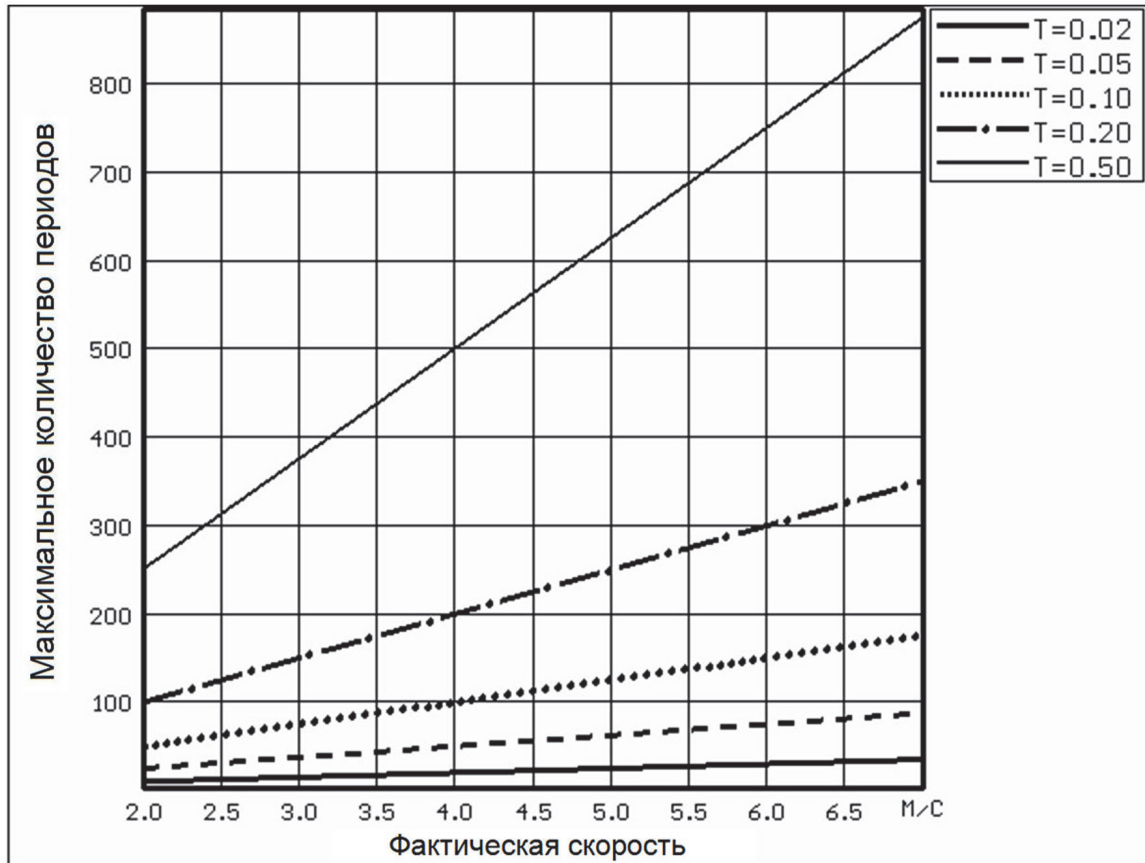


Рис. 4.9. Зависимость максимального количества периодов доплеровской частоты от фактического значения скорости для различных периодов квантования T

Из (4.40) и рис. 4.9 видно, что при периоде квантования $T \leq 0,1$ с для реального диапазона измеряемых в тормозной позиции скоростей отцепов достаточно счётчика разрядностью в один байт.

4.3.4. Идентификация пути, пройденного отцепом

Путь, пройденный отцепом, может быть определён путём суммирования отдельных отрезков пути, пройденных за период T квантования:

$$S_{\text{изм}} = \sum_{i=1}^r \Delta S_{\text{изм}_i}, \quad (4.41)$$

где r – количество периодов квантования, в течение которых производится измерение пути.

Величина измеренного значения отрезка пути может быть определена по формуле:

$$\Delta S_{\text{изм}} = V_{\text{изм}} \cdot T = k \cdot N. \quad (4.42)$$

$$\Delta S_{\phi} = V_{\phi} \cdot T = k(N + \delta_{\Pi}). \quad (4.43)$$

Абсолютная ошибка измерения кванта пути:

$$\delta_{\Delta S} = k \cdot \delta_{\Pi}. \quad (4.44)$$

Это случайная величина. Так как мы предположили, что δ_{Π} случайная величина с равномерным законом распределения (4.31), то $\delta_{\Delta S}$ также случайная величина с равномерным законом распределения, нулевым математическим ожиданием и средним квадратическим отклонением

$$\sigma[\delta_{\Delta S}] = k \cdot \sigma_{\delta_{\Pi}} = k \cdot \frac{|\beta - \alpha|}{2\sqrt{3}} = \frac{k}{\sqrt{3}}, \quad (4.45)$$

где α и β – границы закона распределения δ_{Π} , равные соответственно -1 и $+1$.

Очевидно, что абсолютная ошибка измерения пути

$$\delta_S = \sum_{i=1}^r \delta_{\Delta S_i} = \sum_{i=1}^r k \cdot \delta_{\pi_i} = k \sum_{i=1}^r \delta_{\pi_i}. \quad (4.46)$$

Так как величина r достаточно велика и можно предположить приблизительно равномерное малое влияние каждого из случайных слагаемых δ_{π_i} на сумму (4.46), то вследствие центральной предельной теоремы [21] величина δ_S является случайной величиной распределённой по нормальному закону. По теореме о числовых характеристиках

$$M[\delta_S] = \sum_{i=1}^r M_i[\delta_{\Delta S}] = 0, \quad (4.47)$$

$$\sigma[\delta_S] = \sqrt{\sum_{i=1}^r (\sigma_i[\delta_{\Delta S}])^2} = \sqrt{r \cdot (\sigma[\delta_{\Delta S}])^2} = \sqrt{r} \cdot \sigma[\delta_{\Delta S}]. \quad (4.48)$$

Для оценочных расчётов можно считать, что количество квантов измерения r вычисляется по формуле:

$$r = \frac{t_{\Sigma}}{T} = \frac{S/V_{\text{cp}}}{T}, \quad (4.49)$$

где t_{Σ} – суммарное время нахождения отцепа в тормозной позиции,
 S – путь, пройденный отцепом за это время,
 V_{cp} – средняя скорость отцепа на этом участке пути.

Подставляя (4.45) и (4.49) в (4.48) найдём:

$$\sigma[\delta_S] = k \cdot \sqrt{\frac{S}{3 \cdot V_{\text{cp}} \cdot T}}. \quad (4.50)$$

Зависимости $\sigma[\delta_S] = F(S)$ для некоторых характерных значений V_{cp} приведены на рис. 4.10...4.12.

Зависимости, представленные на рис. 4.10...4.12 показывают, что средняя квадратическая ошибка измерения пути, вызванная кванто-

ванием по уровню, не превышает нескольких сантиметров в диапазоне реальных значений длин оцепов и скоростей их движения на участке торможения.

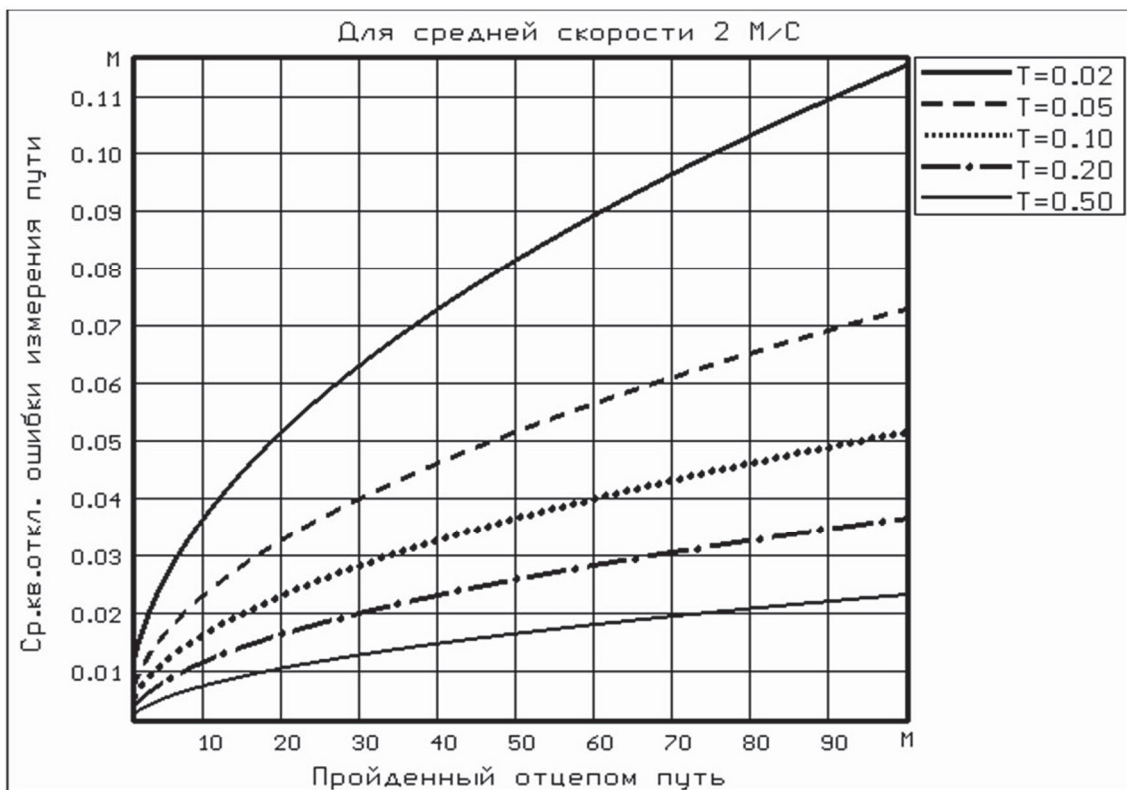


Рис. 4.10. Зависимость $\sigma[\delta_S] = F(S)$ для $V_{cp} = 2 \text{ м/с}$

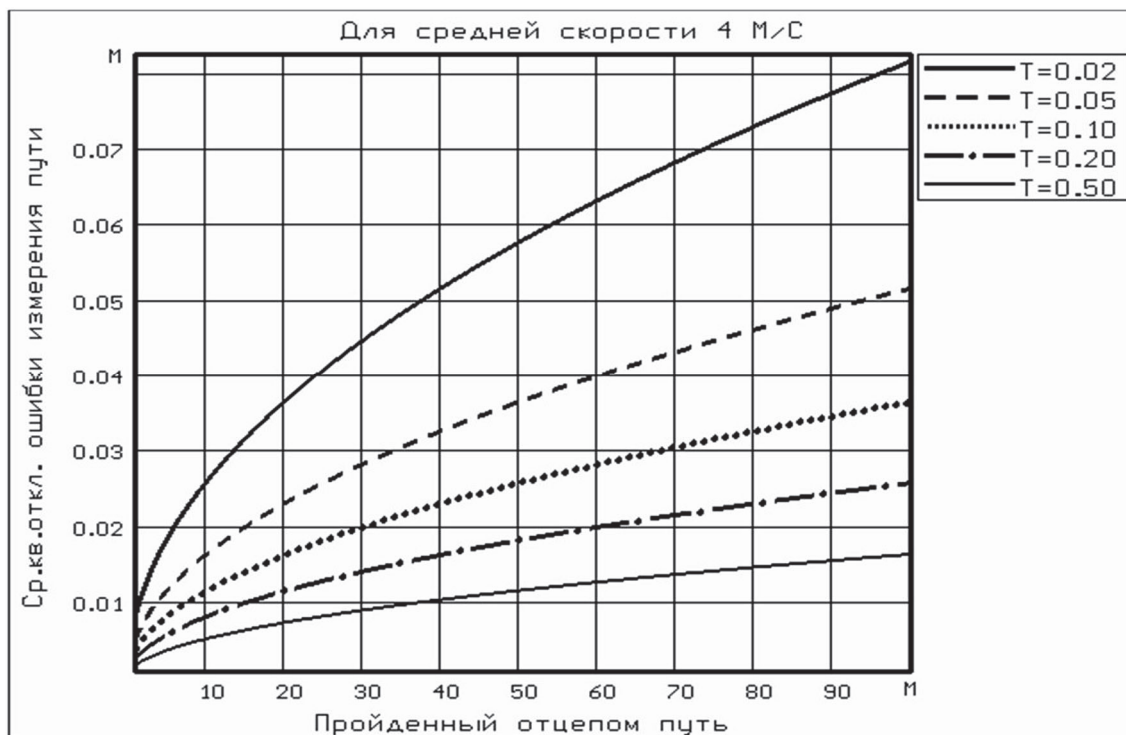


Рис. 4.11. Зависимость $\sigma[\delta_S] = F(S)$ для $V_{cp}=4\text{м/с}$

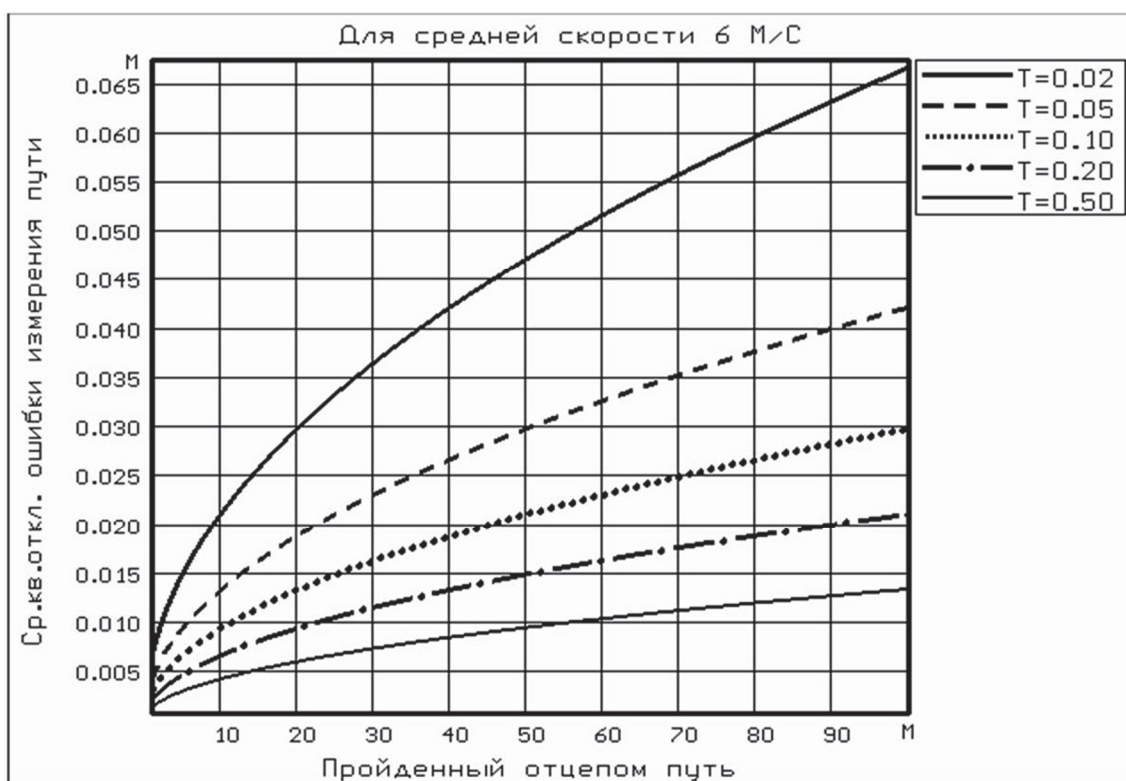


Рис. 4.12. Зависимость $\sigma[\delta_S] = F(S)$ для $V_{cp}=6\text{м/с}$

Совершенствование методов расчёта задающих воздействий в системах АРС на сортировочной горке

5.1. Математическая модель движения отцепа с учетом влияния воздушной среды

Как известно, дифференциальное уравнение скатывания отцепа с горки в общем виде имеет вид:

$$m \frac{d^2 S}{dt^2} = \sum_k F_k \quad (5.1)$$

при начальных условиях: $S(t_0) = S_0$; $\dot{S}(t_0) = V(t_0) = V_0$,

где m – масса отцепа;

S – пройденный путь;

$\sum_k F_k$ – сумма сил, действующих на отцеп.

В главах 2 и 3 анализировалась эта формула, с учетом торможения отцепа в замедлителях тормозной позиции. При свободном скатывании из суммы сил, действующих на отцеп, исключается сила от действия замедлителей, но больший удельный вес приобретают и требуют учета другие силы: от стрелок, от кривых, от ударов на стыках, от действия воздушной среды и ветра.

Рассмотрим частный случай дифференциального уравнения (5.1) при движении отцепа на прямолинейном участке с постоянным укло-

ном i (типичный случай – движение отцепа на путях накопления).
Уравнение (5.1) с учетом замечаний гл. 2 примет вид:

$$\frac{d^2S}{dt^2} = g'(i - W_0 - W_{CB}) \cdot 10^{-3}, \quad (5.2)$$

где W_0 – основное сопротивление движению отцепа;

W_{CB} – сопротивление среды, ветра.

Известно [114], что аэродинамическое сопротивление движению прямо пропорционально квадрату скорости движения и площади сечения, перпендикулярной относительно вектора скорости отцеп-воздушная среда. Рассмотрим вначале частный случай – отсутствия ветра:

$$W_{CB} = K\dot{S}^2 = KV^2, \quad (5.3)$$

где V – скорость движения отцепа;

K – коэффициент сопротивления воздушной среды, определяемый поперечным сечением отцепа.

Выделив в уравнении (5.2) независимые элементы

$$c_1 = g' \cdot (i - W_0) \cdot 10^{-3}, \quad (5.4)$$

$$c_2 = g' \cdot K \cdot 10^{-3}, \quad (5.5)$$

получим

$$\frac{dV}{dt} = c_1 - c_2V^2. \quad (5.6)$$

Учитывая, что $dt = \frac{dS}{V}$, уравнение (5.6) можно записать как

$$\frac{dV}{dS} = \frac{c_1 - c_2V^2}{V}, \quad (5.7)$$

или

$$\frac{VdV}{c_1 - c_2V^2} - dS = 0. \quad (5.8)$$

Интегрируя (5.8), получаем

$$\int_{V_0}^V \frac{VdV}{c_1 - c_2V^2} - \int_{S_0}^S dS = 0. \quad (5.9)$$

Взяв определенные интегралы, получаем алгебраическое уравнение

$$-\frac{1}{2c_2} \ln \frac{V^2 - c_1/c_2}{V_0^2 - c_1/c_2} - (S - S_0) = 0. \quad (5.10)$$

Решая уравнение (5.10), получим:

$$V = \sqrt{\left(V_0^2 - \frac{c_1}{c_2}\right) \cdot e^{-2c_2(S-S_0)} + \frac{c_1}{c_2}}, \quad (5.11)$$

или, подставляя в (5.11) значения c_1 и c_2 , окончательно получим:

$$V(S) = \sqrt{\left(V_0^2 - \frac{i - W_0}{K}\right) \cdot e^{-2g'K(S-S_0) \cdot 10^{-3}} + \frac{i - W_0}{K}}. \quad (5.12)$$

Для нахождения $V(t)$ представим уравнение (5.6) в виде:

$$\frac{dV}{c_1 - c_2V^2} - dt = 0 \quad (5.13)$$

и проинтегрируем его:

$$\int_{V_0}^V \frac{dV}{c_1 - c_2V^2} - \int_{t_0}^t dt = 0. \quad (5.14)$$

Для случая $c_1 > 0$ (или $i > W_0$) в результате интегрирования получаем алгебраическое уравнение:

$$\frac{1}{2\sqrt{c_1 c_2}} \cdot \left(\ln \frac{\sqrt{c_1} + V\sqrt{c_2}}{\sqrt{c_1} - V\sqrt{c_2}} - \ln \frac{\sqrt{c_1} + V_0\sqrt{c_2}}{\sqrt{c_1} - V_0\sqrt{c_2}} \right) - (t - t_0) = 0. \quad (5.15)$$

Решением этого уравнения является:

$$V(t) = \frac{\left(\sqrt{\frac{c_1}{c_2}} + V_0 \right) \cdot e^{2\sqrt{c_1 c_2}(t-t_0)} - \left(\sqrt{\frac{c_1}{c_2}} - V_0 \right)}{\left(1 + \sqrt{\frac{c_2}{c_1}} \cdot V_0 \right) \cdot e^{2\sqrt{c_1 c_2}(t-t_0)} + \left(1 - \sqrt{\frac{c_2}{c_1}} \cdot V_0 \right)}, \quad (5.16)$$

или, подставляя значения c_1, c_2 :

$$V(t) = \frac{\left(\sqrt{\frac{i - W_0}{K}} + V_0 \right) \cdot e^{2g'10^{-3}\sqrt{K(i-W_0)}(t-t_0)} - \left(\sqrt{\frac{i - W_0}{K}} - V_0 \right)}{\left(1 + \sqrt{\frac{K}{i - W_0}} \cdot V_0 \right) \cdot e^{2g'10^{-3}\sqrt{K(i-W_0)}(t-t_0)} + \left(1 - \sqrt{\frac{K}{i - W_0}} \cdot V_0 \right)}. \quad (5.17)$$

Выделим в выражении (5.17) элементы, не зависящие от времени:

$$r_1 = \sqrt{\frac{i - W_0}{K}} + V_0; \quad (5.18)$$

$$r_2 = 1 + \sqrt{\frac{K}{i - W_0}} \cdot V_0; \quad (5.19)$$

$$r_3 = \sqrt{\frac{i - W_0}{K}} - V_0; \quad (5.20)$$

$$r_4 = 1 - \sqrt{\frac{K}{i - W_0}} \cdot V_0; \quad (5.21)$$

$$r_5 = 2g' \cdot 10^{-3} \sqrt{K(i - W_0)}. \quad (5.22)$$

Выражение (5.17) примет вид:

$$V(t) = \frac{r_1 \cdot e^{r_5(t-t_0)} - r_3}{r_2 \cdot e^{r_5(t-t_0)} + r_4}. \quad (5.23)$$

Для отыскания $S(t)$ выполним очевидное преобразование:

$$S(t) = S(t_0) + \int_{t_0}^t V(t) dt = S(t_0) + \int_0^z V(z) dz, \quad (5.24)$$

где $z = t - t_0$.

Так как в последующем нам понадобятся результаты промежуточных расчетов, процесс вычисления интеграла из (5.20) приведем более подробно.

$$I = \int_0^z V(z) dz = \int_0^z \frac{r_1 \cdot e^{r_5 z} - r_3}{r_2 \cdot e^{r_5 z} + r_4} dz = r_1 I_1 - r_3 I_2, \quad (5.25)$$

где

$$I_1 = \int_0^z \frac{e^{r_5 z}}{r_2 \cdot e^{r_5 z} + r_4} dz = \frac{1}{r_2 r_5} \ln(r_4 + r_2) \cdot e^{r_5 z} \Big|_0^z; \quad (5.26)$$

$$I_2 = \int_0^z \frac{dz}{r_2 \cdot e^{r_5 z} + r_4} = \frac{z}{z_4} - \frac{1}{r_4 r_5} \ln(r_4 + r_2 \cdot e^{r_5 z}) \Big|_0^z. \quad (5.27)$$

Выполнив необходимые преобразования, получим:

$$S(t) = S(t_0) + \frac{1}{r_5} \cdot \left(\frac{r_1}{r_2} + \frac{r_3}{r_4} \right) \cdot \ln \frac{r_4 + r_2 \cdot e^{r_5(t-t_0)}}{r_4 + r_2} - \frac{r_3}{r_4} (t - t_0). \quad (5.28)$$

Формулы (5.17) и (5.28) получены для случая $c_1 > 0$ ($i > W_0$).

Для случая $i < W_0$ обозначим

$$c_3 = g'(W_0 - i) \cdot 10^{-3}, \quad (c_3 > 0). \quad (5.29)$$

При этом дифференциальное уравнение скатывания приобретает вид:

$$\frac{dV}{c_3 + c_2 V^2} + dt = 0. \quad (5.30)$$

Проинтегрируем это дифференциальное уравнение:

$$\int_{V_0}^V \frac{dV}{c_3 + c_2 V^2} + \int_{t_0}^t dt = 0. \quad (5.31)$$

Взяв интегралы, которые являются табличными, получаем алгебраическое уравнение:

$$\frac{1}{\sqrt{c_3 c_2}} \left[\operatorname{arctg} \left(V \sqrt{\frac{c_2}{c_3}} \right) - \operatorname{arctg} \left(V_0 \sqrt{\frac{c_2}{c_3}} \right) \right] + (t - t_0) = 0. \quad (5.32)$$

Решением этого уравнения является:

$$V(t) = \sqrt{\frac{c_3}{c_1}} \cdot \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg} \left(V_0 \sqrt{\frac{c_2}{c_3}} \right) - (t - t_0) \sqrt{c_2 c_3} \right], \quad (5.33)$$

или, подставляя значения c_2 и c_3 :

$$V(t) = \sqrt{\frac{W_0 - i}{K}} \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg} \left(V_0 \sqrt{\frac{K}{W_0 - i}} \right) - (t - t_0) g' 10^{-3} \sqrt{K(W_0 - i)} \right]. \quad (5.34)$$

Другая форма:

$$V(t) = \frac{V_0 - \sqrt{\frac{W_0 - i}{K}} \cdot \operatorname{tg} \left[(t - t_0) g' 10^{-3} \sqrt{K(W_0 - i)} \right]}{1 + V_0 \sqrt{\frac{K}{W_0 - i}} \cdot \operatorname{tg} \left[(t - t_0) g' 10^{-3} \sqrt{K(W_0 - i)} \right]}. \quad (5.35)$$

Для поиска $S(t)$ интегрируем функцию $V(t)$ аналогично (5.23). При этом $V(t)$ представим в виде:

$$V(t) = r_6 \cdot \operatorname{tg}[r_7 - r_8(t - t_0)], \quad (5.36)$$

где

$$r_6 = \sqrt{\frac{c_3}{c_2}} = \sqrt{\frac{W_0 - i}{K}}; \quad (5.37)$$

$$r_7 = \operatorname{arctg} \left(V_0 \sqrt{\frac{c_2}{c_1}} \right) = \operatorname{arctg} \left(V_0 \sqrt{\frac{K}{W_0 - i}} \right); \quad (5.38)$$

$$r_8 = \sqrt{c_2 c_3} = g' \cdot 10^{-3} \sqrt{K(W_0 - i)}. \quad (5.39)$$

Интеграл

$$I = \int_{t_0}^t r_6 \cdot \operatorname{tg}[r_7 - r_8(t - t_0)] dt \quad (5.40)$$

приводится к табличному виду путем замены переменных:

$$z = t - t_0; \quad (5.41)$$

$$r_7 - r_8 z = \theta; \quad z = \frac{r_7 - \theta}{r_8}; \quad (5.42)$$

$$-r_8 dz = d\theta; \quad dz = -\frac{d\theta}{r_8}. \quad (5.43)$$

После чего интеграл (5.40) приобретает вид

$$I = - \int_{r_7}^{r_7 - r_8 z} \operatorname{tg} \theta d\theta = \frac{r_7}{r_8} \cdot \ln(\cos \theta) \Big|_{r_7}^{r_7 - r_8 z}, \quad (5.44)$$

а зависимость пути от времени:

$$S(t) = S(t_0) + \frac{r_7}{r_8} \cdot \left\{ \ln \left[\cos(r_7 - r_8(t - t_0)) \right] - \ln(\cos r_7) \right\}, \quad (5.45)$$

или

$$S(t) = S(t_0) + \frac{r_7}{r_8} \cdot \ln \frac{\cos[r_7 - r_8(t - t_0)]}{\cos r_2}. \quad (5.46)$$

В более общем случае дифференциальное уравнение скатывания имеет вид:

$$\frac{d^2 S}{dt^2} = g' \cdot [i - W_0 - K \cdot \operatorname{sign}(V \pm V_B) \cdot (V \pm V_B)^2] \cdot 10^{-3}, \quad (5.47)$$

при начальных условиях: $S(t_0) = S_0$; $\dot{S}(t_0) = V(t_0) = V_B$, где V_B – скорость ветра.

Вообще говоря, в самом общем случае удельное сопротивление скатыванию от воздушной среды и ветра W_{CB} (в формуле (5.47) эта величина представлена выражением $K \cdot \operatorname{sign}(V \pm V_B) \cdot (V \pm V_B)^2$) определяется следующим образом:

$$W_{CB} = K \cdot \vec{V}_{от}^2, \quad (5.48)$$

где $\vec{V}_{от}$ – относительная скорость «отцеп-воздух» с учетом направления:

$$V_{от}^2 = V^2 + V_B^2 + 2 \cdot V \cdot V_B \cdot \cos(\alpha), \quad (5.49)$$

$$\alpha = \arcsin \frac{V_B \cdot \sin(\beta)}{V}, \quad (5.50)$$

β – угол между направлением ветра и осью участка пути.

При $\beta < \pm 30^\circ$ в горочных расчетах допускается использовать формулу

$$V_{от} = V \pm V_B, \quad (5.51)$$

которая и приводит к (5.47).

Попытка решить уравнение (5.47) была предпринята В. А. Образцовым. В [87] приведено решение этого уравнения в виде:

$$-\frac{1}{2c_2} \cdot \ln \frac{(V \pm V_B)^2 - \frac{c_1}{c_2}}{(V_0 \pm V_B)^2 - \frac{c_1}{c_2}} \mp V_B \cdot \frac{1}{2\sqrt{c_1 c_2}} \times$$

$$\times \ln \frac{[\sqrt{c_1} + (V \pm V_B)\sqrt{c_2}] \cdot [\sqrt{c_1} - (V_0 \pm V_B)\sqrt{c_2}]}{[\sqrt{c_1} - (V \pm V_B)\sqrt{c_2}] \cdot [\sqrt{c_1} + (V_0 \pm V_B)\sqrt{c_2}]} = S - S_0, \quad (5.52)$$

где c_1, c_2 – определены в (5.4), (5.5).

Однако не представляется возможным получить в общем виде решение этого уравнения относительно V , поэтому практическое значение решения (5.52) невелико (что, впрочем, и указано в [87]).

Применим другой подход. Дифференциальное уравнение скатывания представим в виде:

$$\frac{dV}{dt} = c_1 - c_2(V \pm V_B^2), \quad (5.53)$$

где c_1, c_2 определены в (5.4), (5.5).

Рассмотрим случай $c_1 > 0$ ($i > W_0$).

Уравнение (5.44) представим в виде:

$$\frac{dV}{c_1 - c_2(V \pm V_B)^2} - dt = 0 \quad (5.54)$$

и проинтегрируем его:

$$\int_{V_0}^V \frac{dV}{c_1 - c_2(V \pm V_B)^2} - \int_{t_0}^t dt = 0. \quad (5.55)$$

Сделав замену переменных

$$V \pm V_B = Z; \quad Z_0 = V_0 \pm V_B; \quad dV = dZ, \quad (5.56)$$

получим

$$\int_{Z_0}^Z \frac{dZ}{c_1 - c_2 Z^2} - \int_{t_0}^t dt = 0. \quad (5.57)$$

Это уравнение по форме эквивалентно уравнению (5.14), но с другой переменной интегрирования – Z . Очевидно, что решение (5.52) относительно Z такое же, как (5.14) относительно V , а именно:

$$Z = \frac{r_1^* e^{r_3^*(t-t_0)} - r_3^*}{r_2^* e^{r_3^*(t-t_0)} + r_4^*}, \quad (5.58)$$

где

$$r_1^* = \sqrt{\frac{i - W_0}{K}} + (V_0 \pm V_B); \quad (5.59)$$

$$r_2^* = 1 + \sqrt{\frac{K}{i - W_0}} \cdot (V_0 \pm V_B); \quad (5.60)$$

$$r_3^* = \sqrt{\frac{i - W_0}{K}} - (V_0 \pm V_B); \quad (5.61)$$

$$r_4^* = 1 - \sqrt{\frac{K}{i - W_0}} \cdot (V_0 \pm V_B); \quad (5.62)$$

$$r_5^* = 2 \cdot g' \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{K(i - W_0)}. \quad (5.63)$$

Так как $Z = V \pm V_B$, то, выделяя V из (5.58), получим

$$V(t) = \frac{r_1^* e^{r_5^*(t-t_0)} - r_3^*}{r_2^* e^{r_5^*(t-t_0)} + r_4^*} \mp V_B. \quad (5.64)$$

Для случая $c_1 < 0$ ($i > W_0$) дифференциальное уравнение скатывания представим в виде:

$$\frac{dV}{c_3 + c_2(V \pm V_B)^2} + dt = 0, \quad (5.65)$$

где c_2, c_3 определены в (5.5) и (5.25).

Интегрируя это уравнение и делая замену переменной аналогично (5.55), (5.56), получим интегральное уравнение по форме аналогичное (5.31). Выделив V из решения, аналогичного (5.35), но относительно Z , получим:

$$V(t) = \frac{(V_0 \pm V_B) - \sqrt{\frac{W_0 - i}{K}} \cdot \operatorname{tg} \left[(t - t_0) g' 10^{-3} \sqrt{K(W_0 - i)} \right]}{1 + (V_0 \pm V_B) \sqrt{\frac{K}{W_0 - i}} \cdot \operatorname{tg} \left[(t - t_0) g' 10^{-3} \sqrt{K(W_0 - i)} \right]} \mp V_B. \quad (5.66)$$

Выражение для $S(t)$ получаем путем интегрирования (5.64) и (5.66). Так как эти зависимости аналогичны по форме зависимостям

(5.23) и (5.33), то аналогичными (по форме) будут и результаты интегрирования.

Для случая $i > W_0$:

$$S(t) = S(t_0) + \frac{1}{r_5^*} \cdot \left(\frac{r_1^*}{r_2^*} + \frac{r_3^*}{r_4^*} \right) \cdot \ln \frac{r_4^* + r_2^* \cdot e^{r_8^*(t-t_0)}}{r_4^* + r_2^*} - \left(\frac{r_3^*}{r_4^*} \pm V_B \right) (t - t_0). \quad (5.67)$$

Для случая $i < W_0$:

$$S(t) = S(t_0) + \frac{r_7^*}{r_8^*} \cdot \ln \frac{\cos[r_7^* - r_8^*(t - t_0)]}{\cos r_7^*} \mp V_B (t - t_0), \quad (5.68)$$

где

$$r_7^* = \arctg \left[(V_0 \pm V_B) \cdot \sqrt{\frac{K}{W_0 - i}} \right]; \quad (5.69)$$

$$r_8^* = g' \cdot 10^{-3} \sqrt{K \cdot (W_0 - i)}. \quad (5.70)$$

Для проверки правильности полученных аналитических решений был проведен следующий машинный эксперимент. Было получено численное решение дифференциального уравнения (5.1) методом Рунге-Кутты при некоторых наборах исходных данных и с заданным шагом. Результат решения сравнивался с табулированными с тем же шагом функциями, являющимися аналитическими решениями этого дифференциального уравнения. В результате разница численного и аналитического решения составила тысячные доли процента (ошибка численного метода), что подтвердило правильность аналитического решения.

5.2. Методика определения эквивалентного уклона в имитационной модели скатывания отцепа с горки

Для расчета задающих воздействий в системах АЗСР (автоматического задания скорости роспуска) и АРС используют имитационное внесистемное моделирование скатывания группы отцепов с горки. В цифровых системах, использующих достаточно мощные ЭВМ, возможна реализация системного моделирования (моделирования в реальном масштабе времени). В таких моделях актуальной является задача разработки методики сокращения времени моделирования при сохранении точности и адекватности модели.

В гл. 2 было показано, что в имитационных моделях скатывания отцепа с горки дифференциальное уравнение (2.1) заменяют разностным рекуррентным уравнением (2.52). При этом процесс движения отцепа рассматривают как дискретный, состоящий либо из множества элементарных перемещений ΔS , либо из множества элементарных отрезков времени Δt . Внутри каждой дискреты сумма сил, действующих на отцеп, представляется постоянной.

Обычно (см., например, [79]) в качестве кинематической модели отцепа при определении действующих на отцеп сил принята система шарнирно-соединенных материальных точек, расстояние между которыми равно расстояниям между соответствующими осями отцепа, а масса, сосредоточенная в каждой точке, эквивалентна средней нагрузке на соответствующую ось (рис.5.1). При таком допущении для расчета одной из составляющих суммы сил – профильной силы – на некотором шаге, при котором отцеп переместился на величину ΔS , используется значение эквивалентного уклона

$$i_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sum_{k=1}^n q_k i_k}{\sum_{k=1}^n q_k}, \quad (5.71)$$

где q_k – нагрузка на k -ю ось отцепа; i_k – уклон, по которому перемещается k -я ось на некотором шаге; n – число осей в отцепе.

При моделировании движения длинных отцепов на каждом шаге моделирования необходимо вычислять сумму в числителе формулы (5.71), так как уклон i непостоянен вдоль пути S .

Поскольку алгоритмы системного и внесистемного стохастического моделирования требуют достаточно большого количества реализаций, а каждая реализация включает в себя сотни и тысячи шагов в пределах каждого из которых требуется вычислять $i_{\text{ЭКВ}}$, то актуальной представляется задача упрощения алгоритма вычисления $i_{\text{ЭКВ}}$.

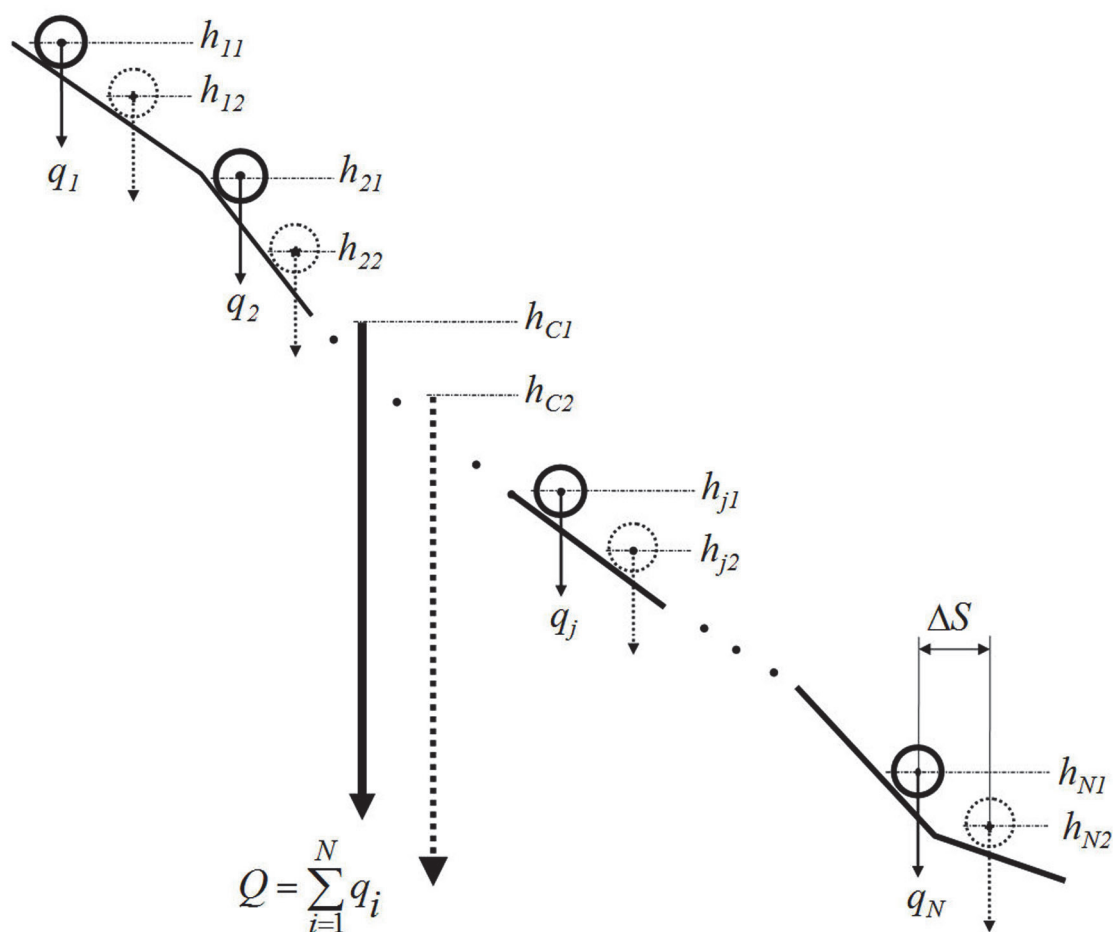


Рис. 5.1. Кинематическая модель отцепа

Рассмотрим ниточную модель отцепа (нить с массой, распределенной по некоторому закону вдоль нити). В такой модели

$$i_{\text{экв}} = \frac{\int_{X_2}^{X_1} \frac{dh(S)}{dS} q(S) dS}{\int_{X_2}^{X_1} q(S) dS}, \quad (5.72)$$

где $h(S)$ – профиль, по которому движется отцеп; $q(S)$ – распределение нагрузки по длине отцепа; X_1, X_2 – координаты «головы» и «хвоста» отцепа (или какой-либо его части).

Рассмотрим случаи, когда группа осей в отцепе имеет одинаковую нагрузку (любой вагон в отцепе либо группа однотипных вагонов с одинаковым грузом). При этом выражение (5.72) можно упростить. Если предположить, что для какой-либо θ -й части отцепа распределение нагрузки в пределах $X_{\theta 1} \dots X_{\theta 2}$ постоянно и равно q_{θ} , то, вынося q из под интеграла, получим для этой части отцепа:

$$i_{\theta \text{ экв}} = \frac{q_{\theta} \cdot \int_{X_{\theta 2}}^{X_{\theta 1}} dh(S)}{q_{\theta} \cdot \int_{X_{\theta 2}}^{X_{\theta 1}} dS} = \frac{h(X_{\theta 1} - X_{\theta 2})}{L_{\theta}}, \quad (5.73)$$

где L_{θ} – длина θ -й части отцепа с одинаковой нагрузкой на все оси, эквивалентный уклон для которой рассчитывается.

Формула (5.73) соответствует формуле (5.71), которая описывает эквивалентный уклон для отцепа с двумя осями, на каждую из которых приходится нагрузка $Q/2$ и с расстоянием L между этими осями.

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

- при моделировании движения одного вагона или отцепа из группы вагонов одного веса поосную модель (5.71) можно заменить моделью «длинного двухосного вагона» (ДДВ);
- в модели длинного отцепа группы однородных вагонов можно заменить моделями ДДВ;
- в модели длинного отцепа в любом случае модель одного вагона можно заменить моделью ДДВ.

Используя эти выводы, можно при моделировании движения отцепа не менее чем в два раза сократить время расчётов $i_{\text{ЭКВ}}$ на каждом шаге моделирования.

Таким образом, если несколько (N_{θ}) расположенных подряд осей отцепа имеют одинаковую нагрузку q_{θ} (θ – номер группы из числа групп осей с одинаковой нагрузкой, всего ζ групп, то все эти N_{θ} осей можно в (5.71) заменить двумя эквивалентными осями с координатами:

$$X_{\theta 1_{\text{ЭКВ}}} = X_{\theta 1}; \quad h_{\theta 1_{\text{ЭКВ}}} = h_{\theta 1};$$

$$X_{\theta 2_{\text{ЭКВ}}} = X_{\theta N}; \quad h_{\theta 2_{\text{ЭКВ}}} = h_{\theta N};$$

каждая из которых имеет нагрузку

$$q_{\theta \text{ЭКВ}} = \frac{N_{\theta} \cdot q_{\theta}}{2}. \quad (5.74)$$

Формулу (5.71) теперь перепишем в виде:

$$i_{\text{ЭКВ}} = \frac{2 \cdot \sum_{\theta=1}^{\zeta} \left(\frac{h_{\theta 1_{\text{ЭКВ}}} - h_{\theta 2_{\text{ЭКВ}}}}{L_{\theta}} \right) \cdot q_{\theta \text{ЭКВ}}}{Q}, \quad (5.75)$$

где ζ – количество групп расположенных подряд осей с одинаковой нагрузкой;

Q – вес всего отцепа.

Введя переменную

$$q_{\theta}^* = \frac{2 \cdot q_{\theta \text{ЭКВ}}}{Q \cdot L_{\theta}} = \frac{N_{\theta} \cdot q_{\theta}}{Q \cdot L_{\theta}}, \quad (5.76)$$

значение которой можно вычислить до начала цикла моделирования, получим:

$$i_{\text{ЭКВ}} = \sum_{\theta=1}^{\zeta} (h_{\theta 1_{\text{ЭКВ}}} - h_{\theta 2_{\text{ЭКВ}}}) \cdot q_{\theta}^* \quad (5.77)$$

Так как ζ всегда меньше n , то расчёт $i_{\text{ЭКВ}}$ по формуле (5.77) будет всегда короче, чем по формуле (5.71).

5.3. Вероятностный метод определения скорости выхода отцепов с прицельной тормозной позиции

Как известно, задачей прицельного торможения является обеспечение такой скорости V_0 выхода отцепа с тормозной позиции, чтобы он подошел к стоящим на сортировочных путях вагонам со скоростью $0 \leq V_{\text{п}} \leq V_{\text{п, доп}}$. Скорость подхода $V_{\text{п}}$ рассчитывается по элементарной формуле:

$$V_{\text{п}} = \sqrt{V_0^2 - 2g'(\sum W - i)l_{\text{п}} \cdot 10^{-3}} \quad (5.78)$$

где g' – ускорение свободного падения с учетом инерции вращающихся масс;

$\sum W$ – суммарное сопротивление движению отцепа;

i – средний уклон пути;

$l_{\text{п}}$ – длина пути пробега отцепа от тормозной позиции до точки прицеливания.

Известны методы расчета скорости выхода отцепа из прицельной ТП, использующие в контуре управления имитационные модели [122]. Эти методы, однако, предусматривают проведение предварительных аналитических расчетов для сужения диапазона поиска. Кроме того, эти методы требуют достаточно дорогих вычислительных устройств, обеспечивающих имитационное моделирование в реальном масштабе времени. Применение таких вычислительных устройств оправдано на крупных сортировочных станциях. На малых сортировочных станциях, на сортировочных станциях промышленного транспорта применение дорогих вычислительных средств не оправдано. Здесь целесообразно применять аналитические методы, использующие некоторые упрощения.

Рассмотрим один из таких методов.

При обсуждении предлагаемого метода примем следующие допущения:

– сопротивление движению постоянно на всем участке его движения после выхода из тормозной позиции;

– движение отцепа после выхода из прицельной тормозной позиции и до остановки на пути накопления осуществляется на участке с постоянным уклоном i , равным среднему уклону на этом участке;

Предположим, что достоверно определен диапазон ходовых свойств данного отцепа ($\sum W_{\min} \leq \sum W \leq \sum W_{\max}$) и диапазон длин пробега $l_{\min} \leq l \leq l_{\max}$.

Для того, чтобы скорость соударения находилась в допустимых пределах, необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

1) самый плохой бегун (с $\sum W = \sum W_{\max}$) должен добежать до самой дальней из диапазона длин пробега точки l_{\max} , т.е. чтобы

$$V_0 \geq \sqrt{2g'(\sum W_{\max} - i) \cdot l_{\max} \cdot 10^{-3}}; \quad (5.79)$$

2) самый хороший бегун (с $\sum W = \sum W_{\min}$) должен добежать до самой ближней из диапазона длин пробега точки l_{\min} со скоростью $V_{\text{п}}$, не превышающей максимально допустимую скорость соударения $V_{\text{пдоп}}$, т.е. чтобы

$$V_0 \leq \sqrt{V_{\text{пдоп}}^2 + 2g'(\sum W_{\min} - i) \cdot l_{\min} \cdot 10^{-3}}. \quad (5.80)$$

Расчеты показывают, что для совместного выполнения условий (5.79) и (5.80) необходимы весьма малые диапазоны $\sum W$ и l . Но даже и при этих диапазонах интервал скоростей, при которых обеспечивается совместное выполнение условий (5.79) и (5.80) весьма мал. Если учесть еще и то обстоятельство, что реализуемая скорость выхода отличается от расчетной (вследствие ошибки регулирования), и то, что во многих системах АРС существует жесткий набор заданных скоростей выхода, то можно сделать вывод, что обеспечить совместное выполнение условий (5.79) и (5.80) практически невозможно. А оценкой возможности их совместного выполнения является зависимость вероятности образования «окон» и превышения скорости соударения

от скорости V_0 при заданных диапазонах ΣW и l и заданном профиле i сортировочных путей.

При образовании «окна» подкоренное выражение в (5.78) принимает отрицательное значение и величина V_{Π} переходит в область мнимых чисел. Чтобы избежать действий с мнимыми числами будем оперировать не величиной V_{Π} , а величиной V_{Π}^2 . Последняя принимает отрицательные значения при образовании «окна».

Квадрат прицельной скорости V_{Π}^2 можно рассматривать как случайную величину, функцию от двух других случайных величин – ΣW и l (см. (5.78)). Пусть ходовое сопротивление ΣW имеет случайное значение x , лежащее в диапазоне от $x_1 = \Sigma W_{\min}$ до $x_2 = \Sigma W_{\max}$, а «точка прицеливания» l_{Π} имеет случайное значение y , лежащее в диапазоне от $y_1 = l_{\min}$ до $y_2 = l_{\max}$. При этом случайная величина V_{Π}^2 принимает значение $z = f(x, y)$.

Примем, что случайные величины ΣW и l распределены равномерно в соответствующих диапазонах. Тогда плотности их распределения запишутся следующим образом:

$$\varphi_1(x) = \frac{1}{x_2 - x_1}, \quad (5.81)$$

$$\varphi_2(y) = \frac{1}{y_2 - y_1}. \quad (5.82)$$

Найдем плотность распределения величины V_{Π}^2 .

Распределение вероятностей величины V_{Π}^2 определяется формулой [102]:

$$P\{z < V_{\Pi}^2 < z + \Delta z\} = \iint_{(D_{z, \Delta z})} \varphi(x, y) dx dy, \quad (5.83)$$

где $D_{z, \Delta z}$ – такая область плоскости (x, y) , в которой

$$z < \varphi(x, y) < z + \Delta z; \quad (5.84)$$

$\varphi(x, y)$ – плотность распределения двумерной величины $(\sum W, l)$.
 Так как случайные величины $\sum W$ и l независимы, то

$$\varphi(x, y) = \varphi_1(x) \cdot \varphi_2(y) = \frac{1}{x_2 - x_1} \cdot \frac{1}{y_2 - y_1} = \frac{1}{\Delta x \Delta y}. \quad (5.85)$$

Область $(D_{z, \Delta z})$ представляет собой полоску (рис. 5.2), заключенную между кривыми

$$V_0^2 - 2g'(x-i)y \cdot 10^{-3} = z, \quad (5.86)$$

$$V_0^2 - 2g'(x-i)y \cdot 10^{-3} = z + \Delta z. \quad (5.87)$$

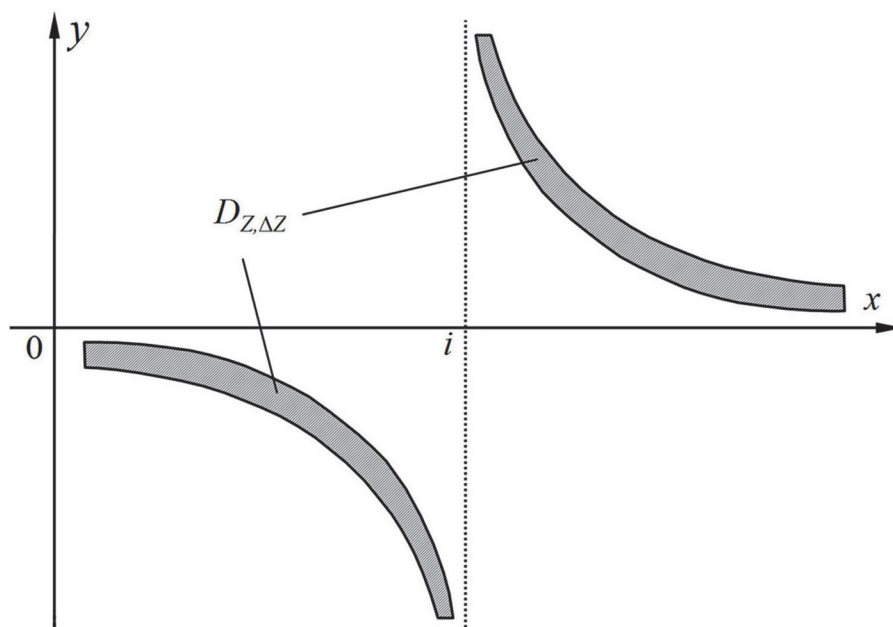


Рис. 5.2. Область $D_{z, \Delta z}$

Поэтому

$$P\{z < V_{\Pi}^2 < z + \Delta z\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\frac{V_0^2 - z}{2g'(x-i) \cdot 10^{-3}}}^{\frac{V_0^2 - (z + \Delta z)}{2g'(x-i) \cdot 10^{-3}}} \varphi(x, y) dx dy. \quad (5.88)$$

Полагая Δz малой величиной можно выделить главную часть внутреннего интеграла из правой части (5.88) в виде

$$\frac{\frac{V_0^2 - z}{2g'(x-i) \cdot 10^{-3}}}{\frac{V_0^2 - z}{2g'(x-i) \cdot 10^{-3}}} \approx \varphi \left(x, \frac{V_0^2 - z}{2g'(x-i) \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \frac{\Delta z}{2g'(x-i) \cdot 10^{-3}}. \quad (5.89)$$

При этом формула (5.88) дифференциала вероятности принимает вид:

$$dP_z = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi \left(x, \frac{V_0^2 - z}{2g'(x-i) \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \frac{\Delta z}{2g'(x-i) \cdot 10^{-3}} dx. \quad (5.90)$$

Как известно, плотность распределения φ случайной величины z определяется формулой

$$\phi(z) = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{dP_z}{\Delta z}. \quad (5.91)$$

Из (5.90) и (5.91) получаем:

$$\phi(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_1(x) \cdot \varphi_2 \left(\frac{V_0^2 - z}{2g'(x-i) \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \frac{dx}{2g'(x-i) \cdot 10^{-3}}. \quad (5.92)$$

Так как функция $\varphi_1(x)$ определена в интервале от x_1 до x_2 , а функция $\varphi_2 \left(\frac{V_0^2 - z}{2g'(x-i) \cdot 10^{-3}} \right)$ в интервале от $\frac{V_0^2 - z}{2g'y_1 \cdot 10^{-3}} + i$ до $\frac{V_0^2 - z}{2g'y_2 \cdot 10^{-3}} + i$, то имеем четыре зависимости для $\phi(z)$:

$$\phi_1(z) = \frac{\varphi_1(x) \cdot \varphi_2 \left(\frac{V_0^2 - z}{2g'(x-i) \cdot 10^{-3}} \right)}{2g' \cdot 10^{-3}} \int_{x_1}^{\frac{V_0^2 - z}{2g'y_1 \cdot 10^{-3}} + i} \frac{dx}{x-i}; \quad (5.93)$$

$$\phi_2(z) = \frac{\varphi_1(x) \cdot \varphi_2\left(\frac{V_0^2 - z}{2g'(x-i) \cdot 10^{-3}}\right)}{2g' \cdot 10^{-3}} \int_{\frac{V_0^2 - z}{2g'y_2 \cdot 10^{-3} + i}}^{x_2} \frac{dx}{x-i}; \quad (5.94)$$

$$\phi_3(z) = \frac{\varphi_1(x) \cdot \varphi_2\left(\frac{V_0^2 - z}{2g'(x-i) \cdot 10^{-3}}\right)}{2g' \cdot 10^{-3}} \int_{x_1}^{\frac{V_0^2 - z}{2g'y_2 \cdot 10^{-3} + i}} \frac{dx}{x-i}; \quad (5.95)$$

$$\phi_4(z) = \frac{\varphi_1(x) \cdot \varphi_2\left(\frac{V_0^2 - z}{2g'(x-i) \cdot 10^{-3}}\right)}{2g' \cdot 10^{-3}} \int_{\frac{V_0^2 - z}{2g'y_1 \cdot 10^{-3} + i}}^{x_2} \frac{dx}{x-i}. \quad (5.96)$$

Если взять определенные интегралы в (5.93)–(5.96), то получим уравнения для четырех кривых, которые задают закон распределения вероятностей:

$$\phi_1(z) = \frac{10^3}{2g' \Delta x \Delta y} \ln \frac{V_0^2 - z}{2g'y_1(x_1 - i) \cdot 10^{-3}}; \quad (5.97)$$

$$\phi_2(z) = \frac{10^3}{2g' \Delta x \Delta y} \ln \frac{2g'y_2(x_2 - i) \cdot 10^{-3}}{V_0^2 - z}; \quad (5.98)$$

$$\phi_3(z) = \frac{10^3}{2g' \Delta x \Delta y} \ln \frac{V_0^2 - z}{2g'y_2(x_1 - i) \cdot 10^{-3}}; \quad (5.99)$$

$$\phi_4(z) = \frac{10^3}{2g' \Delta x \Delta y} \ln \frac{2g'y_1(x_2 - i) \cdot 10^{-3}}{V_0^2 - z}. \quad (5.100)$$

Графики этих кривых для различных вариантов соотношений x_1 , x_2 , i приведены на рис. 5.3. Результирующий закон распределения $\phi(z)$ представляет собой разность ординат этих кривых в области положительных значений (заштрихованная площадь между кривыми на рис. 5.3 – ее площадь равна единице)

По найденному закону распределения можно найти вероятность образования «окна» $P(z < 0)$ и вероятность превышения скорости безопасного соударения $P(z > z_{\text{доп}})$. Вероятность образования окна численно равна площади той части закона распределения, которая лежит левее оси ординат, а вероятность соударения вагонов, со скоростью, превышающей допустимую, – площади части закона распределения, лежащей правее абсциссы $z_{\text{доп}}$. Площади эти находятся

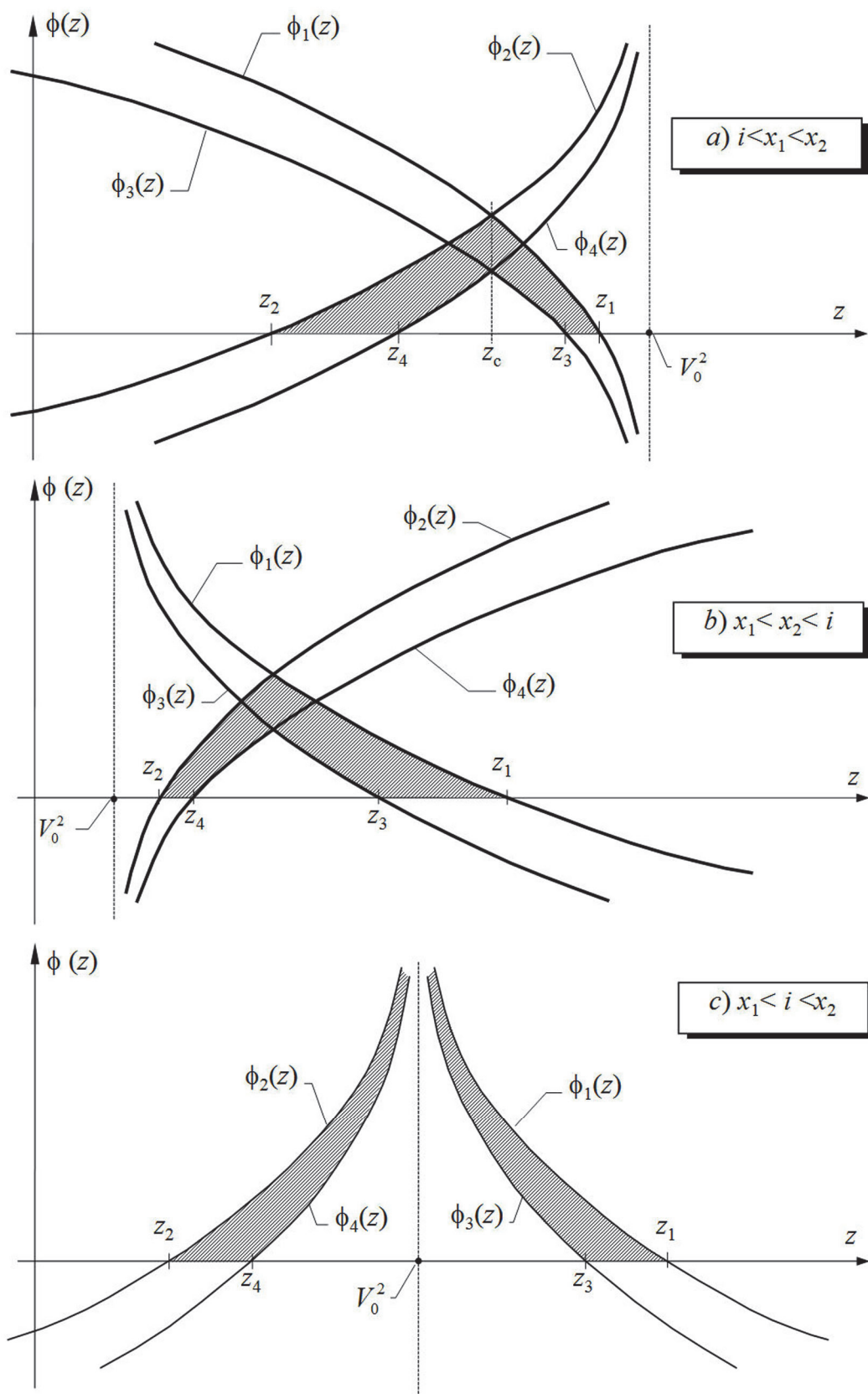


Рис. 5.3. Закон распределения вероятностей величины $z \equiv V_{\pi}^2$

интегрированием уравнений (5.97)...(5.100) для каждого конкретного случая взаимного расположения кривых $\phi_1(z)$... $\phi_4(z)$ между собой и с осью ординат.

Для определения пределов интегрирования определены координаты точек пересечения кривых (5.97)...(5.100) с осью абсцисс – z_1 , z_2 , z_3 , z_4 и между собой – z_c (рис. 5.3):

$$z_1 = V_0^2 - 2g'y_1(x_1 - i) \cdot 10^{-3}; \quad (5.101)$$

$$z_2 = V_0^2 - 2g'y_2(x_2 - i) \cdot 10^{-3}; \quad (5.102)$$

$$z_3 = V_0^2 - 2g'y_2(x_1 - i) \cdot 10^{-3}; \quad (5.103)$$

$$z_4 = V_0^2 - 2g'y_1(x_2 - i) \cdot 10^{-3}; \quad (5.104)$$

$$z_c = V_0^2 - 2g' \cdot 10^{-3} \sqrt{y_1 y_2 (x_1 - i)(x_2 - i)}. \quad (5.105)$$

В зависимости от взаимного расположения закона распределения $\phi(z)$ относительно оси ординат и точек z_3 и z_4 между собой найдены аналитические зависимости, представленные в табл. 5.1...5.4, описывающие вероятности образования окна $P(z < 0)$ и вероятности превышения допустимой скорости соударения $P(z < Z_{\text{доп}})$ для случая $i < x_1 < x_2$.

Таблица 5.1.

**Аналитические зависимости, описывающие вероятности $P(z < 0)$
образования окна для случая $z_4 < z_3$**

Вариант	Расположение закона распределения $\phi(z)$ на координатной оси для случая $z_4 < z_3$	$P(z < 0)$
1	$z_2 \geq 0$	0
2	$z_2 < 0 \leq z_4$	$\frac{2g'y_2(x_2 - i) - V_0^2 \left(\ln \frac{2g'y_2(x_2 - i)}{V_0^2} + 1 \right)}{2g'\Delta x \Delta y}$
3	$z_4 < 0 \leq z_c$	$\frac{2g'\Delta y(x_2 - i) - V_0^2 \ln \frac{y_2}{y_1}}{2g'\Delta x \Delta y}$
4	$z_c < 0 \leq z_3$	$1 - \frac{V_0^2 \ln \frac{y_2}{y_1} - 2g'\Delta y(x_1 - i)}{2g'\Delta x \Delta y}$
5	$z_3 < 0 \leq z_1$	$1 - \frac{V_0^2 \ln \frac{V_0^2}{2g'y_1(x_1 - i)} - V_0^2 + 2g'y_1(x_1 - i)}{2g'\Delta x \Delta y}$
6	$z_1 < 0$	1

Аналитические зависимости, описывающие вероятности $P(z < 0)$ образования окна для случая $z_4 < z_3$

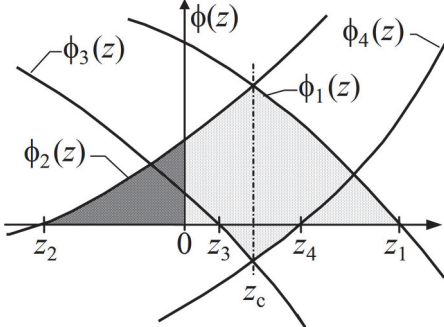
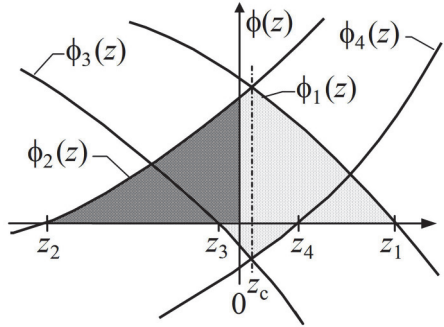
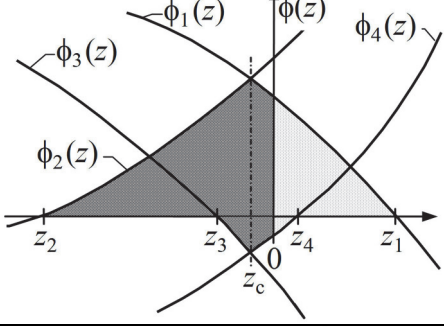
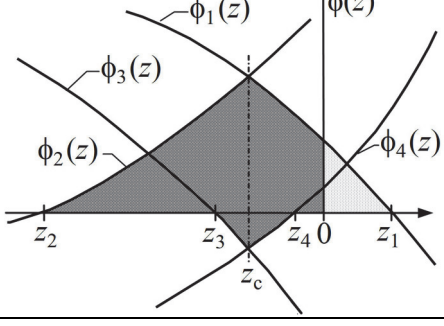
Вариант	Расположение закона распределения $\phi(z)$ на координатной оси для случая $z_4 > z_3$	$P(z < 0)$
1	$z_2 \geq 0$	0
2	$z_2 < 0 \leq z_3$	$\frac{2g'y_2(x_2 - i) - V_0^2 \left(\ln \frac{2g'y_2(x_2 - i)}{V_0^2} + 1 \right)}{2g'\Delta x \Delta y}$ 
3	$z_3 < 0 \leq z_c$	$\frac{2g'y_2(x_2 - x_1) - V_0^2 \ln \frac{x_2 - i}{x_1 - i}}{2g'\Delta x \Delta y}$ 
4	$z_c < 0 \leq z_4$	$1 - \frac{V_0^2 \ln \frac{x_2 - i}{x_1 - i} - 2g'y_1(x_2 - x_1)}{2g'\Delta x \Delta y}$ 
5	$z_4 < 0 \leq z_1$	$1 - \frac{V_0^2 \ln \frac{V_0^2}{2g'y_1(x_1 - i)} - V_0^2 + 2g'y_1(x_1 - i)}{2g'\Delta x \Delta y}$ 
6	$z_1 < 0$	1

Таблица 5.3.

Аналитические зависимости, описывающие вероятности $P(z > V_{доп}^2)$ превышения скорости соударения для случая $z_4 < z_3$

Вариант	Расположение закона распределения $\phi(z)$ на координатной оси для случая $z_4 < z_3$	$P(z > V_{доп}^2)$
1	$z_{доп} \leq z_2$	1
2	$z_2 < z_{доп} \leq z_4$	$1 - \frac{2g'y_2(x_2 - i) - \Delta z \left(\ln \frac{2g'y_2(x_2 - i)}{\Delta z} + 1 \right)}{2g'\Delta x \Delta y}$ <p>где $\Delta z = V_0^2 - V_{доп}^2$</p>
3	$z_4 < z_{доп} \leq z_c$	$1 - \frac{2g'\Delta y(x_2 - i) - \Delta z \ln \frac{y_2}{y_1}}{2g'\Delta x \Delta y}$
4	$z_c < z_{доп} \leq z_3$	$\frac{\Delta z \ln \frac{y_2}{y_1} - 2g'\Delta y(x_1 - i)}{2g'\Delta x \Delta y}$
5	$z_3 < z_{доп} \leq z_1$	$\frac{2g'y_1(x_1 - i) - \Delta z \left(1 - \ln \frac{\Delta z}{2g'y_1(x_1 - i)} \right)}{2g'\Delta x \Delta y}$
6	$z_1 < z_{доп}$	0

**Аналитические зависимости, описывающие вероятности $P(z > V_{\text{доп}}^2)$
превышения скорости соударения для случая $z_4 > z_3$**

Вариант	Расположение закона распределения $\phi(z)$ на координатной оси для случая $z_4 < z_3$	$P(z > V_{\text{доп}}^2)$
1	$z_{\text{доп}} \leq z_2$	0
2	$z_2 < z_{\text{доп}} \leq z_3$ 	$1 - \frac{2g'y_2(x_2 - i) - \Delta z \left(\ln \frac{2g'y_2(x_2 - i)}{\Delta z} + 1 \right)}{2g'\Delta x \Delta y}$ где $\Delta z = V_0^2 - V_{\text{доп}}^2$
3	$z_3 < z_{\text{доп}} \leq z_c$ 	$1 - \frac{2g'y_2 \Delta x - \Delta z \ln \frac{x_2 - i}{x_1 - i}}{2g'\Delta x \Delta y}$
4	$z_c < z_{\text{доп}} \leq z_4$ 	$\frac{\Delta z \ln \frac{x_2 - i}{x_1 - i} - 2g'y_1 \Delta x}{2g'\Delta x \Delta y}$
5	$z_3 < z_{\text{доп}} \leq z_1$ 	$\frac{2g'y_1(x_1 - i) - \Delta z \left(1 - \ln \frac{\Delta z}{2g'y_1(x_1 - i)} \right)}{2g'\Delta x \Delta y}$
6	$z_1 > z_{\text{доп}}$	1

На рис. 5.4 в качестве примера показаны рассчитанные на ЭВМ с использованием вышеприведенных формул графики вероятностей образования «окна» – $P(z < 0)$, превышения допустимой скорости соударения – $P(z < Z_{\text{доп}})$ и нормального подхода отцепка к «хвосту» состава – $P(0 < z < V_{\text{доп}}^2)$ для следующих исходных данных:

- диапазон измеренных ходовых свойств – 2,2...3,3 м/с²;
 - диапазон измеренного расстояния до точки «прицеливания» – 247...297 м;
 - профиль путей накопления до прицельного участка - 1,54 ‰;
 - профиль путей накопления на прицельном участке - 1,0 ‰.
- Допустимая скорость соударения принималась 1,5 м/с.

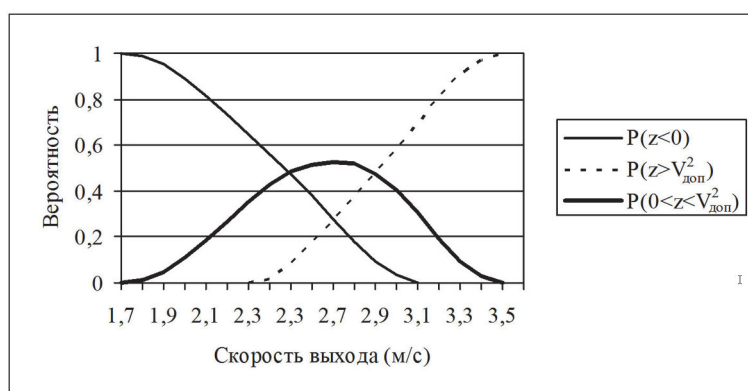


Рис. 5.4. Графики вероятностей образования «окна» – $P(z < 0)$, превышения допустимой скорости соударения – $P(z > V_{\text{доп}}^2)$ и нормального подхода –

$$P(0 < z < V_{\text{доп}}^2)$$

5.4. Адаптивная коррекция задания регулятору тормозной позиции

Известно, что существующие регуляторы скорости скатывания отцепов в системах АРС обрабатывают задание (реализуют заданную скорость V_3 выхода отцепов с тормозной позиции) с ошибкой

$$\varepsilon = V_{\text{ф}} - V_3, \quad (5.106)$$

где V_{ϕ} – фактическое значение скорости выхода. Причём математическое ожидание ошибки $m_{\varepsilon} \neq 0$.

В работе [108] был предложен способ компенсации постоянной составляющей (математического ожидания) ошибки дифференцировано для отцепов разных типов. Согласно этому способу на цифровой модели получают математические ожидания ошибок $m_{\varepsilon j}$ для каждого j -го типа отцепов. Полученные значения $m_{\varepsilon j}$ помещают в запоминающее устройство в качестве поправки ζ_j ($\zeta_j = -m_{\varepsilon j}$) и в процессе управления задание регулятору выдаётся с учётом известного значения ζ_j :

$$V_{zj} = V_p + \zeta_j, \quad (5.107)$$

где V_{zj} – задание регулятору при торможении отцепа j -го типа; V_p – расчётная скорость выхода отцепа из тормозной позиции.

В ЦУС введение поправки ζ_j к величине V_p осуществляется непосредственно ЭВМ.

Однако внесистемный способ определения поправок имеет и ряд недостатков. Во-первых, модель не может быть полностью адекватной объекту, в силу чего реальные значения $m_{\varepsilon j}$, будут отличаться от расчётных. Во-вторых, ошибка регулирования является нестационарной (т.е. ее математическое ожидание и дисперсия являются случайными функциями времени). Это объясняется старением регулятора (износ шин замедлителя, старением радиокомпонентов электронных схем) и нестационарностью окружающей среды (изменением погодных условий), которая оказывает влияние на работу регулятора.

В силу вышеизложенного целесообразно иметь механизм самонастройки, позволяющий корректировать значения поправок с учетом фактических результатов регулирования. В работе [108] предложено использовать для коррекции процедуру, так называемого «скользящего среднего» значения m_{ε} . Такая процедура предполагает коррекцию поправки ζ на некотором $(k + 1)$ -м шаге управления исходя из измеренного значения погрешности ε_k регулирования скорости отцепа на предыдущем шаге в соответствии с формулой

$$\zeta_{k+1} = \gamma \cdot \zeta_k - (1 - \gamma) \cdot \varepsilon_k, \quad (5.108)$$

где γ – коэффициент адаптации, определяемый статистическими параметрами ошибки регулирования ($0 < \gamma < 1$); ζ_k и ζ_{k+1} – значения поправок соответственно для k -го и $(k + 1)$ -го по счёту отцепов одного из типов.

Оценим возможности этого метода для стационарных систем с неизвестными (но постоянными) статистическими характеристиками ошибки регулирования.

После прохождения через тормозную позицию k отцепов поправка ζ примет значение

$$\zeta_{k+1} = \gamma^k \zeta_1 - \sum_{i=1}^k \gamma^{k-i} (1 - \gamma) \varepsilon_i, \quad (5.109)$$

где ε_i – ошибка регулирования для i -го отцепа.

Так как ошибка ε_i является случайной величиной, то и ζ_{k+1} также случайная величина. Её статистические параметры можно найти путём несложных преобразований, используя теорему линейности [21]:

$$M[\zeta_{k+1}] = \gamma^k \zeta_1 - (1 - \gamma^k) \cdot m_\varepsilon; \quad (5.110)$$

$$D[\zeta_{k+1}] = \frac{1 - \lambda}{1 + \lambda} (1 - \lambda^{2k}) \cdot D_\varepsilon. \quad (5.111)$$

Скорость выхода $(k + 1)$ -го отцепа с тормозной позиции:

$$V_{k+1} = V_3 + \varepsilon_{k+1} = V_p + \zeta_{k+1} + \varepsilon_{k+1}. \quad (5.112)$$

Её статистические параметры также можно найти, используя теорему линейности:

$$M[V_{k+1}] = V_p + \gamma^k (\zeta_{k+1} + m_\varepsilon), \quad (5.113)$$

$$D[V_{k+1}] = \left[1 + \frac{(1 - \gamma)}{(1 + \gamma)} (1 - \gamma^{2k}) \right] \cdot D_\varepsilon. \quad (5.114)$$

Найденное значение является дисперсией скорости относительно $M[V_{k+1}]$. Дисперсия же относительно расчётного значения V_p :

$$\begin{aligned} D^*[V_{k+1}] &= D[V_{k+1}] + (M[V_{k+1}] - V_p)^2 = \\ &= \left[1 + \frac{(1-\gamma)}{(1+\gamma)}(1-\gamma^{2k})\right] \cdot D_\varepsilon + \gamma^{2k} (\zeta_1 + m_\varepsilon)^2. \end{aligned} \quad (5.115)$$

Как видно из формул (5.113) и (5.115), при $0 < \gamma < 1$ с ростом k математическое ожидание $M[V_{k+1}] \rightarrow V_p$, а дисперсия

$$D^*[V_{k+1}] \rightarrow \left[1 + \frac{(1-\gamma)}{(1+\gamma)}\right] \cdot D_\varepsilon.$$

При этом если $\gamma \rightarrow 1$, то уменьшается дисперсия $D^*[V_{k+1}]$, но замедляется сходимость величины V_{k+1} к V_p .

С другой стороны, при $\gamma \rightarrow 0$ убыстряется сходимость $M[V_{k+1}]$ к V_p , но и увеличивается дисперсия $D^*[V_{k+1}]$. Для решения вопроса о выборе оптимального значения γ требуется задаться критерием оптимальности. Таким критерием \mathfrak{S} может быть минимум генеральной дисперсии скорости для всех k отцепов, то есть минимум математического ожидания дисперсии:

$$\mathfrak{S} = \min \{M[D_V^*]\}. \quad (5.116)$$

Генеральная дисперсия может быть рассчитана по следующей формуле:

$$\begin{aligned} M[D_V^*] &= \frac{1}{k} \sum_1^k D^*[V_{k+1}] = \\ &= \left(1 + \frac{1-\gamma}{1+\gamma}\right) \cdot D_\varepsilon + \frac{1}{k} \cdot \left[(\zeta_1 + m_\varepsilon)^2 - \frac{(1-\gamma)}{(1+\gamma)} \cdot D_\varepsilon \right] \cdot \frac{\gamma^2(1-\gamma^{2k})}{1-\gamma^2}. \end{aligned} \quad (5.117)$$

Определить γ_{opt} , минимизирующее (5.117), можно несколькими способами. Однако, учитывая относительную сложность формулы (5.117), а также то, что предварительные исследования показали на-

личие лишь одного минимума функции $M_{D_\varepsilon^*}(\gamma)$ в интервалах разумных значений m_ε и D_ε , применим для поиска минимума численный метод последовательного перебора, подставляя в (5.117) различные значения γ в диапазоне $0 \dots 1$ с постоянным шагом. Зависимости $\gamma_{\text{opt}}(k)$ для различных значений m_ε , D_ε , полученные этим методом, приведены на рис. 5.4

На рис. 5.5 показаны зависимости $\sigma_V(k) / \gamma = \gamma_{\text{opt}}$ (здесь σ_V – среднее квадратическое отклонение скорости выхода отцепов из тормозной позиции V от расчетного значения V_p) для некоторых наборов m_ε , D_ε при $\zeta_l = 0$. Как и следовало ожидать, с увеличением k величина $\gamma \rightarrow 1$, а $\sigma_V \rightarrow \sigma_\varepsilon = \sqrt{D_\varepsilon}$.

Оценим теперь возможности адаптивной коррекции с учетом нестационарности системы управления. Так как изменение статистических параметров ошибки ε происходит относительно медленно, то при управлении может быть применен метод «замороженных коэффициентов». То есть, принимается, что на определенном отрезке времени (для определенного числа отцепов N) процесс является стационарным. Количество отцепов N , для которых процесс принимается стационарным, зависит от многих факторов (вагонопотока, номера тормозной позиции, погодных условий и т. п.), но (см. рис. 5.5) это количество может быть выбрано из достаточно широкого диапазона, так как уже через несколько десятков отцепов величина σ_V резко падает.

Алгоритм вычисления поправки.

Принимаем, что для N отцепов процесс стационарен, т.е. в расчет принимаются данные лишь для последних N отцепов и $\zeta_l = 0$. У регулятора имеется память, где хранятся данные (ошибки) для N последних отцепов. Последовательность вычисления поправки для k -го отцепов ($k > N$) при этом следующая:

1. Измеряется ошибка регулирования ε_k .
2. В памяти производится сдвиг ранее измеренных N ошибок. Первая (самая «старая») вообще отбрасывается, вторая становится на место первой, третья на место второй и т.д. Измеренное значение ε_k становится на место ε_N .
3. Вычисляются оценки m_ε и D_ε на основании последних N измерений:

$$\tilde{m}_\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i, \quad (5.118)$$

$$\tilde{D}_\varepsilon = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2 - \frac{N}{N-1} \tilde{m}_\varepsilon^2. \quad (5.119)$$

4. Находим γ_{opt} , минимизирующее (5.119), при вычисленных оценках m_ε и D_ε и количестве отцепов $k = N$.

5. Вычисляем очередную поправку:

$$\zeta_{k+1} = \gamma_{\text{opt}} \cdot \zeta_k - (1 - \gamma_{\text{opt}}) \cdot \varepsilon_k. \quad (5.120)$$

Имитационное моделирование показывает высокую эффективность предложенного метода.

Техническая реализация систем АРС на сортировочных горках магистрального железнодорожного транспорта

6.1. Принципы построения децентрализованных систем АРС для сортировочных горок большой мощности

В последнее время все более перспективным становится создание распределенных систем управления технологическими процессами с применением специализированных управляющих микропроцессорных комплексов (МКСУ). Крупные сортировочные горки имеют ряд особенностей, которые должны быть учтены при создании распределенных систем управления скатыванием отцепов с сортировочной горки:

- высокую скорость роспуска (до 10...12км/час), причем поддержание высокого темпа роспуска возможно лишь при переменной скорости роспуска;
- минимально допустимые интервалы между отцепами на спускной части горки;
- большое количество отцепов, одновременно находящихся на спускной части горки;
- большое количество путей накопления и исполнительных органов (замедлителей);
- возможность параллельного роспуска.

Данные особенности предполагают сложные алгоритмы управления, идентификации, системной оптимизации, уменьшение времени

реакции системы, повышения ее производительности и надежности. Решение этих задач может быть реализовано путем четкой функциональной и технической декомпозиции на системном уровне системы управления скатыванием отцепов с горки. При такой декомпозиции можно выделить собственно систему регулирования скорости скатывания (АРС), подсистему управления маршрутами движения (АСУ МД) и подсистему управления скоростью роспуска (АСУ СР). В рамках АРС можно рассматривать две подсистемы – интервального (АСУ ИР) и прицельного (АСУ ПР) регулирования.

Технически декомпозицию системы на верхнем уровне целесообразно реализовать следующим образом. Каждая из подсистем, входящих в горочную управляющую систему (ГУС), может быть реализована (в зависимости от сложности алгоритмов и возможностей микропроцессорных средств) одно- или многопроцессорной микро-ЭВМ или многомикромашинным комплексом. Информационная связь между этими подсистемами обеспечивается путем включения всех подсистем в единую локальную вычислительную сеть (ЛВС). Горизонтальные информационные связи остаются при этом лишь на уровне локальной сети. Требуемые характеристики ЛВС могут быть выбраны путем имитационного моделирования при уточнении информационных потоков, которыми обмениваются подсистемы.

При декомпозиции структуры ГУС следует учитывать следующие соображения:

- структуры отдельных подсистем, подключаемых к ЛВС, должны быть по возможности унифицированы;
- отдельные подсистемы, подключаемые к ЛВС, должны быть как можно более функционально независимы и, как следствие, должен быть минимизирован информационный поток, которым подсистемы обмениваются по сетевым каналам;

Такая декомпозиция ГУС с использованием ЛВС обеспечит:

- повышение живучести системы;
- открытость системы, позволяющую подключить вновь разрабатываемые подсистемы без переделок технических и программных средств тех подсистем, которые ранее уже были в составе ЛВС;
- возможность поэтапной отладки и ввода в эксплуатацию отдельных подсистем без оказания влияния на эксплуатацию ранее введенных;

- возможность производить автономный ремонт одних подсистем без остановки других;
- повышение вычислительной производительности ГУС за счет распараллеливания вычислений, что позволит применить более сложные алгоритмы и сократит время реакции системы;
- повышение надежности информационного обмена между подсистемами за счет специальных средств, применяемых в ЛВС;
- стандартный протокол обмена.

Рассматривая подсистемы АСУ ИР и АСУ ПР, можно выделить характерный для обеих этих подсистем набор функций, показанный на рис. 6.1. Здесь же показан возможный вариант распределения этих функций по вертикальным уровням децентрализации. При этом выделен уровень локальных регуляторов ТП и уровень предварительной обработки сигналов напольного оборудования (опрос, обработка прерываний, цифровая фильтрация, верификация и т.д.).

Уровень локальных регуляторов целесообразно реализовать набором микропроцессорных контроллеров: по одному на каждую тормозную позицию, состоящую из одного или двух замедлителей. Кроме прочих преимуществ децентрализованной структуры здесь возможен индивидуальный учет особенностей каждого замедлителя, что может быть использовано в алгоритмах адаптации.

Предварительную обработку сигналов напольного оборудования можно производить набором простейших микропроцессорных контроллеров, построенных на базе однокристальных ЭВМ или 8-разрядных микропроцессоров.

Структура ГУС, построенная по этому принципу, приведена на рис. 6.2. Здесь показано, что отдельные подсистемы ГУС объединены в ЛВС с помощью моноканала, что впрочем, не исключает другие варианты построения ЛВС.

Подключение ГУС к сети АСУ СС возможно несколькими способами. На рис. 6.2. в качестве примера показан способ такого подключения через сервер КС ЭОД.

При достаточно сложных алгоритмах управления тормозными позициями в качестве локальных регуляторов должны быть использованы 16- или 32-разрядные контроллеры. Микропроцессорные управляющие вычислительные комплексы (УВК), называемые также «промышленные контроллеры», выпускаются в Украине, России и

ОБЩЕСИСТЕМНЫЕ ФУНКЦИИ

- связь со смежными подсистемами;
- системная оптимизация и адаптация ;
- формирование и коррекция оперативных накопителей (ОН);
- связь с оператором;
- формирование протокола;
- контроль и диагностика;

Системный
уровень

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ

- слежение за перемещением отцепа в зоне регулирования;
- идентификация параметров отцепа;
- расчет задания регуляторам ТП;

Технологический
уровень

- управление замедлителями ТП;
- сбор и статистическая обработка результатов торможения;

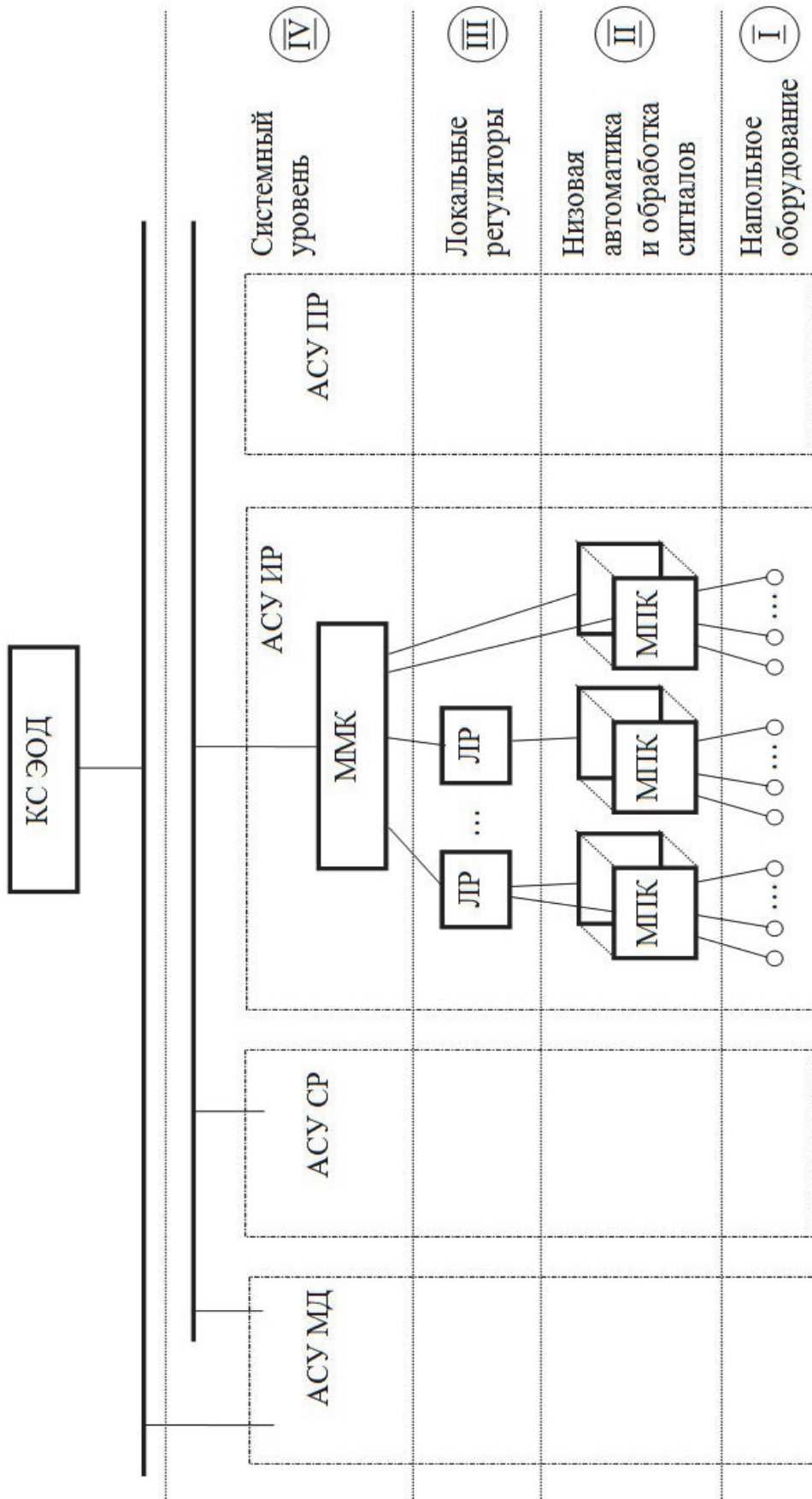
Уровень
локальных
регуляторов

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ

- обработка сигналов путевых датчиков;
- обработка сигналов скоростемеров;

Уровень
предварительной
обработки
сигналов
напольного
оборудования

Рис.6.1. Характерный набор функций системы АСУ РС



ММК – многомикромашиный комплекс
 МПК – микропроцессорный контроллер

Рис. 6.2. Вариант структуры децентрализованной ГУС

других странах. Один из вариантов такой структуры на основе нескольких функционально распределенных УВК приведен на рис. 6.3.

Первый УВК решает задачи интервального регулирования. Он обслуживает напольное оборудование спускной части горки. Для горки с несколькими путями надвига на спускной части может находиться 6...8 тормозных позиций, причем существует достаточно большая вероятность, что при параллельном роспуске все они одновременно будут в работе.

Другие УВК (на рис. 6.3 приведен вариант с двумя УВК АСУ ПР) решают задачи прицельного регулирования на III и IV ТП. При этом каждый УВКС может обслуживать до 14...18 путей накопления в предположении малой вероятности того, что более 6 отцепов одновременно будут тормозиться замедлителями III и IV ТП на этих путях.

При таком распределении УВК их функциональная загрузка будет примерно одинакова, а количество модулей УСО будет отличаться незначительно.

Достаточно мощный УВК позволяет организовать декомпозицию не только по "горизонтали" (по отдельным технологическим зонам), но и по "вертикали" (по набору функций рис. 6.1). Причем технически такую декомпозицию можно организовать несколькими способами. Так, к общей шине УВКС можно подключить несколько процессоров, распределив между ними отдельные функции. В частности, целесообразно выделить особо функцию регулятора отдельной ТП. Реализация этой функции может быть жестко закреплена за процессорами (за каждой ТП из одного или двух замедлителей закреплена один процессор), а возможно и скользящее распределение (при подходе отцепа к ТП программа-диспетчер выделяет в качестве регулятора один из свободных процессоров, а при выходе отцепа из ТП освобождает этот процессор).

Для структуры, изображенной на рис. 6.3 каждый УВК должен иметь в своем составе до 8 процессоров. Причем УВК1 использует жесткое, а УВК2 и УВК3 скользящее распределение процессоров.

Техническими средствами, позволяющим организовать декомпозицию системы, являются микропроцессорные модули ввода-вывода (УМВДв), представляющие собой, по существу, периферийный микропроцессорный контроллер. На эти модули могут быть возложены

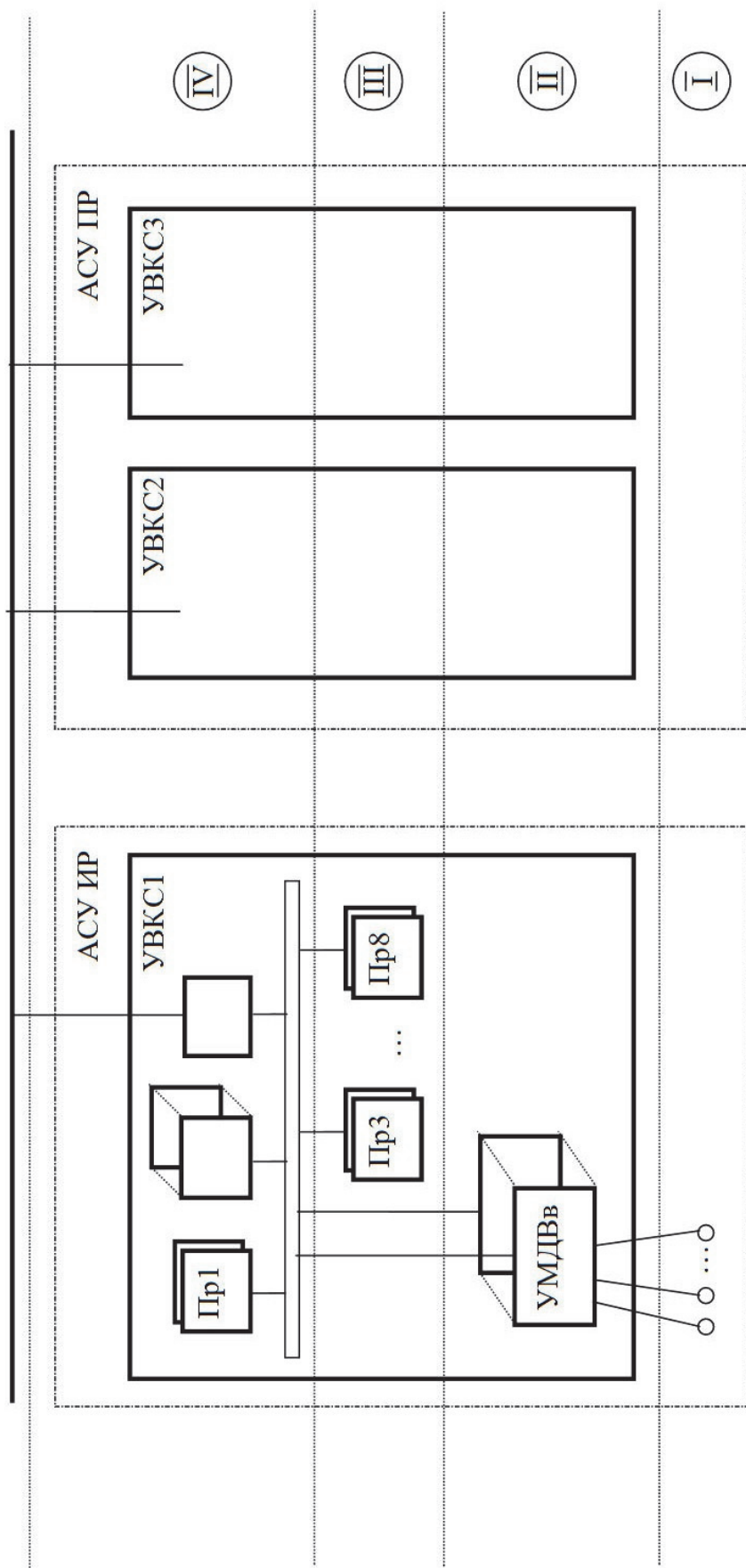


Рис. 6.3. Альтернативный вариант структуры децентрализованной ГУС

функции обработки сигналов от напольного оборудования, связи с оператором системы, регулятора замедлителя.

Возможны комбинированные варианты: использование микропроцессорной структуры УВК в сочетании с УМВДв (на рис. 6.3 приведен именно этот вариант).

6.2. Система автоматического регулирования скоростью скатывания отцепов на 1-й тормозной позиции сортировочной горки большой мощности

6.2.1. Назначение и техническая характеристика АРС 1ТП

На российской станции Пермь-Сортировочная на основании теоретических разработок автора был реализован (совместно с Уральским отделением ВНИИЖТа) опытный образец системы автоматического управления 1-й тормозной позицией (АРС 1ТП). Согласно техническому заданию система АРС 1ТП должна представлять собой комплекс технических средств, предназначенных для автоматизирования управления замедлителями первых тормозных позиций спускной части горки и для выдачи технологической информации о ходе роспуска горочному персоналу. Система АРС 1ТП должна быть связана с ранее разработанной и внедренной системой АСУ МД (АСУ маршрутами движения) и получать исходную информацию именно от этой системы.

Система АРС 1ТП предназначалась для использования на сортировочных горках большой мощности, поэтому при ее создании были использованы принципы, изложенные в п. 6.1. Однако создание АРС 1ТП было обусловлено рядом ограничений, которые не позволили в полной мере реализовать вышеупомянутые принципы. В частности, было предложено использовать УВК с ограниченным набором процессоров и ограниченным набором УСО. По этой причине декомпозиция системы была проведена на программном уровне, о чем будет сказано ниже.

6.2.2. Техническая структура системы АРС 1ТП

Упрощенная техническая структура системы АРС 1ТП показана на рисунке 6.4 в форме, обеспечивающей описание ее функционирования на уровне постановок задач. Технические средства системы можно разделить на следующие группы.

Напольное оборудование:

- путевые датчики Д1...Дк фиксируют проследование отцепов поосно и используются для определения интервалов между следующими друг за другом отцепами; специально помеченные датчики ДТ1, ДТ2, ДТ3 кроме того обеспечивают подсчет количества осей отцепа, находящихся в замедлителе;

- вагонозамедлители – исполнительный орган, обеспечивающий изменение (уменьшение) фактической скорости отцепа до заданной скорости выхода его из ТП;

- радиолокационные скоростемеры РИС1 и РИС2 – используются в качестве чувствительных элементов в контуре обратной связи регулятора скорости и позволяют определить текущие координаты скорости, пути, ускорения;

- стрелочные переводы С1...С3 определяют маршрут следования отцепов; информация о маршрутах смежных отцепов необходима для расчета заданной скорости выхода отцепа из ТП;

- весомер – позволяет определить общий вес отцепа, а также весовую категорию каждого вагона в отцепе и всего отцепа в целом; эта информация необходима, во-первых, для оценки сопротивления движению (ходовых свойств) отцепов и, во-вторых, для выбора управляющих воздействий на замедлители ТП;

- рельсовые цепи (на рис. 6.4 не показаны) – совместно с путевыми датчиками позволяют определить факт занятия и освобождения отцепом участков замедлителей и стрелочных участков.

На рис. 6.4 показано напольное оборудование для одного спускного пути. Для параллельных спускных путей (система должна обеспечивать, согласно техническому заданию, автоматический роспуск на горках с числом путей надвига до трех) состав напольного оборудования аналогичный.

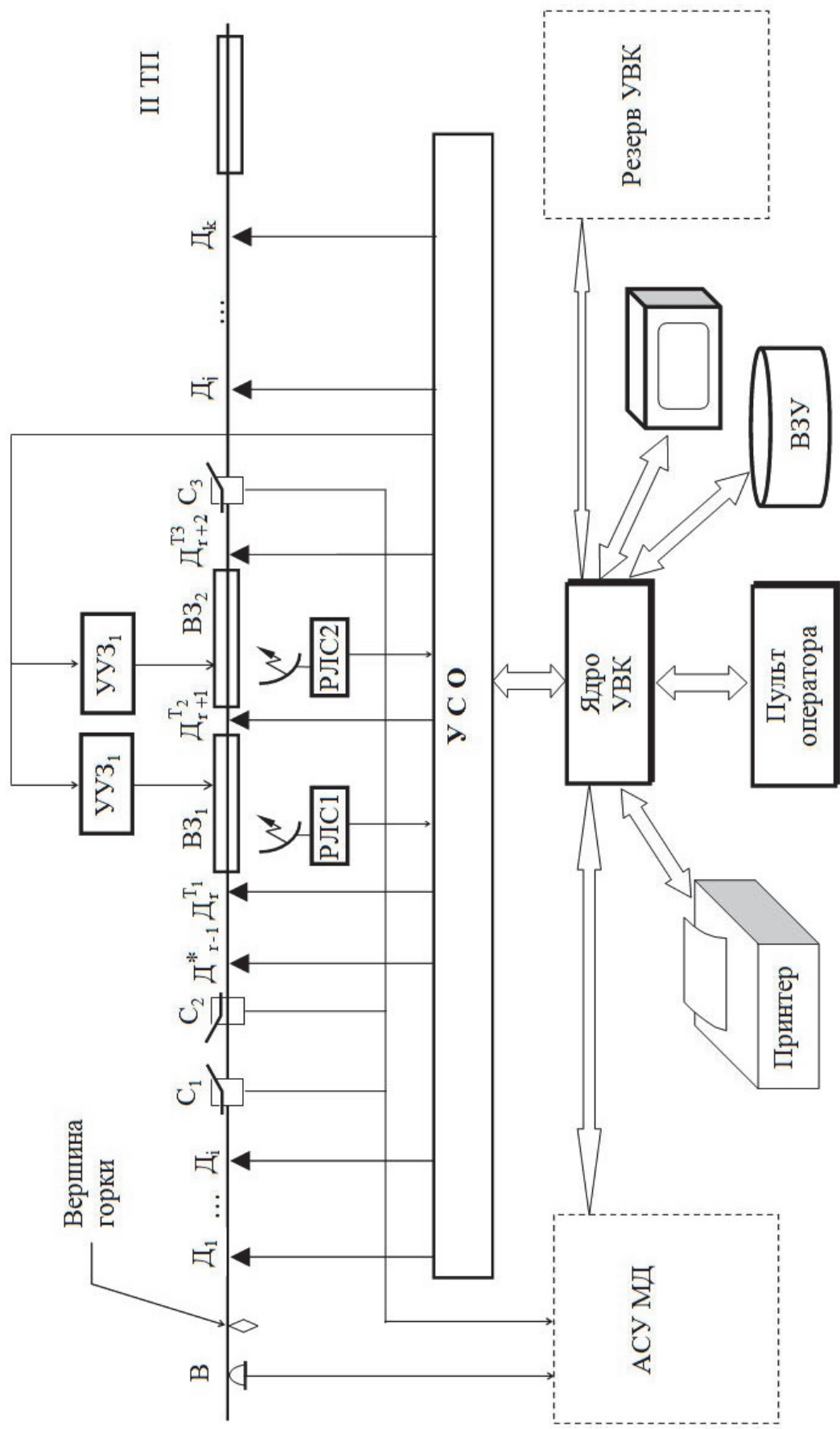


Рис.6.4. Техническая структура АРС ІІІ

Управляющий вычислительный комплекс

Ядро УВК (процессорный модуль) обеспечивает обработку в многозадачном режиме сигналов постового и напольного оборудования и выработку управляющих воздействий на замедлители 1ТП, информационных сигналов на пультовое оборудование и текстов в протокол работы системы.

Устройства связи с объектом (УСО) комплекса обеспечивают ввод в систему сигналов напольного и постового оборудования (дискретных, аналоговых, частотно-импульсных) и вывод дискретных сигналов, управляющих замедлителями и обеспечивающих индикацию на пульте оператора.

УВК включает в себя также набор периферийных устройств. Дисплей обеспечивает обмен служебными сообщениями между УВК и горочным персоналом. Накопитель на магнитных дисках (НМД) служит для хранения системного и специального программного обеспечения, а также протоколов работы системы. Печатающее устройство предназначено для вывода (печати) протоколов работы системы.

Каналы связи обеспечивают связь УВК АРС 1 ТП с резервной УВК и УВК АСУ МД.

Пультное оборудование (пульт)

Обеспечивает индикацию контрольной информации о состоянии управляемого процесса, а также возможность задания режимов работы системы (ручной или автоматический).

6.2.3. Организация программного обеспечения

Система АРС 1ТП функционирует в многозадачной программной среде – аналоге известной операционной системы реального времени QNX. Таким образом, основу комплекса специального (технологического) программного обеспечения составляет набор задач, которые взаимодействуют между собой с помощью специальных буферов – обменников. Через эти обменники задачи могут обмениваться между собой сообщениями. Одновременно могут быть активными несколько задач. Это позволяет одновременно управлять несколькими параллельно идущими процессами (например, торможением одного отцепа в одном замедлителе, другого отцепа – в другом замедлителе и отслеживания перемещения третьего отцепа между замедлителями).

Как было сказано выше, аппаратные средства не позволили произвести нужную декомпозицию системы. Поэтому такая декомпозиция была проведена на программном уровне. На рис. 6.5 показаны основные задачи системы АРС 1ТП в своем взаимодействии. Как видно, по своему взаимодействию задачи системы АРС 1ТП могут быть представлены на уже известных трех уровнях (самый нижний – первый уровень – представляет напольное оборудование).

Обработкой сигналов напольного оборудования занимаются специальные задачи-драйверы. Драйвер инициативных сигналов¹ отслеживает сигналы от точечных путевых датчиков, рельсовых цепей, сигналов с пульта и передает сведения о сработавшем оборудовании в задачи более высокого уровня, в частности, сведения о сработавших точечных датчиках передаются в задачу слежения за перемещением отцепа. Драйверы радиолокационных скоростемеров (РИС) принимают от РИС сигналы, частота которых пропорциональна скорости движения отцепа, и с определенной периодичностью, определяемой задачей-таймером, передают сообщения о скорости, пути, ускорении в задачи управления замедлителем (подробный алгоритм определения скорости, пути, ускорения таким методом описан в п. 4.3).

Уровень локальных регуляторов представлен задачами управления замедлителями, а также задачей статистической обработки результатов торможения. Кроме фиксации результатов торможения в протоколе работы системы, их статистические параметры могут быть использованы для адаптации параметров настройки регулятора ТП и коррекции задания регулятору.

Верхний, четвертый уровень, представлен в программной структуре двумя подуровнями. Подуровень технологических функций IVa и подуровень системных функций IVb. Функции задач этих подуровней практически полностью совпадают с уже приведенными на рис. 6.1. Следует отметить, что связь с системой более высокого уровня – АСУ СС – осуществляется через смежную систему АСУ МД. Это обусловлено последовательностью выполнения проектов и последовательностью внедрения этих систем.

¹ В последней версии системы АРС 1ТП вместо этого драйвера используется специальный контроллер – сканирующий процессор, представляющий собой автономный 16-разрядный процессор подключенный к системной шине компьютера. Разработка сканирующего процессора произведена в Уральском отделении ВНИИЖТа

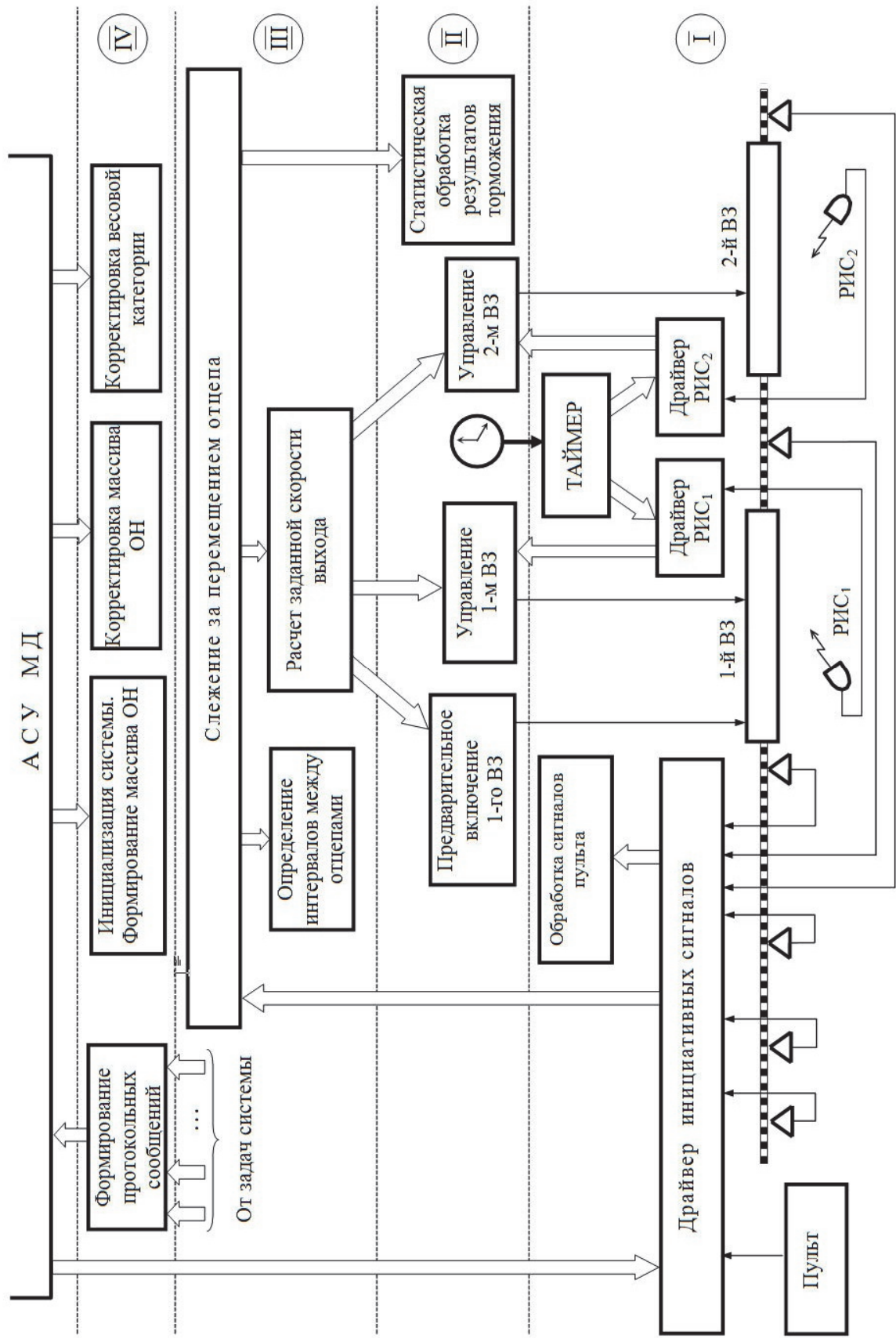


Рис. 6.5. Структура программного обеспечения системы АРС 1ТПП

6.2.4. Алгоритм функционирования

Алгоритм функционирования системы не может быть показан однозначно, так как система многозадачная и отдельные задачи могут выполняться параллельно. Поэтому алгоритм, приведенный на рис. 6.6 следует понимать условно, применительно к одному отцепу.

Запуск системы (блок 1) производится по инициативному сигналу, поступающему от АСУ МД непосредственно перед началом роспуска.

Для инициализации системы (блок 2) используются две задачи:

- формирование оперативных информационных массивов;
- корректировка массивов оперативной информации.

Первая задача до начала роспуска формирует из входного макета, принимаемого от АСУ МД, повагонный макет состава. Данный макет содержит для каждого вагона состава информацию о количестве осей, весе (по документам) и соответствующей ему весовой категории, длине, номере отцепа (по сортировочному листку) и маршруте отцепа. Затем из этого макета формируется массив оперативных накопителей отцепов.

Вторая задача осуществляет корректировку оперативных накопителей отцепов в ходе роспуска в случае получения сообщения от АСУ МД об отклонении от программы роспуска.

Определение весовой категории (блок 3) также осуществляется двумя задачами:

- вычисление весовой категории;
- корректировка весовой категории;

Первая задача предназначена для вычисления весовой категории отцепа или вагона при формировании повагонного макета состава до начала роспуска, а также при корректировке оперативных накопителей отцепов при отклонении от программы роспуска.

Вторая задача осуществляет корректировку реквизитов весовой категории вагона и отцепа, массивов оперативной информации о ходе роспуска при получении сообщения от АСУ МД (от микроконтроллера весомера о фактическом весе вагона).

В задаче «Слежение за перемещением отцепов» (блок 4) реализуется функция контроля положения отцепов при их скатывании в распределительной зоне горки. Процесс слежения базируется на информации, поступающей от точечных путевых датчиков.

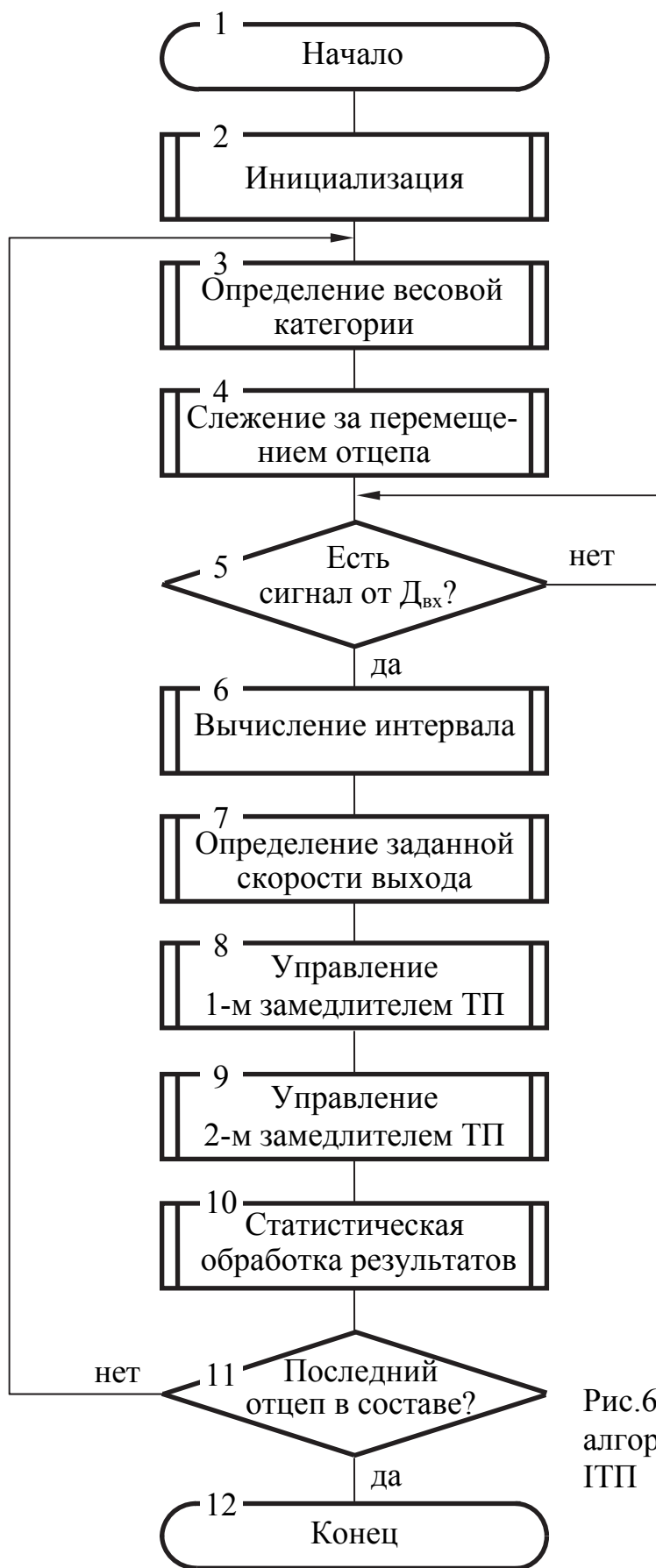


Рис.6.6. Схема обобщенного алгоритма работы системы APC ITP

Когда отцеп вступает на первый предшествующий тормозной позиции датчик D^* (блок 5), то сигнал от этого датчика инициирует задачу, определяющую интервалы с впередиидущим или позадиидущим отцепами (блок 6). При отсутствии впередиидущего или позадиидущего отцепов формируются специальные признаки, которые используются задачей расчета скорости выхода отцепа из ТП. Поскольку в момент вступления очередного отцепа на датчик D^* впередиидущий (позадиидущий) отцеп успевает пройти некоторый отрезок пути необходимо выполнить корректировку фактического положения отцепа. Поправка ΔS используется при уточнении координат положения отцепов в распределительной зоне горки, что позволяет сократить ошибку вычисления расчетного значения скорости выхода отцепа из тормозной позиции.

Для решения задачи определения скорости выхода отцепов из ТП (блок 7), обеспечивающей, с одной стороны, максимальный темп роспуска, а с другой – необходимые интервалы между отцепами на замедлителях и разделительных стрелках, используется дешифраторный метод.

Отличительной особенностью разрабатываемого алгоритма является полнота учета факторов, влияющих на процесс роспуска.

При выборе требуемой скорости выхода отцепа из тормозной позиции учитываются следующие величины:

- ходовые свойства очередного и предыдущего отцепов (W_i, W_{i-1});
- длина очередного и предыдущего отцепов (L_i, L_{i-1}); координата лимитирующего элемента (S_Δ);
- время освобождения предыдущим отцепом второго замедлителя первой ТП (T_{i-1}^{oc});
- интервал между очередным и предыдущим отцепами (I).

Учет перечисленных выше факторов позволит обеспечить высокое качеством интервального регулирования, а применение дешифраторного метода сократит время решения задачи.

Предварительные расчеты показали, возможность реализации этого метода на базе технических средств, выбранных для управляющего вычислительного комплекса.

Кроме расчета заданной скорости выхода, данная задача дает рекомендации по режиму торможения. Разные режимы торможения

обеспечивают выход отцепа из тормозной позиции с заданной скоростью при разном времени занятия отцепом тормозной позиции. Это время является одним из факторов, влияющих на взаимное расположение скатывающихся с горки отцепов. Таким образом, возможность варьирования времени занятия отцепом тормозной позиции позволяет осуществить более гибкое интервальное регулирование.

Так как на 1 ТП могут одновременно находиться два отцепа: «голова» последующего – в первом, а «хвост» предыдущего – во втором замедлителе, то эти замедлители должны управляться автономно, что реализуется задачей управления 1-м и задачей управления 2-м замедлителем 1 ТП (блоки 8,9). При этом обе задачи используют единую стратегию торможения, определяющуюся заданной скоростью выхода отцепа из 1 ТП (со 2-го замедлителями 1 ТП) и рекомендуемым режимом торможения.

Закон управления замедлителями предусматривает непрерывное слежение за скоростью движения отцепа в пределах 1 ТП, измеряемой РИС, оценку текущего значения и прогноз на оставшийся период торможения значения тормозной характеристики замедлителя, измерение координаты отцепа в замедлителе путем интегрирования сигналов РИС с последующим уточнением координаты по сигналам путевых датчиков. Кроме того, происходит непрерывное сложение за количеством осей отцепа, находящегося в замедлителе. В процессе управления происходит накопление статистической информации о тормозной характеристике замедлителя. Эта информация учитывается при последующей оценке тормозной характеристики замедлителя при торможении данного и последующих отцепов.

Кроме получаемой в процессе управления вышеуказанной информации, при выработке управляющего воздействия учитываются находящиеся в оперативном накопителе сведения о фактических параметрах отцепа: весе, длине, типе и других.

Математическая модель цифрового регулятора, используемого в этих задачах, приведена в главе 2.

Задача «Статистическая обработка результатов торможения» (блок 10) накапливает сведения о статистических параметрах ошибки регулирования. Эти сведения в дальнейшем используются для корректировки задания скорости выхода отцепа из тормозной позиции, а также поступают в протокол системы.

Кроме вышеуказанных, в состав комплекса задач программного

обеспечения АРС 1ТП входят задачи, которые начинают функционировать при нарушении программы роспуска, отказе РИС и других сбойных ситуациях, возникающих в процессе роспуска.

6.2.5. Отличительные особенности системы АРС 1ТП.

По сравнению с известными системами АРС, внедренными на железных дорогах стран СНГ, принятые технические и алгоритмические решения для описываемой системы должны обеспечить требуемое качество при повышенных скоростях роспуска (10...12 км/час). Это достигается за счет:

- более точного определения интервалов между скатывающимися отцепами;
- более полного учета факторов, влияющих на процесс интервального регулирования;
- использование нескольких режимов торможения отцепов в замедлителе, что позволяет варьировать время занятия отцепом тормозной позиции;
- повышение точности работы регулятора замедлителей ТП, что обеспечивается учетом большего количества факторов, влияющих на процесс торможения;
- использование в процессе управления статистических данных о работе системы АРС, накопленных за определенный период ее работы;
- автоматического контроля сбойных ситуаций в системе, возможности адаптации к сбоям, возникающим в других подсистемах.

Список использованных источников

1. Автоматизация работы сортировочных горок // Автоматика, телемеханика и связь. – 1975. – №23
2. Автоматизация сортировки вагонов // БТЭИ ЦНИИТЭИ МПС – 1976 – №6.
3. Автоматизация сортировочных станций на сети национального общества французских железных дорог (SNCF) // ЭИ ВИНТИ. Организация перевозок, автоматика, телемеханика и связь на ж. д. – 1974 – №27.
4. Автоматизированная система управления движением поездов на линии ВАРТ (США) // ЭИ ВИНТИ. Организация перевозок, автоматика, телемеханика и связь на ж. д. – 1973 – №
5. Автоматизована система керування вантажними перевезеннями на залізничному транспорті України (АСК ВП УЗ). Загальносистемні вимоги до автоматизації систем лінійного рівня, їх взаємодії між собою та з системами вищого рівня.
6. Анализ функционирования устройства управления прицельным торможением УУПТ. Отчет о НИР / ВНИИАС МПС России [текст], 2003.
7. Атаманенко А.В. Способ автоматизации расформирования составов на сортировочной станции / А.В. Атаманенко, И.П. Старшов // Автоматика, телемеханика и связь. – 1987. – №6 – С.6–7.
8. Атаманенко Е.Г. Сравнительная оценка систем регулирования скорости движения вагонов на сортировочных путях / Е.Г. Атаманенко, Г.И. Бекренев // Вестник ВНИИ ж.д. трансп. – 1995. – №1. – С.38–42.
9. Бесекерский В.А. Цифровые автоматические системы / В.А. Бесекерский. – М: Наука, 1976. – 576 с.

10. Бобровский В.И. Временной принцип моделирования процесса скатывания отцепов с горки / В.И. Бобровский // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях. Межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 197/12. – Днепропетровск, 1978. – С.50–58.
11. Бобровский В. И. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках. Монография [текст] / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Н. П. Божко, Н. В. Рогов, Н. И. Березовый, А. В.Кудряшов. – Дн–вск: Изд–во Маковецкий, 2010. – 260с.
12. Божко Н.П. Динамические тормозные характеристики весовых и нажимных вагонных замедлителей / Н.П. Божко // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях. Межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 197/12. – Днепропетровск, 1978. – С.87–100.
13. Божко Н.П. Моделирование работы тормозных позиций на сортировочной горке / Н.П. Божко // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях. Межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 197/12. – Днепропетровск, 1978. – С.73–87.
14. Божко Н.П. О физических величинах и их размерностях в горочных расчетах / Н.П. Божко // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях. Межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 277/17. – Днепропетровск, 1990. – С.53–60.
15. Боровков Ю.Г. Методика расчета скорости выхода отцепов из парковой тормозной позиции в АСУ ТП горки / Ю.Г. Боровков, И.Н. Перов // Развитие и механизация сортировочных устройств. – М:ВНИИ ж.д. трансп. – 1993. – С.20–28.
16. Буянов В.А. Автоматизированные информационные системы на железнодорожном транспорте / В.А. Буянов, Г.С. Ратин. – М. Транспорт, 1984. – 239 с.
17. Буянов В.К. Моделирование на ЭЦВМ процесса роспуска вагонов с сортировочной горки / В.К. Буянов // Вестник ВНИИ ж.д. трансп. – 1965. – №6.
18. Ваванов Ю.В. Горочные доплеровские измерители скорости и их погрешности / Ю.В. Ваванов [и др.] // Вестник ВНИИ ж.д. трансп. – 1976. – №5

19. Вагонные ускорители–замедлители с линейными двигателями / ЭИ ВИНТИ. Организация перевозок, автоматика, телемеханика и связь на ж.д. – 1972 – №13
20. Василенко М.Н. Имитационная модель АСУ РСГ и возможности её использования при проектировании и эксплуатации / М.Н. Василенко, А.В. Гриненко, Д.Я. Мясников // Автоматизированные информационные системы на железнодорожных станциях. – Днепропетровск: ДИИТ, 1986. – С.56–60.
21. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М: Наука, 1969. – 576 с.
22. Волков В.П. Сопротивление движению вагонов на сортировочных горках / В.П. Волков // Вестник ВНИИ ж.д. трансп. – 1977. – №7.
23. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике / М.Я. Выгодский. – М.: Наука, 1975. – 872 с.
24. Глаголев Б.С. Датчик скорости Альфа–1 / Б.С. Глаголев [и др.] // Автоматика, телемеханика и связь. – 1996. – №12. – С.5–6
25. Гора В.В. Вагоноосаживаемость для подгорочных путей сортировочных парков / В.В. Гора [и др.] // Развитие и механизация сортировочных устройств. – М.:ВНИИ ж.д. трансп. – 1993. – С.107–117.
26. Грольс Р. Сортировочная станция Антверпен / Р. Грольс // Железные дороги мира. – 1992. – №6. – С.37–42.
27. Гурский А.А. Система автоматического управления тормозной позицией (САУ ТП) на ж.д. сортировочных горках / А.А. Гурский, В.Н. Максименко // Сб. научн. тр. МИИТа. – 1990. –№840. – С.156–162.
28. Дельпи А. Управление с помощью ЭВМ расформированием поездов на сортировочных станциях железных дорог ФРГ // Железные дороги мира. – 1974. – №10
29. Долаберидзе А.М. Автоматизация регулирования скорости вагонов на горках малой мощности / А.М. Долаберидзе [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 1974. – №7
30. Долаберидзе А.М. Отечественный и зарубежный опыт научно–экспериментальных работ по применению вагоноосаживающих

устройств на сортировочных путях / А.М. Долаберидзе [и др.] // Тр. ХИИТа. – 1973. – Вып. 131.

31. Дудниченко А.М. Основные положения концепции автоматизации расформирования составов в условиях отечественных железных дорог / А.М. Дудниченко, Ю.Г. Боровков // Системы и ус-ва автомат. телемех. для ж.д. и метрополитенов. – М.: ВНИИ ж.д. трансп. – 1992. – С.25–29.

32. Жуковицкий И.В. Адаптивная коррекция задания в цифровой системе управления скоростью движения / И.В. Жуковицкий // Праці 4-ї конференції з автоматичного управління "Автоматика-97": Черкаси, 23–28 червня 1997р. – Том IV. – Черкаси: ЧІТІ, 1997. – С.21.

33. Жуковицкий И.В. Адаптивная коррекция задания регулятору / И.В. Жуковицкий // Проблемы управления и информатики. – 1999. – №1. – С. 53–57.

34. Жуковицкий И.В. Адаптивная коррекция задания регулятору тормозной позиции / И.В. Жуковицкий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 4. – С. 93–95.

35. Жуковицкий И.В. Вероятностный метод определения скорости выхода отцепов из тормозных позиций / И.В. Жуковицкий // Труды ДИИТа. – Вып. 171/7. – Днепропетровск, 1975. С.

36. Жуковицкий И.В. Измеритель скорости цифровой системы управления / И.В. Жуковицкий // Вісник технологічного університету Поділля. – Хмельницький, 2003, – №3 Т.2 (51). – С. 166 –170.

37. Жуковицкий И.В. Использование адаптивной коррекции задания скорости выхода отцепов из тормозной позиции / И.В. Жуковицкий // Материалы 10-й международной школы-семинара "Перспективные системы управления на железнодорожном, промышленном и городском транспорте" // Информационно-управляющие системы управления технологическими процессами на железнодорожном транспорте. – 1997. – №4. – С.104–105.

38. Жуковицкий И.В. Использование управляющей ЭВМ в цифровой системе управления замедлителями тормозных позиций / И.В. Жуковицкий // Информационно-управляющие системы управления технологическими процессами на железнодорожном транспорте. – 1997. – №1. – С.54–59.

39. Жуковицкий И.В. Методика определения профильной силы при моделировании скатывания оцепя с горки / И.В. Жуковицкий // Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 1998, – № 2. – С.79–81.
40. Жуковицкий И. В. Методы идентификация ходового сопротивления отцепов на участках с переменным уклоном / И. В. Жуковицкий // Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 1999. – № 3. – С. 17–19.
41. Жуковицкий И. В. Области “безразличного” управления в задаче регулирования скорости скатывания группы вагонов / И. В. Жуковицкий // Проблемы управления и информатики. – 1999. – №4. – С. 28–37.
42. Жуковицький І.В. Підвищення точності ідентифікації опору руху відцепів при їх скочуванні з гірки на основі методу статистичних рішень / І.В. Жуковицький // Вісник Національного транспортного університету та транспортної академії України. – Київ, 2002. – Випуск 6. – С. 122–127.
43. Жуковицкий И.В. Получение областей размытого управления при использовании метода динамического программирования / И.В. Жуковицкий // Праці 3-ї української конференції з автоматичного керування. Том третій. – Севастополь. – Вересень, 1996. – С.21–22.
44. Жуковицкий И. В. Принципы проектирования цифровых систем управления на сортировочных станциях / И. В. Жуковицкий // Вісник технологічного університету Поділля. – Хмельницький, 2004, – №2 – Частина1, Т.1. – С. 15–17.
45. Жуковицкий И. В. Принципы цифровой обработки сигналов доплеровского скоростемера / И.В. Жуковицкий // П'ята конференція з автоматичного управління "Автоматика –98", Київ, НТУУ. – 1998: праця конф. – [ч.IV] – С. 93–98.
46. Жуковицкий И. В. Разработка стохастической имитационной модели цифровой системы управления замедлителями тормозной позиции / И. В. Жуковицкий // Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 1999. – № 2. – С.9–12.
47. Жуковицкий И. В. Расчет скорости выхода отцепов с прицельной тормозной позиции сортировочной горки в системах АРС / И. В.

Жуковицкий // Інформаційно–керуючі системи на залізничному транспорті. – 2001. – № 4. – С. 62–66.

48. Жуковицкий И. В. Рекуррентный алгоритм идентификация тормозной характеристики замедлителя для регулятора с дискретным измерителем скорости / И. В. Жуковицкий // 7 конференція з автоматичного управління "Автоматика –2000", Львів, 2000: праці конф. – [Том 5]. – С. 48–52.

49. Жуковицкий И.В. Решение дифференциального уравнения свободного скатывания отцепа с горки / И.В. Жуковицкий // Информационно–управляющие системы управления технологическими процессами на железнодорожном транспорте. – 1997. – №4. – С.14–17.

50. Жуковицкий И. В. Управление замедлителями тормозной позиции сортировочной горки. Часть 1. Модель системы / И. В. Жуковицкий, Г.И. Загарий, Н.И. Луханин // Інформаційно–керуючі системи на залізничному транспорті. – 2000. – № 5. – С. 10–15.

51. Жуковицкий И. В. Управление замедлителями тормозной позиции сортировочной горки. Часть 2 / И. В. Жуковицкий // Інформаційно–керуючі системи на залізничному транспорті. – 2002. – № 4,5. – С. 17–20

52. Жуковицкий И. В. Управление замедлителями тормозной позиции сортировочной горки. Часть 3 / И. В. Жуковицкий // Інформаційно–керуючі системи на залізничному транспорті. – 2003. – № 4. – С.32 –37.

53. Жуковицкий И. В. Управление замедлителями тормозной позиции сортировочной горки. Часть 4. Оптимальная настройка регулятора для неоднородной последовательности отцепов / И. В. Жуковицкий // Інформаційно–керуючі системи на залізничному транспорті. – 2005. – № 6. – С. 9–12.

54. Жуковицкий И.В. Цифровые управляющие системы для автоматизации сортировочной работы на станциях магистрального и промышленного железнодорожного транспорта / И. В. Жуковицкий // – Праці 4–ї конференції з автоматичного управління "Автоматика–97": Черкаси, 23–28 червня 1997р. / Том IV. – Черкаси: ЧІТІ, 1997. – С.20.

55. Жуковицкий И.В. Шумы квантования в измерителе скорости цифровой системы управления замедлителями тормозных позиций /

И. В. Жуковицкий // Информационно–керуючі системи на залізничному транспорті. –1998, –№ 2 . – С.76–78.

56. Жуковицкий И.В. Адаптивная коррекция задания регулятору тормозной позиции в условиях АСУРСГ / И.В. Жуковицкий, А.Б. Устенко А.Б. // Автоматизированные системы управления технологическими процессами на железнодорожных станциях. Межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 231/12. – Днепропетровск: ДИИТ. – 1983. – С.41–46.

57. Жуковицкий И.В. О повышении точности определения сопротивления движению отцепов в условиях АСУ РСГ / И.В. Жуковицкий, А.Б. Устенко А.Б // Автоматизированные системы управления технологическими процессами на железнодорожных станциях. Межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 218/10. – Днепропетровск: ДИИТ. – 1981. – С.47–52.

58. Зиброва Т.М. Повышение точности регулирования скоростей отцепов на тормозных позициях / Т.М. Зиброва // Тр. ДИИТа – Вып. 172/7. – Днепропетровск: ДИИТ. – 1975.

59. Иванченко В.Н. Микропроцессорная информационно–управляющая система автоматизации сортировочной горки / В.Н. Иванченко // Автоматика, телемеханика и связь. – 1987 – №9 – С. 31–34

60. Иванченко В.Н. Разработка и внедрение микропроцессорной информационно–управляющей системы на сортировочной горке / В.Н. Иванченко // Экспр.–инф.: Серия Автоматика и связь. – М.: ЦНИИТЭИ МПС. – 1986. – №6. – С.1–29.

61. Иванченко В.Н. Принципы построения горочного микропроцессорного комплекса / В.Н. Иванченко, Н.Н. Лябах, А.А. Сепетый // Вестник ВНИИЖТ. – 1984. – С.15–18.

62. Информационно–управляющая система для сортировочных станций // Железные дороги мира. – 1993. – №7. – С.57–61

63. Катков А.В. Измерительный участок в микропроцессорной системе расформирования составов на сортировочных горках / А.В. Катков // Межвуз. сб. научн. тр. – Вып.188. – Ростов н/Д: РИИЖТ. – 1987. – С.87–90.

64. Красовский Г.А. АСУ маршрутами движения для сортировочных горок на базе микропроцессорной ЭВМ типа СМ-1800 / Г.А. Красов-

ский, Б.А. Игнатов [и др] // Автоматика, телемеханика и связь. – 1984 – №7.

65. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления; Пер. с англ. /Б. Куо. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.

66. Мелешук П.А. Эксплуатация системы автоматического регулирования скорости роспуска в режиме двухпозиционного торможения / П.А. Мелешук, Н.К. Модин // Железнодорожный транспорт. – 1973. – №12,

67. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений / А.К. Митропольский. – М.: Наука, 1971.

68. Модернизация сортировочной станции Познань Франово (ПНР) / ЭИ ВИНТИ. Организация перевозок. АСУ транспортом – 1988. – №25 – реф.232–237.

69. Модин Н.К. Анализ условий для выбора очередности оттормаживания замедлителей в пределах одной тормозной позиции / Н.К. Модин // Тр. БИИЖТа. – 1974. – Вып. 128.

70. Модин Н.К. Моделирование алгоритмов оптимального управления замедлителями в системе АРС ЦНИИ / Н.К. Модин // Тр. БИИЖТа. – 1975. – Вып. 142.

71. Моргачев В.Д. Система автоматического управления скоростью скатывания вагонов / В.Д. Моргачев, К.Г. Майшмаз, И.В. Жуковичский, Н.И. Бубело // Черная металлургия. – 1989. – №11. – С.74–75.

72. Муха Ю.А. Некоторые результаты экспериментальных исследования работы на горках систем автоматического регулирования скорости (АРС) / Ю.А. Муха [и др] // Межвуз.сб.науч.тр. – МИИТ, 1976. – Вып.548. – С.96–98.

73. Муха Ю.А. Скорости соударения отцепов и “окна”, образующиеся на путях сортировочного парка / Ю.А. Муха [и др] // Тр. ДИИТа. – 1975. – Вып. 160/8

74. Муха Ю.А. Описание процесса скатывания отцепа с горки при помощи метода планирования эксперимента // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях. Сб. научн. тр. ДИИТа – Вып. 168/9. – Днепропетровск: ДИИТ. – 1975 – С.3–19

75. Муха Ю.А. Алгоритмы и библиотека программ для моделирования на ЭВМ «Наири–К» сортировочного процесса на горках / Ю.А. Муха, В.И. Бобровский // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях. Межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 194/11. – Днепропетровск: ДИИТ. – 1977.
76. Муха Ю.А. Исследование точности прицельного регулирования на сортировочных горках, оборудованных системой APC / Ю.А. Муха, В.И. Бобровский // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях. Межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 168/9. – Днепропетровск: ДИИТ – 1975.
77. Муха Ю.А. Исследования точности прицельного регулирования на сортировочных горках, оборудованных системами APC / Ю.А. Муха, В.И. Бобровский // Тр. ДИИТа. – 1975. – Вып. 160/8.
78. Муха Ю.А. Цифровая модель процесса роспуска составов на автоматизированных сортировочных горках / Ю.А. Муха, В.И. Бобровский С.А. Попов // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях. Межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 181/10. – Днепропетровск, 1976.
79. Муха Ю.А. Имитационное моделирование процесса скатывания отцепов при выполнении горочных расчётов / Ю.А. Муха, А.А. Муратов // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях. Межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 277/17. – Днепропетровск: ДИИТ. – 1990. С.11–19.
80. Муха Ю.А. Динамика скатывания отцепов с горки и проблема оценки ходовых свойств / Ю.А. Муха, А.И. Павловский // Тр. ДИИТа. Вып 216/14. – Днепропетровск. – 1981. – С.37–47.
81. Муха Ю.А. Основные характеристики и показатели работы вагонных замедлителей / Ю.А. Муха, В.З. Яневич, А.М. Бледный // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях. Сб. научн. тр. ДИИТа – Вып. 194/11. – Днепропетровск. – 1977.
82. Нагорный Е.В. К вопросу автоматизации процесса расформирования составов на сортировочных горках / Е.В. Нагорный, В.И. Берестов // Информационно–управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1996. –№1,2. – С.19–25.

83. Никифоров Н.А. Разработка системы автоматического управления расформированием составов на Октябрьской дороге // Вестник ВНИИ ж.д. трансп. – 1992. – №3. – С.37.
84. Никифоров Н. А. Система автоматизации горочных процессов ГАЦ–АРС. [текст] / Н. А. Никифоров // Автоматика, связь, информатика – № 9. – 2006. – С. 39–41.
85. Никифоров Н.А. Система автоматического регулирования скорости скатывания отцепов на сортировочной горке (АРС) / Н. А. Никифоров // Автоматика, телемеханика и связь. – 1994. – №12. – С.14–15
86. Новая техника на японских национальных железных дорогах / ЭИ ВИНТИ. Организация перевозок, автоматика, телемеханика и связь на ж.д. – 1974 – №11
87. Образцов В.Н. Станции и узлы. Часть II / В.Н. Образцов. – М. Трансжелдориздат, 1938. – 490 с.
88. Оптимальное регулирование входной скорости отцепов на тормозных позициях подгорочных путей // ЭИ ВИНТИ. Организация перевозок, автоматика, телемеханика и связь на ж. д. – 1973. – №30
89. Опытные установки для сортировки вагонов на сортировочных станциях Дайсбург–Ведау и Ольденбург // ЭИ ВИНТИ. Организация перевозок, автоматика, телемеханика и связь на ж. д. – 1967. – №38.
90. Павлов В.Е., Красовский Г.А. Повышение точности процесса торможения отцепов в системах автоматического регулирования скорости на сортировочных горках // Тр. ЦНИИ МПС. – 1970. – Вып. 419.
91. Павловский А.И. О погрешностях оценки ходовых свойств отцепов на измерительном участке А.И. Павловский // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях. Сб. научн. тр. ДИИТа – Вып. 216/14. – Днепропетровск. – 1981.
92. Павловский А.И. Методика экспериментальных исследований удельных сопротивлений движению / А.И. Павловский, Ю.А. Муха, И.А. Горбачёва // Механизация и автоматизация сортировочного процесса на станциях. Межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 277/17. – Днепропетровск: ДИИТ. – 1990. С.4–10.

93. Павловский А.Н. Определение расчетных параметров сопротивления движению вагонов при скатывании с сортировочной горки / А.Н. Павловский, Л.Б. Тишков, В.П. Шейкин // Развитие и механизация сортировочных устройств. – М:ВНИИ ж.д. трансп. – 1993. – С.79–88.
94. Панкратов Л. В. Цифровое управление тормозными замедлителями [текст] / Л. В. Панкратов// Наука и техника транспорта. – 2004. – № 4. – С. 64–69.
95. Пилипченко П.А. Экспериментальные исследования тормозных характеристик нажимных замедлителей / П.А. Пилипченко, В.И. Бледный // Труды ДИИТа. – Вып.90/6. – Днепропетровск – 1969.
96. Повышение эффективности систем управления на сортировочных горках / М.А. Смычек, В.И. Шелухин: Моск. гос. ун–т путей сообщ. – М., 1993. 29с. – Рус. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 30.11.93, №5916–жд93 // Анот. в реферативном журнале Железнодорожный транспорт, №2, 1994.
97. Поллард Дж. Справочник по вычислительным методам статистики; Пер. с англ. / Дж. Поллард. – М. Финансы и статистика, 1982. – 344 с.
98. Прокопин Ю.Д. Автоматизированная система управления расформированием составов на горках (АСУ РСГ) / Ю.Д. Прокопин, В.А. Мишин // Автоматика, телемеханика и связь. – 1982. – №7. – с.35–36.
99. Разработка алгоритмов управления замедлителями в КСАУ СП с применением ВУПЗМ: Отчет о НИР / ВНИИАС МПС России [текст], 2003.
100. Регулирование скорости вагонов при помощи системы Dowty / ЭИ ВИНТИ. Организация перевозок, автоматика, телемеханика и связь на ж. д. – 1966. – №23
101. Рудановский В.М. Об определении удельных сопротивлений движению вагонов на путях с переменным уклоном / В.М. Рудановский // Вестник ВНИИЖТ. – 1969. – №1.

102. Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента: Справочное руководство Л.З. Румшицкий. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

103. Рыбцов В.Н. Исследование влияния точности работы отдельных устройств на показатели качества функционирования АСУ РСГ методом имитационного моделирования / В.Н. Рыбцов // Автоматизированные системы управления технологическими процессами на железнодорожных станциях. Межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 218/10. – Днепропетровск: диит. – 1981. С.52–60.

104. Савицкий А. Г. Комплексная система автоматизированного управления сортировочной станцией (КСАУ СС) / А.Г. Савицкий // 1 Международная научно–практическая конференция "Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте. Транс ЖАТ – 2004", Санкт–Петербург, 8–11 июля, 2004: Тезисы докладов. СПб: Изд–во ПГУПС. 2004, с. 26–27

105. Савицкий А. Г. Управление движением составов и отцепов на автоматизированных сортировочных горках / А.Г. Савицкий, В.И. Шелухин, В.Н. Соколов // Автомат., связь, информат. 2004, N 7, с. 15–19.

106. Сафрис Л.В. Стратегия целевого торможения при автоматизации сортировочной горки / Л.В. Сафрис // Автоматическое управление и вычислительная техника на железнодорожном транспорте. Труды ДИИТа.– Вып. 162/6.– Днепропетровск. – 1975. – С.15–22.

107. Сафрис Л.В. К использованию методов статистических решений в системах управления / Л.В. Сафрис, В.Л. Сафрис // Автоматизированные системы управления технологическими процессами на железнодорожных станциях. Межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 224/11. – Днепропетровск: ДИИТ. – 1982. – С.30–39.

108. Сафрис Л.В., Скабалланович Т.И. Исследование режимов целевого торможения методом статистических испытаний на ЦВМ / Л.В. Сафрис, Т.И. Скабалланович // Вопросы автоматического управления и применения средств вычислительной техники на железнодорожных станциях. Труды ДИИТа.– Вып. 149/5.– Днепропетровск. – 1973. – С.36–44.

109. Сафрис Л.В. Коррекция задания для регуляторов замедлителей / Л.В. Сафрис, Т.И. Скабалланович // Автоматическое управление и

вопросы применения вычислительной техники на железнодорожном транспорте. Труды ДИИТа.– Вып. 184/8.– Днепропетровск. – 1976. – С.29–32.

110. Серый Н.Ф. Система КГМ–ЛИИЖТ в Красном Лимане / Н.Ф. Серый // Автоматика, телемеханика и связь. – 1986 – №11. – С.23–26

111. Система автоматического регулирования скорости на сортировочной горке станции Ленинград–Сортировочный–Московский / БТЭИ ЦНИИТЭИ МПС. – 1965 – №6

112. Система прицельного торможения вагонов на сортировочной станции Сотвиль / ЭИ ВИНТИ. Организация перевозок, автоматика, телемеханика и связь на ж. д. – 1975. – №13

113. Соколов В.Н. Комплексная автоматизация управления сортировочными процессами / В.Н. Соколов // Автоматика, связь, информатика, 2011, № 2, с. 8–9

114. Сопротивление движению грузовых вагонов при скатывании с горок / Под ред. Е.А. Сотникова. – М.: Транспорт, 1995. – 104 с.

115. Страковский И.И., Тишков А.Б. Об измерительном участке для определения ходовых свойств вагонов на сортировочных горках / И.И. Страковский, А.Б. Тишков // Вестник ВНИИ ж.д. трансп. – 1975. – №5.

116. Теоретические и экспериментальные исследования в области механизации и автоматизации сортировочного процесса на станциях. Раздел “Исследование основных параметров и эксплуатационных показателей системы АРС–ЦНИИ на автоматизированной горке ст. Орехово–Зуево Моск. ж.д.”: Отчет о НИР / ДИИТ – Днепропетровск. – 1975. – 143 с.

117. Технические требования на автоматизированную систему ролпуска составов на сортировочных горках (АСУ ТП). Указания МПС № Ф–1172у от 20.04.89.

118. Томаки М., Узами И. Системы автоматической сортировки вагонов с использованием линейных двигателей / М. Томаки, И. Узами // Железные дороги мира – 1972 – №2

119. Ульянычев Ю.В. АРС–ГТСС автоматическое. регулирование скорости вагонов на сортировочной горке / Ю.В. Ульянычев // Автоматика, телемеханика и связь. – 1972. – №7
120. Ульянычев Ю.В. Григорьев К.К. Устройство управления замедлителями тормозных позиций в системе АРС–ГТСС // Автоматика, телемеханика и связь. – 1974. – №9.
121. Управление пучковой тормозной позицией и горочным локомотивом при помощи ЭВМ РР2100 // ЭИ ВИНТИ. Организация перевозок, автоматика, телемеханика и связь на ж. д. – 1973. – №38.
122. Устенко А.Б. О некоторых направлениях совершенствования подсистемы прицельного торможения АСУ РСГ / А.Б. Устенко // Автоматизированные системы управления технологическими процессами на железнодорожных станциях. Межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 211/9. – Днепропетровск: ДИИТ. – 1980. – С.48–56.
123. Устенко А.Б. К вопросу об использовании микроЭВМ для управления вагозамедлителями / А.Б. Устенко, А.А. Муратов, И.В. Жуковицкий // Автоматизированные информационно–управляющие системы на сортировочных станциях железнодорожного транспорта. Межвуз.сб.научн.тр. – Вып. 279/17. – Днепропетровск, 1990. С.26–31.
124. Устенко А.Б. Оценка надежности и эффективности систем прицельного регулирования скорости движения вагонов на сортировочных горках / А.Б. Устенко, В.М. Рудановский, Н.М. Фонарев // Повышение надежности технических средств на станциях. – М.: Транспорт, 1984. – С.21–35.
125. Устройство для контроля тормозного пути (дополнение к системе INDUSI) // ЭИ ВИНТИ. Организация перевозок, автоматика, телемеханика и связь на ж. д. – 1974. – №18
126. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем / А.А. Фельдбаум. – М: Наука, 1966. – 624 с.
127. Фонарёв Н.М. Автоматизация процесса расформирования составов на сортировочных горках / Н.М. Фонарёв. – М.: Транспорт, 1985. – 271с.
128. Шафит Е.М. Применение ЭВМ СМ–2 в автоматизированной системе управления расформированием составов на горке (АСУ РСГ) /

Е.М. Шафит, Л.А. Вашурин, Т.М. Зиброва, А.Н. Самков // Сб. науч. тр. ДИИТа. – Вып. 218/10. – Днепропетровск. – 1981 – С.3–5.

129. Шафит Е.М. Временные характеристики замедлителей типа 50 / Е.М. Шафит [и др.] // Сб. науч. тр. ДИИТа. – Вып. 97. – М.: Транспорт. – 1969.

130. Шафит Е.М., Вашурин Л.А. Определение ускорений отцепов на сортировочной горке на основе использования фильтров–эксттраполяторов в УВМ. // Автоматическое управление и вычислительная техника на железнодорожном транспорте. Сб. науч. тр. ДИИТа.– Вып. 192/9.– Днепропетровск –1977. – С.19–22.

131. Шафит Е.М., Жуковицкий И.В., Рыбцов В.Н. Принципы построения децентрализованных систем АРС для сортировочных горок большой мощности // Тезисы докладов всесоюзной научно–технической конференции "Микропроцессорные системы и устройства управления ответственными технологическими процессами на транспорте". – Москва, 1989. – С.50–52.

132. Шафит Е.М. Информационно–управляющий комплекс сортировочной системы / Е.М. Шафит, Т.М. Зиброва, В.В. Елисеев [и др.] // Автоматика, телемеханика и связь. – 1990 – № 11.

133. Шафит Е.М. Принципы декомпозиции и интеграции автоматизированных систем управления сортировочными станциями / Е.М. Шафит, А.А. Косолапов // Автоматизированные информационно–управляющие системы на сортировочных станциях железнодорожного транспорта. Межвуз. сб. научн. тр. – Вып. 289/18. – Днепропетровск. – 1993. –С.5–17.

134. Шафит Е.М. Современные принципы построения АСУ сортировочных станций / Е.М. Шафит, И. В. Жуковицкий // Залізничний транспорт України. – 2000. – №3. – С.22 –26

135. Шейкин В.П. Выбор тормозных средств для сортировочных горок // Автоматика, телемеханика и связь. – 1973. –№5.

136. Шейкин В.П. Эффективность систем квазинепрерывного регулирования скорости отцепов на сортировочных горках с использова-

нием точечных вагонных замедлителей / В.П. Шейкин [и др.] // Вестн. ВНИИ ж.д. трансп. – 1992. – №5. – С.17–21.

137. Шейкин В.П. Системы АРС на сортировочных станциях японских железных дорог / В.П. Шейкин, В.М. Рудановский // Автоматика, телемеханика и связь. – 1973. – №1

138. Шелухин В.И., Адаптивное вытормаживание отцепов в горочных замедлителях / В.И. Шелухин // Автоматика, связь, информатика, 2010, № 9, с. 6–9

139. Шелухин В.И. Алгоритмы вытормаживания отцепов в горочных замедлителях / В.И. Шелухин // Автоматика, связь, информатика, 2010, № 10, с. 2–4

140. Шелухин В.И. Горочный измеритель скорости нового поколения / В.И. Шелухин, И.Н. Малышев, М.А. Смычок // Автоматика, телемеханика и связь. – 1993. – №12. – С.2–4

141. Шелухин В. И. Прицельное торможение отцепов на базе адаптивных алгоритмов / В. И. Шелухин, И. Н. Малышев, Д. А. Милехин // Автоматика, связь, информатика. – 2000. – № 2. – С. 9.

142. Шелухин В. И. Универсальный модуль управления тормозными позициями [текст] / В. И. Шелухин, И. Н. Малышев // Автоматика, связь, информатика. – 2000. – № 5. – С. 12.

143. Штальдер О. Автоматическое управление процессом роспуска составов в реальном масштабе времени с помощью ЭВМ на сортировочной станции Базель–Муттенц–П. // Железные дороги мира. – 1976. – №9

144. Шумский А. В. Проблемы автоматизации управления вагонными замедлителями [текст] / А. В. Шумский, С. А. Рогов // Автоматика, связь, информатика. – 2007. – № 11. – С. 17–20.

145. Ющенко Н.Р. Сортировка шестиосных вагонов на горках и тормозные характеристики замедлителей / Н.Р. Ющенко, Е.М. Шафит // Железнодорожный транспорт. – 1963. – №5.

146. Baylay. Newclass of North Plate. – Railway Age, 1968, №17

147. Barstow–on–line? on–time–delivers on its promise. – Railway Age, 1976, №8

148. Brand Walter A/ Integrated digital information and control System for classification Yards. – “2 Conf internal IFAC–IFIP” Menton, 1967
149. Der vollautomatisierte Rangierbahnhof // Eisenbahningenieur. – 1996. – 47, №2. – С16.
150. Micklet G., Demharter S. Die Prozeßsteuerung im Rangierbahnhof München Nord // Rangiertechn. und Gleisanschlusstechn. – 1991. – №5. – С.39–43, 46–48, 50.
151. Shiral Yoshimi, Ishihata Yonehiko/ Tieto Rapid Transit Authority's automatic trane operation. – IEEE, 1968, №4
152. Авторское свидетельство №360260 (СССР)
153. Авторское свидетельство №376289 (СССР)
154. Авторское свидетельство №467851 (СССР)
155. Патент № 1377540 (Великобритания)
156. Патент № 3237007 (США)
157. Патент № 3240930 (США)
158. Патент № 3268725 (США)
159. Патент № 3332524 (США)
160. Патент № 3363095 (США)
161. Патент № 3385964 (США)
162. Патент № 3394250 (США)
163. Патент № 3633026 (США)
164. Патент № 3639754 (США)
165. Патент № 3654456 (США)
166. Патент № 3745334 (США)
167. Патент № 3844514 (США)
168. Патент № 1605368 (ФРГ)
- 169 Патент № 453419 (Швейцария)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

И.В. ЖУКОВИЦКИЙ

**ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ
СКАТЫВАНИЯ ОТЦЕПОВ НА СОРТИРОВОЧНЫХ ГОРКАХ**

**Монография
(на русском языке)**

Редактор *А. А. Мищенко*
Ответственный за выпуск *А. А. Мищенко*
Компьютерная верстка *А. А. Зайченко*
Дизайн обложки *А. А. Зайченко*

Издательство Маковецкий Юрий Вадимович
Свидетельство ДК № 2665 от 25.10.2006 г.
49000, Украина, г. Днепропетровск, ул. Плеханова, 16, к. 14
Тел. (056) 798-33-64, факс (0562) 36-79-93
e-mail: europress@galanet

Напечатано:
Издательство ЧФ «Стандарт-Сервис»
Свидетельство ДК № 3197 от 28.05.2008 г.
г. Днепропетровск, ул. Плеханова, 2, оф. 48.
тел. (056) 370-30-22.
Сдано в печать 18.12.2012 г. Формат 29,7x42 ¼. Бумага офсетная.
Печать - ризограф. Усл.печ.л. 10,86.
Тираж 300 экз. Заказ № 42 от 24.12.2012 г.

ISBN 978-966-1507-47-9

ЖУКОВИЦКИЙ ИГОРЬ ВЛАДИМИРОВИЧ



Доктор технических наук, профессор, академик Транспортной академии Украины. Закончил Днепропетровский горный институт. Работает в Днепропетровском национальном университете железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. Заведующий кафедрой электронных вычислительных машин. Область научных интересов – автоматические и автоматизированные системы на железнодорожном транспорте.

ISBN 966150747-3



9 789661 507479